

Minderung diffuser Nährstoffausträge aus drainierten landwirtschaftlichen Flächen: Teilprojekt Sickerwasser

Franziska Fengler, David Buglowski, Dr. Ines Bull

Im Rahmen des EIP Agri Projektes DRAINFIT wurde im Teilprojekt Sickerwasser am Standort Gülzow die Sickerwasserqualität unter einem Dauerversuch zur Stickstoffdüngung mit vierfeldriger Fruchtfolge untersucht. Über eine Saugkerzenanlage wurde das Sickerwasser gesammelt und anschließend der Nitratgehalt analysiert. Die vorliegenden Auswertungen umfassen vier Sickerwasserperioden von 2017/2018 bis einschließlich 2020/2021. Die Ergebnisse weisen nach, dass die angebaute Kulturart und die Vorfrucht einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Nitratkonzentration im Sickerwasser darstellen. Obwohl bei hohem Düngungsniveau und auch mit organischer Düngung das Risiko für höhere Nitratkonzentrationen zunimmt, scheint sich der Einfluss dieser beiden Faktoren im Vergleich zu Kultur und Vorfrucht untergeordnet auszuwirken. Außerdem können auch ohne Düngung in Abhängigkeit der angebauten Kultur erhöhte Nitratkonzentrationen und somit potentielle Nitratausträge ins Grundwasser stattfinden.

Einleitung

In Auswertungen von Untersuchungsergebnissen aus dem Landesmessnetz Grundwassergüte werden häufig Stickstoffeinträge in Grund- und Oberflächengewässer als bedeutende Ursache für den schlechten Zustand dieser Gewässer benannt (LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE MECKLENBURG-VORPOMMERN, 2015 und 2021). Zum Einfluss der Landbewirtschaftung auf Stickstoffausträge mit dem Sickerwasser werden in verschiedenen Regionen Untersuchungen durchgeführt, so dass grundlegende Zusammenhänge bekannt sind. Die quantitative Beurteilung einzelner acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen in Bezug auf die Stickstoffausträge beruht jedoch bislang nur auf Abschätzungen. Außerdem sind immer die konkreten Standortbedingungen für die tatsächlichen Stickstoffkonzentrationen und -frachten von entscheidender Bedeutung. So beruhen die Angaben im Maßnahmenkatalog MV bislang nur auf groben Schätzwerten ohne regionale Überprüfung (KAPE et al., 2012).

Drainsysteme in Böden vergrößern die belüftete Zone, verbessern die Befahrbarkeit, verlängern die Vegetationszeit und steigern letztlich die Produktion landwirtschaftlicher Flächen (DWA, 2012). Drainung bedeutet aber auch eine Veränderung der hydraulischen Verhältnisse, da die Aufenthaltsdauer des Sickerwassers in der biologisch aktiven ungesättigten Bodenzone verkürzt und der Grundwasser- und Oberflächenabfluss reduziert werden. Künstliche Entwässerungssysteme erweisen sich somit als wichtiger Stoffeintragungspfad in Oberflächengewässer (UBA, 2009). Das gilt insbesondere für Tieflandinzugsgebiete mit hohem Anteil gedrainter Fläche (MEHL et al., 2009; KAHLE et al., 2007). In Mecklenburg-Vorpommern gelten 885.000 ha des Landes als künstlich entwässert. Dies entspricht einer Entwässerungsquote von ca. 61 % der Landwirtschaftsfläche, verteilt auf 53 % der Acker- und 83 % der Grünlandfläche (BIOTA, 2010). Aktuelle Untersuchungen verdeutlichen den übergroßen Anteil der Stickstoffeinträge über die Drainsysteme an den Gesamteinträgen. Auch für Phosphor wird dem Drainpfad eine große Rolle beigemessen.

In welcher Höhe der viel schnellere Abfluss mit dem Drainagewasser im Vergleich zur Sickerung in das Grundwasser die Prozesse beeinflusst, kann zurzeit nicht bestimmt werden. Über die Veränderung von Nährstoffkonzentrationen mit der Verlagerung des Sickerwassers in die Tiefe bestehen ebenfalls erhebliche Unsicherheiten. Da zudem mit dem Drainwasser nur ca. die Hälfte des Sickerwassers abgeleitet wird, bleiben zum Schutz des Grundwassers Maßnahmen der Landbewirtschaftung auch bei der Nutzung von wasserseitigen Maßnahmen unbedingt notwendig.

Die Mineralstickstoffkonzentration im Boden (N_{\min} -Gehalt) ist im Zeitraum nach der Ernte/im Spätsommer bis zum Vegetationsende hoch flexibel. Die Eignung des Herbst- N_{\min} -Gehaltes zur Bewertung acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen in Bezug auf den Nitrataustrag ist gerade für Regionen mit geringem Niederschlag stark umstritten. Deshalb wurden unter einem statischen Parzellenversuch mit einer für MV typischen Fruchtfolge (Winterraps, Winterweizen, Mais, Wintertriticale) unter verschiedenen Düngungsregimen kontinuierliche Messungen während der Sickerwasserperioden mit einer Saugkerzenanlage durchgeführt (z. B. SCHWARZ und BISCHOFF, 2017; STEFFENS et al., 2017). In

verschiedenen Forschungsprojekten wurde die prinzipielle Eignung der Methode Saugkerzen-Messungen zur Beschreibung von Nährstoffeinträgen in Grund-/Oberflächengewässer nachgewiesen (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN; BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT; LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN; BOBE et al.; HÄDRICH et al., 1977; HÖPER et al.; HETSCH et al., 1979; PETERS et al., 2005; DVWK, 1990; FOHRER et al., 2010; LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 2004).



Abb. 1: Luftbild der Versuchspartellen in Gülzow (links, GAIA-MV 2016) und Beginn der Einbauarbeiten der Saugkerzenanlage in den Versuchspartellen – Hauptgraben für die Unterdruckleitung (rechts)

Material und Methoden

Standort

Der Versuchsstandort Gülzow, Mecklenburg-Vorpommern, befindet sich im vergleichsweise niederschlagsarmen Güstrower Becken inmitten der jungpleistozänen Grundmoränenlandschaft. Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur (1988–2017) beträgt 9,1°C und die Jahresniederschlagssumme 557 mm.

In einem Bodenprofil direkt neben der Versuchsfläche ist als Bodenform eine Humusbraunerde aus Geschiebedecksand über Geschiebelehm (LLh: pky-ls(Sp)/gm-sl(Lg)) angesprochen worden. Die Versuchsfläche selbst zeigt die typische hohe Substratheterogenität diluvialer Standorte. Die Bodenarten der einzelnen Horizonte variieren zwischen den einzelnen Partellen. Sie reichen von reinem Sand (Ss) über schluffige Sande (Su2) und lehmige Sande (SI2-SI4) hin zu sandigen Lehmen (Ls4, Ls3). Im Mittel wiesen die Profile eine mittlere bis schwache Durchwurzelungsintensität auf (Stand September 2017) und eine geringe bis mittlere Lagerungsdichte. Die Grobporenanteile sind ebenfalls sehr gering. Das Bodengefüge ist im Ackerhorizont krümelig und in den unteren Bodenschichten vorrangig ein Subpolyedergefüge. Aus den erhobenen Bodendaten (Bodenart, Horizontmächtigkeit) wurden Einzeldiagramme je Feld und Partelle erstellt (Abb. 2, Anhang 1).

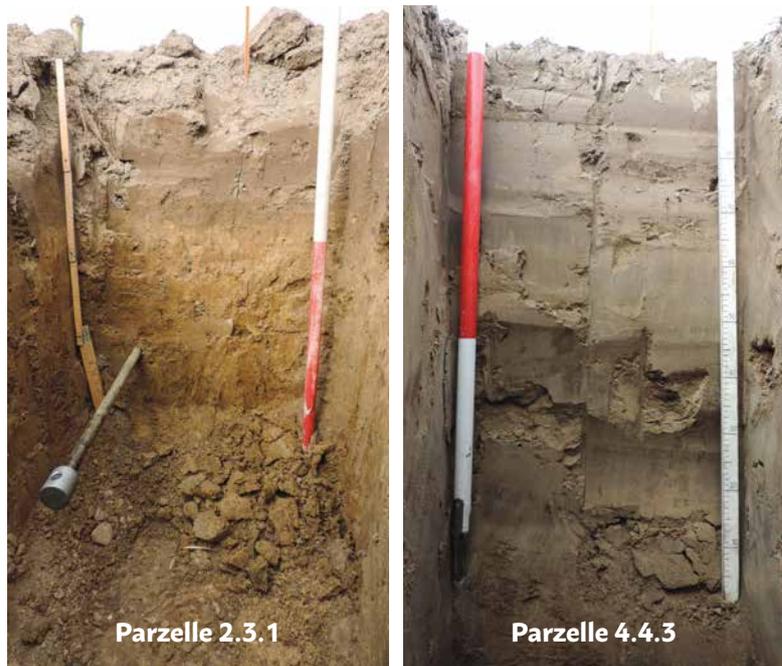


Abb. 2: Beispiele unterschiedlicher Bodenprofile im Versuch: Parzelle 2.3.1 mit Lehm Boden (links); Parzelle 4.4.3 mit reinem Sandprofil (rechts)

Bewirtschaftung: Prüfglieder und Rotation

Die Versuchsfläche war bis zum Jahr 2013 langjährig in ökologischer Bewirtschaftung ohne bzw. mit nur marginaler Düngung. Nach einer zweijährigen Übergangsphase mit einheitlichem Anbau und ebenfalls geringer N-Düngung erfolgte im Herbst 2015 die Anlage eines Dauerversuches zur mineralischen und organisch-mineralischen Stickstoffdüngung. Alle Kulturarten der vierfeldrigen Fruchtfolge Winterraps – Winterweizen (abfrierende Zwischenfrucht) – Silomais – Wintertriticale (Ernte als Ganzpflanze zur Silage) werden in jedem Jahr angebaut (Tab. 1). Die Zwischenfruchtmischung besteht aus Phacelia, Öllein, Perser- und Alexandrinerklee.

Tab. 1: Angebaute Kulturarten mit Anbaudaten auf den Versuchsfeldern

		Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4 (mit Saugplatten)
2015	Kultur	Winterraps	Winterweizen	Zwischenfrucht	Wintertriticale
	Datum Aussaat	28.08.2015	30.09.2015	18.09.2015	21.09.2015
2016	Kultur			Silomais	
	Datum Aussaat			04.05.2016	
	Datum Ernte	26.07.2016	23.07.2016	12.09.2016	28.06.2016
	Kultur	Winterweizen	Zwischenfrucht	Wintertriticale	Winterraps
	Datum Aussaat	14.10.2016	18.08.2016	14.10.2016	22.08.2016
2017	Kultur		Silomais		
	Datum Aussaat		28.04.2017		
	Datum Ernte	04.08.2017	19.09.2017	22.06.2017	31.07.2017
	Kultur	Zwischenfrucht	Wintertriticale	Winterraps	Winterweizen
2018	Datum Aussaat	16.08.2017	20.10.2017	23.08.2017	19.10.2017
	Kultur	Silomais			
	Datum Aussaat	07.05.2018			
	Datum Ernte	23.08.2018	18.06.2018	19.07.2018	21.07.2018
	Kultur	Wintertriticale	Winterraps	Winterweizen	Zwischenfrucht
2019	Datum Aussaat	28.09.2018	29.08.2018	28.09.2018	21.08.2018
	Kultur				Silomais
	Datum Aussaat				17.04.2019
	Datum Ernte	16.06.2019	28.07.2019	24.07.2019	16.09.2019
	Kultur	Winterraps	Winterweizen	Zwischenfrucht	Wintertriticale
2020	Datum Aussaat	22.08.2019	14.10.2019	15.08.2019	14.10.2019
	Kultur			Silomais	
	Datum Aussaat			04.05.2020	
	Datum Ernte	29.07.2020	30.07.2020	28.09.2020	25.06.2020
	Kultur	Winterweizen	Zwischenfrucht	Wintertriticale	Winterraps
2021	Datum Aussaat	14.09.2020	19.08.2020	01.10.2020	25.08.2020
	Kultur		Silomais		
	Datum Aussaat		06.05.2021		
	Datum Ernte			05.07.2021	

2017/18

Die Entwicklung der angebauten Kulturarten war durch die extremen Witterungsverhältnisse des Anbaujahres geprägt. Nach der Aussaat entwickelten sich die Bestände gut, durch den nassen Herbst/Winter blieb jedoch die Wurzelentwicklung zurück. Entsprechend dramatisch waren die Auswirkungen der langen Trocken- und Hitzeperiode im Frühjahr/Sommer. Die Erträge blieben gering, verbunden mit überdurchschnittlich hohen N-Salden.

2018/19

Die Aussaatbedingungen der Winterungen waren durch die ausgetrockneten Böden problematisch. Ein sehr milder Winter führte jedoch bis zum Frühjahr meist zu ausreichend entwickelten Beständen. Trotz höherer Niederschläge als im Vorjahr blieb 2019 die Wasserversorgung der Kulturen aufgrund des tief ausgetrockneten Bodens angespannt. Dadurch und durch eine frühsommerliche Hitzeperiode ausgelöste schnelle Abreife lagen die Erträge auf mittlerem bis unterdurchschnittlichem Niveau.

2019/20

Im Herbst 2019 kam es aufgrund der Trockenheit und dem entsprechend verzögerten Abbau der Stroh- und Ernterückstände wieder zu Auflaufproblemen im Raps. Die Rapsbestände konnten diesen Mangel über die gesamte Anbau-dauer nicht ausgleichen. Das Frühjahr 2020 war wiederum durch Vorsommertrockenheit gekennzeichnet. Die Ertrags-situation gestaltete sich ähnlich wie im Vorjahr.

2020/21

Im Herbst bis zur Winterruhe entwickelten sich die Kulturen gut, so dass in Abhängigkeit von der Kulturart die N-Aufnahme im Herbst 2020 als optimal eingeschätzt werden kann. Die Vegetationsruhe begann spät, kurze Frostperioden führten dank leichter Schneebedeckung nicht zu Pflanzenausfällen. Das folgende Frühjahr war deutlich kühler als der langjährige Durchschnitt. Bodenerwärmung und Pflanzenwachstum setzten dadurch später und langsamer als üblich ein. Bis Ende Mai war für alle Winterkulturen ein mittleres bis hohes Ertragspotenzial zur Ernte 2021 vorhanden.

Insgesamt sind die Untersuchungsjahre durch bis jetzt für die Landwirtschaft ungewöhnlich schwierige Witterungs-perioden geprägt. In der Tendenz bestätigen sie Prognosen zum Klimawandel mit milden Wintern, länger andauernden Trocken- und Hitzeperioden im Frühjahr/Sommer und Extremniederschlägen.

Sickerwassergewinnung

Die ortsfesten Prüfvarianten zur N-Düngung sind als einfaktorielle Blockanlage in jedem Fruchtfolgefeld mit drei-facher Wiederholung angelegt. Aus den zwölf Düngungsvarianten wurden fünf für die Sickerwasseruntersuchungen ausgewählt (Tab. 2). Unter diesen wird in allen Wiederholungen mit jeweils zwei keramischen Saugkerzen Bodenwasser in 60 cm Tiefe gewonnen. Zusätzlich sind je Fruchtfolgefeld in vier Prüfvarianten in einer Wiederholung je zwei Saug-kerzen in 100 cm Tiefe eingebaut. Vier Saugplatten in nur einem Feld in 100 cm Bodentiefe ergänzen die Messpunkte (hier nicht dargestellt).

Tab. 2: Prüfglieder (PG) des Düngungsversuches

PG*	Kurzbezeichnung	Stroh- verbleib	N-Düngungshöhe nach DüV		Gärrest-Düngung	
			Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr
1	ohne Düngung	nein	-	0	-	-
3	80 % mineralisch	nein	-	80 %	-	-
4	100 % mineralisch	nein	-	100 %	-	-
7	Organisch-mineralisch, Frühjahr	nein	-	100 %	-	zu allen Kulturen
12	Organisch-mineralisch, Herbst und Frühjahr	ja	-	100 %	nur zu Winterraps und Mais	nur zu Winterraps und Mais

* Nicht aufgelistete Prüfglieder werden nicht für die Sickerwasseruntersuchungen genutzt.

Über eine am Feld verbaute Pumpanlage sind alle Saugkerzen und -platten über ein unterirdisch verlegtes Schlauchsystem einem ständigen Unterdruck ($-0,3$ bar) ausgesetzt. An der Zentralstation befindet sich eine Membran-Pumpe mit manuell einstellbarem Vakuumregler. Das Sickerwasser wird so in Sammelflaschen geleitet (Abb. 3). Das einmal wöchentlich gesammelte Sickerwasser wird je Prüfparzelle entsprechend der angefallenen Wassermenge zu einer Mischprobe vermengt, gekühlt transportiert und anschließend auf die Nitratkonzentration im Labor der LUFA Rostock nach EN ISO 13395 D28 untersucht. Durch die separate Untersuchung der einzelnen Wiederholungen sollen Abschätzungen der durch die Bodenheterogenität bedingten Varianz der Nitratkonzentrationen möglich sein.



