

Heinz-Josef Koch¹, Andreas Windt², Stefan Mittler³, Melanie Hauer¹

Einfluss der Witterung auf Biomassebildung und N-Aufnahme von Zwischenfrüchten sowie deren Wirkung auf Bodenwasser- und N_{min}-Gehalt in Norddeutschland

Effect of weather variables on biomass production and N uptake of catch crops, and their influence on soil water and N_{min} content in Northern Germany

361

Zusammenfassung

Der Anbau von nicht winterharten Zwischenfrüchten mit Resistenz gegenüber dem Rübenzystennematoden erfolgt bundesweit auf etwa der Hälfte der nächstjährigen Zuckerrübenfelder. Die vorliegende Studie zielte darauf ab, (i) den Einfluss der Witterungsbedingungen im Zeitraum des Zwischenfruchtanbaus auf das Wachstum von Weißem Senf (*Sinapis alba*) und einer Artenmischung aus 7 Legumen und nicht-legumen Pflanzenarten zu analysieren. Darüber hinaus sollte die Wirkung dieser Zwischenfrüchte auf (ii) die Wasserverfügbarkeit für die Folgefrucht Zuckerrübe und (iii) das N-Auswaschungsrisiko über Winter im Vergleich zu einer Variante Strohmulch unter den Boden-, Klima- und Anbaubedingungen Norddeutschlands erfasst werden. Dazu wurden Feldversuche in 15 Umwelten durchgeführt (2012/13–2014/15, 5 Standorte pro Jahr).

In einer Korrelationsanalyse erwiesen sich die mittlere tägliche Niederschlagsmenge nach Aussaat der Zwischenfrucht bis Ende September und die Lufttemperatur um die Monatsmitte des Septembers als maßgebliche Einflussgrößen auf die oberirdische Biomassebildung der Zwischenfrüchte bis Anfang November. Diese beiden Parameter erklärten bis zu 70% der Varianz der Zwischenfrucht-Biomasse. Parameter, die den Aussaattermin bzw. die Länge der Vegetationszeit der Zwischenfrüchte unmittelbar beinhalteten, fanden keinen Eingang in die abgeleitete multiple Regression. Im Mittel senkte der Zwischenfruchtanbau den Bodenwassergehalt vor und

nach Winter nicht gegenüber Strohmulch, wenngleich er vor Winter in 7 Umwelten nach Strohmulch signifikant höher lag als nach Zwischenfrucht. Nach Winter traten in keiner Umwelt mehr Unterschiede auf. Somit war der Bodenvorrat von Wasser für die nachfolgenden Zuckerrüben durch den Anbau von im Spätherbst gemulchten Zwischenfrüchten gegenüber Strohmulch nicht verringert.

Sowohl der Senf als auch die Artenmischung senkten den Boden-N_{min}-Gehalt vor Winter deutlich ab. Damit ist zunächst von einem geringeren Risiko der Nitratauswaschung während der Wintermonate auszugehen. Dennoch kann bei einem frühen Häckseltermin sowie milder und nasser Winterwitterung eine N-Mineralisation stattfinden, die das Auswaschungsrisiko erheblich steigert.

In eine Gesamtbewertung des Zwischenfruchtanbaus in derzeit praxisüblicher Form müssen weitere Aspekte wie Nematodenkontrolle, Lachgasfreisetzung, Humusgehalt, Bodenstruktur, Erosionsschutz und Biodiversität einbezogen werden.

Stichwörter: Weißer Senf, Artenmischung, Wasserverbrauch, N-Mineralisation, Regressionsanalyse

Abstract

The cultivation of non-frost tolerant catch crops with resistance against the beet cyst nematode is performed on almost 50% of the German sugar beet fields. Our

Institut

Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ), Göttingen¹
Nordzucker AG, Braunschweig²
Syngenta Agro GmbH, Maintal³

Kontaktanschrift

Dr. Heinz-Josef Koch, Institut für Zuckerrübenforschung, Holtenser Landstr. 77, 37079 Göttingen, E-Mail: koch@ifz-goettingen.de

Zur Veröffentlichung angenommen

5. Oktober 2017

study aimed to elucidate (i) the effect of weather variables during the growth period of catch crops on the biomass production of white mustard (*Sinapis alba*) and a species mixture including 7 legume and non-legume plant species. In addition, the influence of such catch crops on (ii) the amount of plant available soil water for subsequent sugar beet, and (iii) the risk of nitrate leaching over winter compared to a reference without catch crop (straw mulch) under the soil, climatic and management condition of Northern Germany was investigated. Field experiments were conducted in 15 environments (2012/13–2014/15, 5 sites per year).

Correlation analysis revealed the mean daily rainfall after catch crop sowing until the end of September and the air temperature around mid-September as the main factors determining catch crop biomass production until beginning of November. The combination of both parameters explained up to 70% of the variation of the catch crop biomass. Parameters including the sowing date or the length of the growing season were not maintained in the multiple regression that was developed. Across all environments catch crop cultivation did not decrease the soil water content before and after winter compared to straw mulch, even if before winter it was significantly lower after straw mulch in 7 out of the 15 environments included. After winter such differences had completely disappeared. Thus, water consumption of catch crops mulched in late autumn did not shorten soil water supply for subsequent sugar beet crops.

Both, cultivation of white mustard and species mixture substantially decreased the soil mineral nitrogen content before winter, which may indicate a lower risk of N leaching over winter. Nevertheless, when mulched in late autumn followed by mild temperatures and high rainfall over winter, N mineralization from catch crop residues may substantially increase the risk of N leaching.

A comprehensive evaluation of the current practice of catch crop cultivation requires to take into account further aspects such as beet cyst nematode control, N₂O emission, humus content, soil structure, erosion control and biodiversity.

Key words: White mustard, Species mixture, Water consumption, N mineralisation, Regression analysis

Einleitung

Zwischenfrüchte werden nach der Ernte frühräumender Hauptfrüchte etabliert und nutzen die verbleibende Zeit bis zum Vegetationsende. Zur Verfügung stehen dafür winterharte und abfrierende Arten, die in der Fruchtfolge zumeist vor Sommerungen angebaut werden. Vor Zuckerrüben wurden in den vergangenen Jahren auf nahezu 50% der Schläge in Deutschland nicht winterharte und in die Stoppel der Getreidevorfrucht gesäte Zwischenfrüchte angebaut (TRIMPLER und STOCKFISCH, 2017a); dabei bestanden große regionale Unterschiede von ca. 20% in Ostdeutschland bis ca. 75% in Nord- und Westdeutschland

(TRIMPLER und STOCKFISCH, 2017b). Während in Süd- und Westdeutschland der Weiße Senf (*Sinapis alba*) die alleinig dominierende Zwischenfruchtart war, wurde in Nord- und Westdeutschland oftmals Örettich (*Raphanus sativus*) bevorzugt, insbesondere in Regionen, in denen Kartoffeln und Zuckerrüben in derselben Fruchtfolge angebaut wurden. Die für die nachfolgenden Zuckerrüben wichtigste Eigenschaft der angebauten Senf- und Örettichsorten ist deren Resistenz gegenüber dem Rübenzystemnematoden *Heterodera schachtii* (Schmidt), die zu einer Reduktion des *H. schachtii*-Besatzes im Boden und damit zu einem reduzierten Befallsdruck für die nachfolgende Zuckerrübe führen soll. *Heterodera schachtii* ist einer der bedeutendsten Parasiten der Zuckerrübe und kann zu erheblichen Ertragseinbußen führen (KENTER et al., 2014). Als weitere mögliche Vorteile des Zwischenfruchtanbaus werden genannt: zunehmender Humusgehalt, stabilere Bodenstruktur, erhöhte Wasserinfiltration, gesenkte Evaporation, Erosionsschutz, Unkrautunterdrückung, Stickstofffixierung (Leguminosen), erhöhte Nährstoffverfügbarkeit, verminderte Nährstoffauswaschung sowie erhöhte biologische Aktivität und Biodiversität (SNAPP et al., 2005; BLANCO-CANQUI et al., 2015). Insbesondere die letztgenannten Eigenschaften führten dazu, dass ein Anbau von Artenmischungen nach den Regeln des „Greening“ für die im Umweltinteresse genutzte Betriebsfläche mit dem Faktor 0,3 angerechnet werden kann (DirektZahlDurchfV, 2014).

Ein möglicher Nachteil des Zwischenfruchtanbaus kann der Wasserverbrauch des Bestandes sein, der Wassermangel für die nachfolgende Hauptfrucht auslösen oder verstärken kann (WORTMAN et al., 2012), insbesondere in semiariden Gebieten (UNGER et al., 2006). Untersuchungen zum Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit, in denen der Zwischenfruchtanbau unter praxisnahen Bedingungen für norddeutsche Boden- und Klimabedingungen abgebildet ist, sind derzeit nicht verfügbar. Ebenso fehlen aktuelle regionalspezifische Informationen zur Wirkung des Zwischenfruchtanbaus auf das Risiko der Nitratverlagerung. SHEPHERD (1999) konnte einen verringerten mineralischen N-Gehalt des Bodens (N_{\min}) im Herbst sowie eine verminderte N-Auswaschung auf einem englischen Sandboden zeigen. Skandinavische und nordamerikanische Studien bestätigten dies (TONITTO et al., 2006; HANSEN et al., 2015).

