



Forschungsbericht

Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement

am Beispiel der Gemeinde Hohenthann (Niederbayern) mit intensiver
landwirtschaftlicher Flächennutzung

**An das Bayerische Staatsministerium für Ernährung,
Landwirtschaft und Forsten**

Projektbearbeiter

Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen, Dr. Franz-Xaver Maidl

M.Sc. Felix Forster, M.Sc. Josef Prücklmaier

Technische Universität München
Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme
Liesel-Beckmann-Straße 2
85354 Freising

Weihenstephan, 18.10.2017

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	5
1. Gegenstand und Zielsetzung des Projektes.....	10
1.1. Problemstellung und Forschungsbedarf	10
1.2. Forschungsansatz und Projektstruktur.....	12
2. Analyse des Nitratbelastungspotenzials und Nitrat-Minderungsstrategien (Teilprojekt 1)	14
2.1. Untersuchungsziele und Forschungsansatz in Teilprojekt 1	14
2.2. Material und Methoden	15
2.2.1. Datengrundlagen und Betriebsdatenerfassung	15
2.2.2. Methodik der Stickstoffbilanzierung	16
2.2.3. Berechnung der Stickstoffverlustpfade	24
2.2.4. Untersuchung der N_{\min} -Vorräte in Böden	29
2.2.5. Rammkernsondierungen	30
2.2.6. Untersuchungsbetriebe und Standortbedingungen	33
2.3. Ergebnisse von Teilprojekt 1	36
2.3.1. Betriebliche Stickstoffflüsse	36
2.3.1.1. Marktfruchtbetrieb mit Gülleabnahme MF_G 1	36
2.3.1.2. Marktfruchtbetrieb mit Gülleaufnahme MF_G 2	39
2.3.1.3. Hopfenbetrieb mit Gülleaufnahme und Marktfruchtanbau HP	43
2.3.1.4. Schweinemastbetrieb MS 1	46
2.3.1.5. Schweinemastbetrieb MS 2	50
2.3.1.6. Schweinemast- und Biogasbetrieb BG	54
2.3.1.7. Ferkelerzeugungsbetrieb ZS	58
2.3.1.8. Vergleich der betrieblichen Ergebnisse	62
2.3.2. Ergebnisse der N_{\min} -Analysen	66
2.3.2.1. N_{\min} -Vorräte nach der Ernte	66
2.3.2.2. N_{\min} -Vorräte im Herbst	67
2.3.2.3. N_{\min} -Vorräte im Frühjahr	71
2.3.3. Nitrataustrag ausgewählter Flächen	74
2.3.3.1. Tiefenprofile und Modellergebnisse ausgewählter Schläge	74
2.3.3.2. Beziehung zwischen Modellwerten und Messwerten	79
2.4. Diskussion von Teilprojekt 1	82
2.4.1. Betriebliche Stickstoffflüsse und Bewirtschaftung	82

2.4.1.1	Gesamtbetrieb.....	82
2.4.1.2.	Pflanzenbau	83
2.4.1.3.	Tierhaltung	85
2.4.2.	Mess- und Modellwerte zu N_{\min} -Vorräten und Nitratausträgen.....	87
2.4.2.1	N_{\min} -Vorräte bis 90 cm Bodentiefe	87
2.4.2.2.	Nitratmengen im Unterboden.....	90
2.5.	Anhang zu Abschnitt 2.....	93
2.6.	Literatur zu Abschnitt 2	106
3.	Maßnahmen zur Minderung von Nitratausträgen mit dem Schwerpunkt „teilflächenspezifische Stickstoffdüngung“ (Teilprojekt 2)	114
3.1.	Untersuchungsziele und Forschungsansatz in Teilprojekt 2	114
3.2.	Material und Methoden	116
3.2.1.	Charakterisierung der Versuchsstandorte	116
3.2.2.	Klimatische Bedingungen und Witterung im Untersuchungszeitraum.....	119
3.2.3.	Versuchsbeschreibung	121
3.2.3.1.	Versuchsbeschreibung und Versuchsanlage 2014	121
3.2.3.2.	Versuchsbeschreibung und Versuchsanlage 2015	124
3.2.3.3.	Versuchsbeschreibung und Versuchsanlage 2016	129
3.2.4.	Messparzellen.....	133
3.2.5.	Düngung der Versuche	133
3.2.6.	Beprobung der Versuche.....	134
3.2.7.	Sensorsysteme.....	134
3.2.7.1.	Sensorvergleich Schleppergerät / Handgerät.....	134
3.2.7.2.	Schlepper-Sensormessungen	135
3.2.8.	Laboranalysen	136
3.2.8.1.	Bodenanalysen	136
3.2.8.2.	Pflanzenanalysen.....	136
3.2.9	Statistische Auswertungen.....	136
3.3.	Ergebnisse von Teilprojekt 2	137
3.3.1.	Stickstoffdüngerversuche bei Winterweizen.....	137
3.3.1.1.	Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2014	137
3.3.1.2.	Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2015	140
3.3.1.3.	Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2016	147
3.3.1.4.	Vergleich der Düngesysteme.....	150
3.3.2.	Stickstoffdüngerversuche bei Wintergerste	153

3.3.2.1.	Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2014	153
3.3.2.2.	Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2015	153
3.3.2.3.	Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2016	153
3.3.3.	Stickstoffdüngerversuche bei Mais.....	157
3.3.3.1.	Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2015	157
3.3.3.2.	Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2016	159
3.3.4.	Schlepper-Sensormessungen auf Praxis- und Versuchsflächen.....	161
3.3.4.1.	Gesamtschlaganalyse Wintergerste	161
3.3.4.2.	Gesamtschlaganalyse Winterweizen.....	164
3.3.4.3.	Düngervergleich Landwirt – sensorgestütztes Düngesystem Winterweizen	167
3.4.	Diskussion von Teilprojekt 2.....	173
3.4.1.	Methodischer Ansatz der Untersuchungen	173
3.4.1.1.	Feldexperimente mit unterschiedlichen N-Düngesystemen.....	173
3.4.2.	Ergebnisse der Stickstoffdüngerversuche.....	174
3.4.2.1.	Wirkungen organisch-mineralischer N-Düngung	174
3.4.2.2.	Bewertung der angewendeten Düngesysteme Sensor, DSN und BEFU.....	176
3.4.2.3.	Bewertung der spektralen Gesamtschlaganalyse in der Praxis.....	180
3.5.	Anhang zu Abschnitt 3.....	181
3.6.	Literatur zu Abschnitt 3	190
4.	Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz.....	193
4.1.	Tierhaltung und Tierfütterung.....	193
4.2.	Gülledüngung	194
4.3.	Mineraldüngung	196
4.4.	N-Salden und N _{min} -Vorräte der Böden	197
4.5.	Fruchtfolgegestaltung	199
4.6.	Beratung und Kontrolle	200
5.	Schlussfolgerungen und Ausblick	201

Zusammenfassung

Problemstellung und Forschungsansatz

In dem vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Projekt *“Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement – am Beispiel der Gemeinde Hohenthann“* wurden in den Jahren 2014 bis 2017 in zwei miteinander vernetzten Teilprojekten (a) modellgestützt betriebliche Stickstoffkreisläufe und Nitrataustragspotenziale in Betrieben unterschiedlicher Struktur und Produktionsrichtung analysiert sowie (b) die Ertragswirkungen und die N-Effizienz von N-Düngesystemen in Feldexperimenten auf Praxis schlägen untersucht. Ein Schwerpunkt lag hierbei auf der sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung mit einem neuentwickelten Düngesystem der TU München.

Als Untersuchungsgebiet wurden die Gemeinden Hohenthann, Pfeffenhausen und Rottenburg an der Laaber im Landkreis Landshut gewählt. In dieser Region besteht ein Konflikt zwischen intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung und Trinkwasserschutz. Durch den Ausbau der Schweinehaltung und den Bau von Biogasanlagen stieg in den vergangenen Jahren der Gülleanfall deutlich. Zugleich wurden in Trinkwasserbrunnen steigende Nitratgehalte im Rohwasser festgestellt. Als wichtigste Ursache sehen die Wasserversorger die Intensivtierhaltung und die damit verbundene Gülleausbringung an.

Methodischer Ansatz und Ziele der Untersuchungen in Teilprojekt 1

Im Teilprojekt 1 wurden Stickstoffflüsse landwirtschaftlicher Betriebe mit dem Modell REPRO analysiert und bewertet. Ein wesentliches Untersuchungsziel bestand darin, Stickstoffkreisläufe abzubilden, um potenzielle standort- und nutzungsbedingte Stickstoffverluste und Nitratausträge zu quantifizieren. Hierbei ging es vor allem um die Frage, unter welchen Bedingungen erhöhte Nitratverluste auftreten und durch welche Maßnahmen diese Verluste wirksam zu reduzieren sind.

Für die Analysen wurden 10 Betriebe unterschiedlicher Struktur ausgewählt, um ein breites Spektrum an Bewirtschaftungssystemen abzubilden. Die Betriebe unterschieden sich hinsichtlich der Tierarten, des Tierbesatzes (0 bis über 2 GV ha⁻¹), der ausgebrachten Güllemengen sowie der angebauten Fruchtarten und der Fruchtfolgen. Voraussetzung für die Projektteilnahme war die Bereitschaft zur Offenlegung betrieblicher Daten, die in ausreichender Qualität dokumentiert sein mussten. In den Betrieben wurden detaillierte Bewirtschaftungsdaten im Zeitraum 2013 bis 2015 erhoben und ausgewertet.