Abb. 3: Zentralstation mit Solarpaneel (links); Unterdruckleitung im Graben (Mitte links); Sammelkisten mit Druckleitung (Mitte rechts); geöffnete Sammelkiste mit über eine Hahnenbank an die Druckleitung angeschlossenen Sammelflaschen (rechts)

Die Saugplatten dienen der Quantifizierung/Validierung der vom Deutschen Wetterdienst für den Standort modellierten Sickerwassermenge. So wird die Berechnung der Nitratfracht in der jeweiligen Sickerwasserperiode möglich. Die Saugplatten stellen somit eine tatsächliche Vergleichsgröße zur berechneten Sickerwassermenge dar. Jede der vier Platten fängt auf einer Fläche von ca. 490 cm^2 (Abb. 4, rechts) das Sickerwasser ein.

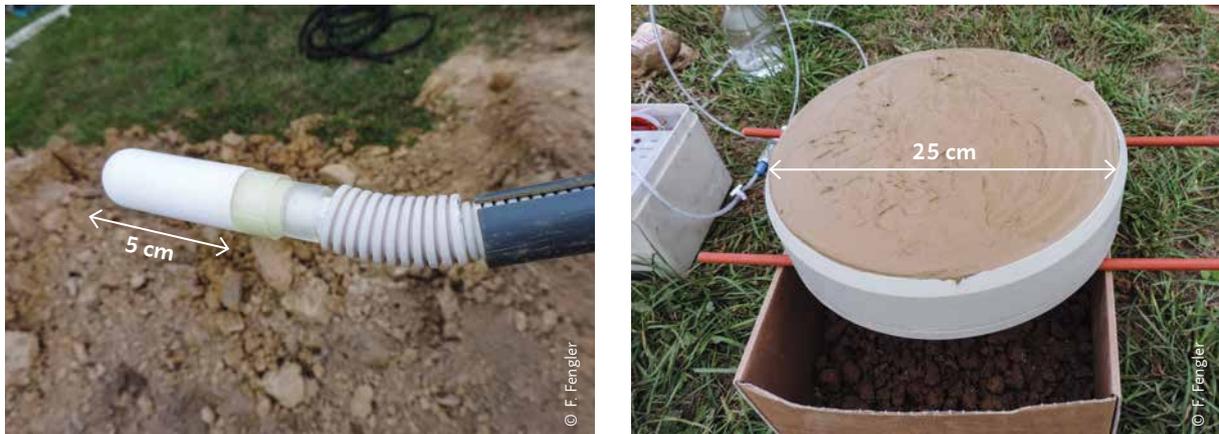


Abb. 4: Keramik-Saugkerze (links); Saugplatte (rechts)

Bestimmung von Sickerwassermenge und N-Fracht

Die Sickerwassermenge wurde mit dem Programm METVER vom Deutschen Wetterdienst für die Bodentiefe 1 m auf der Grundlage eines Standardbodenprofils, welches direkt neben der Versuchsfläche vor Versuchsbeginn aufgenommen wurde, und dem aktuellen Pflanzenbestand (Kulturart, Aussaat-, Auflauf- und Erntedatum) berechnet. Berechnungsgrundlage bilden die Wetterdaten der Wetterstation Gülzow mit ca. 600 m Entfernung vom Versuchsstandort und die Bodendaten des direkt neben der Versuchsfläche angelegten Bodenschurfs. Die Messwerte der von den Saugplatten in 1 m aufgefangenen Wassermenge dienen dem Abgleich mit den errechneten Sickerwasserwerten.

Für die Berechnung der Nitratfrachten wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Kulturpflanzen außerhalb der Vegetationsperiode nur unwesentlich Wasser und Nährstoffe aufnehmen. Nitratkonzentrationen und Sickerwassermengen sollten sich also in diesem Zeitraum unterhalb von 60 cm Bodentiefe mit der weiteren Versickerung kaum ändern und können zur Abschätzung der Nitratverlagerung ins Drain- und Grundwasser genutzt werden. In der Realität wird der Einfluss des Pflanzenbestandes in dieser Zeit tatsächlich gering sein. Der Einfluss wechselnder Bodenart und Bodenporen dagegen ist vorhanden und kann die Werte sehr stark beeinflussen. Um den bodenbedingten Einfluss auf die gemessenen Nitratkonzentrationen gering zu halten, wurden die Saugkerzen relativ oberflächennah in 60 cm Tiefe eingebaut. Für die Abschätzung der Nitratverlagerung während der Vegetationsperiode ist diese Vorgehensweise nicht übertragbar.

Zur Berechnung der N-Frachten wurden für die Sickerwasserperiode 2017/18 die wöchentlich gemessenen Nitratkonzentrationen mit den nach METVER kalkulierten Sickerwassermengen der entsprechenden Woche multipliziert und als Summe für die Periode dargestellt. 2018/19 gab es kein Sickerwasser, also auch keine N-Frachten. 2019/20 und auch 2020/21 konnten aufgrund des lange nicht vollständig durchfeuchteten Bodens auch während der Sickerwasserperiode kaum durchgängig Proben je Messpunkt gewonnen werden. Eine auf wöchentlichen Werten basierende Berechnung der Nitratfrachten war deshalb nicht möglich. Für diese Jahre wurden der Nitratgehalt im Sickerwasser als arithmetischer Mittelwert aller Messwerte während der Sickerwasserperiode und die nach METVER modellierte Gesamt-Sickerwassermenge verwendet. Die Aussagesicherheit der Ergebnisse ist also geringer als in der ersten Messperiode. Auch aus diesem Grund bleibt der Hinweis auf die Vorläufigkeit der Ergebnisse wichtig. Bei der Interpretation ist außerdem zu beachten, dass eine N-Verlagerung in 1 m Bodentiefe nicht mit dem N-Austrag aus der durchwurzelten Bodenzone gleichzusetzen ist. Gleichwohl ist ein Rückschluss auf das N-Austragsrisiko zulässig.

Ergebnisdarstellung

Die vorliegende erste Auswertung bezieht sich ausschließlich auf die Messungen in 60 cm Bodentiefe. Die dargestellten Perioden werden mit Bezug auf das hydrologische Jahr jeweils vom 01.11. bis zum 31.10. zusammengefasst.

Aufgrund des noch vergleichsweise kurzen Untersuchungszeitraumes, der extrem unterschiedlichen Witterungsverhältnisse und der nur in einem Jahr realisierbaren kontinuierlichen Gewinnung von Proben über die gesamte Sickerwasserperiode sind die Auswertungsmöglichkeiten eingeschränkt. Die gemessenen Nitratkonzentrationen wurden deshalb in der Gesamtheit der Einzelmesswerte (Anhang 3) sowie in ihrer Verteilung mit Mittel- und Medianwert, Interquartilsabstand und Ausreißerwerten dargestellt. Im Gegensatz zur Darstellung der Einzelmesswerte wurden für alle anderen Grafiken nur die Messwerte während der Dauer der modellierten Sickerwasserbildung zusammengefasst.

Zur Gegenüberstellung des N-Saldos und der Nitratkonzentration wurde der Median aller Messwerte während der Sickerwasserbildung je Kulturart bestimmt und dieser dann als Mittelwert über die Kulturarten dargestellt. Der N-Saldo bezieht sich auf die vier jeweils vor der Sickerwasserperiode liegenden Anbaujahre (abweichend 2017/18 nur zwei Anbaujahre). Der Bezug auf den Medianwert der Nitratkonzentration wurde gewählt, um die Verzerrung durch die in den Ergebnissen beobachteten Ausreißerwerte zu begrenzen.

Ergebnisse und Diskussion

Niederschlagsverhältnisse und Sickerwasseranfall

2017/18

Die Niederschlagsverhältnisse waren im Untersuchungszeitraum am Standort extrem unterschiedlich. Das Jahr 2017 war insgesamt sehr regenreich. Von Juni bis Dezember fiel so viel Niederschlag wie im langjährigen Mittel eines ganzen Jahres. Diese Wetterlage hielt bis März/Anfang April an. Die Sickerwasserbildung begann deshalb sehr früh im November. Schon am 13.11.2017 konnten die Messungen beginnen. Die letzte Wasserprobe wurde am 07.05.2018 genommen. In 22 der 26 Wochen war eine Probenahme möglich, d. h. es konnte Wasser in die Sammelflaschen gesaugt werden. Im März (05.03. bis 26.03.2018) war es zu trocken bzw. zu frostig; es fiel kein Probenwasser an. Ab 23.04.2018 lieferten nur noch einzelne Messpunkte Probenwasser. In Summe wurde während der Messperiode 2017/18 von 1.361 Bodenwasserproben die Nitratkonzentration analysiert (Abb. 5, Abb. 6).

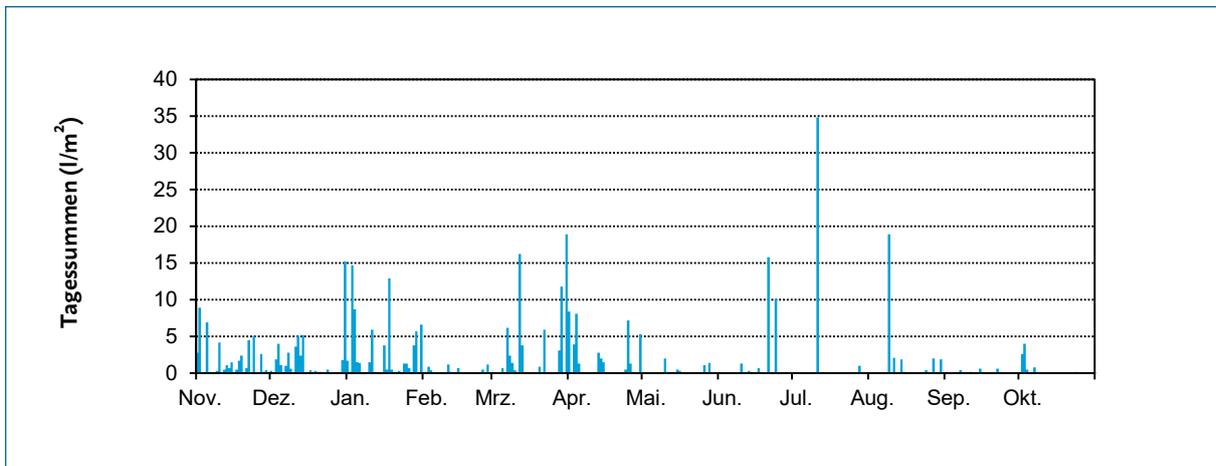


Abb. 5: Niederschlagsmenge im hydrologischen Jahr 2017/18 (Messwerte, Wetterstation Gülzow)

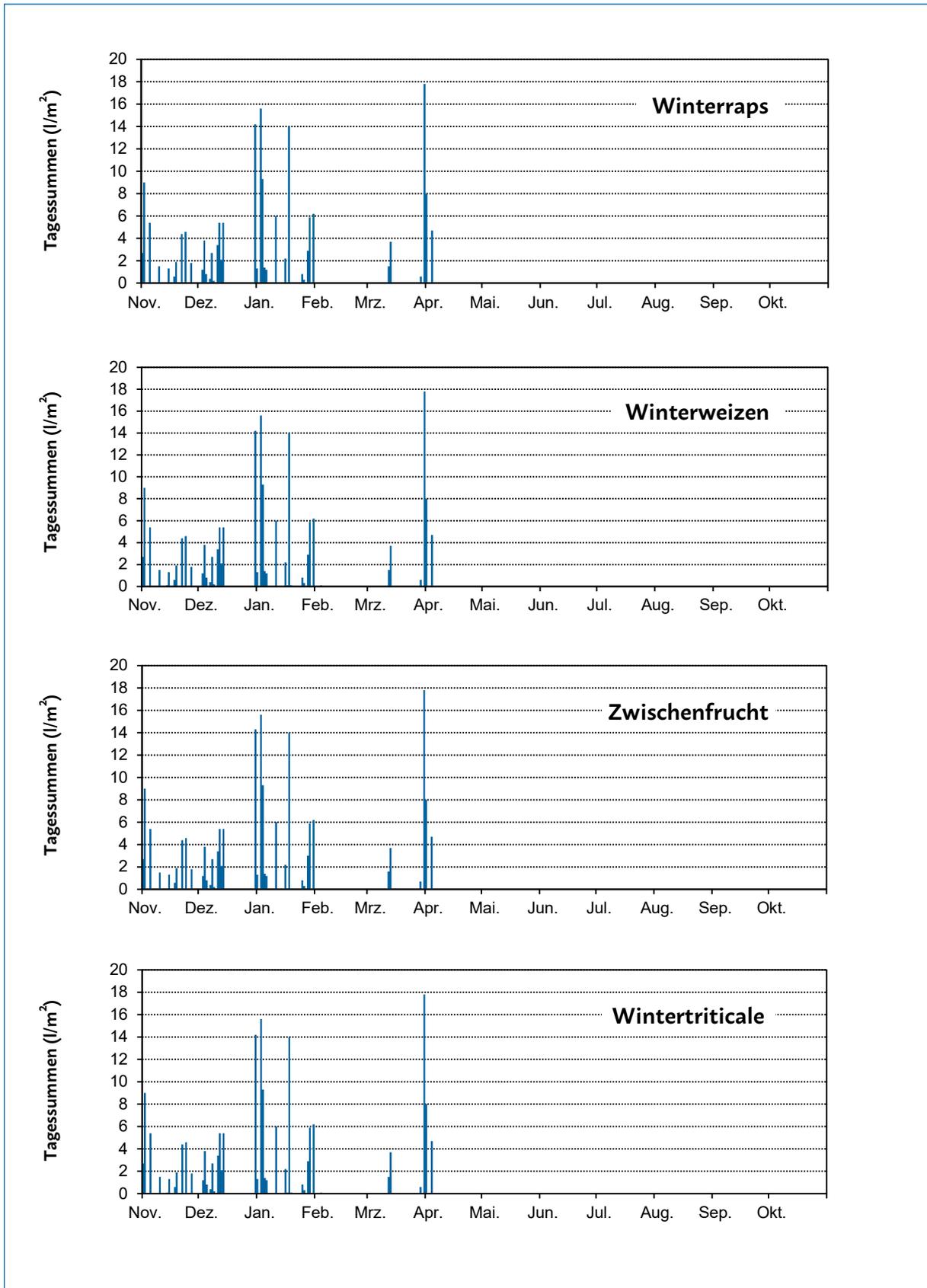


Abb. 6: Sickerwassermenge der Sickerwasserperiode 2017/18 nach Modell METVER (DWD) in 1 m Bodentiefe in Abhängigkeit von der Kulturart

2018/19

Auf die Periode mit langer Wassersättigung im Boden folgte das Dürrejahr 2018. Von Mai bis November fielen nur 115 mm Niederschlag, weniger als die Hälfte des langjährigen Mittels in diesen Monaten. Die Böden trockneten tiefgründig aus und wurden auch durch die folgenden Winterniederschläge nicht wieder aufgefüllt. Dadurch fielen in der Messperiode 2018/19 nur vereinzelt Wasserproben an. Eine Sickerwasserbildung fand überhaupt nicht statt (Abb. 7, Abb. 8).