Die zuvor genannten möglichen Effekte des Zwischenfruchtanbaus werden maßgeblich von der Biomassebildung der Zwischenfrucht bestimmt, die von dem Angebot an den Wachstumsfaktoren Temperatur, Wasser und Einstrahlung abhängt (MONTEITH, 1977). Dieses wird von den Boden- und Witterungsbedingungen maßgeblich beeinflusst. Obwohl zahlreiche Untersuchungen zur Biomassebildung und zur N-Aufnahme von Zwischenfrüchten vorliegen (z.B. OHLANDER et al., 1996; BRANT et al., 2011; BRENNAN und BOYD, 2012; BJÖRKMAN et al., 2015; LIU et al., 2015), sind solche Daten speziell für abfrierende, in die Stoppel der Getreidevorfrucht gesäte Zwischenfrüchte, wie sie vor Zuckerrüben in Deutschland typisch sind, nur sehr selten (EICHLER-LÖBERMANN et al., 2008).

Zusammenhänge zwischen Witterungsparametern in spezifischen Abschnitten der Vegetationsperiode und der Biomassebildung wurden für landwirtschaftlich genutzte Hauptfruchtarten umfangreich beschrieben, z.B. von KENTER et al. (2006) für Zuckerrüben, sind jedoch für in Norddeutschland angebaute Zwischenfrüchte nicht verfügbar. Hinsichtlich der Zwischenfruchtarten und Anbaubedingungen ähnliche Untersuchungen liegen bislang nur für trocken-warme tschechische, kühle schwedische und kontinentale nordamerikanische Klimabedingungen vor (BRANT et al., 2011; BJÖRKMANN et al., 2015; LIU et al., 2015). Andere Studien fokussierten auf den Anbau von winterharten Zwischenfrüchten unter gemäßigten Klimabedingungen Neuseelands (TEIXEIRA et al., 2016) oder von nach Silomais im September gesäten Winterzwischenfrüchten in Schleswig-Holstein (KOMAINDA et al., 2016).

Vor diesem Hintergrund zielte die vorliegende Studie darauf ab, (i) den Einfluss der Witterungsbedingungen im Zeitraum des Zwischenfruchtanbaus auf das Wachstum von Weißem Senf (*Sinapis alba*) und einer Artenmischung aus 7 Legumen und nicht-Legumen Pflanzenarten zu analysieren. Darüber hinaus sollte die Wirkung dieser Zwischenfrüchte auf (ii) die Wasserverfügbarkeit für die Folgefrucht Zuckerrübe und (iii) das N-Auswaschungsrisiko über Winter im Vergleich zu einer Variante Strohmulch unter den Boden-, Klima- und Anbaubedingungen Norddeutschlands erfasst werden. Dazu wurden Feldversuche in 15 Umwelten durchgeführt (2012/13–2014/15, 5 Standorte pro Jahr). Diese Analyse schließt die Daten der zweijährigen, 10 Umwelten umfassenden Studie von HAUER et al. (2016) ein.

Material und Methoden

Versuchsanlage- und durchführung

Feldversuche wurden in den drei aufeinander folgenden Jahren 2012/13 – 2014/15 an jeweils 5 Standorten in Norddeutschland durchgeführt (Abb. 1). Im dritten Versuchsjahr entfiel der Standort Bornstedt, welcher durch einen weiteren Standort bei Göttingen ersetzt wurde (Göttingen B). Bis auf den Standort Uelzen (lehmgiger

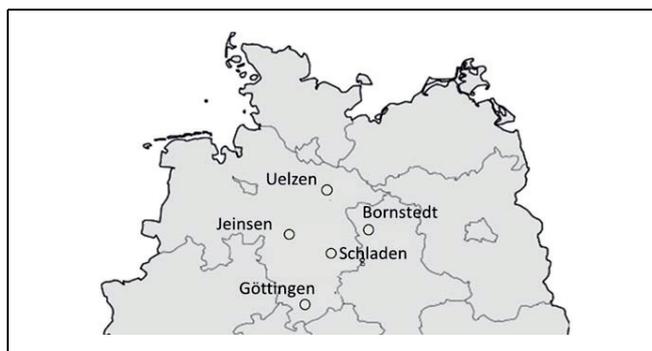


Abb. 1. Lage der Versuchsstandorte in Norddeutschland 2012/13 – 2014/15.

Sand) lagen ausschließlich tiefgründige Lössböden vor. Standort und Jahr wurden jeweils zu einer Umwelt zusammengefasst, so dass Versuche in 15 Umwelten durchgeführt wurden. In Tab. 1 ist für die einzelnen Umwelten die Witterung von der Aussaat der Zwischenfrucht bis zum 20.10. charakterisiert. Dieser Zeitraum wurde gewählt, da in ihm die Biomassebildung der Zwischenfrüchte maßgeblich stattfindet.

Vorfrüchte waren Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) oder Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.). Die darauffolgend angebaute Zwischenfrüchte waren ein nematodenresistenter Weißer Senf (*Sinapis alba*, Resistenznote 2) sowie eine Artenmischung, bestehend aus Alexandrinerklee (*Trifolium alexandrinum*), Blauer Lupine (*Lupinus angustifolius*), Felderbse (*Pisum sativum*), Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*), Ramtilkraut (*Guizotia abyssinica*), Rauhafer (*Avena strigosa*) und Saatwicke (*Vicia sativa*). Nur im zweiten Versuchsjahr war in der Mischung zusätzlich ein geringer Anteil an Weißem Senf enthalten. Als Kontrolle diente eine Strohmulchvariante, in der das auf laufende Ausfallgetreide im Herbst durch ein bis zwei Arbeitsgänge mit einem Grubber eingearbeitet wurde. Die Aussaat der Zwischenfrüchte erfolgte praxisüblich zwischen Ende Juli und Ende August (Tab. 1), nachdem der Boden ein- bis zweimal mit Grubber oder Scheibenegge bearbeitet worden war. Die Zwischenfrüchte sowie die Strohmulchvariante wurden mit 40 kg N ha⁻¹ gedüngt. Zwischen Ende Oktober und Mitte November wurde der Zwischenfruchtaufwuchs gehäckselt und auf der Bodenoberfläche belassen (Tab. 1).

Der Versuch war als Blockanlage mit drei Wiederholungen angelegt. Die Parzellen waren standortspezifisch 8–12 m lang und 9–12 m breit. In jeder Umwelt wurden die Witterungsparameter Lufttemperatur und Globalstrahlung in 2 m Höhe sowie Niederschlag in 1 m Höhe gemessen.

Pflanzenparameter

Zur Bestimmung des Frischmasseertrags der Zwischenfrüchte wurde kurz vor dem Häckseln eine manuelle Ernte und Wiegung des oberirdischen Aufwuchses (Biomasse) auf einer Fläche von 5 × 1 m² jeder Zwischenfruchtparzelle vorgenommen. Der Trockensubstanzgehalt wurde an einer repräsentativen Teilprobe erfasst, welche gehäckselt und vor sowie nach der Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C gewogen wurde. Der Trockenmasseertrag wurde aus Frischmasseertrag und Trockensubstanzgehalt berechnet. Das getrocknete Material wurde gemahlen und der C- und N-Gehalt im CN-Elementaranalysator (bis 2014: Micro-Dumas-Methode; CN Analyser NA 1500, Fisons, Rodano, Italien; ab 2015: FlashEA[®] 1112 Elemental Analyzer, Firma: Thermo Fisher Scientific SpA, Mailand, Italien) gemessen. Die N-Aufnahme des Aufwuchses wurde aus Trockenmasseertrag und N-Gehalt berechnet.