Es wurden Systemanalysen durchgeführt, die alle Komponenten (Pflanzenbau, Tierhaltung, Biogasanlage) umfassten. Dazu wurden Hofter-, Stall- und Flächenbilanzen verknüpft und in Modellrechnungen die Nitratauswaschung abgeschätzt. Die im Bilanzierungsmodell relevanten Systemgrenzen und N-Flüsse, die verwendeten Methoden, Algorithmen und Modellparameter sind im Forschungsbericht sehr detailliert beschrieben, damit die Berechnungen und Modellergebnisse nachvollziehbar sind. Das im Projekt verwendete Modell geht hinsichtlich der Detailliertheit und Aussagekraft, aber auch bezüglich des Datenbedarfs weit über einfache Bilanzierungsansätze (wie z.B. beim Nährstoffvergleich der Düngeverordnung) hinaus, um die Nitratausträge hinreichend genau quantifizieren zu können.

Parallel und ergänzend zur Modellierung erfolgten umfangreiche N_{min}-Analysen im Frühjahr, Sommer und Herbst sowie Tiefbohrungen (Rammkernsondierungen) zur Bestimmung von Nitratprofilen in der ungesättigten Zone. Somit war es möglich, Beziehungen zwischen Messwerten und Modellwerten zu prüfen. Auf der Grundlage der Modellergebnisse und Messwerte wurden Nitrat-Minderungsstrategien abgeleitet und hinsichtlich ihrer Effekte und ihrer Effizienz beurteilt.

Ergebnisse der Stickstoffbilanzierung

In den untersuchten Marktfruchtbetrieben betragen die Hoftor-N-Salden 79 bis 99 kg ha⁻¹, in den schweinehaltenden Betrieben 204 – 345 kg ha⁻¹. Die N-Salden der flächenbezogenen N-Bilanz erreichten 79 bis 174 kg ha⁻¹. Insgesamt lagen die N-Salden damit auf hohem Niveau, weshalb mit hohen N-Verlusten und Nitratausträgen zu rechnen ist.

Die in der Untersuchungsregion Hohenthann ermittelte N-Effizienz im Pflanzenbau von 45 bis 67 % zeigt ebenfalls einen Optimierungsbedarf an. Dabei traten erhebliche Unterschiede in der N-Effizienz in Abhängigkeit von Standortbedingungen und Ertragspotenzialen, Fruchtarten und Fruchtfolgen, organischer und mineralischer Düngung auf. In den untersuchten Schweinemastbetrieben wurde eine N-Effizienz der Tierhaltung von 32 bis 34 % ermittelt. Auch in der Tierhaltung konnten Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung aufgezeigt werden, die vor allem in der Fütterung ansetzen.

Wesentliche Ursachen für die hohen N-Salden sind der hohe Tierbesatz und Gülleanfall, Proteinüberschüsse in der Fütterung, der verbreitete Einsatz von Gülle im Herbst mit geringer N-Effizienz, die unzureichende Berücksichtigung von Gülle-Gaben und Boden-N-Nachlieferung bei der Bemessung der Mineral-N-Gaben sowie unrealistische Ertragserwartungen bei der Düngeplanung.

Sehr positiv zu bewerten ist die in einigen Betrieben während der Projektlaufzeit festgestellte Steigerung der N-Effizienz und Minderung der N-Salden, die auf ein verbessertes N-Management, den Einsatz neuer Technik (verlustarme Gülleapplikation) und optimierte N-Düngestrategien zurückzuführen sind.

Ergebnisse der N_{min}-Untersuchungen

Die höchsten Nachernte-N_{min}-Vorräte wurden nach Winterraps (56 kg ha⁻¹) gemessen, während sich die N_{min}-Vorräte von Weizen und Gerste (unter 30 kg ha⁻¹) nur wenig unterschieden. Es war kein Zusammenhang zwischen der Bewirtschaftung und den Nachernte-N_{min}-Vorräten erkennbar.

Die Herbst-N_{min}-Vorräte waren unter Raps und Zwischenfrüchten mit 18 bzw. 28 kg ha⁻¹ am niedrigsten. Bei Getreide zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Vorfrucht. Im Mittel wurden bei Weizen nach Zuckerrüben 39 kg ha⁻¹, bei Wintergetreide nach Getreide 71 kg ha⁻¹, nach Silomais 91 kg ha⁻¹, nach Körnermais 95 kg ha⁻¹ sowie bei Weizen nach Winterraps 124 kg ha⁻¹ gemessen. Somit zeigten auch die Herbst-N_{min}-Werte z.T. hohe Nitratverlustpotenziale an, die u.a. durch die langjährige Güllendüngung und das N-Mineralisationspotenzial der Böden zu begründen sind.

Die Frühjahrs-N_{min}-Vorräte unter Getreide hingen vor allem vom N_{min}-Vorrat im Herbst ab. Der Vergleich zu den Herbst-N_{min}-Werten zeigte aber einen hohen Abbau über Winter in der Schicht 0 – 60 cm, aber keine Zunahme in der Schicht 60 – 90 cm. Dies weist darauf zu hin, dass neben der Nitratauswaschung auch ein Abbau durch Denitrifikation sowie durch Immobilisationsprozesse stattfand. Zwischenfrüchte führten dagegen durch Mineralisation der abgestorbenen Biomasse zu steigenden N_{min}-Vorräten im Frühjahr. Nach Absterben der Zwischenfrüchte bis zur Probenahme im März fand zudem eine Nitrat-Tiefenverlagerung statt.

Ergebnisse der Tiefenbohrungen und Vergleich mit Modellergebnissen

Der Vergleich der in Tiefenprofilen ermittelten Nitratverlagerung mit der im N-Umsatzmodell berechneten Nitratauswaschung zeigte bei langfristiger Betrachtung einen guten Zusammenhang, wobei die Nitratauswaschung vom Modell (verglichen mit den Messwerten) überschätzt wurde. Möglicherweise sind dabei die Verluste durch Denitrifikation und Ammoniakausgasung vom Modell unterschätzt worden. Um dies zu klären, sind weitergehende Untersuchungen notwendig.

Methodischer Ansatz und Ziele der Untersuchungen in Teilprojekt 2

Um Möglichkeiten zur Erhöhung der Stickstoffdüngeneffizienz unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen, wurden auf Hoch- und Niedrigertragszonen von Praxisschlägen im Untersuchungsgebiet Düngeversuche (als randomisierte Exaktversuche mit vier Wiederholungen) zu Winterweizen (2014 bis 2016), Wintergerste (2014 bis 2016) und Mais (2015 und 2016) durchgeführt.

Geprüft wurden die Wirkungen unterschiedlicher N-Düngerformen (Gülle, Mineral-N), N-Aufwandmengen, Verteilung der N-Gaben sowie Düngesysteme (praxisüblich, DSN, BEFU und Sensor) auf die Ertragsbildung, die Produktqualität (Rohproteingehalte), den N-Entzug, die N-Salden und die N-Effizienz. Die N-Effizienz wurde nach der Differenzmethode im Vergleich zur ungedüngten „Nullvariante“ berechnet. Die zu bearbeitenden Forschungsfragen erforderten Ackerflächen mit unterschiedlichen Ertragszonen sowie hohem N-Mineralisationspotenzial nach langjähriger Gülledüngung. Die von den Landwirten bereitgestellten Flächen wurden vor Versuchsanlage betriebsüblich bewirtschaftet, d.h. die Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung u.ä. waren den jeweiligen Bedingungen angepasst.

Aus den Ergebnissen der Versuche konnten jeweils die Düngevarianten ermittelt werden, die den optimalen Ertrag unter Berücksichtigung des N-Saldo und der N-Effizienz erreichten.

Ergebnisse der Düngeversuche

Die Versuchsergebnisse bei Weizen, Gerste und Mais zeigen, dass die Ertragseffekte der Mineral-N-Düngung stark von den Bodenbedingungen (Ertragspotenzial, N-Mineralisationsleistung) abhängen. In den ungedüngten „Nullvarianten“ wurden N-Entzüge von 50 bis 135 kg ha⁻¹ erreicht, was vor allem auf die unterschiedliche N-Nachlieferung aus dem Boden zurückzuführen war. Bei geringer N-Freisetzung wurden die Erträge durch Mineral-N deutlicher gesteigert als bei hoher N-Nachlieferung. In den meisten Versuchen sank die N-Effizienz mit steigender N-Düngermenge.

In den Versuchen ergaben sich große Unterschiede in der N-Effizienz bei Gülledüngung von 5 bis 89 %. Bei Gülledüngung traten meist deutlich höhere N-Salden als bei alleiniger Mineral-N-Düngung auf. Besonders hoch waren die N-Salden auf Flächen, die im Herbst und im Frühjahr eine Gülledüngung erhielten. Aus den Versuchsergebnissen ist zu schlussfolgern, dass auf Herbst-Güllegaben zu Wintergetreide grundsätzlich verzichtet werden sollte. Güllegaben im Frühjahr sollten nur so hoch sein, dass der Gülle-N optimal durch die Pflanzen verwertet werden kann und eine gezielte Bestandesführung durch Mineral-N-Gaben unter Berücksichtigung des Ertragspotenzials möglich ist.