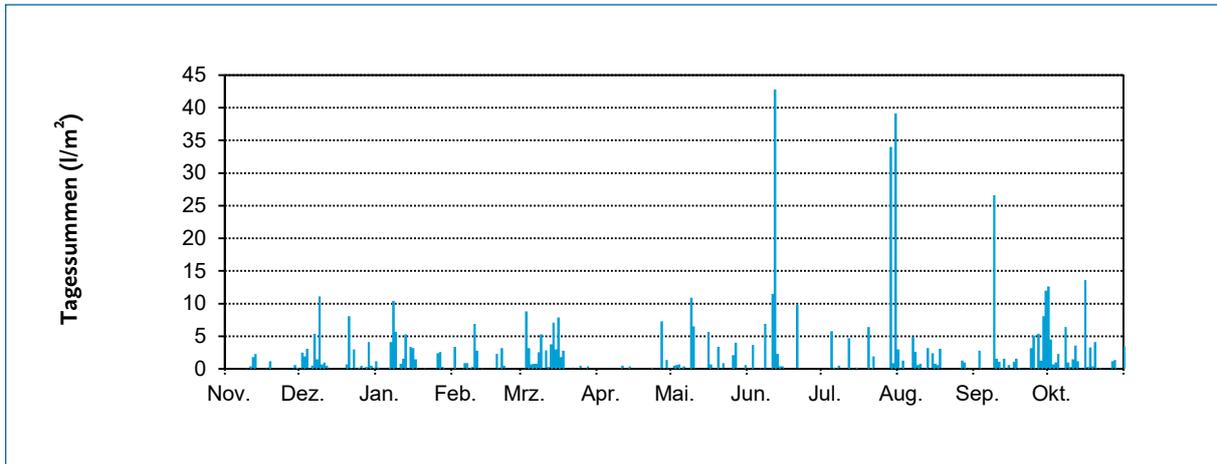


Abb. 7: Niederschlagsmenge im hydrologischen Jahr 2018/19 (Messwerte, Wetterstation Gülzow)

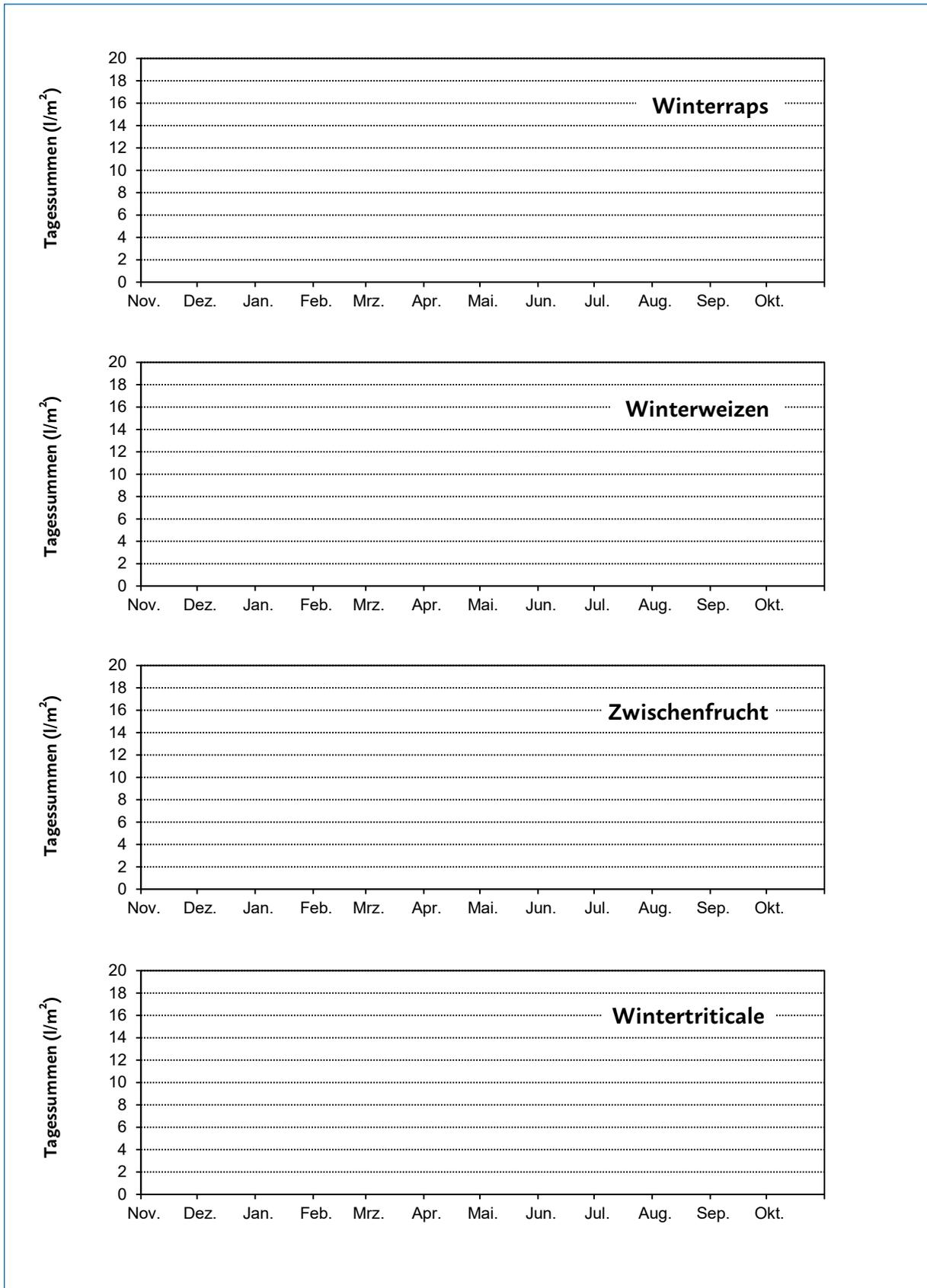


Abb. 8: Sickerwassermenge der Sickerwasserperiode 2018/19 nach Modell METVER (DWD) in 1 m Bodentiefe in Abhängigkeit von der Kulturart

2019/20

Die ab Spätherbst 2019 wiedereinsetzenden Niederschläge führten lange nicht zu nennenswerter Sickerwasserbildung, da in erster Linie das sommerliche Bodenwasserdefizit ausgeglichen wurde. Zwischen Oktober und Dezember 2019 konnten nur insgesamt 83 von möglichen 1.066 Wasserproben eingeholt und analysiert werden. Im Januar 2020 und insbesondere im Februar 2020 fielen verstärkt Niederschläge. Obwohl in dieser Zeit auch mit einem erhöhten Anfall an Sickerwasserproben zu rechnen gewesen wäre – da die Wasseraufnahme der jeweiligen Kulturbestände zu dieser Zeit gering ist – wurden in den ersten beiden Wintermonaten des Jahres 2020 insgesamt nur 77 von möglichen 574 Proben entnommen. Auch die Modellierung des Deutschen Wetterdienstes zeigt eine stärkere Sickerwasserbildung erst für den Monat Februar 2020. Ab Mitte März 2020 blieben die Niederschläge am Standort Gülzow überwiegend aus. In der gesamten Messperiode fielen insgesamt 751 Proben an (Abb. 9, Abb. 10).

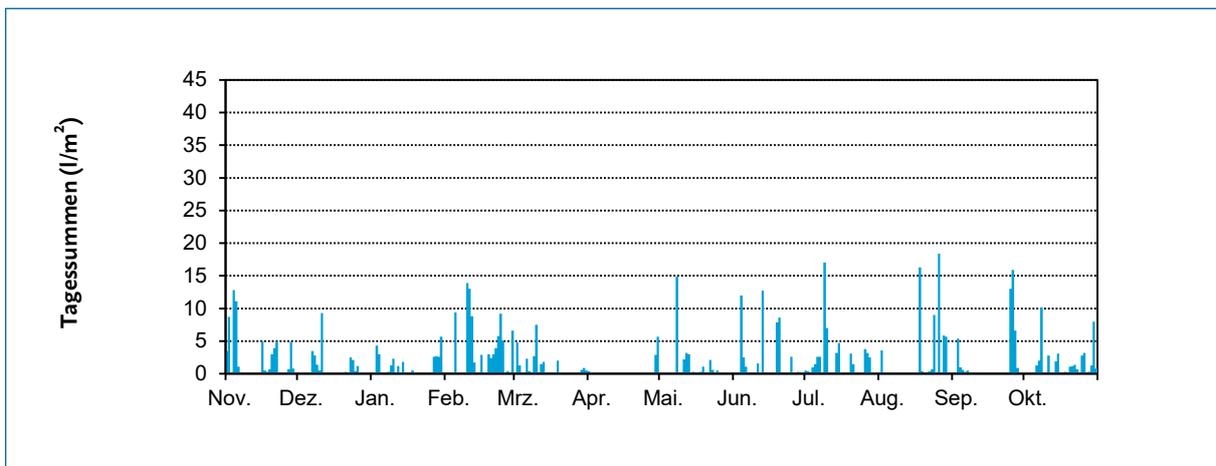


Abb. 9: Niederschlagsmenge im hydrologischen Jahr 2019/20 (Messwerte, Wetterstation Gülzow)

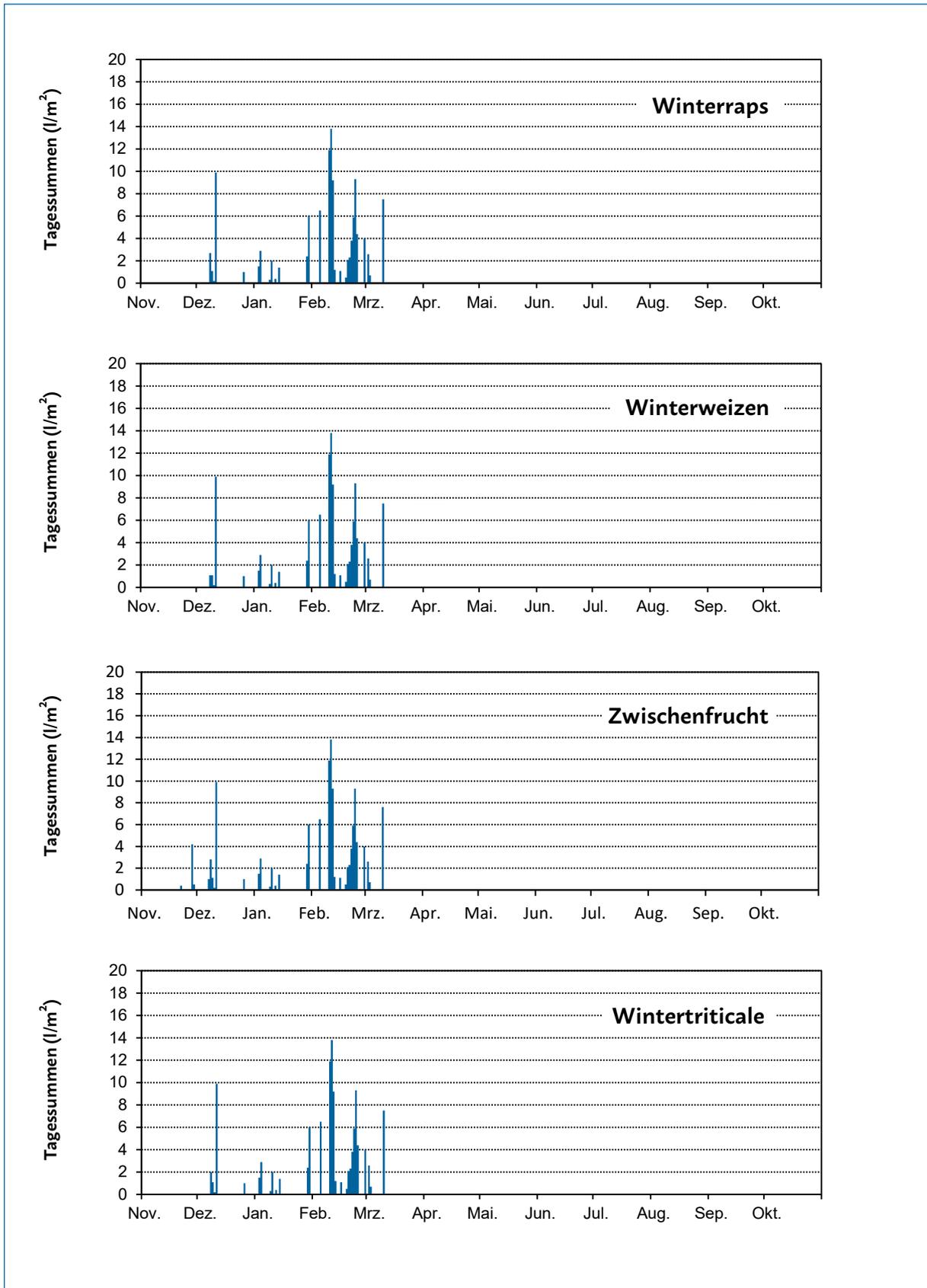


Abb. 10: Sickerwassermenge der Sickerwasserperiode 2019/20 nach Modell METVER (DWD) in 1 m Bodentiefe in Abhängigkeit von der Kulturart

2020/21

Die Niederschlagsmengen in der Periode 2020/21 erreichten bis auf den November ein mittleres Niveau. Da der Boden jedoch durch die vorhergehenden Trockenjahre weit ausgetrocknet war, begann die Sickerwasserbildung erst spät im Januar 2021 und dauerte nur ca. neun Wochen.

Die Probenahmeperiode 2020/21 dauerte insgesamt vom 02.11.2020 bis zum 10.5.2021 und umfasste somit 28 Probenahmewochen. Auch nach dem 10.05.2021 hätte die Bodenfeuchte für weitere Probenahmen ausgereicht. Die Probenahme wurde jedoch aufgrund mangelnder Personalkapazität (Arbeitsstunden im Projekt waren planmäßig am 31.03.2021 ausgeschöpft, Mitarbeiterauslastung im Institut durch Corona-Situation extrem angespannt) sowie dem Ende der Sickerwasserbildung beendet.

In den 28 Wochen hätten an 156 Probenahmepunkten maximal 4.368 potentielle Einzelproben und nach der Erstellung der Mischproben maximal 2.296 potenzielle Laborproben gewonnen werden können. In der Realität war der Boden noch bis Anfang Februar fast überall für eine Probenahme zu trocken. Nur vereinzelt erreichte die Wasserprobenmenge die notwendige Mindestmenge für die Laboranalyse. Dauerfrost im Februar unterbrach die Anfang Februar begonnene Phase stärkerer Sickerwasserbildung auf den meisten Teilflächen für ca. zwei bis vier Wochen. Nach dem Auftauen bis Anfang Mai lieferten 3/4 aller Saugkerzen/-platten ausreichend Wasser für eine Analyse. Durch den Einbau von jeweils zwei Saugkerzen je Parzelle und Bodentiefe konnten für bis zu 83% der Parzellen an mindestens einem Termin Sickerwasserproben entnommen werden. Es ist nicht auszuschließen, dass ohne den durch befristete Arbeitsverträge ausgelösten und zusätzlich durch die Corona-Situation verschärften häufigen Wechsel der Bearbeiter mehr Proben hätten gewonnen werden können.

1.750-mal konnte Probenwasser gewonnen werden. 971-mal betrug die Probenahmemenge mehr als die für die Nitratanalyse labortechnisch benötigten 10 ml. Elf Probenahmepunkte lieferten über die gesamte Sickerwasserperiode kein Wasser. Insgesamt konnten nach Verwerfen bei Unterschreitung der Mindestwassermenge für die Laboranalyse und dem aliquoten Erstellen von Mischproben je Parzelle und Bodentiefe 756 Sickerwasserproben dem Labor übergeben werden.

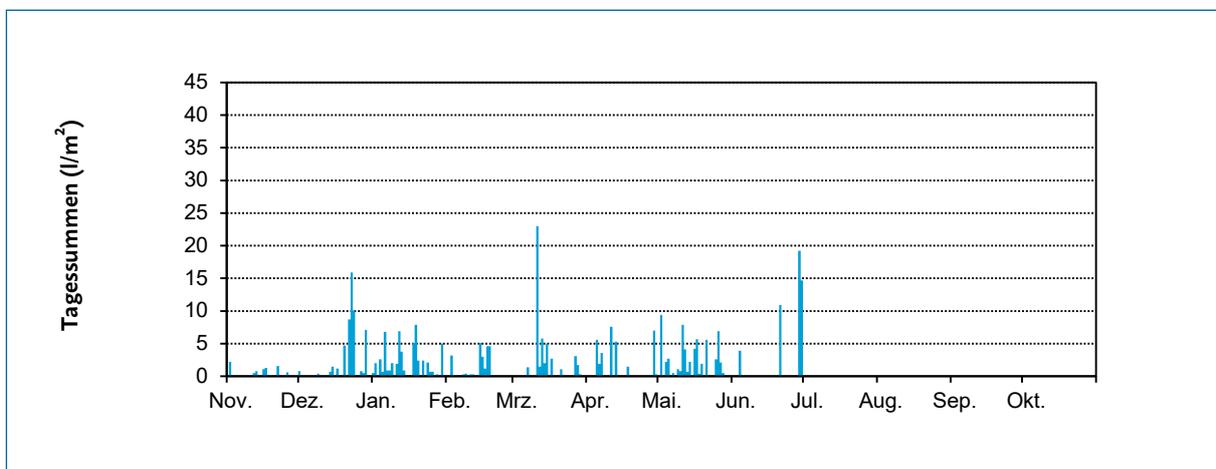


Abb. 11: Niederschlagsmenge im hydrologischen Jahr 2020/21 (Messwerte, Wetterstation Gülzow bis 30. Juni 2021)