Bodenparameter

Zur Bestimmung des mineralischen Stickstoffgehalts (N_{min}) des Bodens wurden Bodenproben aus 0–90 cm

Tab. 1. Standorteigenschaften, Witterung während der Vegetationsperiode der Zwischenfrucht von Aussaat bis 20. Oktober des jeweiligen Jahres. (T = Mittlere Lufttemperatur in 2 m Höhe, NS = Niederschlagssumme in 1 m Höhe, GS = Summe der Globalstrahlung in 2 m Höhe) und Kennwerte des Zwischenfruchtanbaus (SE = Senf, MI = Artenmischung) vor Zuckerrüben in 15 Umwelten Norddeutschlands 2012/13 – 2014/15. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen innerhalb einer Umwelt bzw. im Mittel der Umwelten (Tukey-Test, $p \leq 0,05$; keine Angabe = Unterschiede nicht signifikant)

Umwelt (Ort/Jahr)	Bodenart [§]	Termin von		T (°C)	NS (mm)	GS (kW m ⁻²)	Biomasse (Mg TM ha ⁻¹) ^{&}		N-Aufnahme (kg N ha ⁻¹)	
		Aussaat	Häckseln				SE	MI	SE	MI
Bornstedt 12/13	Ut3	20.08.12	06.11.12	14,6	53	117	2,5a	1,9b	59,6a	49,5b
Schladden 12/13	Uls	30.08.12	02.11.12	12,5	48	–	1,1	1,1	32,0	35,0
Jeinsen 12/13	Ut3	24.08.12	02.11.12	12,9	117	109	2,0	1,6	57,1a	40,4b
Uelzen 12/13	Sl2	28.08.12	07.11.12	12,3	86	102	1,7	1,6	30,6	36,3
Göttingen A 12/13	Ut3	27.08.12	05.11.12	13,8	137	158	2,9	3,4	63,8	77,9
Bornstedt 13/14	Ut3	25.08.13	19.11.13	13,2	99	161	1,4	1,6	43,1	49,7
Schladden 13/14	Ut3	27.08.13	19.11.13	12,9	86	74	1,3	–	43,2	–
Jeinsen 13/14	Ut2	29.07.13	22.10.13	14,5	106	270	3,3	3,5	50,0b	90,1a
Uelzen 13/14	Su2	26.08.13	31.10.13	12,2	120	78	2,0	1,8	49,4	56,0
Göttingen A 13/14	Ut4	14.08.13	13.11.13	15,0	183	219	3,8	4,1	101,3b	121,7a
Göttingen B 14/15	Ut3	13.08.14	04.11.14	14,4	116	170	5,0	3,5	93,9	76,8
Schladden 14/15	Ut3	25.08.14	10.11.14	15,5	70	146	2,8	2,1	65,9	62,8
Jeinsen 14/15	Ut3	19.08.14	03.11.14	14,4	98	161	3,8a	2,0b	84,9a	67,3b
Uelzen 14/15	Sl2	24.07.14	30.10.14	15,4	147	287	2,8	3,2	61,3	80,9
Göttingen A 14/15	Ut4	04.08.14	04.11.14	14,7	146	227	3,2	1,9	58,6	46,7
Mittelwert	–	–	–	13,9	107	163	2,7a	2,4b	61,0	63,4

[§]des Oberbodens nach AD-HOC-AG BODEN, 2005; [&]TM = Trockenmasse

Tiefe in 30-cm-Schritten entnommen. Dazu wurden, aufgeteilt in drei Messwiederholungen, 15–21 Einstiche pro Parzelle mit dem Göttinger Bohrstock gemacht. Die Probenahme erfolgte im August vor dem Zwischenfruchtanbau, im November nach dem Zwischenfruchtanbau und im März des Folgejahres vor der Zuckerrüben Aussaat. Die Boden-N_{min}-Gehalte wurden nach der N_{min}-Methode unter Verwendung der CaCl₂-Extraktion bestimmt (VDLUF A 6.1.4.1; VDLUFA, 1997).

Der gravimetrische Wassergehalt wurde durch Trocknung von ca. 100 g feldfeuchtem Boden bei 105 °C bestimmt. Aus dem gravimetrischen Wassergehalt vor Zwischenfruchtanbau in der Bodentiefe 0–30 cm wurde die pflanzenverfügbare Wassermenge bei Aussaat in mm umweltspezifisch unter Berücksichtigung von Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt berechnet (WESSOLEK et al., 2009).

Statistische Auswertung

Die statistischen Analysen wurden mit der Software SAS (SAS 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) durchgeführt. Standort und Jahr wurden zu Umwelten zusammengefasst. Effekte wurden geprüft anhand gemischter linearer Modelle unter Berücksichtigung des Versuchsdesigns. Für alle Messparameter wurde nach Feststellung der Normalverteilung (PROC UNIVARIATE) der Zwischen-

fruchteffekt zunächst separat für jede Umwelt getestet (PROC MIXED). Anschließend wurde für die Parameter Biomasse und N-Aufnahme der Zwischenfrüchte nach logarithmischer Transformation und gegebener Normalverteilung eine zweifaktorielle ANOVA mit den fixen Effekten Umwelt, Zwischenfrucht und deren Wechselwirkung gerechnet. Bei signifikantem F-Wert ($p \leq 0,05$) wurde ein Tukey-Test ($p \leq 0,05$) angeschlossen. Für den Gesamtdatensatz der Parameter Wasser- und N_{min}-Gehalt des Bodens zu den einzelnen Terminen ließ sich aufgrund der Umwelten mit extrem niedrigen bzw. hohen Werten (z.B. Schladden 12/13, Uelzen 12/13) auch durch Transformationen keine Normalverteilung der Daten herstellen. Deshalb wurden die einfaktorischen Effekte von Umwelt und Zwischenfrucht separat mittels PROC NPAR1WAY durch den Kruskal-Wallis-Test geprüft und bei Signifikanz der Nemenyi-Test ($p < 0,05$) zur Unterscheidung von Mittelwerten angeschlossen.

In einer Korrelationsanalyse zwischen Witterungsparametern und Biomasse bzw. N-Aufnahme der Senf-Zwischenfrucht wurden zunächst Korrelationskoeffizienten nach Pearson (PROC CORR) berechnet. Als Witterungsparameter wurden neben der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge in 0–30 cm Bodentiefe bei Aussaat Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung der jeweiligen Umwelt verwendet (Tab. 2). Um mögliche Zusam-

Tab. 2. Witterungsparameter, die in der Korrelationsanalyse verwendet wurden

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
SaatTN24.7.	Datum der Aussaat in Tagen nach den 24.07. des jeweiligen Jahres (früheste Aussaat)	d
WGpflvfvZF30	Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser in 0–30 cm Bodentiefe bei Aussaat	mm
TMitSaat–20Okt	Tagesmittel der Lufttemperatur von Aussaat bis zum 20.10. des jeweiligen Jahres	°C
NSMitSaat–20Okt	Tagesmittel des Niederschlags von Aussaat bis zum 20.10. des jeweiligen Jahres	mm d ⁻¹
GSMitSaat–20Okt	Tagesmittel der Globalstrahlung von Aussaat bis zum 20.10. des jeweiligen Jahres	kW m ⁻² d ⁻¹
TMitSaat–30Sept	Tagesmittel der Lufttemperatur von Aussaat bis zum 30.09. des jeweiligen Jahres	°C
NSMitSaat–30Sept	Tagesmittel des Niederschlags von Aussaat bis zum 30.09. des jeweiligen Jahres	mm d ⁻¹
GSMitSaat–30Sept	Tagesmittel der Globalstrahlung von Aussaat bis zum 30.09. des jeweiligen Jahres	kW m ⁻² d ⁻¹
TSu1–5TNS	Lufttemperatursumme 1.–5. Tag nach Saat (Basistemperatur 0°C)	°C d
NS1–5TNS	Niederschlagssumme 1.–5. Tag nach Saat,	mm
GSSu1–5TNS	Globalstrahlungssumme 1.–5. Tag nach Saat	kW m ⁻²
TSu6–18TNS	Lufttemperatursumme 6.–18. Tag nach Saat (Basistemperatur 0°C)	°C d
NS6–18TNS	Niederschlagssumme 6.–18. Tag nach Saat	mm
GSSu6–18TNS	Globalstrahlungssumme 6.–18. Tag nach Saat	kW m ⁻²
TSu19–31TNS	Lufttemperatursumme 19.–31. Tag nach Saat (Basistemperatur 0°C)	°C d
NS19–31TNS	Niederschlagssumme 19.–31. Tag nach Saat	mm
GSSu19–31TNS	Globalstrahlungssumme 19.–31. Tag nach Saat	kW m ⁻²
TSu1–20Okt	Lufttemperatursumme 1.–20.10. (Basistemperatur 0°C)	°C d
NS1–20Okt	Niederschlagssumme 1.–20.10.	mm
GSSu1–20Okt	Globalstrahlungssumme 1.–20.10.	kW m ⁻²

menhänge in verschiedenen Zeiträumen der Vegetationsperiode des Senfs zu erfassen, wurden neben dem Saattermin für die Zeiträume mit variabler Länge (Aussaat bis 20.10., Aussaat bis 30.09. des jeweiligen Jahres) Mittelwerte der drei Witterungsgrößen berechnet. Für die gewählten Zeiträume mit einheitlicher Länge (1.–5., 6.–18. und 19.–31. Tag nach Saat, 1.–20.10.) wurden Summen gebildet. Bei in Abhängigkeit vom Saattermin variabler Länge des Zeitraums gibt der Mittelwert die Intensität des Witterungsparameters präziser wieder als dessen Summe, ohne von der Zeitdauer überprägt zu werden. Gleichzeitig erwies sich in einer ersten Gegenüberstellung der Mittelwert der Witterungsparameter enger mit der Biomasse korreliert als die aufsummierten Tageswerte (nicht dargestellt). Die Zeiträume wurde so gewählt, damit auch für die Umwelt mit dem spätesten Saattermin (Schladen 12/13, 30.08.) eine überlappungsfreie Abgrenzung zum Betrachtungszeitraum 1.–20.10. möglich war.