Die Bodenkarten zeigen eine große Heterogenität der Schläge im Untersuchungsgebiet. Die unterschiedlichen Bodeneigenschaften führten in den Versuchen zum Teil zu großen Ertragsdifferenzen zwischen Hoch- und Niedrigertragszonen sowie zu unterschiedlichen N-Entzügen. In den Hohertragszonen wurden erheblich niedrigere N-Salden (= N-Auswaschungspotenziale) als in den Niedrigertragszonen festgestellt. Durch eine teilflächenspezifische N-Düngung entsprechend dem jeweiligen Ertragspotenzial kann Dünger-N gespart werden, ohne auf Ertrag verzichten zu müssen.

Die z.T. gefundene geringe N-Effizienz der Gülle- und Mineraldüngung steht im Zusammenhang mit der hohen N-Mineralisationsleistung einzelner Teilschläge. Dies unterstreicht, dass die N-Nachlieferung bei der Mineral-N-Düngung berücksichtigt werden muss, um eine hohe N-Effizienz zu erzielen. Düngesysteme, die die N-Aufnahme (und damit indirekt die N-Nachlieferung) berücksichtigen (Sensor, BEFU), bieten deutliche Vorteile gegenüber Systemen, die nur Bewirtschaftungsdaten einbeziehen.

Vergleich der Düngesysteme

In den Versuchen zeigte sich, dass die N-Düngesysteme aufgrund unterschiedlicher Berechnungsmodelle abweichende N-Düngeempfehlungen ausgeben. Nicht nur die Wahl des Düngesystems (DSN, BEFU, Sensor) beeinflusste die N-Düngeempfehlung, sondern auch die Vorgabe der Zielerträge. Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse ist zu beachten, dass DSN und BEFU teilflächenspezifisch zur Anwendung kamen, denn es wurden Versuche in Hoch- und Niedrigertragszonen angelegt und hierbei unterschiedliche Zielerträge angenommen. Bei der praxisüblichen schlageinheitlichen Anwendung der Düngesysteme DSN und BEFU findet keine Differenzierung nach Ertragszonen statt, so dass es in der Praxis zu einer stärkeren N-Über- oder Unterversorgung der Pflanzenbestände kommen kann.

Sensorgestütztes Düngesystem der TU München

Das Düngesystem nach TUM-Algorithmus wurde in den Untersuchungsjahren 2015 und 2016 bei Winterweizen und Wintergerste angewendet. Durch den Düngealgorithmus wird auf Grundlage des Spektralwerts REIP der N-Düngebedarf zu verschiedenen EC-Stadien (EC 32, EC 39) berechnet und hierbei das standortspezifische Ertragspotenzial und der Zielrohproteingehalt berücksichtigt. Das System wurde auf Standorten ohne organische Düngung entwickelt. Daher war es wichtig zu untersuchen, inwieweit es auch auf Standorten mit langjähriger Gülledüngung erfolgreich eingesetzt werden kann. Durch den Sensor wurde die N-Versorgung der Pflanzen sehr gut abgebildet. Mit dem Sensorsystem wurden je nach Bestandsentwicklung bei hoher N-Nachlieferung aus Boden oder Gülle die N-Gaben deutlich reduziert. Die Düngebedarfsermittlung nach Sensor führte im Vergleich zu den anderen Düngesystemen zu hohen Erträgen bei einer relativ hohen N-Düngeeffizienz.

Der neue TUM-Düngealgorithmus zu Wintergerste entspricht in Aufbau und Funktionsprinzip dem Winterweizen-Düngesystem. Die Anwendung erfolgte auf Flächen mit langjähriger Gülledüngung. Auch bei Wintergerste führte die sensorgestützte Düngung zu einer Effizienzsteigerung und ist als wirksame Maßnahme zum Trinkwasserschutz zu empfehlen.

Das im Jahr 2014 konstruierte und getestete Schleppersensorsystem kam bei der Düngung von Wintergerste und Winterweizen erstmalig zum Einsatz und zeigte seine Praxistauglichkeit. Im Praxiseinsatz ist es künftig notwendig, die Sensormessdaten des TUM-Schleppersystems mit dem Mineraldüngerstreuer zu verbinden und so gleichzeitig zu messen und zu düngen. Dies konnte im Projekt noch nicht realisiert werden, da hierzu noch weitere Entwicklungsarbeiten zu leisten sind.

Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz

Auf der Basis der Projektergebnisse wurden praxisanwendbare Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz und Minderung der Nitratausträge erarbeitet. Die Maßnahmen und Optimierungsstrategien beziehen sich auf die Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen der Untersuchungsregion; sie sind aber auch auf andere Agrarregionen Bayerns mit intensiver Tierhaltung übertragbar.

Eine Bewertungsmatrix gibt einen Überblick zu Umsetzbarkeit, Effizienz und Kosten von Maßnahmen in den Handlungsfeldern (1) Tierhaltung und Tierfütterung, (2) Gülledüngung, (3) Mineraldüngung, (4) N-Salden und N_{\min} -Vorräte der Böden, (5) Fruchtfolgegestaltung, (6) Beratung und Kontrolle. Zu den wichtigsten Maßnahmen zählen demnach (1) Optimierung der Fütterung, Ausbau der Güllelagerkapazität, Begrenzung des Tierbesatzes, (2) Gülleanalysen, verlustarme Ausbringtechnik, keine Gülledüngung im Herbst zu Getreide, keine zeitgleiche Gülle- und Mineral-N-Gabe im Frühjahr, (3) sorgfältige Düngeplanung, ertragsangepasste Düngung, Anwendung von Düngesystemen, sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung, (4) Einhaltung von N-Salden unter 50 kg ha^{-1} , um Nitratgehalte von

50 mg l⁻¹ im Sickerwasser nicht zu überschreiten, Nutzung von Herbst-N_{min} als Indikator zum Trinkwasserschutz und Frühjahrs-N_{min} bei der Düngebedarfsermittlung, (5) Optimierung der Fruchtfolge bezüglich des Mais- und Rapsanteils und Integration von Zwischenfrüchten mit hoher N-Aufnahme, (6) intensive Beratung und Schulung der Landwirte sowie Kontrolle der Einhaltung der Düngeverordnung.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Forschungsprojekt Hohenthann wurden auf der Grundlage der betrieblichen Stickstoffbilanzierung und umfangreicher Düngungsversuche neue Erkenntnisse zur N-Effizienz und Nitrataustragsgefährdung bei hohem Gülleinsatz gewonnen. Die Nährstoffsituation der Untersuchungsregion kann sehr gut eingeschätzt werden. Darauf aufbauend wurden Maßnahmen zum Trinkwasserschutz abgeleitet, die tatsächlich eine Minderung der Nitratausträge bewirken und die in den Betrieben umsetzbar sind.

Die am Beispiel der Gemeinden Hohenthann, Pfeffenhausen und Rottenburg a.d. Laaber festgestellten Nutzungskonflikte zwischen intensiver Landwirtschaft und Trinkwassergewinnung und die Lösungsvorschläge und Maßnahmen sind von grundlegender Bedeutung. Auch in anderen Agrarregionen mit hohen Tierkonzentrationen kommt es zu Nährstoffüberschussproblemen, zum Anstieg der Nitratgehalte im Grundwasser sowie zur Eutrophierung von Oberflächen- und Fließgewässern. Daher sind die beispielhaften Untersuchungen der Stickstoffflüsse in der „Modellregion Hohenthann“ sowie die Ableitung von Nitratminderungsstrategien unter Nutzung modernster Technik (Modellierung, Sensoreinsatz, Precision Farming) als Lösungsansatz auch für andere Agrargebiete relevant und übertragbar. Die Nutzung dieser Technik ermöglicht Grundwasserschutz ohne Ertragsverluste im Pflanzenbau und trägt dazu bei, den Konflikt zwischen Landwirtschaft und Trinkwasserschutz wesentlich zu entschärfen. Die Anwendung des Precision Farming und moderner N-Managementsysteme hat generelle Bedeutung für die Erhöhung der Stickstoffeffizienz und den flächendeckenden Grundwasserschutz in Bayern.