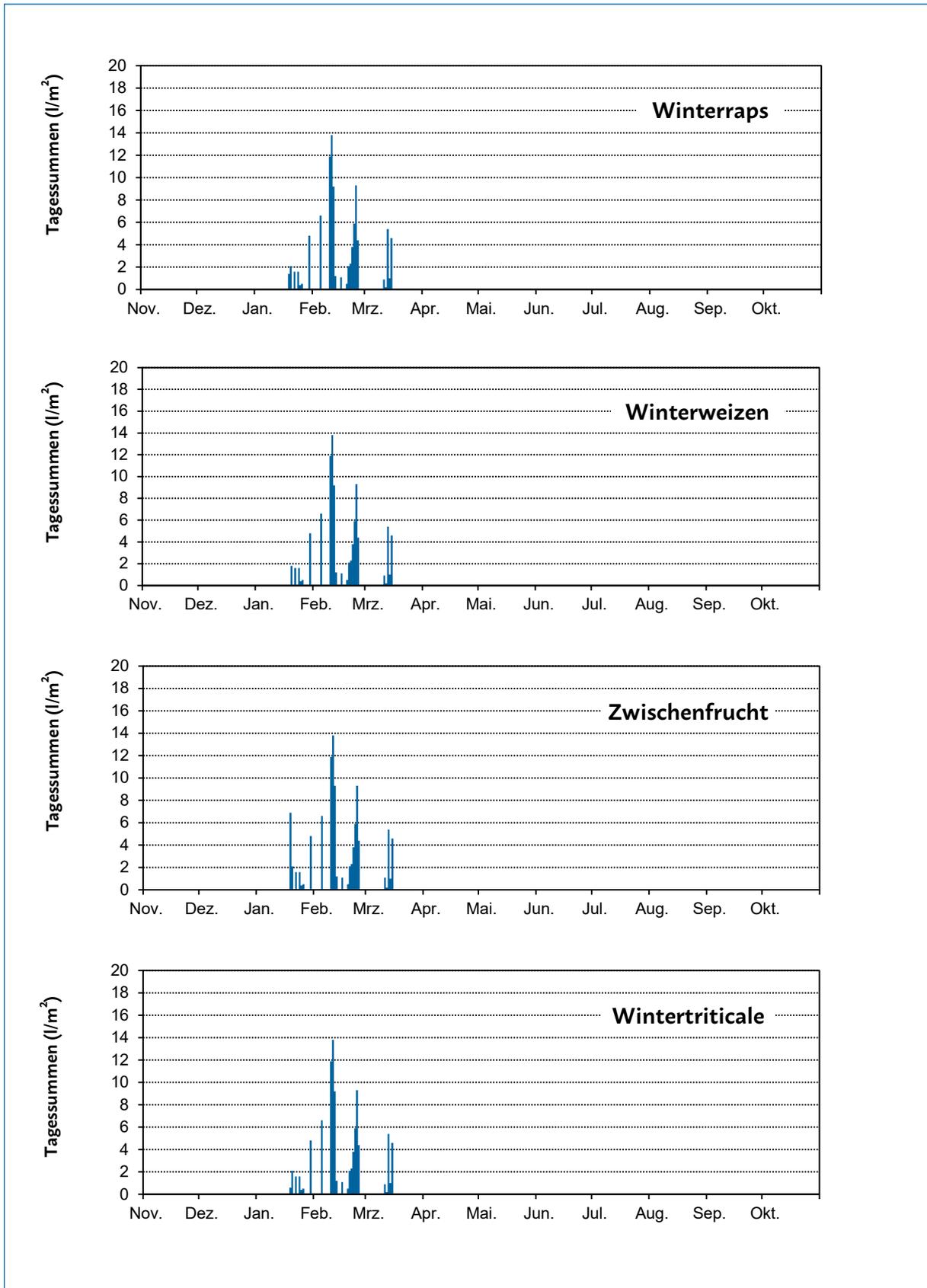


Abb. 12: Sickerwassermenge der Sickerwasserperiode 2020/21 nach Modell METVER (DWD) in 1 m Bodentiefe in Abhängigkeit von der Kulturart

Quantifizierung der Sickerwassermenge mittels Messung und Modellierung

Der langjährige Mittelwert der Sickerwasserbildung eines vergleichbaren Standortes (Lysimeterstation Groß Lüsewitz) liegt mit 199 mm (1973–2012) über den Werten der Jahre 2017–2021 (KLEHR et al., 2020). Es sind also nicht nur die Sickerwassermengen nach dem Dürrejahr 2018, sondern auch die von 2019/20 und 2020/21 unterdurchschnittlich. Damit erklärt sich, dass in diesen Jahren keine kontinuierliche Erfassung von Bodenwasser über die Saugkerzen möglich war. Da die Witterung also einen sehr großen Einfluss auf die Ergebnisse hat, sollte die Untersuchung über einen längeren Zeitraum fortgesetzt werden. Nur dann wird es möglich, typische standortbezogene Kennziffern zu ermitteln (Tab. 3).

Tab. 3: Mittlere Niederschlags- und Sickerwassersummen in 1 m Tiefe je Periode (November–Oktober), berechnet mit METVER, Standort Gülzow

Hydrologisches Jahr	Niederschlagssumme [mm]	Modellierte Sickerwassermenge [mm]
2017/18	393	177
2018/19	547	0
2019/20	522	120
2020/21	189*	97

* bis 30.04.2021

Die Messungen der Sickerwasserperiode 2017/18 starteten am 07.11.2017 und endeten am 30.04.2018. Insgesamt fielen an der Saugplatte in Parzelle 4.1 54,1 mm Sickerwasser an. An der Saugplatte in Parzelle 7.1 waren es 89,7 mm. Beide Werte liegen unter dem durch METVER errechneten Wert für Sickerwasser von 159,5 mm. Gemessener und modellierter Sickerwasseranfall zeigen jedoch einen ähnlichen Verlauf (Abb. 13).

Abweichend dazu lieferten die anderen beiden Saugplatten keine nutzbaren Ergebnisse. Während eine Saugplatte während der Sickerwasserperioden extrem viel Wasser lieferte (ein Mehrfaches des Niederschlages), also von lateralem Wasserzufluss geprägt ist, lieferte die vierte Saugplatte bisher kein Wasser. Da ein fehlerhafter Einbau nach bestem Wissen ausgeschlossen werden kann, muss von einer direkt über der Saugplatte anliegenden Sperrschicht ausgegangen werden. Eine vorsichtige Bodensondierung stützt diese Vermutung. Beide Phänomene sind in der Grundmoräne nicht überraschend, führen aber zu der Schlussfolgerung, dass punktuelle Untersuchungen mit nur wenigen echten Wiederholungen für Sickerwasseruntersuchungen in der Moränenlandschaft zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

2018/19 gab es kein Sickerwasser. 2019/20 und 2020/21 konnte die Anlage aufgrund der nicht vollständigen Wassersättigung im Boden keine Arbeitsphase mit ausreichend stabilem Unterdruck erreichen. Die gesammelten Wassermengen entsprechen deshalb nicht annähernd der realen Sickerung und können deshalb nicht für einen Vergleich mit den Modellwerten genutzt werden.

Ursachen für die Unterschiede zwischen den mit Saugplatten gemessenen und mit METVER modellierten Werten liegen in den Bodenverhältnissen. Den Modellwerten, die als repräsentativ für die gesamte Versuchsfläche angenommen wurden, liegen Bodendaten eines direkt benachbart liegenden Bodenschurfs zugrunde. Die Bodenverhältnisse der einzelnen Messparzellen weichen natürlich davon ab. Neben Körnungsunterschieden sind Abweichungen durch unterschiedlich stark ausgeprägte präferentielle Flüsse über den einzelnen Saugplatten anzunehmen. Im ersten Teil der Messperiode 2017/18 laufen die Kurven unabhängig von den absoluten Mengen sehr synchron. Die Wassersättigung des Bodens war in dieser Zeit sehr hoch. Im zweiten Teil dieser Sickerwasserperiode liegen die Ergebnisse weiter auseinander. In diesem Zeitabschnitt kam es zu „Trockenphasen“ durch Frost bzw. fehlende Niederschläge. Die Ergebnisse der Folgejahre sind aufgrund unvollständiger Wassersättigung des Bodens über die gesamte Sickerwasserperiode nicht verwertbar. Die Messungen durch Saugplatten werden also durch wechselnde Feuchteverhältnisse eingeschränkt bzw. fallen teilweise aus. Für die Sickerwasserperiode 2017/18, in der ein Vergleich mit Messwerten möglich war, ergab sich eine ausreichende Übereinstimmung der Werte. Für die Schätzung der Nitratfracht ist deshalb eine Modellrechnung der Sickerwassermenge notwendig und sinnvoll.

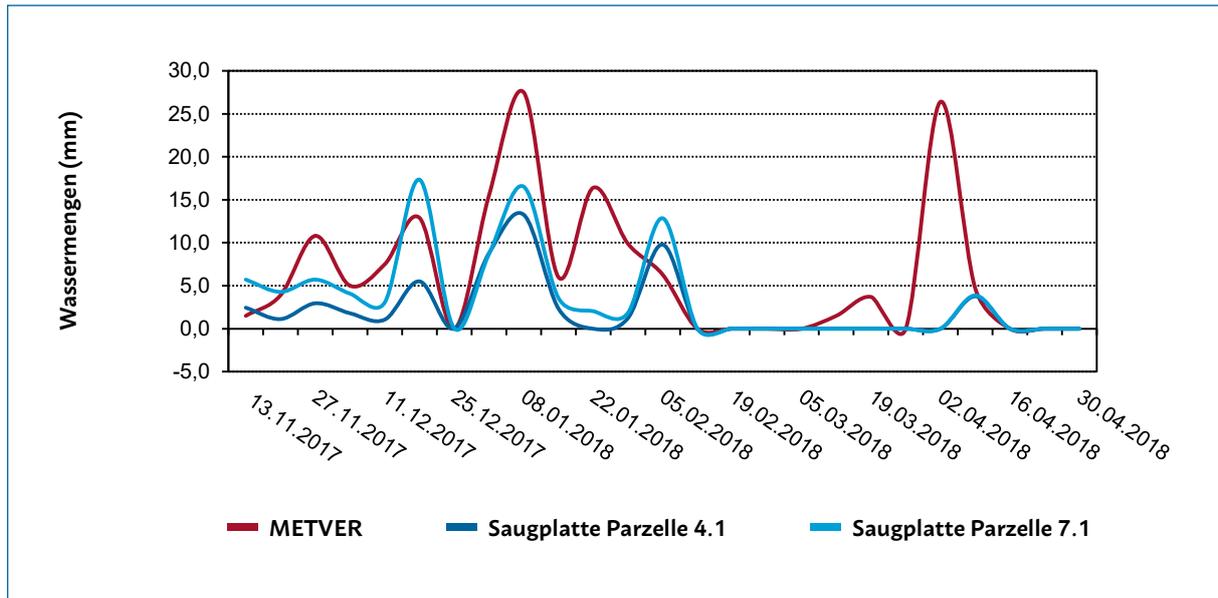


Abb. 13: Vergleich der nach METVER berechneten mit den gemessenen Sickerwassermengen in den Parzellen 4.1 und 7.1. Berechnungsgrundlage: Wetterdaten Gülzow, berechnet für 1 m Tiefe unter Winterweizen, Bodenwerte nach Bodenschurf neben der Versuchsfläche (Humus-Parabraunerde)

Der Einfluss der untersuchten Kulturart auf die anfallenden Sickerwassermengen in der Berechnung durch METVER ist gering, die Verläufe der Sickerwasserbildung sind sehr ähnlich (Abb. 6, Abb. 8, Abb. 10, Abb. 12). Deshalb kann aus dem Vergleich gemessener Nitratkonzentrationen auf Unterschiede im Nitrataustrag geschlossen werden. Zu gleichen Ergebnissen kommen ALBERS et al., 2020, die einen parallelen Verlauf von Nitratkonzentration und N-Fracht beobachteten. Die tatsächliche N-Fracht muss jedoch unter Einbeziehung der Sickerwassermenge bestimmt werden.

Nitratkonzentration

2017/18

Seit dem 13.11.2017 liegen Wochenwerte der Nitratkonzentrationen des Bodenwassers vor. Je nach Wasseranfall sind bis zu 82 Proben jede Woche möglich. Die einzelnen Nitratwerte unter den 60 Versuchspartellen der flachen (60 cm) und tiefen (100 cm) Saugkerzen sowie der Saugplatten variieren stark über die Fläche und die Zeit ($0,05 \text{ mg l}^{-1}$ bis 505 mg l^{-1}). Die Maximalwerte wurden bis Anfang Dezember gemessen und gingen im weiteren Verlauf zurück. Es ist keine generelle Abnahme der Nitratkonzentrationen von 60 auf 100 cm Tiefe festzustellen.

Die Messungen der flachen Saugkerzen in 60 cm Tiefe zeigen alle über die Saison einen abfallenden Trend, wenn auch in sehr unterschiedlichen Konzentrationshöhen. Auffällig ist dabei, dass sich die Nitratkonzentrationen im Bodenwasser unter den verschiedenen Prüfgliedern, d. h. den Düngegraden, zumindest am Anfang der Sickerwasserperiode deutlich nach Feldern bzw. nach den angebauten Kulturen gruppieren. Auch die Nitratkonzentrationen aller ungedüngten Varianten (PG 1) auf allen vier Feldern sind sehr unterschiedlich. Insgesamt wurden während der Periode, in der METVER eine Sickerwasserbildung auswies, 960 Wasserproben in der Bodentiefe 0–60 cm untersucht.

2018/19

In dieser Periode gab es kein Sickerwasser. Die vereinzelt gesammelten Proben an Bodenwasser enthielten Nitrat in der Spanne von unterhalb der Nachweisgrenze bis $>700 \text{ mg/l}$. Die geringe Anzahl der Messwerte erlaubt keine fachliche Bewertung.

2019/20

Schon nach der Aussaat der Kulturen konnten erste Bodenwasserproben gewonnen werden. Obwohl noch ohne echte Sickerwasserbildung nahm mit Beginn des hydrologischen Jahres ab November die Anzahl wasserliefernder Messpunkte zu. Allerdings blieb der Unterdruck in der Saugkerzenanlage während der ganzen Messperiode und auch in der Periode mit Sickerwasserbildung für kontinuierliche Probensammlung an allen Messplätzen nicht stabil genug. Ursächlich sind aufgrund nicht vollständiger Durchfeuchtung des Bodens im Bereich der gesamten Versuchsfläche immer wieder trockenfallende Saugkerzen. Während der modellierten Sickerwasserperiode konnten in 60 cm Tiefe 95 Sickerwasserproben gewonnen werden. Insgesamt wurden höhere maximale Nitratkonzentrationen als 2017/18 gemessen. Die höchsten Maximalwerte während der Sickerwasserbildung fanden sich mit > 500 mg/l unter Winterweizen und mit > 400 mg/l unter Winterraps.

2020/21

Mit der ersten Novemberdekade konnten punktuell Wasserproben unter einzelnen Parzellen gewonnen werden. Im ersten Zeitraum von November bis Januar vor Beginn der Sickerung wurden in 60 cm Bodentiefe Nitratkonzentrationen von 0–300 mg/l gemessen. Ein Wert lag über 550 mg/l. In diesem Zeitraum ist kaum ein Unterschied zwischen den Feldern zu erkennen. Zwar liegen die Maximalwerte unter Zwischenfrucht und Triticale mit 200 mg/l unter denen von Winterweizen und Winterraps. Die geringe Probenanzahl erlaubt jedoch keine sichere Unterscheidung.

Mit Beginn der Sickerwasserperiode im Januar wurden im zweiten abgrenzbaren Zeitraum bis zum Stoppen der Sickerung durch Bodenfrost Anfang Februar neben weiterhin sehr niedrigen auch höhere Nitratkonzentrationen gemessen. Nur unter der Zwischenfrucht wurden in keinem Fall 200 mg/l überschritten. An der Mehrzahl der Probenpunkte reichte die Bodenfeuchte erst ab Ende Februar für eine Beprobung aus.

Der dritte Zeitraum der Messperiode 2020/21 beginnt Ende Februar mit dem Auftauen des Bodens und endet Anfang Mai mit zunehmend trockenem Boden. Die Sickerwasserperiode 2020/21 dauerte nur bis Ende März. Anfang bis Mitte März wurden an einem Messpunkt unter Wintertriticale extrem hohe Nitratkonzentrationen mit abfallender Tendenz von 973 bis 758 mg/l gefunden. Dieser Messpunkt war in den Vorjahren unauffällig und liegt unter einer Parzelle mit mineralischer Düngung in Höhe von 80% nach DüV.

Einzelne Saugkerzen lieferten über die gesamte Sickerwasserperiode kein oder nur während einzelner Wochen ausreichend Wasser für eine Analyse. Für die Sickerwasserperiode 2020/21 liegen insgesamt etwa doppelt so viele Analysen wie in der Periode 2019/20 vor, für die Messpunkte in 60 cm Tiefe sind es 179 Analysen. Die Aussagesicherheit der Ergebnisse der Sickerwasserperiode 2020/21 ist trotzdem deutlich geringer als die der Periode 2017/18.

Einflussfaktoren auf die Nitratkonzentration

Der Einfluss der Bodenbewegungen beim Einbau der Messanlage auf die Ergebnisse wird mit zunehmendem zeitlichen Abstand zurückgehen, lässt sich jedoch vor allem zu Beginn der Messperiode 2017/18 nicht ausschließen. Außerdem ist zu beachten, dass es auf Grund der nassen Witterungsverhältnisse in 2017 auch vor November schon zu N-Austrägen gekommen sein muss. Die drei folgenden Sickerwasserperioden sind deutlich durch Trockenheit und Nachwirkungen des Dürrejahres 2018 geprägt. Sowohl eine verstärkte Mineralisation nach Wiederbefeuchtung des Bodens als auch die durch die Trockenheit verursachten niedrigen Erträge können den Nitratgehalt im Boden stark erhöhen. Die Ergebnisse aus den untersuchten drei Sickerwasserperioden können deshalb nur eingeschränkt verallgemeinert werden. Eine Fortführung der Untersuchungen ist wünschenswert.