Im nächsten Schritt wurden multiple lineare Regressionen mit der Biomasse der Senf-Zwischenfrucht als abhängiger Variable berechnet, in die zunächst alle Witterungsparameter mit signifikantem Korrelationskoeffizienten eingesetzt wurden. Dabei wurde zur Vermeidung von in der Regel auftretenden Autokorrelationen aus jedem Betrachtungszeitraum jeweils nur der Parameter mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten verwendet. Schrittweise wurde der Parameter mit der jeweils höchsten Irrtumswahrscheinlichkeit aus dem Regressionsmodell entfernt, bis alle verbliebenen Parameter signifikant waren.

Das absolute Glied wurde auch bei fehlender Signifikanz stets beibehalten. Im abschließenden Schritt wurde der mittels der Daten der Senf-Zwischenfrucht kalibrierte Algorithmus genutzt, um berechnete Biomasse-Werte den gemessenen Werten der Artenmischung gegenüberzustellen. Die Regressionsanalysen wurden mittels der Software SigmaPlot (Version 13, Systat Software Inc., San Jose, CA, USA) durchgeführt, mit der auch die Abbildungen erstellt wurden.

Einfache lineare Korrelationen wurden zwischen Zwischenfrucht-Biomasse bzw. N-Aufnahme und Boden-N_{min}-Gehalt vor Winter bzw. dessen Verminderung durch Zwischenfruchtanbau gegenüber Strohmulch berechnet.

Ergebnisse

Die oberirdische Biomasse der Zwischenfrucht variierte in den einzelnen Umwelten von 1 bis 5 Mg TM ha⁻¹ und die N-Aufnahme von 30 bis 120 kg N ha⁻¹ (Tab. 1). Bei beiden Parametern trat eine signifikante Wechselwirkung der Faktoren Umwelt und Zwischenfrucht auf (Tab. 3), die mit signifikant höheren Werten nach Senf gegenüber Mischung in Bornstedt 12/13 und Jeinsen 14/15 einherging, während sich die Biomasse der Zwischenfruchtvarianten in den anderen Umwelten nicht unterschied. Im Mittel der Umwelten war die Biomasse des Senfs um 0,3 Mg TM ha⁻¹ signifikant höher als die der Mischung. Demgegenüber war die N-Aufnahme der Varianten im Mittel der Umwelten gleich. In den Umwel-

Tab. 3. F-Werte und Signifikanz des Einflusses von Umwelt, Zwischenfrucht und deren Wechselwirkung auf Biomassertrag und N-Aufnahme der Zwischenfrucht (ZF) sowie Wasser- und N_{\min} -Gehalt des Bodens (Mittel bzw. Summe 0–90 cm) bei Aussaat der Zwischenfrucht, vor Winter und nach Winter (nur Wassergehalt) in 14 bzw. 15 Umwelten Norddeutschlands 2012/13 – 2014/15

Varianzursache	ANOVA			Kruskal-Wallis					
	FG	Biomasse ZF	N-Aufnahme ZF	FG	Wassergehalt vor ZF	Wassergehalt vor Winter	Wassergehalt nach Winter	N_{\min} -Gehalt vor ZF	N_{\min} -Gehalt vor Winter
Umwelt (U)	13	23,1***	11,1***	14	***	***	***	***	***
Zwischenfrucht (ZF)	1	15,2***	0,0	2	ns	ns	ns	ns	***
U × ZF	13	3,7***	3,2**		nicht bestimmt				

Biomasse und N-Aufnahme ZF: ohne ZF Strohmulch, ohne Schladen 13/14

ten Jeinsen 13/14 und Göttingen A 13/14 traten signifikant höhere Werte bei der Mischung im Vergleich zum Senf auf (Tab. 1).

Aus dem Zeitraum von Aussaat bis zum 20.10. korrelierten die Mittelwerte von Lufttemperatur und Globalstrahlung signifikant mit der Senf-Biomasse, aus dem Zeitraum von Aussaat bis 30.09. das Mittel des Niederschlags und der Globalstrahlung (Tab. 4). Übereinstimmend damit ergaben sich signifikante Korrelationen der zuvor genannten Parameter zur Senf-Biomasse im Zeitraum 1.–5. Tag nach Aussaat. Demgegenüber war im Zeitraum 6.–18. Tag nach Aussaat kein Witterungsparameter mit der Biomassebildung des Senfs korreliert und im Zeitraum 19.–31. Tag nach Aussaat nur der Summenwert der Lufttemperatur. Dies galt auch für den Zeitraum 1.–20.10. Die Bildung eines Summenparameters aus pflanzenverfügbarem Bodenwasser in 0–30 cm Bodentiefe und Niederschlag in verschiedenen Zeiträumen ergab keine signifikante Beziehung zur Biomasse der Zwischenfrucht (nicht gezeigt). In fünf Fällen von signifikanter Korrelation zur Biomasse war auch die Korrelation des jeweiligen Witterungsparameters zur N-Aufnahme signifikant, in fünf weiteren Fällen war allerdings entweder die Beziehung zur Biomasse oder zur N-Aufnahme signifikant. Die Parameter N-Aufnahme und Biomasse korrelierten mit $r = 0,874$ signifikant miteinander. Darüber hinaus traten zahlreiche Korrelationen der Witterungsparameter untereinander auf (Tab. 4).

In der multiplen Regressionsanalyse erwiesen sich von anfangs fünf berücksichtigten Witterungsparametern und dem konstanten Glied zwei Witterungsparameter und das konstante Glied als signifikant (Abb. 2):

$$\begin{aligned} \text{Biomasse Senf (Mg ha}^{-1}\text{)} = & \\ -2,937^{***} + 1,16 \text{ Niederschlagsmittel Aus-} & \\ \text{saat-30.09. (mm d}^{-1}\text{)}^{***} & \\ + 0,021 \text{ Lufttemperatursumme 19–31 Tage nach} & \\ \text{Aussaat (}^{\circ}\text{C d)}^{***} & \quad (1) \\ (r^2 = 0,7^{***}, \text{RSME} = 0,649 \text{ Mg ha}^{-1}, \text{N} = 15). & \end{aligned}$$

Die Witterungsparameter der jeweiligen Umwelt wurden zur Berechnung der Biomasse der Variante Mischung (y) verwendet und der dort gemessenen Biomasse (x) gegenübergestellt (Abb. 3):

$$y = 0,779 + 0,77x; \quad r^2 = 0,63^{***}, \text{N} = 14. \quad (2)$$

In allen Zwischenfruchtvarianten stieg der gravimetrische Wassergehalt des Bodens im Mittel der Umwelten vom Probenahmetermin vor zum Termin nach Zwischenfruchtanbau an. Nachfolgend veränderte er sich bis zum Frühjahrstermin gegenüber dem Herbst nicht (Tab. 5). Die geringsten Wassergehalte wurden in Uelzen 12/13 und die höchsten in Schladen 12/13 gemessen. Während zum Termin vor Zwischenfrucht nur in den beiden Umwelten Göttingen A 13/14 und Uelzen 14/15 uneinheitlich signifikante Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten vorlagen, wies der Boden nach Strohmulch zum Termin nach Zwischenfrucht in 8 Umwelten den signifikant höchsten Wassergehalt auf. Demgegenüber war der Effekt der Zwischenfrucht nach Winter in keiner Umwelt signifikant. Im Mittel über alle Umwelten traten zu keinem Termin signifikante Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten auf (Tab. 5). Signifikante Korrelationen zwischen dem Wassergehalt vor Winter bzw. dessen Veränderung gegenüber dem Gehalt vor Zwischenfruchtanbau und der Zwischenfrucht-Biomasse traten nicht auf (nicht gezeigt).

Im Mittel der Umwelten stieg der N_{\min} -Gehalt in der Variante Strohmulch vom Termin vor Zwischenfrucht zur Probenahme im Herbst nach Zwischenfrucht um 40 kg N ha^{-1} deutlich an, während er durch Zwischenfruchtanbau um $15\text{–}25 \text{ kg N ha}^{-1}$ abgesenkt wurde (Tab. 6). Nach Senf war der N_{\min} -Gehalt vor Winter um ca. 15 kg N ha^{-1} signifikant niedriger als nach Mischung. Die höchsten N_{\min} -Gehalte wurden in Schladen 12/13, die geringsten Werte in Jeinsen 13/14 gemessen. Während sich vor Zwischenfruchtanbau die Zwischenfruchtvarianten nur in drei Umwelten uneinheitlich signifikant unterschieden, lag der N_{\min} -Gehalt in 13 Umwelten nach Strohmulch

Tab. 4. Pearson-Korrelationskoeffizienten der Beziehung zwischen Witterungsparametern und der oberirdischen Biomasse (BioZF) bzw. N-Aufnahme (NAuf) einer Senf-Zwischenfrucht im Zeitraum von der Aussaat bis zum 20.10. des jeweiligen Jahres. Daten aus 15 Umwelten in Norddeutschland 2012/13 – 2014/15 (N = 15). Signifikante Koeffizienten in Fettdruck ($p \leq 0,05$)