Im Projekt Hohenthann konnten aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit und Forschungskapazitäten nicht alle Fragen zur Gülle- und Nitratproblematik geklärt werden; zudem ergaben sich bei der Projektbearbeitung neue Fragestellungen. Die Forschungsarbeiten sollten daher in Folgeprojekten fortgesetzt werden. Schwerpunkte sollten hierbei die Praxiserprobung und der Transfer neuer Dünge- und N-Managementsysteme bilden. Folgende Forschungsschwerpunkte sollten bearbeitet werden:

- Weiterentwicklung des sensorgestützten TUM-Düngesystems bis zur Praxisreife, Erarbeitung spezifischer N-Düngealgorithmen für Trinkwasserschutzgebiete,
- Praxiseinführung und -erprobung eines neuentwickelten Web-basierten N-Managementsystems auf Grundlage der in Hohenthann verwendeten N-Bilanzierungsmethoden,
- Flächendeckende, räumlich differenzierte Stickstoffbilanzierung und Analyse der Nitrataustragspotenziale in Agrarregionen, ergänzend zu den betrieblichen Analysen,
- Analyse der überbetrieblichen Stoffströme (Gülletransfer) und der Vernetzung der Betriebe,
- Messung der Denitrifikationsverluste von Böden in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und N-Mineralisationspotenzialen nach langjähriger Gülledüngung,
- Umstellung auf ökologischen Landbau (Umsetzbarkeit in Regionen mit intensiver Tierhaltung, Wirkungen auf N-Salden, N-Effizienz und Nitratverluste),
- Ökonomische Bewertung von Nitratminderungsmaßnahmen, Analyse von Kosten und Nutzen moderner Sensorsysteme, Entwicklung eines Kooperationsmodells von Wasserwirtschaft und Landwirtschaft zur Förderung der Praxiseinführung dieser innovativen Düngesysteme.

1. Gegenstand und Zielsetzung des Projektes

1.1. Problemstellung und Forschungsbedarf

Die landwirtschaftlichen Nutzflächen im Untersuchungsgebiet der Gemeinden Hohenthann, Pfeffenhausen und Rottenburg an der Laaber im niederbayerischen Landkreis Landshut (Abb. 1) werden aufgrund günstiger Standortbedingungen intensiv genutzt.

In den vergangenen Jahren ist die Nutzungsintensität durch den Ausbau der Schweinehaltung und den Bau von Biogasanlagen weiter erhöht worden. Die Schweinezucht und -mast kann in den wachstumsorientierten Betrieben wirtschaftlich effizient betrieben werden. In einigen Betrieben erreicht der Tierbesatz inzwischen über $2,0 \text{ GV ha}^{-1}$. Dadurch stieg der Anfall von Wirtschaftsdüngern, insbesondere das Gülleaufkommen. Es stellt sich daher die Frage, ob die anfallenden Nährstoffmengen pflanzenbedarfsgerecht genutzt werden können oder grundwassergefährdende Nitratverluste auftreten.

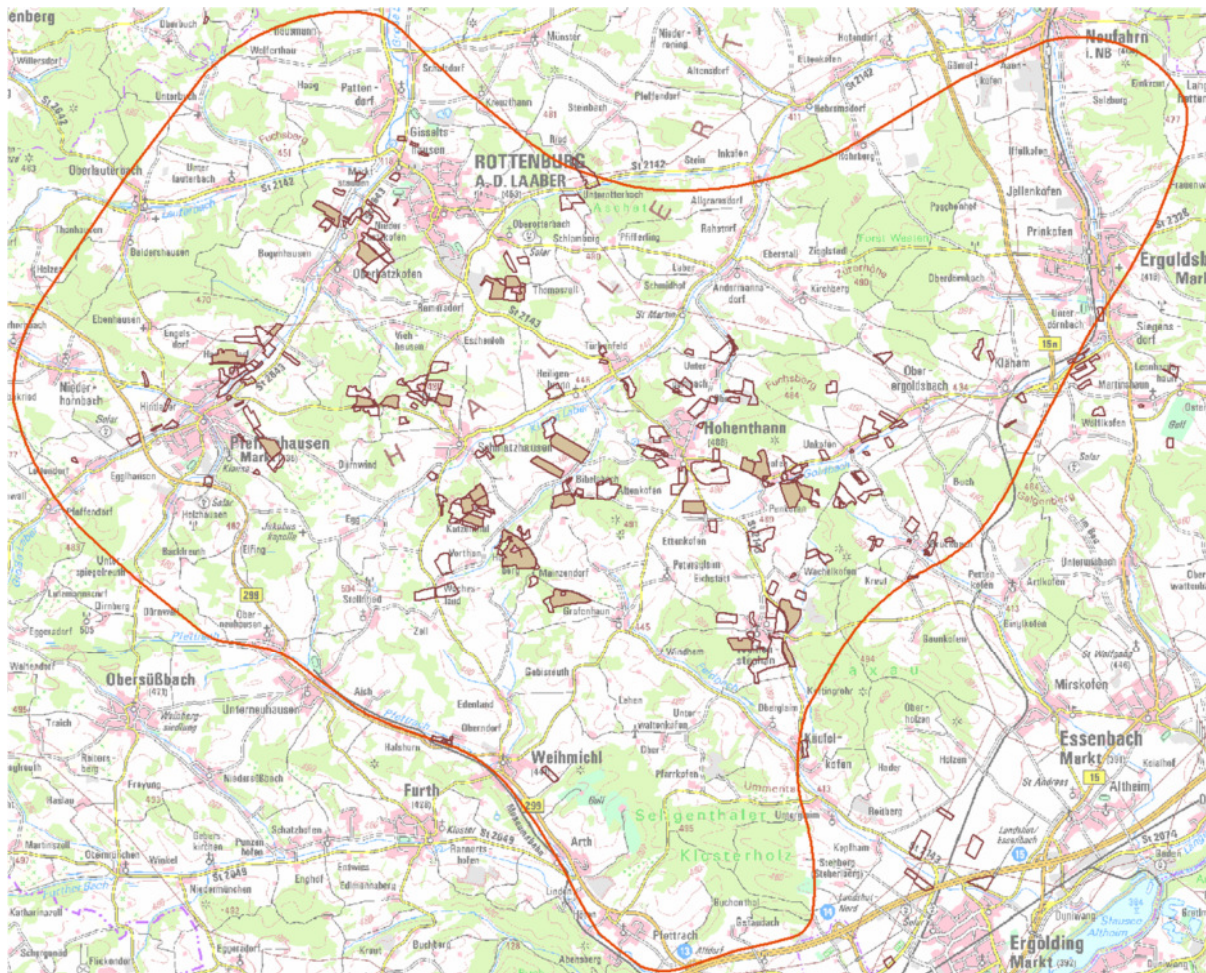


Abb. 1: Untersuchungsgebiet und Untersuchungsflächen

- Umgriff Projektgebiet
- Flächen der untersuchten Betriebe
- Beprobte Flächen

Seit einigen Jahren zeichnet sich in dieser Region ein Konflikt mit dem Trinkwasserschutz ab. In einigen Trinkwassergewinnungsanlagen ist ein Anstieg der Nitratkonzentration im Rohwasser festzustellen, z.B. im Trinkwasserbrunnen 2 in Hohenthann von 22 mg l⁻¹ im Jahr 1980 auf 42 mg l⁻¹ im Jahr 2014, so dass in absehbarer Zeit in einzelnen Brunnen die EU-Nitratgrenzwerte überschritten werden könnten¹. Als wichtigste Ursache sehen die Wasserversorger die Intensivtierhaltung und die damit verbundene Gülleausbringung an.

Allerdings lagen bisher keine detaillierten, wissenschaftlich fundierten Untersuchungen zu den Ursachen des Nitratanstiegs im Grundwasser vor. Der Zusammenhang zwischen landwirtschaftlicher Flächennutzung und Nitrat im geförderten Wasser ist außerordentlich komplex. Hierbei spielen nicht nur die Art und Intensität der landwirtschaftlichen Flächennutzung eine wichtige Rolle, sondern auch die standortbedingten Nitrataustragspotenziale (abhängig von der Niederschlagsmenge, dem Oberflächenabfluss und der Verdunstung sowie der Wasserspeicherkapazität der Böden, der Wasseraustauschrate und der daraus resultierenden Sickerwassermenge) sowie der Nitratabbau in der ungesättigten Zone und im Aquifer sowie die Verweilzeit des Wassers im Trinkwasserleiter bis zur Förderung. Die Ableitung von wirksamen Maßnahmen und Optimierungsstrategien zur Minderung von Nitratausträgern setzt die Aufklärung der zugrundeliegenden Prozesse der Nitratauswaschung voraus.

Die am Beispiel der Gemeinden Hohenthann, Pfeffenhausen und Rottenburg a.d. Laaber dargestellten Nutzungskonflikte zwischen intensiver Landwirtschaft und Trinkwassergewinnung sind von grundlegender Bedeutung. Auch in anderen Agrarregionen mit hohen Tierkonzentrationen kommt es, teilweise verstärkt durch den Betrieb von Biogasanlagen, zu Nährstoffüberschussproblemen, zum Anstieg der Nitratgehalte im Grundwasser sowie zur Eutrophierung von Oberflächen- und Fließgewässern.

Daher sind die beispielhafte Untersuchung sowie die Ableitung von Nitratminderungsstrategien und Lösungsansätzen in der „Modellregion Hohenthann“ auch für andere Agrargebiete relevant und haben generelle Bedeutung für Bayern, z.B. hinsichtlich der Übertragbarkeit von Minderungsstrategien.

¹ Die Trinkwassergewinnungsanlagen der Gemeinde Hohenthann gehören zum Zweckverband zur Wasserversorgung - Rottenburger Gruppe, der in seinem Gebiet von 504 Quadratkilometern über 38.000 Einwohner in 16 Gemeinden mit Trinkwasser versorgt.