Außerhalb der Perioden mit Sickerwasserbildung findet im Prinzip keine weitere Verlagerung von Nitrat in tiefere Bodenschichten statt. Es ist im Gegenteil in der Vegetationsperiode von einem kapillaren Aufstieg des Bodenwassers und der Aufnahme von Nitrat durch die Pflanzenwurzeln auszugehen. Messergebnisse außerhalb der Sickerwasserperioden zeigen daher den Verlauf der Nitratgehalte im Boden. Durch kleinräumig heterogene Bodenunterschiede, Wasserbewegungen durch Grobporen (z. B. Regenwurmgänge) oder lateralen Wasserfluss kann dennoch auch außerhalb der berechneten Perioden Nitratverlagerung auftreten. Die große Bedeutung der Bodenheterogenität lässt sich an der hohen Streuung der Messwerte und den extrem unterschiedlichen Wassermengen in den Saugkerzen bei vergleichbaren Druckverhältnissen ablesen.

In anderen Untersuchungen wurde vereinfachend angenommen, dass die Nitratverlagerung mit dem Sickerwasser in Sandböden gleichmäßig über den gesamten Profilquerschnitt stattfindet, und nur bei bindigen Substraten von einem relevanten Einfluss präferenzierter Flüsse auszugehen sei (ANTONY et al., 2012). Für den Versuchsstandort, der nach den Substratanalysen den Sandböden zugeordnet werden kann, ist mit der vorliegenden Untersuchung das Gegenteil nachgewiesen. Sowohl Sickerwassermengen als auch die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser variieren kleinräumig sehr stark. ANTONY et al. stellten schon 2012 fest, dass beim Vergleich von Messwerten der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ab 90 cm mit anhand von gemessenen Herbst- N_{\min} -Gehalten (0–90 cm) kalkulierten Werten Abweichungen eher die Regel als eine Ausnahme sind. Dennoch wird die Methode der Kalkulation zur Risikoabschätzung landwirtschaftlich bedingter N-Austräge nach wie vor propagiert. Die Vermutung liegt nahe, dass die bekannte N_{\min} -Methode, die für die Düngeberatung entwickelt wurde, mangels Alternative genutzt wird. Durch die Nutzung einer realen N_{\min} -Messung wird eine scheinbare Objektivität dargestellt. Zumindest für die Grund- und Endmoränenlandschaften mit ihren heterogenen Böden kann aus Herbst- N_{\min} -Gehalten nicht die verlagerte Nitratmenge berechnet werden.

In verschiedenen Forschungsprojekten wurde die prinzipielle Eignung der Methode Saugkerzen-Messungen zur Beschreibung von Nährstoffeinträgen in Grund-/Oberflächengewässer nachgewiesen (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN; BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT; LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN; BOBE et al.; HÄDRICH et al., 1977; HÖPER et al.; HETSCH et al., 1979; PETERS et al., 2005; DVWK, 1990; FOHRER et al., 2010; LANDES-UMWELTAMT BRANDENBURG). Aktuelle Sickerwassermonitoring-Messstellen wurden in Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt errichtet. Im westlichen Münsterland hat die Bocholter Energie- und Wasserversorgung GmbH in den Jahren 2012 und 2013 die Firma ecoTech mit dem Aufbau von acht Nitrat-Monitoringstationen unter landwirtschaftlichen Flächen beauftragt. Hier kommen Glas-Saugplatten zur gravimetrischen Gewinnung von Sickerwasser in 1,00 m Tiefe zum Einsatz. Diese Monitoringstationen wurden seit 2016 zum Sickerwassermonitoring-Messnetz für NRW ausgebaut und umfassen 18 Messstationen. Eine parallele Messstation wurde an einem Standort in Sachsen-Anhalt errichtet. Ergebnisse der benannten Monitorings sind bisher kaum recherchierbar (ECO-TECH). TAUCHNITZ und SCHRÖDTER (2018) beschrieben Nitratkonzentrationen in 60 cm Bodentiefe in vergleichbarer Höhe wie die in Gülzow gemessenen.

Ähnlich wie in Gülzow wurde in anderen Untersuchungen auf einem mecklenburgischen Grundmoränenstandort eine hohe räumliche Variabilität von Nitratkonzentrationen im Bodenwasser beobachtet (JANSSEN et al., 2013; KAHLE und MEHL, 2014). Diese Variabilität ist also für diese Standorte typisch und vermutlich auf präferenziale/laterale Wasserbewegungen im Boden oder längere Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Bodenzone zurückzuführen (HANNAPPEL et al., 2011). Voraussetzung für sinnvolle Ergebnisse ist hier eine an die vorliegende Bodenheterogenität angepasste Anzahl von Messpunkten. Diese ist in den Grund- und Endmoränenlandschaften Mecklenburg-Vorpommerns ungleich höher anzusetzen als beispielsweise in den Lößregionen anderer Bundesländer. Den hohen Einfluss der Standortbedingungen, die schon in geringer Entfernung bedeutsam sein können, belegen auch BEDNORZ et al. (2016) sowie RÄBINGER et al. (2020).

Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass diese hohe Variabilität der Nitratkonzentration schon in nur 60 cm Bodentiefe auftreten kann. Das belegen die punktuell aufgetretenen extrem hohen Nitratkonzentrationen, die hohe Varianz der Nitratkonzentration bei gleicher Düngung und Kulturart sowie Sickerwassermengen weit über den Niederschlagsmengen an einzelnen Messpunkten in Gülzow. Die Nitratkonzentration wird also auf entsprechend heterogenen Standorten schon in der Unterkrume nicht nur durch die direkt darüber liegende Nutzung, sondern z. T. auch stark durch präferentielle sowie laterale Wasserströme beeinflusst.

Insgesamt sind die standort- und witterungsbedingten Einflüsse auf Nitratkonzentration und -fracht höher als die durch ackerbauliche Nutzung veränderbaren (BEISECKER, 2021). Beispielhaft wird dies auch an der Gegenüberstellung einzelner Parameter auf Flächen ohne N-Düngung aus unterschiedlichen Regionen (Tab. 4) sichtbar.

Für den Verlauf der Nitratkonzentration während der Sickerwasserperiode wird in der Literatur bei der Nutzung von vereinfachten Modellen z. T. davon ausgegangen, dass der Nitratgehalt im Boden mit der N-Düngung im Frühjahr ansteigt, im Spätfrühjahr am höchsten ist und danach bis zum Vegetationsende im Wesentlichen abfällt (FINCK und GUTSER, 2012). Diese Annahme trifft zumindest für den untersuchten Standort nicht zu. Im Gegenteil, mit einset-

zudem Pflanzenwachstum im Frühjahr fällt der Nitratgehalt im Bodenwasser trotz N-Düngung und Zunahme der N-Mineralisation aus dem Bodenvorrat. Nur Flächen ohne Bewuchs – im Versuch die Flächen unter abgefrorener Zwischenfrucht – weisen im Frühjahr steigende Nitratgehalte im Bodenwasser auf. Höchste Nitratgehalte wurden dagegen regelmäßig vor und zu Beginn der Sickerwasserperiode ermittelt.

Nitratkonzentration in Abhängigkeit von der Kulturart

Die Häufigkeit hoher Nitratkonzentrationen ist je nach angebaute Kulturart sehr unterschiedlich. In allen Jahren wurden unter Winterweizen die meisten hohen Nitratkonzentrationen gemessen. Absteigend folgen Wintertriticale, Winterraps und Zwischenfrucht. In der Periode 2019/20 sind abweichend von dieser Reihenfolge die Nitratkonzentrationen auch unter Winterraps hoch, weisen eine hohe Spannweite auf und liegen weit über denen von Triticale (Abb. 14).

Die besondere Bedeutung von Fruchtfolge und Zwischenfruchtanbau zur Reduzierung von N-Austrägen wird in Versuchsauswertungen unterschiedlicher Bundesländer betont (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT; ALBERS et al., 2020; FINCK und GUTSER, 2012; TRAUTZ et al., 2020). Während in den meisten Untersuchungen der Einfluss der während der Sickerwasserperiode angebaute Kulturart als wesentlich angesehen wird, interpretieren ALBERS et al. (2020) ihre Ergebnisse dahingehend, dass die angebaute Kulturart vor der Sickerwasserperiode entscheidend ist. Dort folgen nach Mais höhere N-Austräge als nach Winterroggen und -gerste. Hier könnten sich die besonderen Standortbedingungen (mehr Niederschlag, höhere Humusgehalte, langjährig hohe organische Düngung der Vorjahre) ausgewirkt haben. Das in der Regel geringe N-Aufnahmevermögen von nach der Silomaiserte gesättem Getreide könnte jedoch ebenfalls ausschlaggebend sein. Die Höhe der N-Konzentrationen und -Frachten in Gülzow lässt sich jedenfalls am besten mit dem N-Aufnahmevermögen im Herbst der während der Sickerwasserperiode angebaute Kulturart in Verbindung bringen. Genau wie bei SIELING und KAGE (2006) war die N-Auswaschung unter Weizen nach Raps am höchsten, während nach Weizen unter Zwischenfrucht immer die niedrigsten Nitratkonzentrationen gemessen wurden. Deutlich wurde die benannte Abhängigkeit an den Messwerten unter Raps in den verschiedenen Messperioden, an denen sich eine Parallelität zur Bestandesentwicklung erkennen lässt.

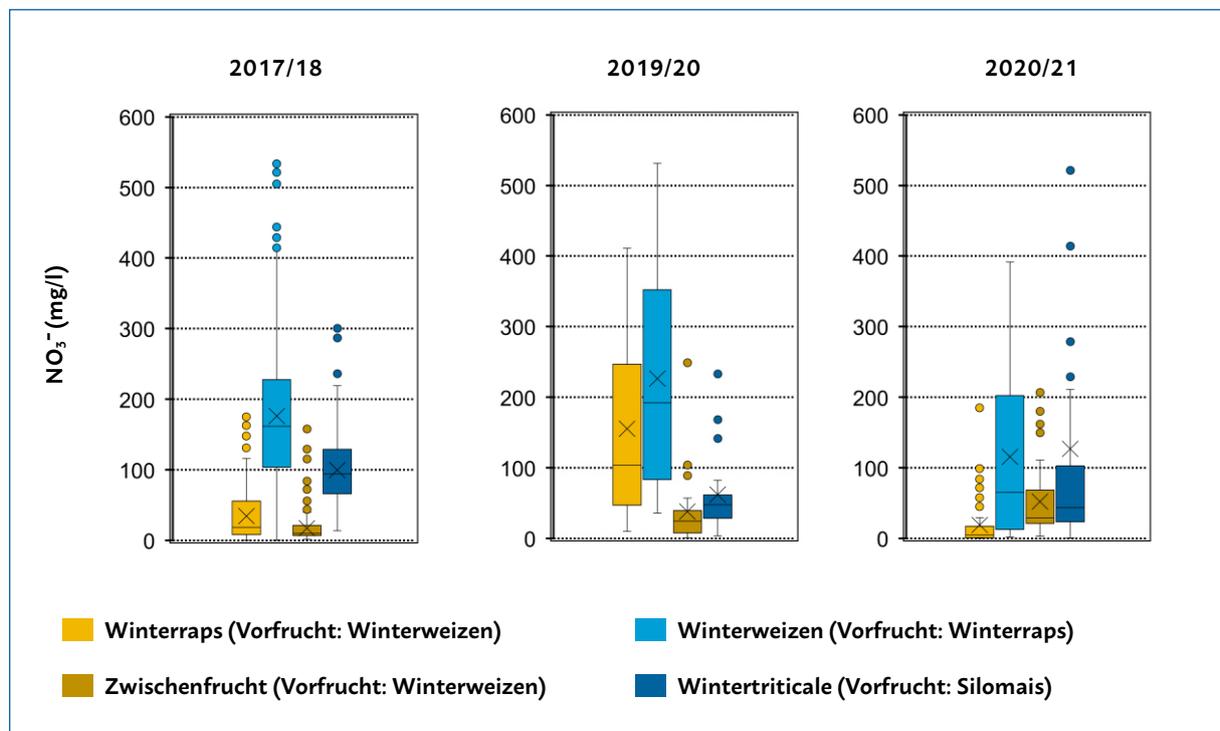


Abb. 14: Nitratkonzentration im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von der angebaute Kulturart, Messwerte aller Düngungsvarianten (x = Mittelwert, - = Median, boxplot = Interquartilsabstand, Whisker = 1,5-facher Interquartilsabstand, Punkte = Einzelwerte außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands), Gülzow 2017–2021

Nitratkonzentration in Abhängigkeit von der N-Düngung

Überraschend und anders als vielfach angenommen sind die Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit zur N-Düngungshöhe.

In der Sickerwasserperiode 2017/18 sind die Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten kleiner als in den beiden folgenden Perioden. Ursächlich können insgesamt hohe Niederschlags- und Sickerwassermengen 2017/18 sein, die zu einer Verdünnung der Nitratkonzentrationen führten. Die Messungen begannen allerdings erst zwei Wochen nach Abschluss der Einbauarbeiten der Saugkerzenanlage Mitte November. Es ist nicht ausgeschlossen, dass die Maxima zu diesem Zeitpunkt schon nach unterhalb der Messtiefe verlagert wurden. Hohe Werte 2019/20 und auch noch 2020/21 werden aber auch durch hohe N-Salden des Dürrejahres 2018 und des Trockenjahres 2019 mit beeinflusst worden sein.

Auffällig sind weiterhin ähnliche Nitratkonzentrationen unter Flächen ohne und mit 80 % N-Düngung in allen drei Perioden. Auch zwischen den Ergebnissen bei mineralischer und mineralisch-organischer mit 100 % N-Düngung lassen sich keine Unterschiede erkennen. Insgesamt ist die Spannweite der gemessenen Nitratkonzentrationen sehr hoch. Unter allen Varianten wurden in jedem Jahr sehr niedrige und sehr hohe Werte gemessen. Auch ohne N-Düngung traten Nitratkonzentrationen bis 300 mg/l auf und nicht selten wurde der Richtwert von 50 mg/l überschritten (Abb. 16).

Durch die natürlichen Standortunterschiede bedingt, gibt es regional unterschiedliche Ergebnisse zum Einfluss der Stickstoffdüngungshöhe auf die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser. Während in Niedersachsen nur bis zu einer maximalen N-Düngungshöhe von 100 kg/ha zu Silomais vertretbare Nitratkonzentrationen erreicht wurden, wurden in Schleswig-Holstein und Bayern auch bei deutlich höherer N-Düngung zu Silomais nur geringe bzw. tolerierbare Nitratbelastungen gemessen (BÜCHTER et al.; BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT). Die Beobachtung, dass sich der Einfluss der N-Düngungshöhe vor allem auf die Nitratkonzentration zu Beginn der Sickerwasserperiode auswirkt, trifft auch für den Standort Gülzow zu (TRAUTZ et al., 2020).

Es ist jedoch eher der mehrjährige N-Saldo einer Fläche als das N-Düngungsniveau, welches über eine Erhöhung des N-Pools im Boden zu einer höheren N-Mineralisation im Herbst und damit dem N-Austrag beiträgt. Dies würde auch die fehlenden Unterschiede zwischen den Varianten ohne und mit 80 % N-Düngung bzw. bei mineralischer und mineralisch-organischer mit 100 % N-Düngung erklären. Bei einer Gegenüberstellung der ermittelten N-Salden und der über die Fruchtfolge gemittelten Nitratkonzentration deutet sich ebenfalls die zweigeteilte Gruppierung der Ergebnisse an. In 60 cm Bodentiefe waren negative N-Salden mit mittleren Nitratkonzentrationen um 45 mg/l und einer geringeren Spannweite der Ergebnisse verbunden. Außerdem nahmen die mittleren Nitratkonzentrationen im Laufe der Untersuchungsjahre ab. Alle positiven N-Salden führten zu mittleren Nitratkonzentrationen um 100 mg/l und einer höheren Spannweite der Ergebnisse. Bei den Einzeljahresergebnissen sticht die Sickerwasserperiode 2019/20 mit erhöhten Mittelwerten hervor. Die Mittelwerte der Sickerwasserperioden 2017/18 und 2020/21 liegen hier dicht beieinander (Abb. 15). Die naheliegende Schlussfolgerung ist, dass mehrjährig negative N-Salden unabhängig von der N-Düngungshöhe im Laufe der Zeit zu abnehmenden Nitratkonzentrationen führen. Die positiven N-Salden der 100 %-N-Düngungsvarianten sind stark durch die sehr ungünstigen Witterungsbedingungen der Jahre 2016, 2018 und 2019 geprägt. Die Erwartung, dass künftig geringer positive N-Salden bei 100 % N-Düngung auch zu niedrigeren Nitratkonzentrationen führen, kann aus den vorliegenden Ergebnissen nicht sicher abgeleitet werden. Die Abnahme der Nitratkonzentrationen bei negativen mittleren N-Salden mit der Versuchsdauer spricht dafür. Mittlere Nitratkonzentrationen von ca. 20–60 mg/l scheinen bei Ackernutzung auf diesem Standort mit der gegebenen Fruchtfolge jedoch unvermeidbar (vgl. auch Tab. 4). Höhere N-Salden, die mit organisch-mineralischer Düngung im Vergleich zur rein mineralischen Düngung verbunden sind, scheinen sich (bislang) auf den N-Austrag nicht auszuwirken. Diese (vorläufige) Schlussfolgerung bezieht sich allerdings nicht auf überhöhte N-Düngungsmengen, die hier nicht geprüft wurden.