Parameter	Saat TN	WG pflvF30	TMit Saat-20Okt	NSMit Saat-20Okt	GSMit Saat-20Okt	TMit Saat-30Sept	NSMit Saat-30Sept	GSMit Saat-30Sept	TSu 1-5 TNS	NS 1-5 TNS	GSSu 1-5 TNS	TSu 6-18 TNS	NS 6-18 TNS	GSSu 6-18 TNS	TSu 19-31 TNS	NS 19-31 TNS	GSSu 19-31 TNS	TSu Okt	NS Okt	GSSu Okt	Bio ZF	
Mittel	24,53	45,51	13,91	1,69	2,45	15,09	1,34	2,76	86,83	6,94	23,97	211,55	19,21	46,07	188,07	20,32	36,76	228,67	46,26	34,41	2,64	
Standardabw.	11,43	28,52	1,14	0,52	0,66	0,99	0,53	0,86	12,59	7,53	4,63	18,03	16,29	11,13	26,67	22,02	9,06	35,54	27,74	7,59	1,09	
WGpflvF30	0,234	1																				
TMitSaat-20Okt	-0,634	0,112	1																			
NSMitSaat-20Okt	0,005	-0,400	-0,017	1																		
GSMitSaat-20Okt	-0,715	0,024	0,754	0,189	1																	
TMitSaat-30Sept	-0,543	-0,072	0,864	0,068	0,715	1																
NSMitSaat-30Sept	-0,485	-0,007	0,508	0,593	0,464	0,286	1															
GSMitSaat-30Sept	-0,634	0,020	0,647	0,183	0,979	0,583	0,414	1														
TSu1-5TNS	-0,661	-0,423	0,358	-0,029	0,404	0,624	0,072	0,288	1													
NS1-5TNS	-0,119	-0,055	0,446	0,354	0,345	0,292	0,294	0,362	-0,294	1												
GSSu1-5TNS	-0,653	-0,056	0,672	-0,109	0,688	0,756	0,158	0,577	0,558	0,321	1											
TSu6-18TNS	-0,522	-0,256	0,391	0,029	0,433	0,649	0,076	0,293	0,733	-0,202	0,461	1										
NS6-18TNS	0,209	0,087	-0,187	0,542	-0,150	-0,217	0,526	-0,101	-0,194	-0,040	-0,202	-0,428	1									
GSSu6-18TNS	-0,761	-0,276	0,630	0,124	0,849	0,725	0,276	0,756	0,616	0,328	0,887	0,553	-0,228	1								
TSu19-31TNS	-0,469	-0,144	0,771	0,030	0,673	0,818	0,184	0,618	0,348	0,542	0,661	0,348	-0,204	0,630	1							
NS19-31TNS	-0,188	-0,220	0,356	0,495	0,447	0,469	0,150	0,422	0,105	0,736	0,378	0,170	-0,086	0,403	0,626	1						
GSSu19-31TNS	-0,796	-0,194	0,664	-0,171	0,690	0,748	0,210	0,563	0,751	0,034	0,845	0,703	-0,353	0,858	0,574	0,149	1					
TSu1-20Okt	-0,288	0,426	0,739	-0,098	0,369	0,328	0,555	0,374	-0,252	0,452	0,199	-0,168	-0,004	0,129	0,335	0,019	0,153	1				
NS1-20Okt	0,390	-0,496	-0,384	0,707	-0,099	-0,090	-0,134	-0,085	-0,083	0,286	-0,196	-0,039	0,205	-0,032	0,007	0,574	-0,356	-0,562	1			
GSSu1-20Okt	0,009	0,165	0,364	0,103	0,267	0,602	-0,035	0,091	0,342	0,006	0,448	0,559	-0,174	0,377	0,171	0,209	0,400	0,011	0,134	1		
BioZF	-0,462	0,008	0,682	0,280	0,597	0,480	0,660	0,592	0,014	0,652	0,510	-0,116	0,252	0,473	0,625	0,444	0,370	0,618	-0,150	-0,152	1	
NAufZF	-0,268	-0,029	0,659	0,441	0,475	0,531	0,619	0,467	-0,085	0,807	0,380	-0,008	0,188	0,380	0,649	0,587	0,209	0,573	0,093	0,010	0,874	

SaatTN24.7 = Saattermin nach dem 24.7. (d), WGpflvF30 = Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser in 0–30 cm Bodentiefe bei Saat (mm), TMitSaat-20Okt = Tagesmittel der Lufttemperatur Aussaat – 20. Okt. (°C), NSMitSaat-20Okt = Tagesmittel des Niederschlags Aussaat – 20. Okt. (mm d⁻¹), GSMitSaat-20Okt = Tagesmittel der Globalstrahlung Aussaat – 20. Okt. (kW m⁻² d⁻¹), TMitSaat-30Sept = Tagesmittel der Lufttemperatur Aussaat – 30. Sept. (°C), NSMitSaat-30Sept = Tagesmittel des Niederschlags Aussaat – 30. Sept. (mm d⁻¹), GSMitSaat-30Sept = Tagesmittel der Globalstrahlung Aussaat – 30. Sept. (kW m⁻² d⁻¹), TSu1-5TNS = Lufttemperatursumme 1.–5. Tag nach Saat (°C d), NS1-5TNS = Niederschlagssumme 1.–5. Tag nach Saat (mm), GSSu1-5TNS = Globalstrahlungssumme 1.–5. Tag nach Saat (kW m⁻²), TSu6-18TNS = Lufttemperatursumme 6.–18. Tag nach Saat (°C d), NS6-18TNS = Niederschlagssumme 6.–18. Tag nach Saat (mm), GSSu6-18TNS = Globalstrahlungssumme 6.–18. Tag nach Saat (kW m⁻²), TSu19-31TNS = Lufttemperatursumme 19.–31. Tag nach Saat (°C d), NS19-31TNS = Niederschlagssumme 19.–31. Tag nach Saat (mm), GSSu19-31TNS = Globalstrahlungssumme 19.–31. Tag nach Saat (kW m⁻²), TSu1-20Okt = Lufttemperatursumme 1.–20. Okt. (°C d), NS1-20Okt = Niederschlagssumme 1.–20. Okt. (mm), GSSu1-20Okt = Globalstrahlungssumme 1.–20. Okt. (kW m⁻²), BioZF = oberirdische Biomasse der Zwischenfrucht (Mg ha⁻¹), NAufZF = N-Aufnahme der Zwischenfrucht (kg ha⁻¹)

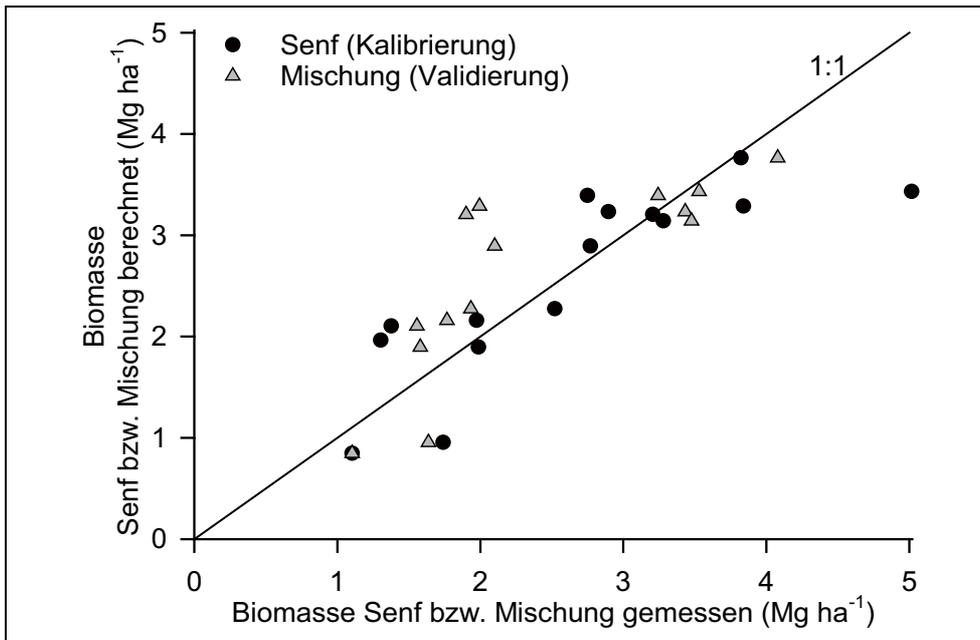


Abb. 2. Gemessene und berechnete Biomassebildung von Senf und Mischung in 15 Umwelten Norddeutschlands 2012/13 – 2014/15. Die Daten Senf zeigen das Ergebnis der Kalibrierung ($\text{Biomasse Senf (Mg ha}^{-1}\text{)} = -2,937 + 1,16 \text{ Niederschlagsmittel Ausaat-30.09. (mm d}^{-1}\text{)} + 0,021 \text{ Lufttemperatursumme 19-31 Tage nach Ausaat (}^{\circ}\text{C d)}$), alle Koeffizienten signifikant, $r^2 = 0,7^{***}$, $\text{RSME} = 0,649 \text{ Mg ha}^{-1}$, $N = 15$). Für die berechneten Daten Mischung wurden die Witterungsparameter derselben Umwelten verwendet und der dort gemessenen Biomasse der Mischung gegenübergestellt ($y = 0,779 + 0,77x$, $r^2 = 0,63^{***}$, $N = 14$).