1.2. Forschungsansatz und Projektstruktur

Das vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderte Projekt „Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement – am Beispiel der Gemeinde Hohenthann (Niederbayern) mit intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung“ ist Teil eines Forschungsverbundvorhabens (Abb. 2). Kooperationspartner sind die Technische Universität München (TUM), die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) und das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU).

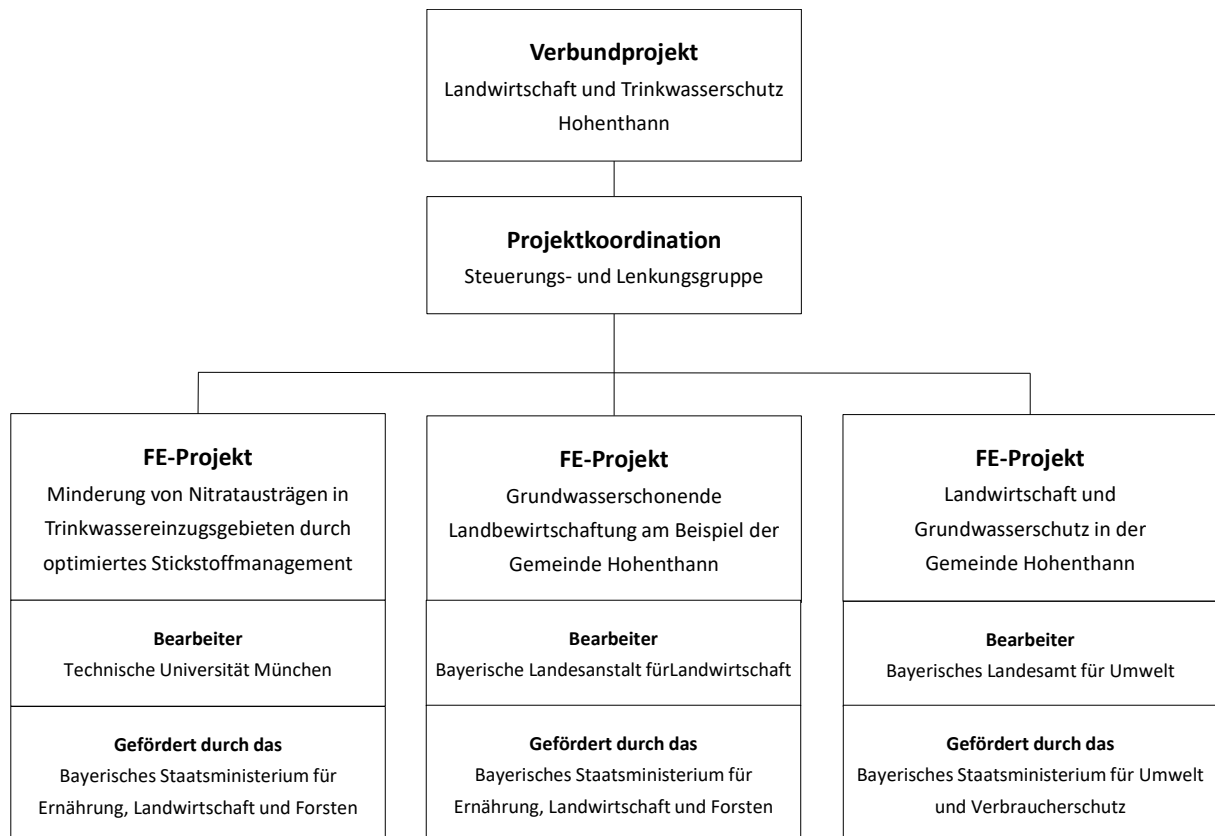


Abb. 2: Struktur des Forschungsverbundprojektes

Das Projekt der Technischen München war agrarwissenschaftlich, das Projekt des Bayerischen Landesamtes für Umwelt geohydrologisch, das Projekt der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft umsetzungsorientiert ausgerichtet. Für den Erfolg des Verbundprojektes war es entscheidend, die Projekte inhaltlich und zeitlich (Arbeitsschritte, Daten- und Informationsaustausch) eng zu vernetzen und die Projektarbeiten fortlaufend abzustimmen. Die Projektkoordination übernahm eine Lenkungs- und Steuerungsgruppe.

Folgende übergeordnete Fragestellungen wurden im Verbundprojekt interdisziplinär bearbeitet:

- Analyse von Ursachen für den Anstieg der Nitratgehalte im oberflächennahen Grundwasser: Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Betriebstyp (Marktfruchtbetrieb, Milchviehbetrieb, Schweinemastbetrieb), Betriebsstruktur (Tierbesatz, Fruchtfolge), Nährstoffflüssen (Gülleanfall, Düngeintensität, Nährstoffentzug) sowie der N-Effizienz, dem N-Saldo und der potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser.
- Analyse von Ursachen für den Anstieg der Nitratgehalte im geförderten Rohwasser: Untersuchung des Einflusses der Flächennutzung (Landwirtschaft, Forstwirtschaft) sowie der geohydrologischen Bedingungen, z.B. der Fließrichtung, Fließstrecke, der Verweilzeit des Wassers sowie den Nitratabauraten im Aquifer.
- Ableitung praxisanwendbarer Nitratminderungsstrategien: Untersuchung der Wirksamkeit unterschiedlicher Maßnahmen zur Optimierung der Stickstoffkreisläufe und zur Minderung von N-Salden und Nitratausträgen. Ein Untersuchungsschwerpunkt ist hierbei der Einsatz der teilflächenspezifischen sensorgestützten N-Düngung (Precision Farming).

Das Projekt der TU München ist in zwei Teilprojekte untergliedert:

- Teilprojekt 1: Analyse des Nitratbelastungspotenzials in Abhängigkeit von der landwirtschaftlichen Flächennutzung und Ableitung von Nitrat-Minderungsstrategien,
- Teilprojekt 2: Erprobung und Umsetzung von Maßnahmen zur Minderung der Nitratausträge mit dem Schwerpunkt „teilflächenspezifische Stickstoffdüngung“.

Das Projekt wurde unmittelbar nach Bewilligung der Fördermittel und Besetzung der Projektstellen Anfang März 2014 begonnen und im Juni 2017 beendet. Nachfolgend werden die Ziele, die verwendeten Untersuchungsmethoden und Modelle sowie die Projektergebnisse dargestellt und diskutiert. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse werden Schlussfolgerungen zum weiteren Forschungsbedarf gezogen und praxisanwendbare Empfehlungen für eine grundwasserschonende landwirtschaftliche Flächennutzung in Agrarregionen mit intensiver Tierhaltung abgeleitet.

2. Analyse des Nitratbelastungspotenzials und Nitrat-Minderungsstrategien (Teilprojekt 1)

Felix Forster, Kurt-Jürgen Hülsbergen

2.1. Untersuchungsziele und Forschungsansatz in Teilprojekt 1

Im Teilprojekt 1 wurden die Stickstoffflüsse in ausgewählten Betrieben mit unterschiedlicher Struktur und Bewirtschaftungsintensität im Projektgebiet modellgestützt analysiert und bewertet. Ein wesentliches Ziel bestand darin, die betrieblichen Stickstoffflüsse und Stickstoffkreisläufe abzubilden sowie die potenziellen standort- und nutzungsbedingten N-Verluste und Nitratausträge zu quantifizieren.

In den Untersuchungen ging es vor allem um die Frage, unter welchen Bedingungen erhöhte Stickstoffausträge und Nitratverluste auftreten und durch welche Maßnahmen diese Verluste wirksam zu reduzieren sind.

In den Untersuchungsbetrieben wurden Systemanalysen durchgeführt, die alle Komponenten (Pflanzenbau, Tierhaltung, Biogasanlage) und deren Vernetzung durch Stoffströme umfassen. Dazu wurden Hoftor-, Stall- und Flächenbilanzen auf Einzelschlagebene verknüpft und mittels Modellrechnungen die Nitratauswaschung abgeschätzt. Parallel erfolgten umfangreiche N_{\min} -Analysen im Frühjahr, Sommer und Herbst sowie Tiefbohrungen (Rammkernsondierungen) auf Praxis schlägen, um diese Messwerte in Beziehung zu Modellwerten (Stickstoffbilanzen) stellen zu können.

Auf dieser Datengrundlage wurden Nitrat-Minderungsstrategien abgeleitet sowie hinsichtlich ihrer Effekte und ihrer Effizienz beurteilt. Es wurden Schlussfolgerungen gezogen, inwieweit die in der „Modellregion Hohenthann“ erarbeiteten Lösungsansätze auch auf andere Agrarregionen Bayerns übertragbar sind.

2.2. Material und Methoden

Die Stickstoffströme der Untersuchungsbetriebe wurden mit dem Modell REPRO analysiert (Küstermann et al. 2010) und die Stickstoffverlustpfade modellgestützt abgeschätzt (Abraham 2001). Es wurde eine gesamtbetriebliche Systemanalyse durchgeführt, die alle Komponenten (Pflanzenbau, Tierhaltung, Biogasanlage) und deren Vernetzung durch Stoffströme umfasst. Dazu wurden Hoftor-, Stall- und Flächenbilanzen auf Einzelschlagebene verknüpft und mittels Modellrechnungen die Nitratauswaschung abgeschätzt. Als räumliche Grenzen wurden jeweils der gesamte Betrieb sowie die einzelnen Schläge bzw. Teilschläge des Betriebs betrachtet.