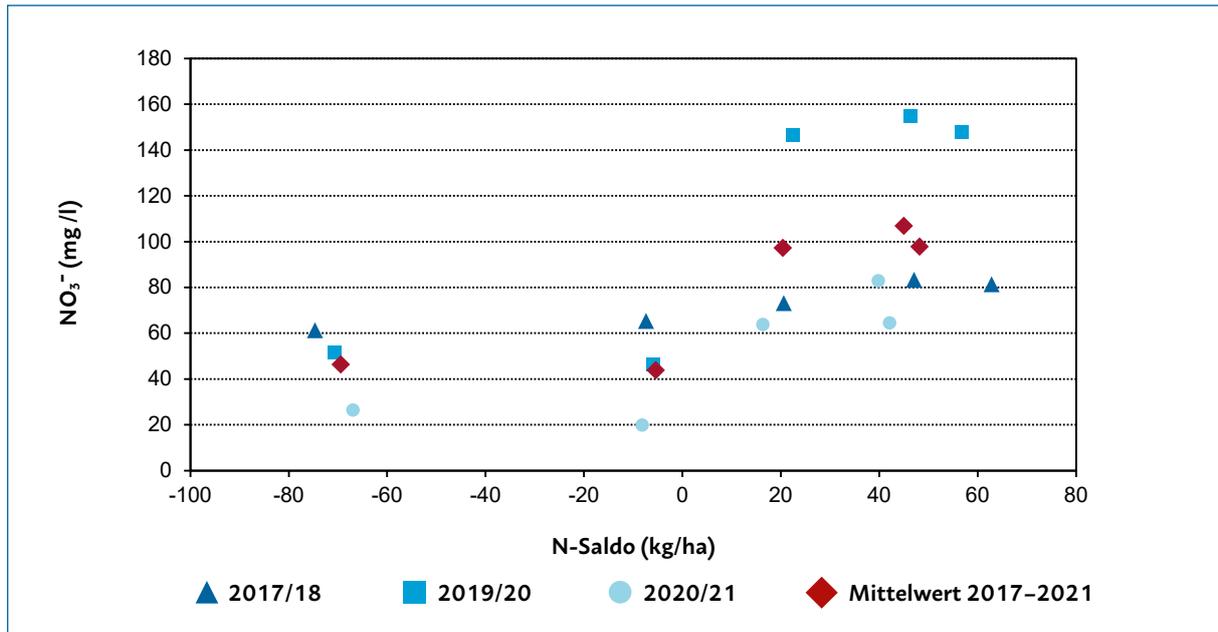


Abb. 15: Nitratkonzentration (mittlerer Medianwert über die Kulturarten, 60 cm Bodentiefe) in Abhängigkeit vom mittleren N-Saldo der Düngungsvarianten der Fruchtfolge (N-Saldo 2017/18: aus 2 Vorjahren, 2019/20 und 2020/21 aus je 4 Vorjahren, 2017–2021 aus 5 Vorjahren gebildet), Gülzow, 2016–2021

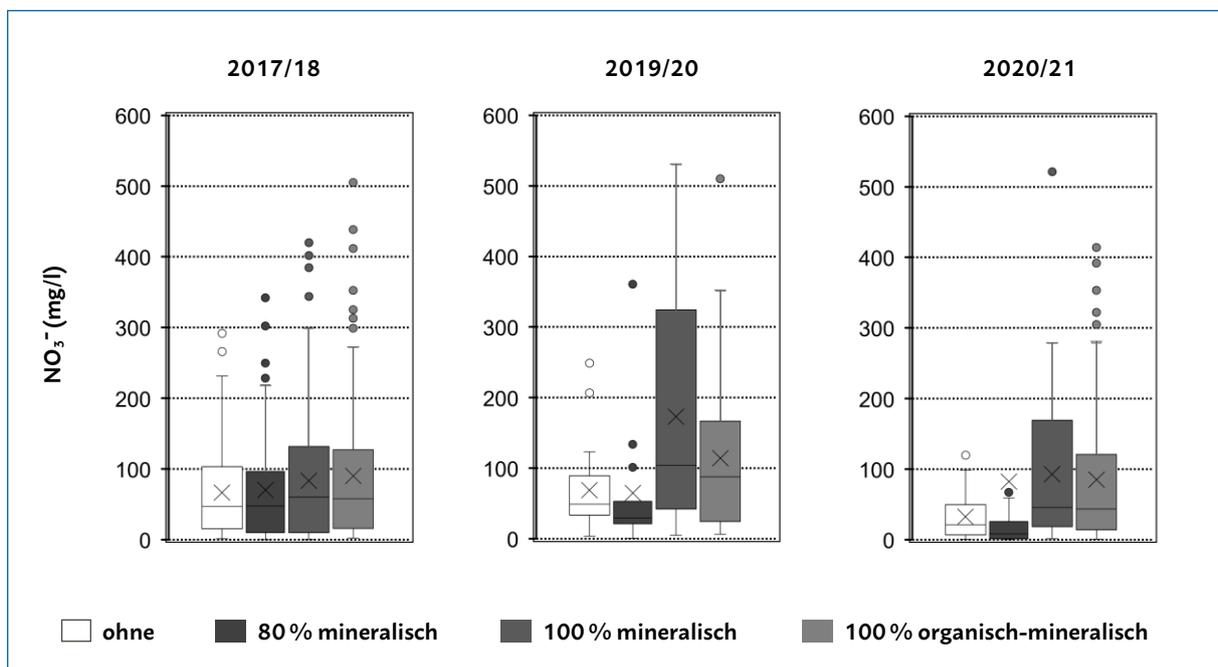


Abb. 16: Nitratkonzentration im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von der N-Düngung, Messwerte aller Kulturarten (x = Mittelwert, = Median, boxplot = Interquartilsabstand, Whisker = 1,5-facher Interquartilsabstand, Punkte = Einzelwerte außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands), PG 7 und 12 zusammengefasst, Gülzow 2017–2021

Tab. 4: Kennzahlen vergleichbarer Untersuchungen bei Ackernutzung ohne N-Düngung im Sickerwasser in anderen Bundesländern

Quelle	Bundesland	Jahre [Anzahl]	Messung in Bodentiefe [cm]	Mittlere N-Konzentration [mg/l]	Spannweite der N-Konzentration [mg/l]	Mittlere jährliche N-Fracht [kg/ha]	Spannweite der N-Frachten [kg/ha]	Trend N-Fracht [kg/ha]
ALBERS et al. (2020)	NI	25	80	31 ¹⁾	-	30	0-70	ca.-25
SIELING und KAGE (2006)	SH	9	90	-	-	ca. 35	-	ohne
TRAUTZ et al. (2020)	NI	3	80	117	7-152 ²⁾	62	3-66	ohne
LFA	MV	4	60	44 ^{3),4)}	0,5-292 ³⁾	13	0-40 ⁵⁾	ohne

1) im Winterhalbjahr, gewichtet mit Sickerwassermenge

2) Mittelwerte je Kulturart

3) Messwerte während der Sickerwasserperioden

4) gemittelte Medianwerte der Einzeljahre

5) 0-Wert bei fehlender Sickerung durch Trockenheit

Nitratfracht

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die aus den Nitratkonzentrationen und den modellierten Sickerwassermengen errechneten Nitratfrachten. Die Zwischenfruchtbestände nach dem vorangegangenen Anbau von Weizen weisen mit Abstand die geringsten N-Frachten auf (im Mittel < 10 kg/ha). In aufsteigender Reihenfolge folgen Wintererbsen, Wintertriticale und Winterweizen. Sowohl Raps als auch Zwischenfrüchte besitzen im Vergleich zu den Getreidearten ein höheres Nitrataufnahmevermögen im Herbst. Die Voraussetzung dafür sind gut entwickelte Bestände. Die v. a. trockenheitsbedingt schwache und ungleichmäßige Entwicklung der Wintererbsenbestände 2018/19 und 2019/20 spiegelt sich in höheren mittleren N-Frachten und scheinbaren Unterschieden zwischen den Düngungsvarianten wider. In den Sickerwasserperioden 2017/18 und 2020/21 lagen die N-Frachten unter Wintererbsen nicht über denen unter Zwischenfrüchten. Eine Zunahme der N-Fracht mit höherer N-Düngung war im Untersuchungszeitraum nur bei Wintergetreide und vor allem bei Winterweizen zu erkennen.

Die für Niedersachsen abgeleitete Erkenntnis, dass die N-Düngung zu Mais zur Reduzierung der N-Frachten ohne große finanzielle Einbußen auf 100 kg reduziert werden kann, ist auf ein dortiges hohes Mineralisierungspotenzial durch hohe Humusgehalte, langjährig hohe organische Düngung und mehr Niederschläge in der Vegetationsperiode zurückzuführen (ALBERS et al., 2020). Es ist bekannt, dass die messbare N-Düngewirkung zu Mais auch unter den Standortbedingungen in MV weit geringer als z. B. zu Wintergetreide ist. Trotzdem war der N-Saldo hier auch bei 100 % N-Düngung beim Silomaisanbau fast immer negativ. Im Mittel der Jahre 2016–2020 betrug er bei mineralischer N-Düngung -63 kg/ha (N-Düngung: 200 kg/ha abzüglich N_{\min}), bei zu Mais ausschließlich organischer N-Düngung (PG 7 und 12) -34 kg/ha (N-Düngung: ca. 175 kg/ha Gesamt-N). Eine Forderung nach einer weiteren Verringerung ist hier schwer abzuleiten.

Nach BEISECKER (2021) trägt die N-Düngung nur zu 10–15 % zur Höhe der N-Fracht bei. In den Untersuchungen von TRAUTZ et al. (2020) sind Fruchtfolge und Zwischenfruchtanbau die entscheidenden Stellgrößen für eine grundwasserschonende Bewirtschaftung, wenngleich ein N-Düngungseinfluss ebenfalls nachgewiesen wurde. In Gülzow betrug der Unterschied zwischen den Düngungsvarianten beim N-Austrag im Mittel der Fruchtfolge und Jahre ca. 10 kg/ha. Der Unterschied zwischen den angebauten Kulturarten war mit bis zu ca. 35 kg/ha mehr als doppelt so hoch (Abb. 18). Auch bei der Betrachtung der N-Fracht ist also die Kulturart bzw. die gewählte Fruchtfolge eine mindestens ebenso wichtige Einflussgröße wie die Höhe der N-Düngung.

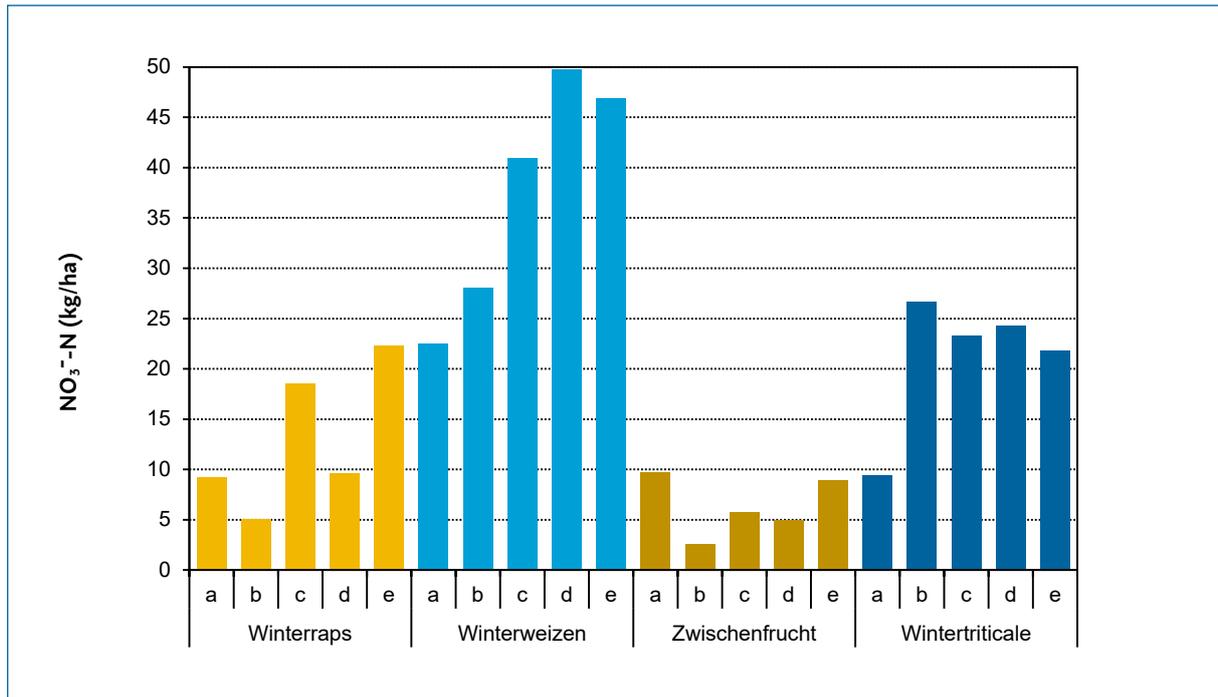


Abb. 17: Nitrat-Fracht in 60cm Tiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von N-Düngung und Kulturart, N-Düngung: a = ohne, b = 80 % mineralisch, c = 100 % mineralisch, d = 100 % organisch-mineralisch nur Frühjahr, e = 100 % organisch-mineralisch Herbst und Frühjahr (Mittelwerte 2017-2021)

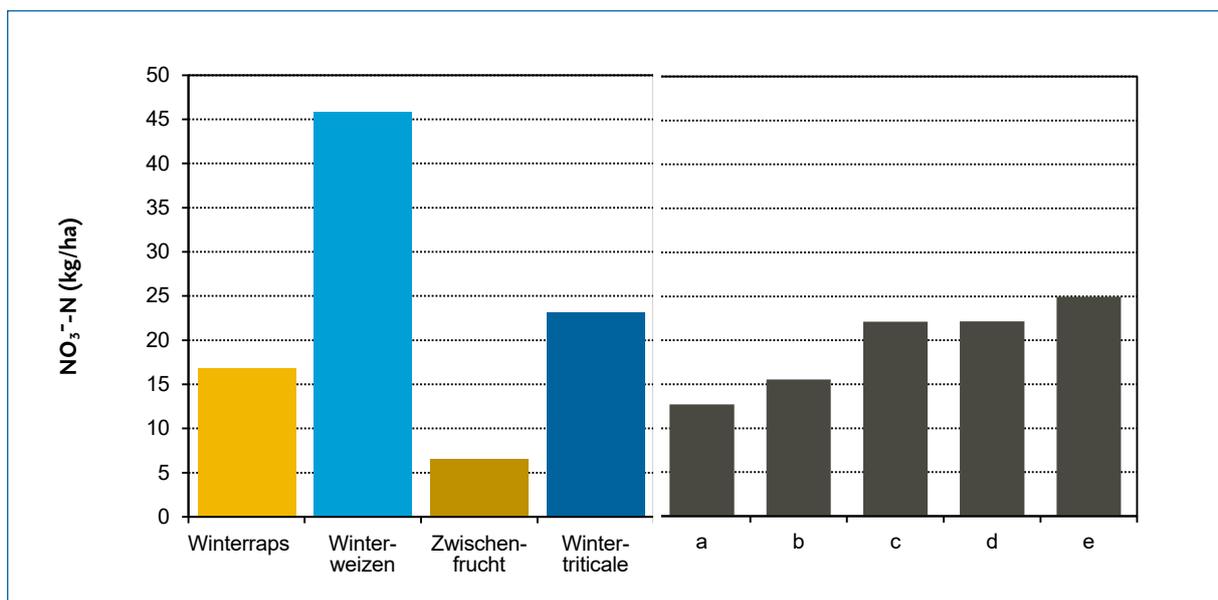


Abb. 18: Nitrat-Fracht in 60cm Tiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von Kulturart (N-Düngung c, d, e) bzw. N-Düngung: a = ohne, b = 80 % mineralisch, c = 100 % mineralisch, d = 100 % organisch-mineralisch nur Frühjahr, e = 100 % organisch-mineralisch Herbst und Frühjahr (Mittelwerte 2017-2021)

Schlussfolgerungen

Die Auswertung bezieht sich bisher nur auf vier witterungsbedingt sehr extrem unterschiedliche Jahre. Für eine gesicherte Einschätzung des standortbezogenen Nitrataustragsrisikos von Ackerflächen in der Grundmoränenlandschaft Mecklenburg-Vorpommerns sollten die Messungen fortgeführt und um punktuelle Messungen in Praxisbetrieben mit unterschiedlichen Anbausituationen ergänzt werden. Die Ergebnisauswertung ist daher vorläufig.