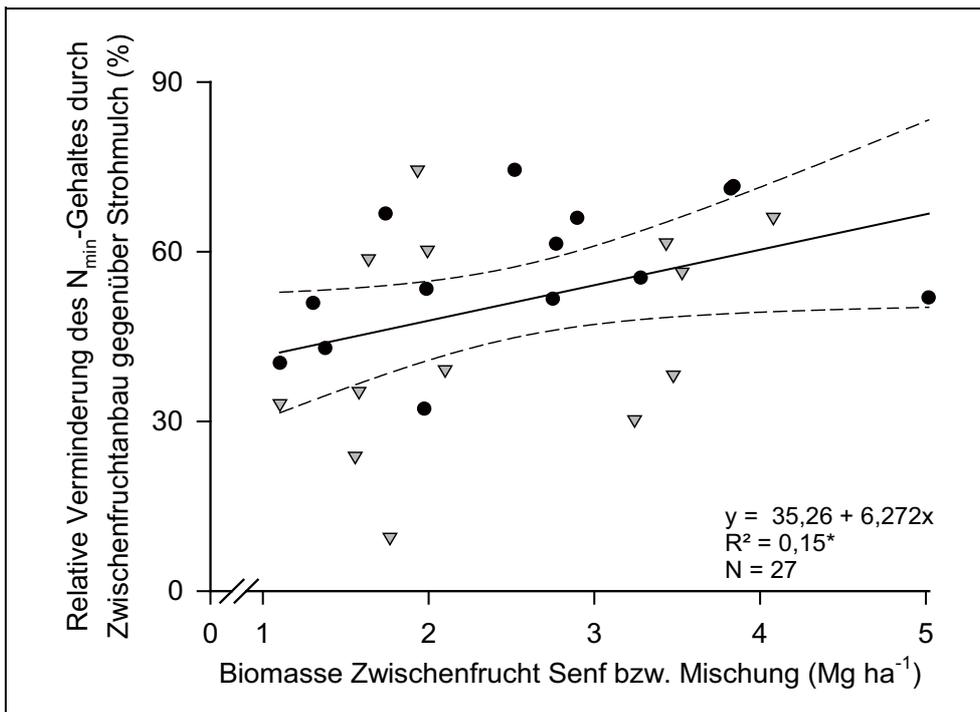


Abb. 3. Einfluss der Biomasse der Zwischenfrucht auf die relative Verminderung des N_{\min} -Gehaltes (0–90 cm) vor Winter durch Zwischenfruchtanbau gegenüber Strohmulch (Punkte = Senf, Dreiecke = Mischung). Die gestrichelten Linien geben das Konfidenzintervall an ($p \geq 95\%$).

signifikant am höchsten. Weder die Biomasse noch die N-Aufnahme der Zwischenfrucht korrelierten weder mit der absoluten Höhe des N_{\min} -Gehaltes vor Winter, noch mit dessen Verminderung gegenüber dem Termin vor Zwischenfrucht, noch gegenüber Strohmulch zum Messtermin nach Zwischenfrucht (Tab. 7). Allein die relative Verminderung des N_{\min} -Gehaltes der Zwischenfruchtvarianten gegenüber Strohmulch zum Termin vor Winter zeigt eine schwach signifikante Abhängigkeit von der

Höhe der Zwischenfrucht-Biomasse mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,15$ (Abb. 3).

Diskussion

Der Aussaattermin der Zwischenfrüchte variierte zwischen den Umwelten vom 24.07. bis zum 30.08. und lag in 10 der 15 Umwelten nach dem 15. August. Dies spiegelt die

Tab. 5. Wassergehalt des Bodens (Mittel bzw. Summe 0–90 cm) bei Aussaat der Zwischenfrucht (vor Zwischenfrucht = vZF), vor Winter (vW) und nach Winter (nW) in 15 Umwelten Norddeutschlands 2012/13 – 2014/15 (SM = Strohmulch, SE = Senf, MI = Artenmischung). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen innerhalb einer Umwelt bzw. im Mittel der Umwelten (Tukey-Test, $p \leq 0,05$; keine Angabe = Unterschiede nicht signifikant)

Umwelt (Ort/Jahr)	Wassergehalt (Gew.-%)								
	Vor Zwischenfrucht			Vor Winter			Nach Winter		
	SM	SE	MI	SM	SE	MI	SM	SE	MI
Bornstedt 12/13	22,5	21,5	21,5	23,9	21,3	21,5	21,0	21,1	21,4
Schluden 12/13	43,3	42,3	44,6	49,5	47,0	49,0	33,3	42,6	32,8
Jeinsen 12/13	11,6	11,6	11,5	19,5a	16,8b	17,8b	21,9	22,1	22,2
Uelzen 12/13	7,7	7,2	7,7	10,7ab	10,3b	11,0a	10,8	10,5	11,0
Göttingen A 12/13	18,9	18,5	18,4	22,4a	20,4b	20,6b	25,0	25,5	25,6
Bornstedt 13/14	11,1	11,2	10,9	23,5	23,6	23,5	23,7	24,0	24,1
Schluden 13/14	22,7	23,3	21,9	31,9	32,2	31,3	28,8	29,3	28,6
Jeinsen 13/14	14,3	14,6	14,4	20,8a	19,2b	19,5b	20,7	20,4	20,7
Uelzen 13/14	12,3	13,8	15,7	16,1	16,2	19,8	16,4	13,7	19,8
Göttingen A 13/14	16,9a	16,5ab	15,9b	24,2a	23,4b	23,7b	23,0	22,5	22,9
Göttingen B 14/15	17,9	17,1	17,4	21,7a	19,2b	21,3a	22,6	22,3	22,4
Schluden 14/15	24,1	23,3	23,2	22,4a	21,6b	22,1ab	15,8	16,4	16,4
Jeinsen 14/15	23,9	23,5	23,9	23,2	23,6	23,6	22,7	22,9	22,7
Uelzen 14/15	14,1a	13,0b	13,6ab	15,1a	12,4b	12,5b	16,4	16,3	16,2
Göttingen A 14/15	22,9	22,8	22,8	22,6	22,7	22,7	23,2	23,3	23,4
Mittelwert	18,5	18,4	18,6	22,8	21,6	22,3	21,7	22,2	22,0

Tab. 6. N_{\min} -Gehalt des Bodens (Mittel bzw. Summe 0–90 cm) bei Aussaat der Zwischenfrucht (vor Zwischenfrucht = vZF) und vor Winter (vW) in 15 Umwelten Norddeutschlands 2012/13 – 2014/15 (SM = Strohmulch, SE = Senf, MI = Artenmischung). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen innerhalb einer Umwelt bzw. im Mittel der Umwelten (Tukey-Test, $p \leq 0,05$; keine Angabe = Unterschiede nicht signifikant)

Umwelt (Ort/Jahr)	N_{\min} -Gehalt (kg N ha^{-1})					
	Vor Zwischenfrucht			Vor Winter		
	SM	SE	MI	SM	SE	MI
Bornstedt 12/13	76	87	90	122a	31b	31b
Schluden 12/13	158b	192ab	201a	302a	180b	202b
Jeinsen 12/13	44	44	51	102a	48b	66b
Uelzen 12/13	56	46	60	58a	19b	24b
Göttingen A 12/13	109	115	101	150a	51b	58b
Bornstedt 13/14	43b	47b	72a	79a	45c	60b
Schluden 13/14	89	82	70	96a	47b	82ab
Jeinsen 13/14	20	23	25	105a	47b	65b
Uelzen 13/14	66	71	85	67	46	61
Göttingen A 13/14	67	66	76	137a	39b	46b
Göttingen B 14/15	58a	47b	51ab	109a	52b	48b
Schluden 14/15	92	113	102	91a	35b	56b
Jeinsen 14/15	65	77	68	97a	27b	38b
Uelzen 14/15	63	66	55	132a	64b	92ab
Göttingen A 14/15	95	85	90	48	52	71
Mittelwert	73	77	80	113a	52c	67b

Tab. 7. Pearson-Korrelationskoeffizienten für die Beziehung zwischen der oberirdischen Biomasse bzw. der N-Aufnahme von Zwischenfrüchten (ZF; BioZF = oberirdische Biomasse der Zwischenfrucht, NAufZF = N-Aufnahme der Zwischenfrucht) und dem N_{\min} -Gehalt des Bodens (0–90 cm) vor Winter (nach ZF), der absoluten Verminderung des N_{\min} -Gehaltes bei Aussaat der Zwischenfrucht bis zum Termin vor Winter (nach – vor ZF), der absoluten Verminderung des N_{\min} -Gehaltes vor Winter bei Zwischenfruchtanbau gegenüber Strohmulch (SM) sowie der relativen Verminderung des N_{\min} -Gehaltes vor Winter bei Zwischenfruchtanbau gegenüber Strohmulch (Referenz SM; N = 27 bzw. 29), Daten aus 15 Umwelten in Norddeutschland 2012/13 – 2014/15. Signifikante Koeffizienten in Fettdruck ($p \leq 0,05$)

Parameter	N_{\min} -Gehalt absolut nach ZF (kg N ha ⁻¹)	Verminderung des N_{\min} -Gehaltes		
		absolut nach – vor ZF (kg N ha ⁻¹)	absolut nach ZF – nach SM (kg N ha ⁻¹)	relativ nach ZF – nach SM (%)
BioZF (Mg ha ⁻¹)	-0,320	-0,077	0,215	0,389
NAufZF (kg N ha ⁻¹)	-0,263	-0,032	0,205	0,282

auch in der landwirtschaftlichen Praxis Norddeutschlands anzutreffende Spanne wieder, die von der Vorfrucht und deren jahres- und standortspezifisch geprägtem Erntetermin abhängt. Frühe Saattermine vor Mitte August sind nur nach früh räumenden Vorfrüchten wie z.B. Wintergerste möglich. In der vorliegenden Studie wurden erstmals an einem umfangreichen Datensatz aus 15 Umwelten Zusammenhänge zwischen den Witterungsbedingungen während der Vegetationsperiode von nicht winterharten Zwischenfrüchten, die als Stoppelsaat nach Getreidevorfrucht etabliert wurden, und deren Biomassebildung bzw. N-Aufnahme bis zum Winter unter gemäßigten Klimabedingungen analysiert.