2.2.1. Datengrundlagen und Betriebsdatenerfassung

Für die betrieblichen Analysen wurden detaillierte Bewirtschaftungsdaten erhoben. Grundlage für die Auswertungen waren vor allem Ackerschlagkarteien und LKV¹-Berichte sowie Angaben im Mehrfachantrag und in der HIT²-Datenbank. Des Weiteren wurden Analyseergebnisse von Futtermitteln, Gülle sowie Bodenuntersuchungen aufgenommen. Die übrigen Bewirtschaftungsdaten wurden von den Betriebsleitern erfragt. Folgende Daten wurden dabei erfasst:

Pflanzenbau:

- (1) Schlagdaten: GIS-Daten der Schläge mit Schlagbezeichnung, Schlaggröße und Lage des Schlages,
- (2) Fruchtarten (Haupt- und Zwischenfrüchte): Saatgutaufwand, Aussaatdatum, angebaute Sorte,
- (3) Nutzung der Grünlandflächen (Nutzungsart, Schnitthäufigkeit),
- (4) Schlag- und fruchtartbezogene (Hauptfrucht, Zwischenfrucht) organische und mineralische Düngung: Düngerart, Aufwandmenge, Termin, Ausbringungsverfahren,
- (5) Erträge und Verwendung der Ernteprodukte mit TS-Gehalten und Proteingehalten.

Tierhaltung:

- (1) Tierbestand (Jahresdurchschnittsbestand) für jede Tierart bzw. Produktionsrichtung,
- (2) Zukauf, Verkauf und Verluste an Tieren, Anzahl und Gewicht,
- (3) Tierartspezifische Leistungsparameter: Tageszunahmen, Mastdauer, Milchleistung (bei Kühen), Anzahl Nachkommen, Wurfanzahl bzw. Zwischenkalbezeit sowie Futtermittelverwertung,
- (4) Aufstallungsart, Stallhaltungssystem (evtl. Stroheinsatz),
- (5) Organische Dünger: Lagerdauer, Abdeckung, Nährstoffanalysen, ausgebrachte und abgegebene Menge,
- (6) Futtereinsatz (Eigenfutter, Zukauffutter).

Biogasanlagen:

- (1) Anlagendaten: Leistung, Aufbau der Anlage (Fermenter, Nachgärer, Gärrestlager, Abdeckung),
- (2) Eingebrachtes Substrat (Eigenproduktion und Zukauf),
- (3) Gärreste: Analyseergebnisse, ausgebrachte und abgegebene Menge.

Lagen die entsprechenden Daten beim Betriebsleiter nicht vor (waren z.B. Erträge von Zwischenfrüchten nicht bekannt), so wurden Standardwerte verwendet.

¹ Landeskuratorium für tierische Veredelung

² Herkunftssicherungs- und Informationssystem für Tiere

Im Pflanzenbau wurden die Fruchtarten dem jeweiligen Erntejahr zugeordnet. Das Produktionsverfahren beginnt dabei nach Ernte der Vorfrucht. So wurde eine Düngung vor der Saat von Winterungen dem Jahr zugeordnet, in dem die Winterung geerntet wurde. Zwischenfrüchte mit Beerntung wurden wie Hauptfrüchte behandelt. Bei Grünland oder Ackergras wurden Schnitte und Düngung dem Jahr zugeordnet, in dem sie durchgeführt werden. Zwischenfrüchte zur Gründüngung wurden dem Jahr zugeordnet, in dem sie angebaut werden. Die Aufwüchse von Gründüngungspflanzen wurden in Abhängigkeit von der Vorfrucht und der Zwischenfruchtart geschätzt (Tab. A. 1) und der Aufwuchs in der Folgefrucht als organischer Dünger angegeben.

Die Tierhaltung wurde je nach Datenlage der Betriebsleiter in Kalender- bzw. Wirtschaftsjahren aufgenommen. Traten bei den Erträgen sowie dem Futterzukauf größere Schwankungen zwischen den Jahren auf, so wurde angenommen, dass Lagerbestände auf- oder abgebaut wurden. Über alle Untersuchungsjahre betrachtet, wurden immer das gesamte zugekaufte Futter sowie das eigenproduzierte Futter als verfüttert angenommen.

Datengrundlage Standort und Wetter

Bodendaten, die vom Modell benötigt werden, stammen aus der Übersichtsbodenkarte 1:25.000 (ÜBK 25) (LfU 2013) bzw. aus der Bodenschätzungskarte. Die ÜBK 25 enthält schichtbezogenen Angaben zu Bodenart, Skelett- und Humusgehalt sowie zur Trockenrohdichte des Bodens, aus denen im Modell Feld- und Luftkapazitäten geschätzt werden. Die Tiefe des Bodenprofils (effektive Durchwurzelungstiefe) wurde auf Basis der Bodenart in der untersten Schicht nach dem Schema der KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005) abgeschätzt. Aus der Bodenschätzungskarte (LDBV 2011) stammen die Ackerzahlen der einzelnen Schläge.

Die vom Modell in Tagesschritten benötigten Wetterdaten Niederschlag, Lufttemperatur und Globalstrahlung stammen aus der jeweils nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienst (DWD 2016) oder der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL 2016). Zentral im Projektgebiet befindet sich eine Niederschlagsstation des DWD (Station Hohenthann). Um deren Daten nutzen zu können, wurde die Station für Temperatur und Globalstrahlung getrennt von der Niederschlagsstation zugeordnet (Tab. A. 2). Zusätzlich wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD 2016) Jahreswerte der potenziellen Verdunstung zur Verfügung gestellt, die Eingang in die Sickerwasserberechnung der Tiefenprofile fanden.

2.2.2. Methodik der Stickstoffbilanzierung

Um den betrieblichen Stickstoffkreislauf darstellen zu können, erfolgte eine Verknüpfung von Flächenbilanz, Stallbilanz und Hoftorbilanz. Dies ermöglichte eine vollständige Erfassung der Stickstoffflüsse im Betrieb sowie eine Überprüfung der verschiedenen Bilanzglieder.

Flächenbezogene Stickstoffbilanz

Aus den Aufzeichnungen und Angaben der Betriebsleiter wurden zunächst Stickstoffbilanzen auf Ebene des Schlages berechnet (HÜLSBERGEN 2003). Dabei wurden als Inputgrößen die mineralische und organische Düngung, die N₂-Fixierung der Leguminosen sowie der Stickstoffeintrag über Saatgut und

über Deposition aus der Atmosphäre (N-Immission) berücksichtigt (Abb. 3). Im Unterschied zur Stickstoffbilanz (Nährstoffvergleich) nach Düngeverordnung wurden auch der Stickstoffeintrag über Saatgut und die N-Immission einbezogen. Dadurch wurde eine vollständige N-Bilanz erreicht, die nötig war, um die Nitratverluste korrekt abschätzen zu können. Auf der Output-Seite stand der Stickstoffentzug der geernteten Haupt- und Nebenprodukte.

Das Berechnungsverfahren ist in Gleichung 1 dargestellt.

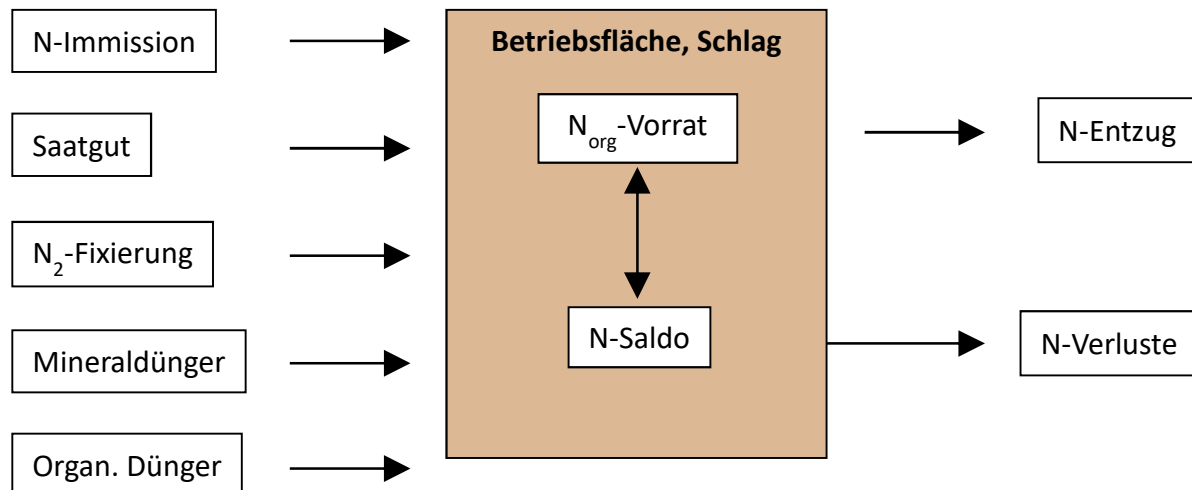


Abb. 3: Berücksichtigte Größen bei der Berechnung des Stickstoffsaldos

$$S_N = N_I + N_{SYM} + N_{SG} + N_{SD} + N_{OD} + N_{MD} - N_E \quad (1)$$

S_N	=	N-Saldo	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_I	=	N-Immission	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{SYM}	=	Symbiotische N-Fixierung	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{SG}	=	N-Zufuhr mit Saatgut	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{SD}	=	N-Zufuhr mit Stroh- und Gründüngung	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{OD}	=	N-Zufuhr mit Wirtschaftsdüngern	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{MD}	=	Mineral-N-Düngung	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_E	=	N-Entzug	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)

Der N-Saldo stellt einen Indikator für die potenziellen N-Verluste dar. Dabei wird zunächst nicht angegeben, ob die Verluste in Form von Nitrat über das Sickerwasser oder aber gasförmig als Ammoniak oder durch Denitrifikation entstehen.