Die Ergebnisse bestätigen, dass mit dem Versuchsstandort eine repräsentative Fläche der Grundmoränenlandschaft in Mecklenburg-Vorpommern gefunden wurde. Durch die hier typischen heterogenen Bodenverhältnisse sind mehrfache Messwiederholungen in der Fläche schon für Untersuchungen in geringer Bodentiefe notwendig. Sickerwasser in > 60 cm Bodentiefe ist hier sehr stark durch präferentielle und laterale Bodenwasserbewegungen beeinflusst. Für Messungen, die acker- und pflanzenbauliche Einflüsse auf das Sickerwasser solcher Standorte nachweisen sollen, sind Probenahmetiefen von 1 m und mehr ungeeignet.

Die Sickerwassermenge wird stark von den Niederschlagsmengen und der Bodenart und nur wenig von der angebauten Kulturart bestimmt. Deshalb kann aus dem Vergleich gemessener Nitratkonzentrationen auf Unterschiede im Nitrataustrag geschlossen werden. Für die Quantifizierung der Nitratfracht ist eine Modellrechnung der Sickerwassermenge notwendig und sinnvoll.

Insgesamt sind die Nitratkonzentrationen in Zeit und Ort sehr variabel. Sehr hohe Werte treten meist im ersten Teil der Sickerwasserperiode auf und nehmen zu Ende der Sickerwasserperiode stark ab. Die standort- und witterungsbedingten Einflüsse auf Nitratkonzentration und -fracht sind höher als die der ackerbaulichen Nutzungsintensität.

Mit Ackerbau ist das Risiko von Nitratausträgen unvermeidbar verbunden. Dabei spielt der mehrjährige N-Saldo eine Rolle. Bei Einhaltung der Düngeverordnung hat die Kulturart jedoch einen größeren Einfluss. Es ist vor allem das N-Aufnahmevermögen der Pflanzen im Herbst entscheidend. Kulturen mit hohem N-Aufnahmevermögen (gut entwickelte Zwischenfruchtbestände, Wintererbsen) können die Nitratkonzentration im Sickerwasser unter die angestrebten Grenzwerte absenken, wohingegen unter Winterweizen auch bei reduzierter Düngung erhöhte Konzentrationen nicht zu vermeiden sind. Eine zielorientierte Strategie zur Verringerung der NO_3^- -Auswaschung in einer Region sollte den Anbauumfang der Kulturarten einbeziehen.

Es ist der mehrjährige N-Saldo einer Fläche und nicht das N-Düngungsniveau, welches über eine Erhöhung des N-Pools im Boden zu einer höheren N-Mineralisation im Herbst und damit dem N-Austrag beiträgt. Wenn die Obergrenzen nach Düngeverordnung nicht überschritten werden, ist hierbei vor allem wesentlich, ob ein mehrjährig positiver N-Saldo vorliegt oder nicht. Die Höhe der N-Austräge ist bei mehrjährig negativen N-Salden nicht von deren absoluter Höhe abhängig. N-Austräge bei mehrjährig positiven N-Salden sind größer als bei negativen N-Salden, aber auch hier scheint die absolute Höhe weniger wichtig. Auch langjährig ohne N-Düngung können in Abhängigkeit der angebauten Kultur trotz negativer N-Salden der vorherigen Jahre erhöhte Nitratkonzentrationen > 50 mg/l und relevante Nitratausträge auftreten.

Organisch-mineralische Düngung ist bei fachgerechter Anwendung nach den bisherigen Versuchsergebnissen im Vergleich zur rein mineralischen N-Düngung nicht mit höheren Nitratkonzentrationen und N-Austrägen verbunden.

Die Ergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass Düngungsbeschränkungen zumindest kurz- und mittelfristig nicht ausreichen, um die Sickerwasserqualität wesentlich zu verbessern. Ergänzende Maßnahmen sind dafür unbedingt notwendig.

Zum Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Nitratkonzentration können aus der aktuellen Auswertung keine Aussagen abgeleitet werden.

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).
- Antony, F.; Gödecke, B.; Hagemann, K. (2012): Untersuchung des mineralischen Stickstoffs im Boden. Empfehlungen zur Nutzung der Herbst-Nmin-Methode für die Erfolgskontrolle und zur Prognose der Sickerwassergüte. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Grundwasser, 8).
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Nitrat- und Phosphorbelastung des Sickerwassers bei Acker- und Grünlandnutzung. <https://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/032132/index.php>
- Bednorz, D.; Tauchnitz, N.; Christen, O.; Rupp, H.; Meissner, R. (2016): The Impact of Soil Heterogeneity on Nitrate Dynamic and Losses in Tile-Drained Arable Fields. In: Water Air Soil Pollut (227-395).
- Beisecker, R. (2021): Empirischer Zusammenhang zwischen N-Flächenbilanzsalden, Herbst-N_{min}-Gehalten und der Stickstofffracht des Sickerwassers. Arbeitsfeld Lysimeter. online, 27.04.2021.
- BIOTA (2010): Ermittlung von Art und Intensität künstlicher Entwässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 102 S.
- Bobe, J.; Wachendorf, M.; Büchter, M.; Taube, F.: NO₃⁻-Konzentration. Vergleich der Nitratkonzentrationen im Grund- und Sickerwasser bei variiertem Grünlandbewirtschaftung auf sandigen Böden Norddeutschlands – Erste Ergebnisse. <https://www.grassland-organicfarming.uni-kiel.de/de/forschung/abgeschlossene-projekte/karkendamm/24>
- Büchter, M.; Wachendorf, M.; Taube, F.: Nitratwaschung. Nitratwaschung unter Silomais in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsform und der N-Düngungsintensität – Ergebnisse aus dem N-Projekt Karkendamm. <https://www.grassland-organicfarming.uni-kiel.de/de/forschung/abgeschlossene-projekte/karkendamm/32>
- DVWK (Hrsg., 1990): Gewinnung von Bodenwasserproben mit Hilfe der Saugkerzen-Methode. Parey, Hamburg.
- DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) (Hrsg.) (2012): Reduktion der Stoffeinträge durch Maßnahmen im Drain- und Gewässersystem sowie durch Feuchtgebiete. Hennef, 86 S.
- eco-tech: Nitratmonitoring – Innovatives Großprojekt in NRW. https://www.ecotech.de/produkt/nitrat_monitoring_im_sickerwasser
- 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.
- Fohrer, N.; Schimming, C.-G.; Neger, R. (2010): Boden-Dauerbeobachtung Schleswig-Holstein: Auswertung der Projektergebnisse im Hinblick auf Aussagen zu Veränderungen von Böden, Aussagefähigkeit und Optimierung der eingesetzten Untersuchungsverfahren. Abschlussbericht „Auswertung BDF in Schleswig-Holstein“. https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/B/boden/Downloads/Broschuere.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- GeoPortal.MV (2021): Digitales Orthofoto 2016. GAIA-MVprofessional – GeoPortal Mecklenburg-Vorpommern. Online verfügbar unter <https://www.geoportal-mv.de/portal/Geodatenviewer/GAIA-MVprofessional>.
- Hädrich, F., K. Stahr u. H.W. Zöttl (1977): Die Eignung von Al₂O₃-Keramikplatten und Nickel-Sinterkerzen zur Gewinnung von Bodenlösungen für die Spurenelementanalyse. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch., 25, 151-162.

Hannappel, S.; Zeilfelder, S.; Lemke, G.; Schwertfeger, B (2011): Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung nach der DIN 19732 für Mecklenburg-Vorpommern.

Hetsch, W., F. Beese u. B. Ulrich (1979): Die Beeinflussung der Bodenlösung durch Saugkerzen aus Nickel-Sintermetall und Keramik. Zeitschrift Pflanzenernährung und Bodenkunde, 142, 29-38.

Höper, H.; Fier, A.; Schäfer, W.: Stickstoffüberschuss und -eintrag in das Grundwasser. Geozentrum Hannover. www.lbeg.niedersachsen.de/download/67122/Stickstoffueberschuss_und_-eintrag_in_das_grundwasser_Dr._H._Hoeper_u._Dr._W._Schaefer.pdf

Janssen, M.; Frings, J.; Lennartz, B. (2013): Haben Gewässerrandstreifen an einem gedrähten Ackerstandort einen Einfluss auf die Nitratkonzentrationen im Grundwasser? – Eine Prozessstudie auf Feldebene in Mecklenburg-Vorpommern. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 57 (2), S. 48–59. Online verfügbar unter DOI: 10.5675/HyWa_2013,2_1.

KA 4 (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung.- Hrsg.: Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämtern und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland, 4. Auflage, 392 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

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

Kahle, P.; Thiemeyer, B.; Deutsch, B.; Lennartz, B. (2007): Untersuchungen zum Stickstoffaustrag über Drainung in einem nordostdeutschen Tieflandseinzugsgebiet. – Wasserwirtschaft 06/2007: 25–29.

Kape, H. E.; Lehmann, E.; Koch, F. (2012): Reduzierung diffuser Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft – Handlungsempfehlungen zu produktions- und düngetechnischen Maßnahmen. Fachberatung Wasserrahmenrichtlinie und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <http://www.wrrl-mv-landwirtschaft.de/sites/default/files/downloads/4-Fachinfo-Ma%C3%9Fnahmen-MELA.pdf>.

Klehr, W.; Zachow, B.; Miegel, K. (2020): Ermittlung von Daten des Wasserhaushaltes an der Lysimeteranlage Groß Lüsewitz. Jahresbericht 2019. Unveröffentlicht.

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2014): 25 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Schleswig-Holstein. ISBN: 978-3-937937-75-5.

Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2015): Das Landesmessnetz zur Güteüberwachung des Grundwassers in Mecklenburg-Vorpommern – Untersuchungsergebnisse 2007–2013 und Bewertung des chemischen Zustandes. https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/schadstoffbelastung_des_grundwassers_2015.pdf

Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2021): Methoden und Bewertung M-V – Wasserrahmenrichtlinie in Mecklenburg-Vorpommern. Online verfügbar unter <https://www.wrrl-mv.de/service/dokumente/methoden-und-bewertung-m-v/>.

Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.) (2004): Fachinformation des Landesumweltamtes Nr. 4. Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg. Nationale und internationale Sachstandsrecherche Praxiserprobte und innovative Direkt/in situ-Probennahmeverfahren für Grund-, Sickerwasser und Bodenluft im Rahmen der Altlastenbearbeitung. <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/ueber-uns/veroeffentlichungen/detail/~01-01-2004-innovative-probennahmeverfahren-wasser-bodenluft-fachinformation-altlastenbearbeitung#>

Landwirtschaftskammer Niedersachsen: Sickerwasseruntersuchungen durch das LBEG. <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/77/nav/1667/article/29940.html>

Mehl, D.; Steinhäuser, A.; Koch, F.; Küchler, A. (2009): Regionalisierung der Nährstoffbelastung in Oberflächengewässern in Mecklenburg-Vorpommern. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 53 (5): 336-342.

Peters, A.; Germer, K.; Durner, W. (2005): Sickerwassererfassung – Ein Vergleich von Geräten unterschiedlicher Bauart. In: 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, 5. und 6. April 2005. Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, S. 1–6.

Schwarz, A.; Bischoff, W.-A. (2017): Besteht ein Zusammenhang zwischen dem Herbst- N_{\min} -Wert und der gemessenen Nitratauswaschung? In: Horizonte des Bodens. Tagungsband zur Jahrestagung der DBG. Göttingen, 02.–07.09.2017. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (DBG).

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.

Steffens, R.; Ebert, S.; Schrödter, M. (2017): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Sachsen-Anhalt. In: VDLUFA-Schriftenreihe. Kongressband 2017. VDLUFA.

Tauchnitz, N.; Schrödter, M. (2018): Bodenwassermessplatz Bernburg (Informationen der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau).

Trautz, D.; Beiküfner, M.; Vergara, M.; Kohlbrecher, M.; Kühling, I.; Siuts, H.; Müller, S. (2020): Modell- und Pilotprojekt zur Ermittlung von Grundlagen für die Umsetzung ordnungsrechtlicher Stickstoffdüngungsbeschränkungen am Beispiel des Wasserschutzgebietes Belm-Nettetal im Landkreis Osnabrück. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Grundwasser, 44). https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/grundwasser/veroeffentlichungen/publikationsreihe_grundwasser/veroeffentlichungen-zum-thema-grundwassertrinkwasser-zum-downloaden-198537.html

UBA (Umweltbundesamt) (2009): Nährstoffeinträge in die Oberflächengewässer Deutschlands. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Anhang 1



Landesforschungsanstalt für
Landwirtschaft und Fischerei

Versuchsplan

„Organische Düngung in der Fruchtfolge“ 2015 - 2021

Bearbeiter: D. Buglowski, I. Bull

Versuchszeitraum: **2015-2021**

Versuchsort: Gülzow – Prützen

Fruchtfolge: **Winterraps – Winterweizen – ZWF – Mais – Wintertriticale (GPS)**

Versuchsnummer: 4076_G – Winterraps Forschungsnr.: 10.02
0176_G – Winterweizen Anlagejahr: Herbst 2015
5676_G – Mais 1. Rotation: 2016 - 2019
0576_G – Wintertriticale 2. Rotation: 2020 - 2023

Prüffaktor: A = N-Düngungsstufen (n = 12)
Wiederholungen: r = 3
Versuchsmaße: Teilparzelle (Saat): 10 m x 1,5 m
Teilparzelle (Ernte): 7,5 m x 1,5 m
Parzelle: 6 m x 10 m
Block: 30 m x 24 m
Feld ohne Randstreifen: 90 m x 24 m
Randstreifen: 3 m x 90 m

Gesamt: Versuch = 9720 m², je Kultur = 2430 m²

Versuchsumfang: 4 Kulturen x 12 Prüfglieder x 3 Wdhg. = 144 Parzellen
+ 18 Randparzellen zur Entnahme von Bodenproben

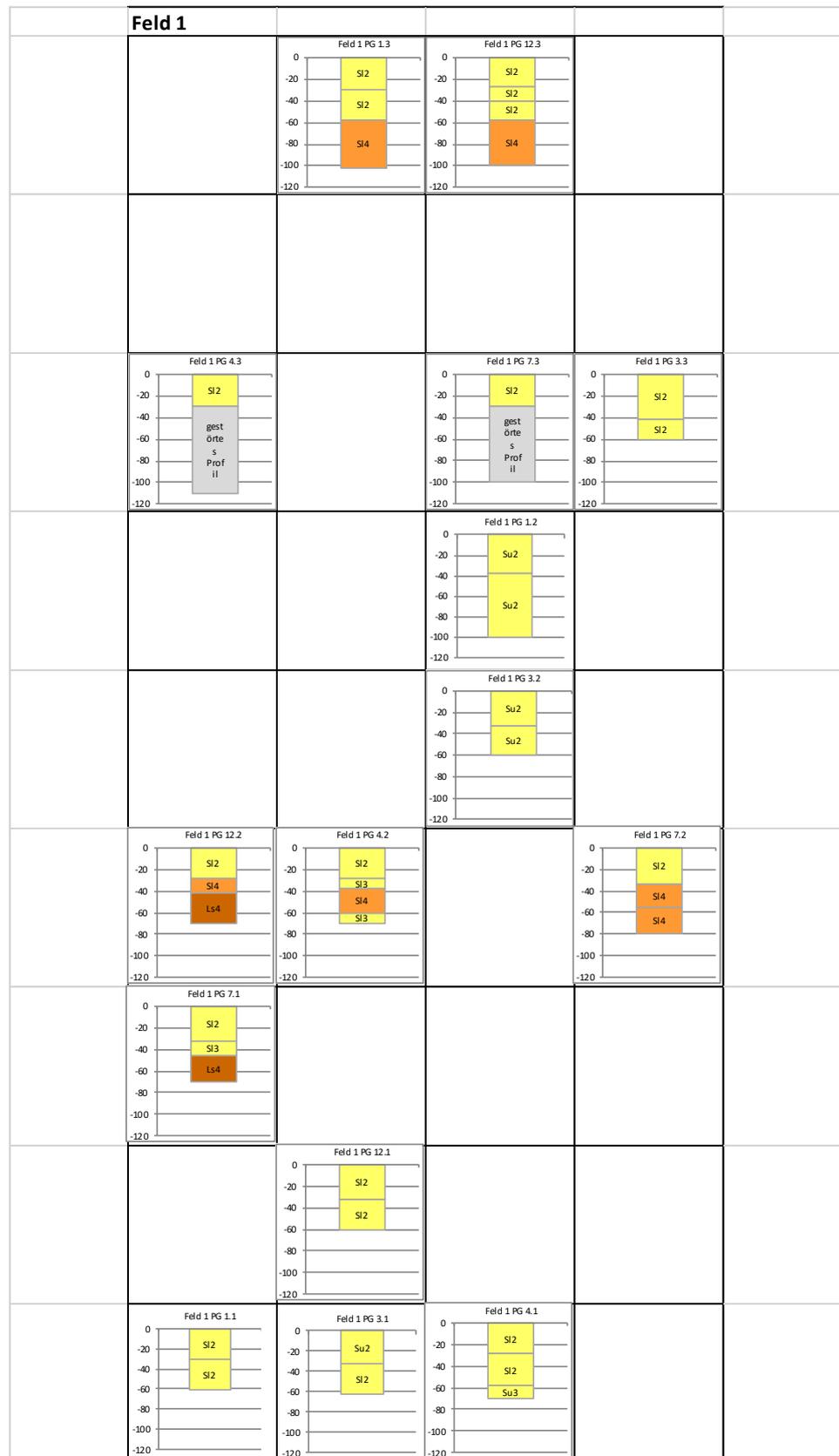
Versuchsfrage: Optimierung des Einsatzes von flüssigen organischen Düngemitteln
innerhalb der Fruchtfolge mit dem Ziel des Gewässerschutzes