Dabei korrelierte der Saattermin trotz der weiten Variation nicht signifikant mit der Zwischenfrucht-Biomasse. Auch andere Witterungsparameter, die von der Länge der Vegetationszeit in den warmen und strahlungsreichen Abschnitten der Vegetationszeit im August und September geprägt waren, standen trotz variabler Länge im vorliegenden Datensatz in keiner signifikanten Beziehung zur Biomasse (z.B. Temperatursumme von Aussaat bis 30.09.) oder wiesen eine weniger enger Korrelation zur Biomassebildung der Zwischenfrucht auf als der Mittelwert des jeweiligen Parameters (z.B. Globalstrahlung von Aussaat bis 30.09., nicht gezeigt). Aus dem Abschnitt der Vegetationsperiode bis Ende September blieb allein das Tagesmittel des Niederschlags als signifikante Einflussgröße in der multiplen Regression erhalten. Demgegenüber stand der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt in 0–30 cm Bodentiefe zur Aussaat nicht in Beziehung zur Biomassebildung und auch die Summierung von Wassergehalt und Niederschlag erbrachte keine signifikante Korrelation. Bei stärkerer zeitlicher Untergliederung des günstigen Vegetationsabschnitts bis maximal Ende September bzw. die Zunahme des Zeitraums vom 1. bis zum 20.10. blieb in der multiplen Regression nur die Temperatursumme in den letzten ca. zwei Wochen des 31-tägigen Zeitraums nach der Aussaat als signifikant erhalten (19.–31. Tag nach Aussaat). Dieser Zeitraum befand sich in der Mehrzahl der Umwelten um die Mitte

des Monats September. Die multiple Regression erklärte 70% der Variation der Biomassebildung des Senfs und ergab auch bei Gegenüberstellung mit den Messdaten der Zwischenfrucht-Mischung ein Bestimmtheitsmaß von 63%. Eine umfangreichere Validierung an einem vollständig unabhängigen Datensatz steht jedoch noch aus.

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass unter den hinsichtlich Temperatur und Einstrahlung günstigen Bedingungen bis Ende September die Höhe der Niederschläge Biomassebildung und N-Aufnahme stoppelgesäter Zwischenfrüchte nach Getreide unter norddeutschen Klimabedingungen maßgeblich bestimmt. Zusätzlich ist bei den häufig anzutreffenden späteren Saatterminen der Zwischenfrucht ab dem 20.08. die Temperatur um die Mitte des Monats September von erheblichem Einfluss. Demgegenüber waren unter anderen Umwelt- und Anbaubedingungen ausschließlich das Aussaatdatum (BRANT et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2016) bzw. die Temperatursumme (BJÖRKMAN et al., 2015; KOMANDA et al., 2016) maßgeblich für die Höhe der Biomassebildung der Zwischenfrüchte. Jedoch weisen auch ALLISON et al. (1998) und LIU et al. (2015) auf die wachstumsbegrenzende Wirkung eines geringen Niederschlags unter englischen bzw. mittel- und südschwedischen Bedingungen hin.

Ein signifikant geringerer Bodenwassergehalt vor Winter in den Varianten mit Zwischenfruchtanbau gegenüber Strohmulch war zumeist in Umwelten mit einem niedrigen Ausgangswassergehalt vor Zwischenfruchtanbau in Relation zur Feldkapazität und gleichzeitig ausreichend hohen Niederschlägen im Vegetationszeitraum sowie einer kräftigen Biomassebildung > 2 Mg ha⁻¹ zu verzeichnen (z.B. Jeinsen 13/14, Göttingen A 13/14). Die Höhe der Biomassebildung als alleiniger Parameter korrelierte demgegenüber nicht mit Zwischenfrucht bedingten Differenzen im Bodenwassergehalt. Im Gegensatz dazu betonten ALLISON et al. (1998) die Bedeutung der Höhe der Biomassebildung von Zwischenfrüchten für den Bodenwassergehalt im November auf englischen Standorten, die eine geringere Wasserspeicherfähigkeit als die

meisten Böden in der vorliegenden Studie aufwiesen. Des Weiteren ist bei der Bewertung des Zwischenfruchteffektes auf den Wasserhaushalt zu berücksichtigen, dass auch in der Variante Strohmulch der Aufwuchs von Ausfallgetreide und Unkräutern je nach Intensität mechanischer oder chemischer Kontrollmaßnahmen eine erhebliche Transpiration aufweisen kann. Darüber hinaus können unproduktive Wasserverluste durch Evaporation insbesondere bei wiederholter Bodenbearbeitung im Herbst ähnlich hoch sein wie der Wasserverbrauch durch Zwischenfruchtanbau ist (BODNER et al., 2007; BÖTTCHER et al., 2015).

In den nachfolgenden Wintermonaten fiel in allen Umwelten der vorliegenden Studie so viel Niederschlag, dass bei Aussaat der Zuckerrübe im Frühjahr keine Unterschiede im Bodenwassergehalt zu finden waren. Dies bestätigen auch Untersuchungen von ALLISON et al. (1998) und BÖTTCHER et al. (2015). Allerdings ist auf tiefgründigen, hoch speicherfähigen Böden (hohe nutzbare Feldkapazität, z.B. 250 mm auf 1 m Bodentiefe) bei stärkerer Ausschöpfung des Bodenwasservorrats durch Vorfrucht und Zwischenfrucht in Verbindung mit geringen Winterniederschlägen ($\ll 200$ mm) eine nachteilige Wirkung des Wasserverbrauchs der Zwischenfrucht auf die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser für die nachfolgende Zuckerrübe nicht auszuschließen, insbesondere wenn in deren Vegetationszeit ebenfalls wenig Niederschlag fällt. Eine derartige Konstellation könnte in Deutschland vor allem in den west- und mitteldeutschen Trockengebieten (Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt) auftreten.

Die im Mittel über alle Umwelten gefundene Verminderung des Herbst- N_{\min} -Wertes um 50–60 kg N ha⁻¹ bei Senf und Mischung gegenüber Strohmulch weist zunächst auf ein deutlich gesenktes potenzielles Risiko der N-Auswaschung durch Zwischenfruchtanbau hin, wie es in zahlreichen Studien aus gemäßigten Klimabereichen gefunden wurde (siehe Übersichtsartikel BLANCO-CANQUI et al., 2015; CONSTANTIN et al., 2010). Allerdings ist einschränkend auf die mineralische N-Düngung von 40 kg N ha⁻¹ auch in der Variante Strohmulch hinzuweisen. Bei unterlassener mineralischer N-Düngung gemäß den Regeln des „Greening“ (DirektZahlDurchfV, 2014) ist eine geringere Verminderung des N_{\min} -Gehaltes vor Winter durch Zwischenfruchtanbau gegenüber Strohmulch zu erwarten, wengleich dies in zusätzlichen Untersuchungen an einzelnen Standorten nicht zu verzeichnen war (nicht gezeigt).

Schlussfolgerungen

Der Anbau von nicht winterharten Zwischenfrüchten mit Resistenz gegenüber dem Rübenzystematoden *Heterodera schachtii* ist auf bundesweit nahezu der Hälfte der Zuckerrübenfelder eine praxisübliche Maßnahme. Vor dem Hintergrund des „Greening“ dürfte dieser Anteil zukünftig noch zunehmen.

In einer Korrelationsanalyse erwiesen sich die mittlere tägliche Niederschlagsmenge nach Aussaat der Zwischen-

frucht bis Ende September und die Lufttemperatur um die Monatsmitte des Septembers als maßgebliche Einflussgrößen auf die oberirdische Biomassebildung der Zwischenfrüchte bis Anfang November. Obwohl der Aussattermin im vorliegenden Datensatz vom 24.7. bis zu 30.8. variierte, fand weder dieser Parameter noch fanden die Summenwerte von Temperatur und Globalstrahlung Eingang in die interaktiv abgeleitete multiple Regression. Trotz des maritim geprägten Klimas ist demzufolge die Wasserversorgung im hinsichtlich Temperatur und Einstrahlung günstigen Zeitraum bis Ende September ein limitierender Faktor für das Zwischenfruchtwachstum in Norddeutschland. Diese Zusammenhänge geben wichtige Hinweise für die Entwicklung bzw. Kalibrierung eines Zwischenfrucht-Wachstumsmodells.