Durch die Einbeziehung zusätzlicher Bilanzglieder (N-Immission und Saatgut) sowie dem fehlenden Abzug von N-Verlusten entsprechen die hier dargestellten Ergebnisse, insbesondere die N-Salden, nicht der Kalkulation nach der Düngeverordnung (Nährstoffvergleich).

Die einzelnen N-Bilanzglieder sind mit unterschiedlicher Genauigkeit ermittelbar. So sind vor allem die Höhe der symbiotischen Stickstofffixierung, der N-Immission, aber auch die Stickstoffmengen, die in Form von Wirtschaftsdüngern appliziert werden, mit Unsicherheiten behaftet.

Die Stickstoff-Immission wurde mit $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ angesetzt (UBA 2015)¹.

Die Berechnungswege für die symbiotische N_2 -Fixierung, sowie die N-Zufuhr aus Wirtschaftsdüngern mittels der Stallbilanz sind nachfolgend dargestellt. Bei der N-Zufuhr über Saatgut gehen die Saatmenge (in kg ha^{-1}), sowie REPRO-Standardwerte für die Inhaltsstoffe ein. Für die Inhaltsstoffe von Stroh- und Gründüngung werden ebenfalls Standardwerte verwendet. Stroherträge werden über das Korn-Stroh-Verhältnis berechnet (Tab. A. 4), während die Aufwüchse von Gründüngungen auf Grundlage von Biomasseschnitten im Jahr 2014 geschätzt werden. Bei Heu- und Silagenutzung werden zudem Konservierungsverluste in Höhe von 15 (Maissilage) – 30 (Bodenheu) % angesetzt. Davon verbleiben 70% am Feld, da der Aufwuchs von der eingesetzten Erntetechnik nicht vollständig erfasst werden kann. Die Feldverluste werden dem Boden wieder als Gründüngung zugeführt. N-Entzüge der Ernteprodukte beruhen, sofern keine Analyseergebnisse vorlagen, auf den in Tab. A. 3 dargestellten Inhaltsstoffen.

N-Effizienz pflanzliche Produktion

Zusätzlich zum N-Saldo wird die N-Effizienz der pflanzlichen Produktion ausgewiesen. Dabei wird das Verhältnis der N-Entzüge in den Ernteprodukten zur N-Zufuhr auf die Flächen berechnet (Gleichung 2). Die N-Zufuhren setzen sich zusammen aus Mineraldünger, Wirtschaftsdüngern, der Gründüngung durch Zwischenfruchtaufwüchse, den N-Immission, der N_2 -Fixierung sowie der N-Zufuhr mittels Saatgut. Der N-Entzug besteht nur aus den N-Mengen in tatsächlich geernteten Haupt- und Nebenprodukten. Feldverluste sind nicht enthalten. Die N-Verwertung wird auch für Zwischenfrüchte ausgewiesen. Bei der Aggregation auf den Ebenen Betrieb oder Ackerland werden Zwischenfruchtaufwüchse und N-Zufuhr über Gründüngungszwischenfrüchte nicht berücksichtigt.

$$NE_{Pfl} = \frac{N_{EP}}{N_{MD} + N_{WD} + N_{GD} + N_I + N_{SYM} + N_{SG}} \quad (2)$$

NE_{Pfl}	=	N-Effizienz der pflanzlichen Produktion	(%)
N_{EP}	=	N-Entzug Ernteprodukte	($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
N_{MD}	=	Mineral-N-Düngung	($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
N_{WD}	=	N-Zufuhr mit Wirtschaftsdüngern	($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
N_{GD}	=	N-Zufuhr durch Gründüngungszwischenfrucht	($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
N_I	=	N-Immission	($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
N_{SYM}	=	Symbiotische N-Fixierung	($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
N_{SG}	=	N-Zufuhr mit Saatgut	($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)

¹ Im Projekt wurden mittlere N-Immissionen in Höhe von 20 kg ha^{-1} angenommen. Das Bayerische Landesamt für Umwelt hat in der Untersuchungsregion an mehreren Standorten Immissionsmessungen durchgeführt. Hierbei wurden N-Immissionen von etwa 25 kg ha^{-1} festgestellt.

Symbiotische N₂-Fixierung

Bei Leguminosen wird die N₂-Fixierung für die Ernteprodukte (NE_{Sym}) und für die Ernte- und Wurzelrückstände (NR_{Sym}) getrennt berechnet (Gleichung 3 und 4). Dabei hängt die N₂-Fixierung vom N-Ertrag in den Ernteprodukten sowie vom fruchtartsspezifischen Anteil des aus der N₂-Fixierung stammenden Stickstoffs (N_{dfa}), ab (Tab. A. 5 Tab. A.). Der in den Ernte- und Wurzelrückständen fixierte Stickstoff wird mit Hilfe von Ertrags- und N-Gehaltsrelationen berechnet. Für jede Fruchtart ist eine minimale sowie eine maximale N₂-Fixierung pro Hektar und Jahr definiert. Beim Anbau von Gemengen aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen (Zwischenfrüchte, Klee gras) sowie im Grünland geht zudem der geschätzte Leguminosenanteil in die Berechnung ein.

$$NE_{Sym} = E * TM * N_{TM} * L * N_{dfa} \quad (3)$$

$$NR_{Sym} = NE_{Sym} * r_{TM} * r_N \quad (4)$$

NE_{Sym}	=	N ₂ -Fixierung im Ernteertrag	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
E	=	Ernteertrag (Frischmasse)	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
TM	=	Trockenmassegehalt	(%)
N_{TM}	=	N-Gehalt in der Trockenmasse (Tab. A. 3)	(%)
L	=	Leguminosenanteil	(%)
N_{dfa}	=	Anteil des Stickstoffs aus N ₂ -Fixierung (Tab. A. 5)	(%)
NR_{Sym}	=	N ₂ -Fixierung in Ernte- und Wurzelrückständen (EWR)	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
r_{TM}	=	TM-Ertragsrelation; Verhältnis EWR / Hauptprodukt (Tab. A. 4)	
r_N	=	N-Gehaltsrelation; Verhältnis EWR / Hauptprodukt (Tab. A. 4)	

Stallbilanz

Die Berechnung der Stallbilanz dient in erster Linie der Abschätzung des Anfalls an organischen Düngern für die Verwendung in der Flächenbilanz. Daneben können aus der Stallbilanz viele Parameter abgeleitet werden, um die Effizienz der Tierhaltung sowie die Plausibilität der Tierhaltungs- und Fütterungsdaten beurteilen zu können.

Zunächst wird auf Basis der eingesetzten Futtermittel sowie des Tierzukaufs abzüglich des Stickstoffs in tierischen Produkten sowie in Tierverlusten der Exkrementanfall berechnet (Gleichung 5). Dabei erfolgte eine Überprüfung der angesetzten Fütterung anhand spezifischer Parameter wie der Futtermittelerwertung (Schweinemast) oder dem Energie- (Milchviehhaltung) und Proteinbedarf der Tiere.

Die N-Mengen des eigenerzeugten Futters stammen aus der Flächenbilanz, die Gehaltsannahmen für Zukauffutter sind in Tab. A. 10 dargestellt. N-Mengen im Tierzukauf sowie in Tierverlusten und tierischen Produkten wurden auf Basis von Nährstoffgehalten nach DLG (2014) berechnet.

$$N_{Ex} = N_{F_E} + N_{F_Z} + N_{TZ} - N_{TV} - N_{TP} \quad (5)$$

$$N_{Ex} = \text{N-Menge in Exkrementen} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

$$N_{F_E} = \text{N-Menge im Futter aus Eigenerzeugung} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

$$N_{F_Z} = \text{N-Menge im Zukaufsfutter (Tab. A. 10)} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

$$N_{TZ} = \text{N-Menge im Tierzukauf (Tab. A 11)} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

$$N_{TV} = \text{N-Menge in Tierverlusten (Tab. A 11)} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

$$N_{TP} = \text{N-Menge in tierischen Produkten (Tab. A. 11)} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