Erhöhung des Mineraldüngeräquivalents von Gärresten durch
verminderte NO₃-Emissionen

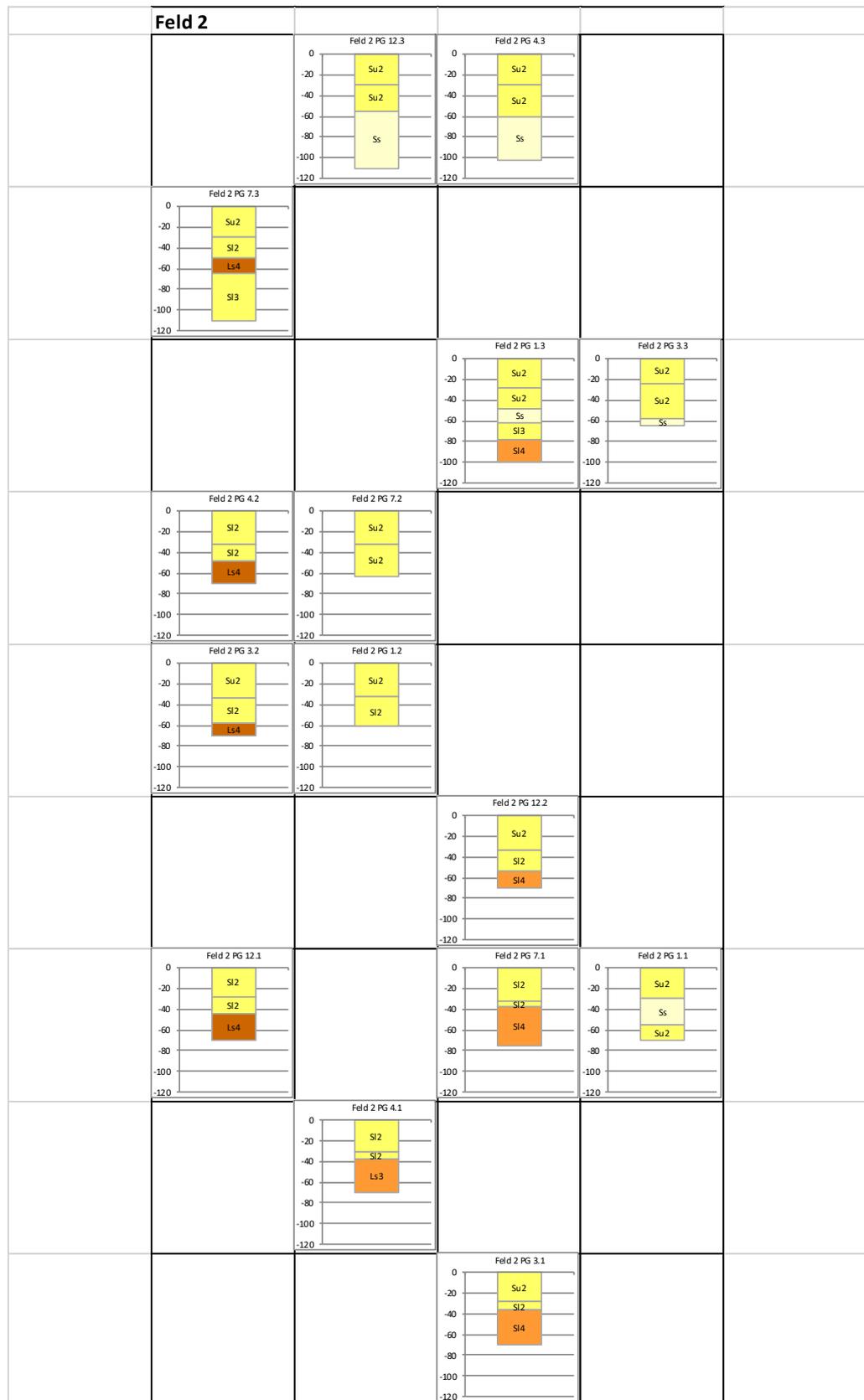
Bestimmung der N-Austragsgefährdung bei unterschiedlichen
Düngeterminen

Optimierung der Ausbringungsverfahren zur N-Verlustminimierung

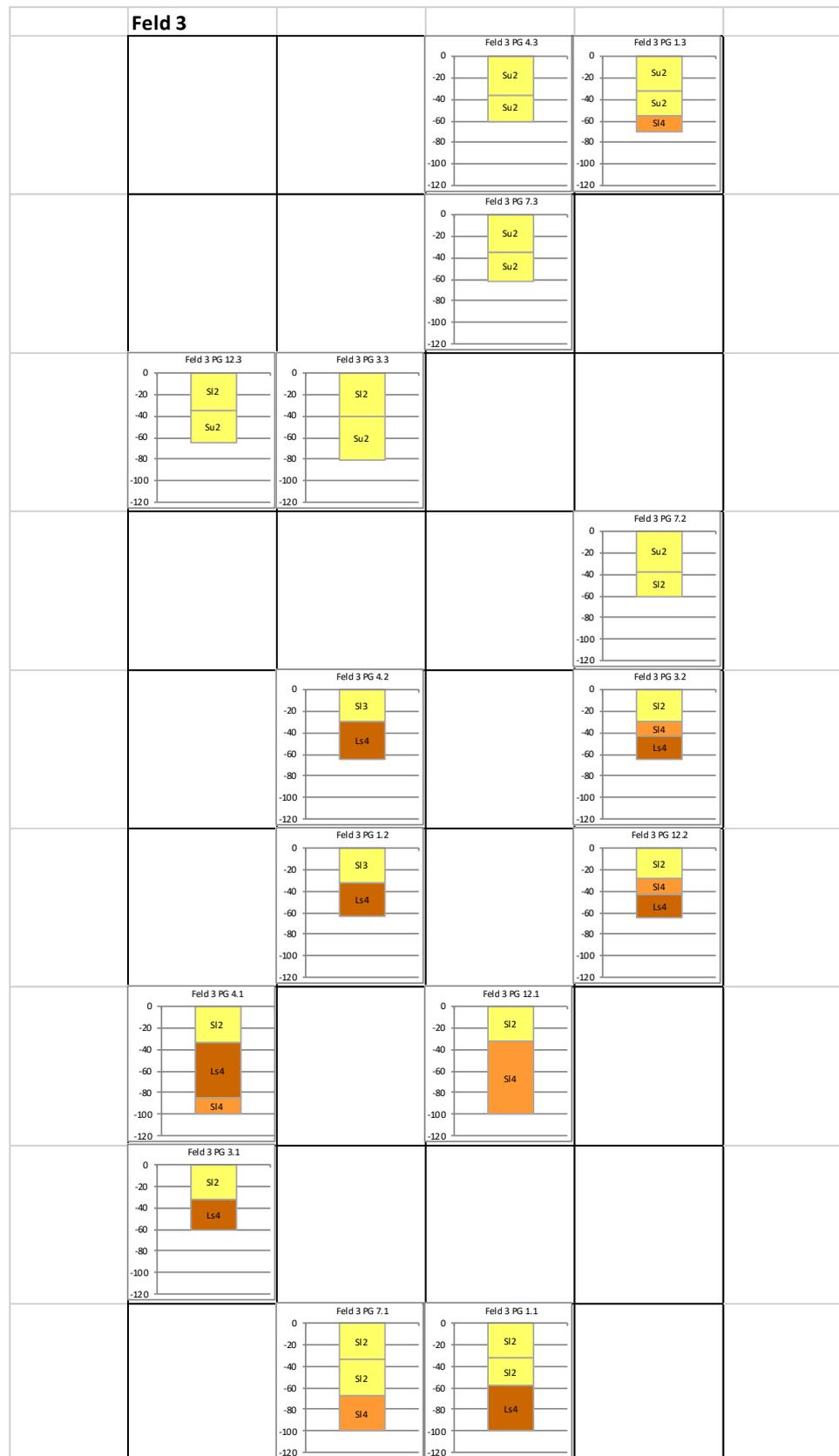
Anhang 2



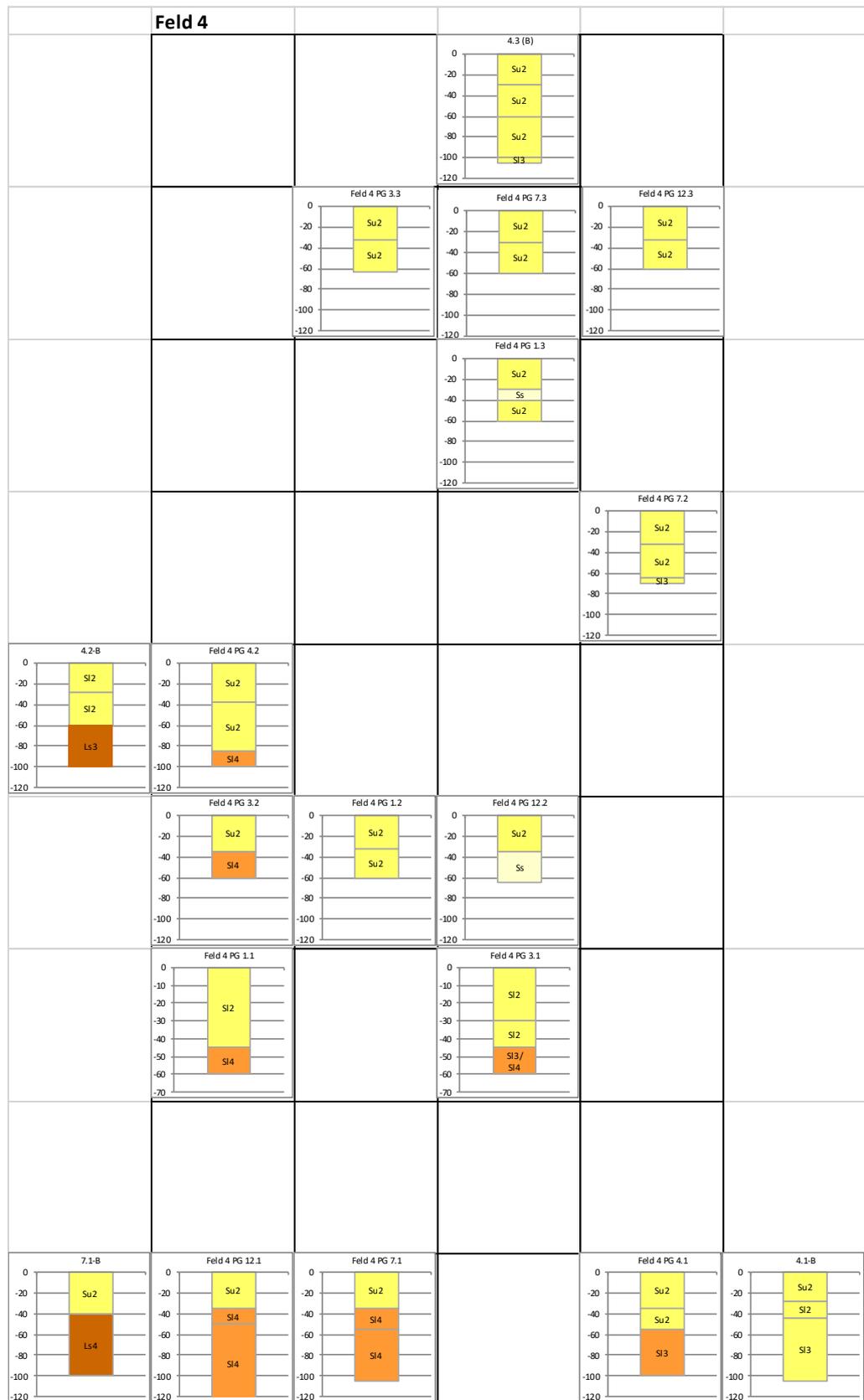
Anhang 2-A: Bodenprofile aller Parzellen mit Sickerwassermesspunkten, Feld 1



Anhang 2-B: Bodenprofile aller Parzellen mit Sickerwassermesspunkten, Feld 2

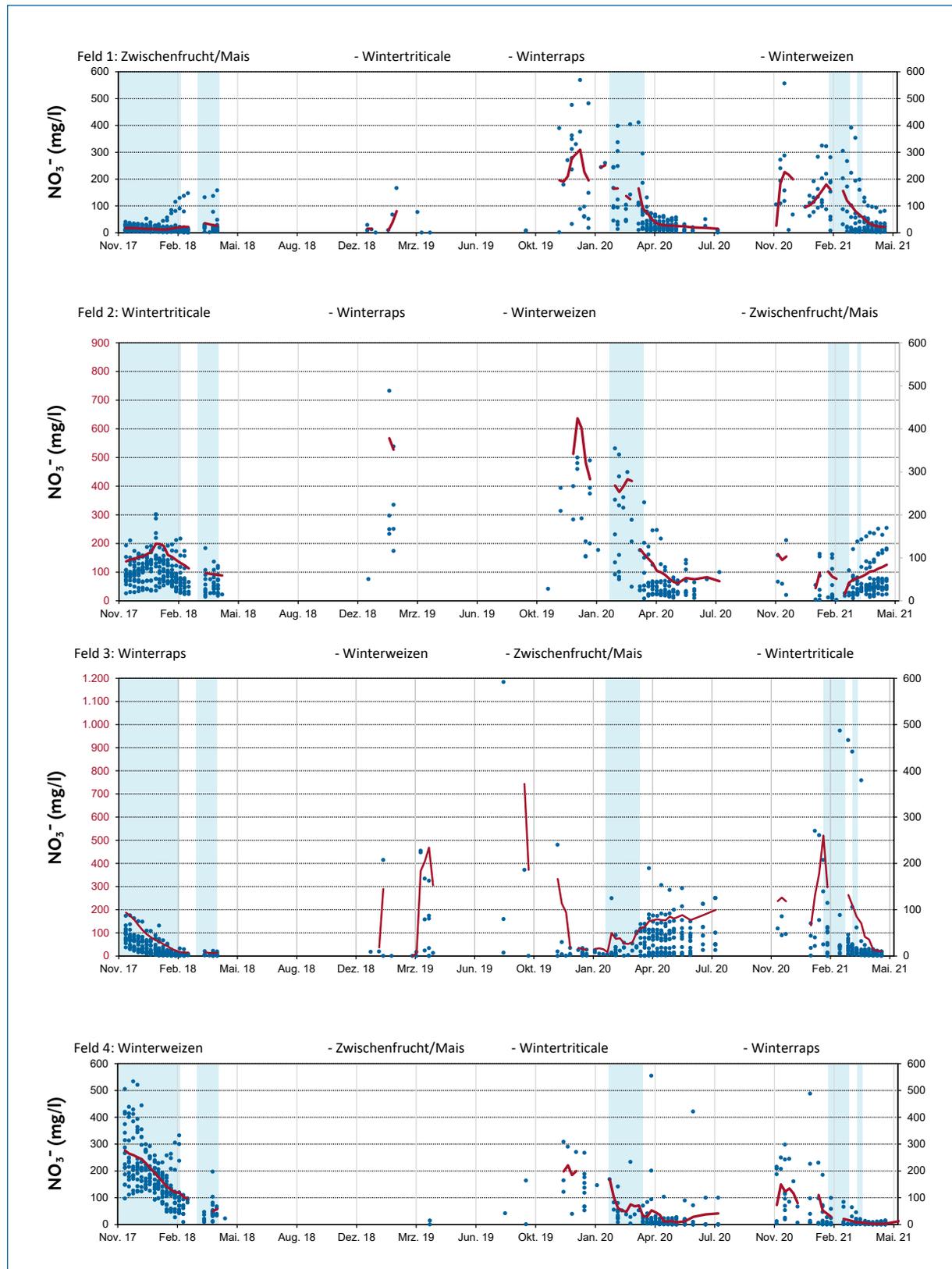


Anhang 2-C: Bodenprofile aller Parzellen mit Sickerwassermesspunkten, Feld 3



Anhang 2-D: Bodenprofile aller Parzellen mit Sickerwassermesspunkten, Feld 4

Anhang 3



Anhang 3: Nitratkonzentration im Bodenwasser in 60 cm Bodentiefe auf den vier Versuchsfeldern, dargestellt sind der Mittelwert und alle einzelnen Messwerte, wöchentliche Probenahme, Perioden mit Sickerwasserbildung sind hellblau hinterlegt.