Der Wasserverbrauch der geprüften nicht winterharten Zwischenfrüchte verminderte unter den gegebenen Anbau- und Niederschlagsbedingungen die Wasserverfügbarkeit für nachfolgende Sommerkulturen im Vergleich zu Strohmulch nicht. Sowohl der Senf als auch die Leguminosen enthaltende Artenmischung senkten den Boden- N_{\min} -Gehalt vor Winter deutlich ab. Damit ist zunächst von einem geringeren Risiko der Nitratauswaschung während der Wintermonate auszugehen. Dennoch kann bei einem frühen Häckseltermin sowie milder und nasser Winterwitterung eine N-Mineralisation stattfinden, die das Auswaschungsrisiko erheblich steigert.

In eine Gesamtbewertung des Zwischenfruchtanbaus in derzeit praxisüblicher Form müssen weitere Aspekte wie Nematodenkontrolle, Lachgasfreisetzung, Humusgehalt, Bodenstruktur, Erosionsschutz und Biodiversität einbezogen werden.

Danksagung

Unser Dank gilt den technischen Mitarbeitern des IfZ und den beteiligten Landwirten für ihren nimmermüden Einsatz bei der Durchführung der Versuche. Die Finanzierung des Projektes erfolgte dankenswerter Weise durch Nordzucker AG und Syngenta Agro GmbH. Ein weiterer Dank gilt der Deutschen Saatveredelung AG sowie dem Pflanzenschutzamt der Landwirtschaftskammer Niedersachsen.

Literatur

- Ad-hoc-AG Boden, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover.
- ALLISON, M.F., M.J. ARMSTRONG, K.W. JAGGARD, A.D. TODD, 1998: Integration of nitrate cover crops into sugarbeet (*Beta vulgaris*) rotations. I. Management and effectiveness of nitrate cover crops. *J. Agric. Sci.* **103**, 53–60.
- BJÖRKMAN, T., C. LOWRY, J.W. SHAIL, Jr., D.C. BRAINARD, D.S. ANDERSON, J.B. MASUNAS, 2015: Mustard Cover Crops for Biomass Production and Weed Suppression in the Great Lakes Region. *Agron. J.* **107**, 1235–1249.
- BLANCO-CANQUI, H., T.M. SHAVER, J. LINQUIST, C.A. SHAPIRO, R.W. ELMORE, C.A. FRANCIS, G.W. HERGERT, 2015: Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. *Agron. J.* **107**, 2449–2474.

- BODNER, G., W. LOISKANDL, H.-P. KAUL, 2007: Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. *Agr. Water Manage.* **93**, 85-98.
- BÖTTCHER, F., M. SCHMIDT, E. MÜLLER, A. SCHMIDT, T. WEISKE, 2015: Grünes Licht für Zwischenfrüchte – Ergebnisse von Wasserhaushaltsuntersuchungen im Zwischenfruchtanbau. *Landwirt. ohne Pflug* **6/2015**, 34-39.
- BRANT, V., J. PIVEC, P. FUKSA, K. NECKÁŘ, D. KOCOURKOVÁ, V. VENCLOVÁ, 2011: Biomass and energy production of catch crops in areas with deficiency of precipitation during summer period in central Bohemia. *Biomass Bioenerg.* **35**, 1286-1294.
- BRENNAN, E., N. BOYD, 2012: Winter cover crop seeding rate and variety affects during eight years of organic vegetables: I. Cover crop biomass production. *Agron. J.* **104**, 684-698.
- CONSTANTIN, J., B. MARY, F. LAURENT, G. AUBRION, A. FONTAINE, P. KERVELLANT, N. BEAUDOIN, 2010: Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agr. Ecosyst. Environ.* **135**, 268-278.
- DirektZahlDurchfV, 2014: Verordnung zur Durchführung der Direktzahlungen an Inhaber landwirtschaftlicher Betriebe im Rahmen von Stützungsregelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (Direktzahlungen-Durchführungsverordnung – DirektZahlDurchfV). *Bundesgesetzblatt 2014 Teil I Nr. 51*, vom 13.11.2014, S. 1690-1702.
- EICHLER-LÖBERMANN, B., S. KÖHNE, B. KOWALSKI, E. SCHNUG, 2008: Effect of catch cropping on phosphorus bioavailability in comparison to organic and inorganic fertilization. *J. Plant Nutr.* **31**, 659-676.
- HANSEN, E.M., L.J. MUNKHOLM, J.E. OLESEN, B. MELANDER, 2015: Nitrate Leaching, Yields and Carbon Sequestration after Noninversion Tillage, Catch Crops, and Straw Retention. *J. Environ. Qual.* **44**, 868-881.
- HAUER, M., H.-J. KOCH, S. MITTLER, A. WINDT, S. KRÜSSEL, G. SCHLINKER, D. WOLLENWEBER, C. RUSTEMEYER, B. MÄRLÄNDER, 2016: Zwischenfruchtanbau, Sortenwahl, N-Düngung: Wirkung auf N-Versorgung und Ertrag von Zuckerrüben sowie auf die Nematodendichte. *Sugar Ind.* **141**, 44-52.
- KENTER, C., C.M. HOFFMANN, B. MÄRLÄNDER, 2006: Effects of weather variables on sugar beet yield development (*Beta vulgaris* L.). *Eur. J. Agron.* **24**, 62-69.
- KENTER, C., P. LUKASHYK, M. DAUB, E. LADEWIG, 2014: Population dynamics of *Heterodera schachtii* Schm. and yield response of susceptible and resistant sugar beet (*Beta vulgaris* L.) after cultivation of susceptible and resistant oilseed radish (*Raphanus sativus* L.). *Journal für Kulturpflanzen* **66**, 289-299.
- KOMAINDA, M., F. TAUBE, C. KLUß, A. HERRMANN, 2016: Above- and belowground nitrogen uptake of winter catch crops sown after silage maize as affected by sowing date. *Eur. J. Agron.* **79**, 31-42.
- LIU, J., G. BERGKVIST, B. ULÉN, 2015: Biomass production and phosphorus retention by catch crops on clayey soils in southern and central Sweden. *Field Crops Res.* **171**, 130-137.
- MONTEITH, J.L., 1977: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. T. Roy. Soc. B* **281**, 277-294.
- OHLANDER, L., G. BERGKVIST, F. STENDAHL, M. KVIST, 1996: Yield of catch crops and spring barley as affected by time of undersowing. *Acta Agr. Scand. B-S P* **46**, 161-168.
- SHEPHERD, M.A., 1999: The effectiveness of cover crops during eight years of a UK sandland rotation. *Soil Use Manage.* **15**, 41-48.
- SNAPP, S.S., S.M. SWINTON, R. LABARTA, D. MUTCH, J.R. BLACK, R. LEEP, J. NYIRANEZA, K. O'NEIL, 2005: Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agron. J.* **97**, 322-332.
- TEIXEIRA, E.I., P. JOHNSTONE, E. CHAKWIZIRA, J. DE RUITER, B. MALCOLM, N. SHAW, R. ZYSKOWSKI, E. KHAEMBAH, J. SHARP, E. MEENKEN, P. FRASER, S. THOMAS, H. BROWN, D. CURTIN, 2016: Sources of variability in the effectiveness of winter cover crops for mitigating N leaching. *Agr. Ecosyst. Environ.* **220**, 226-235.
- TONITTO, C., M.B. DAVID, L.E. DRINKWATER, 2006: Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agr. Ecosyst. Environ.* **112**, 58-72.
- TRIMPLER, K., N. STOCKFISCH, 2017a: Vielfältige Fruchtfolgegestaltung bei Zuckerrüben. *Zuckerrübe* **66**, 35-37.
- TRIMPLER, K., N. STOCKFISCH, 2017b: Persönliche Mitteilung.
- UNGER, P.W., W.A. PAYNE, G.A. PETERSON, 2006: Water conservation and efficient use. In: PETERSON, G.A., P.W. UNGER, W.A. PAYNE (eds.): *Dryland Agriculture*. American Society of Agronomy Monograph Series **23**, 39-85.
- Verband Deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), 1997: Bestimmung von mineralischem (Nitrat-) Stickstoff in Bodenprofilen (Nmin-Labormethode, A 6.1.4.1). In: *Methodenbuch I: Bodenuntersuchung, 2. Teillieferung*. Darmstadt, VDLUFA-Verlag.
- WESSOLEK, G., M. KAUPENJOHANN, M. RENGER, 2009: Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. In: *Bodenökologie und Bodengeneese*, Heft **40**. Selbstverlag, TU Berlin.
- WORTMAN, S.E., C.A. FRANCIS, M.L. BERNARDS, R.A. DRIJBER, J.L. LINDQUIST, 2012: Optimizing cover crop benefits with diverse mixtures and an alternative termination method. *Agron. J.* **104**, 1425.