Anschließend werden die Verluste in Stall und Lager berechnet und unter Berücksichtigung der Einstreu der Anfall an Wirtschaftsdüngern berechnet (Gleichung 6 bis 12). Fallen im Betrieb verschiedene Arten an Wirtschaftsdüngern an, so wird der Düngieranfall für die jeweilige Düngerart getrennt bestimmt. Die Verlustberechnung erfolgt, in Anlehnung an die Methodik von Rösemann (2015), separat für Ammoniakverluste im Stall sowie für Ammoniak- und Denitrifikationsverluste im Düngerlager. Eingangsfaktoren sind dabei feste Verlustkoeffizienten für die verschiedenen Tierarten und Stallhaltungs- bzw. Lagersysteme (siehe Tab. A. 12 – Tab. A. 14). Verfügt ein Stall über eine Abluftreinigungsanlage, so werden die Ammoniakverluste im Stall um 80% vermindert (Rösemann 2015). Basis für die Berechnung von Ammoniakverlusten in Stall und Lager ist der Ammoniumgehalt der Exkremente sowie der organischen Dünger nach Abzug der Stallverluste. Hierfür werden ebenfalls feste Faktoren auf Basis von Rösemann (2015) angesetzt (Tab. A. 12 und Tab. A. 13).

$$N_{WD} = N_{WD_S} - N_{NH3_S} - N_{NH3_L} - N_{D_L} \quad (6)$$

$$N_{WD_S} = N_{Ex} + N_S \quad (7)$$

$$N_{NH3_S} = N_{Ex} * NH4_{Ex} * V_S \quad (8)$$

$$N_{NH3_L} = (N_{WD_S} - N_{NH3_S}) * NH4_L * V_{NH3_L} \quad (9)$$

$$V_{NH3_L} = GK * V_{NH3_GK} + (1 - GK) * V_{NH3_GG} \quad (10)$$

$$N_{D_L} = (N_{WD_S} - N_{NH3_S}) * V_{D_L} \quad (11)$$

$$V_{D_L} = GK * V_{D_GK} + (1 - GK) * V_{D_GG} \quad (12)$$

$$N_{WD_S} = \text{Dünger-N-Anfall Stall} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

$$N_{Ex} = \text{N-Menge in Exkrementen} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

$$N_S = \text{N-Menge in Einstreu} \quad (\text{kg a}^{-1})$$

$N_{NH_3_S}$	=	Ammoniak-N-Verluste Stall	(kg a ⁻¹)
$N_{NH_3_L}$	=	Ammoniak-N-Verluste Lager	(kg a ⁻¹)
N_{D_L}	=	Denitrifikationsverluste Lager	(kg a ⁻¹)
$NH_{4_{Ex}}$	=	Ammonium-Anteil in Exkrementen (Tab. A. 12)	(%)
V_S	=	Stallverluste bezogen auf NH ₄ -N (Tab. A. 12)	(%)
NH_{4_L}	=	Ammonium-Anteil im Düngerlager (Tab. A. 13)	(%)
$V_{NH_3_L}$	=	Ammoniakverluste im Düngerlager bezogen auf NH ₄ -N (Tab. A. 13)	(%)
GK	=	Anteil des Güllelagers im Güllekeller	(%)
$V_{NH_3_{GK}}$	=	Ammoniakverluste im Güllekeller bezogen auf NH ₄ -N (Tab. A. 13)	(%)
$V_{NH_3_{GG}}$	=	Ammoniakverluste in der Güllegrube bezogen auf NH ₄ -N (Tab. A. 13)	(%)
V_{D_L}	=	Denitrifikationsverluste im Lager bezogen auf gesamt-N	(%)
$V_{D_{GK}}$	=	Denitrifikationsverluste im Güllekeller bezogen auf gesamt-N (Tab. A. 14)	(%)
$V_{D_{GG}}$	=	Denitrifikationsverluste in der Güllegrube bezogen auf gesamt-N (Tab. A. 14)	(%)

Die anfallende Güllemenge ergibt sich aus den Düngungsangaben in den Ackerschlagkarteien sowie der Gülleabgabe an andere Landwirte. Aus der Gesamtgüllemenge und den berechneten Stickstoffmengen in den Wirtschaftsdüngern werden schließlich die Stickstoffgehalte pro m³ Gülle bzw. pro t Stallmist zur Verwendung in der Flächenbilanz bestimmt. Die so berechneten Gehalte werden mit Inhaltsstoffanalysen der Betriebsleiter abgeglichen. Ammoniumgehalte in den Wirtschaftsdüngern werden auf Basis von Untersuchungsergebnissen der Betriebsleiter angesetzt.

N-Effizienz tierische Produktion

Um die Effizienz der Tierproduktion beurteilen zu können, wurde die Stickstoffeffizienz der tierischen Produkte berechnet. Dabei wurden die im Betrieb produzierten tierischen Marktprodukte, abzüglich des Tierzukaufs, ins Verhältnis zum Futterzukauf gesetzt (Gleichung 13). Tierverluste werden in der Berechnung der N-Effizienz nicht berücksichtigt.

$$NE_{Tier} = \frac{N_{TP} - N_{TZ}}{N_F} \quad (13)$$

NE_{Tier}	=	N-Effizienz der tierischen Produktion	(%)
N_{TP}	=	N-Menge in tierischen Produkten	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{TZ}	=	N-Menge im Tierzukauf	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_F	=	N-Menge im Futter	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)

N-Bilanz der Biogaserzeugung

In den untersuchten Biogasanlagen gilt die Annahme, dass keine Stickstoffverluste auftreten, da sowohl die Anlage als auch das Gärrestlager über eine gasdichte Abdeckung verfügen (Battini 2014, Clemens 2006). Der Stickstoffanfall im Biogasgärrest entspricht somit der Summe der eingesetzten

Gärsubstrate (Gleichung 14). Grundlage für die Berechnung des Substrateinsatzes waren die eigenen Substratmengen aus der Flächenbilanz, der Nährstoffanfall im Stall sowie Angaben zum Substratzukauf des Betriebsleiters. Die Einsatzmengen pro Jahr wurden jeweils über das betriebliche Substrattagebuch plausibilisiert.

$$N_{BG} = N_{WD} + N_{S,E} + N_{S,Z} \quad (14)$$

N_{BG} = N-Menge im Biogasgärrest (kg a⁻¹)

$N_{S,E}$ = N-Menge im Substrat aus Eigenerzeugung (kg a⁻¹)

$N_{S,Z}$ = N-Menge im Substratzukauf (Tab. A. 3) (kg a⁻¹)

Hopfenproduktion

Beim Hopfen besteht die Besonderheit, dass zur Gewinnung der Dolden die komplette Pflanze geerntet wird. Die Restpflanze wird nach dem Pflücken gehäckselt und ca. einen Monat offen gelagert, bevor der Rebhäcksel wieder auf die Betriebsflächen verteilt wird. Da keine Forschungsarbeiten zur Höhe der auftretenden Stickstoffverluste bei der Lagerung und Ausbringung von Rebhäcksel vorliegen, wurde folgende Methodik angewandt.

Der Ertrag der Restpflanze wurde nach Portner (2012) in Abhängigkeit vom Trockenhopfenertrag geschätzt (Gleichung 15). Aus Angaben der Landwirte zur auf die Flächen zurückgeführten Rebhäckselmenge wurden anschließend Lagerverluste von 30% der Trockenmasse und 31% des Stickstoffs im Pflanzenmaterial angesetzt.

$$E_{RP} = 124,71 + 0,03169 * E_H \quad (15)$$

E_{RP} = Ertrag Restpflanze (21,5 %TS) (dt ha⁻¹)

E_H = Trockenhopfenertrag (90 %TS) (dt ha⁻¹)

Die Ausbringungsverluste wurden in Anlehnung an Hartl (2010) auf 26% des Gesamt-N im Rebhäcksel (entspricht 18% der Gesamtmenge in der Restpflanze) gesetzt. Es wurde der untere von Hartl (2010) angegebene Wert gewählt, da ein Teil der Verluste bereits im Lager auftritt. Diese werden aufgrund der Modellstruktur als Ammoniakverluste angegeben, teilen sich tatsächlich aber in die Verlustpfade NH₃, N₂ und N₂O auf.

Hofterbilanz und gesamtbetriebliche N-Effizienz

Um das Gesamtverlustpotenzial der Betriebe bewerten zu können, wurde zusätzlich zur flächenbezogenen N-Bilanz eine Hofterbilanz berechnet. Als N-Zufuhr wurden dabei die Eingangsgrößen der Stickstoffflächenbilanz sowie die der Stall- und Biogasbilanz, die in den Betrieb zugekauft werden, berücksichtigt (Gleichung 16). Die N-Abfuhr umfasst die pflanzlichen und tierischen Marktprodukte sowie die Abgabe von Wirtschaftsdüngern aus dem Betrieb. Die N-Effizienz des Gesamtbetriebs wird durch Division der gesamtbetrieblichen N-Abfuhr (ohne Tierverluste) durch die N-Zufuhr berechnet (Gleichung 17).

$$S_{NHT} = \frac{N_I + N_{SYM} + N_{SG} + N_{WD_Z} + N_{MD} + N_{F_Z} + N_{TZ} + N_{S_Z} - N_{PP} - N_{TP} - N_{TV}}{-N_{WD_A}} \quad (16)$$

$$E_{Betr} = \frac{N_{PP} - N_{TP} - N_{WD_A}}{N_I + N_{SYM} + N_{SG} + N_{WD_Z} + N_{MD} + N_{F_Z} + N_{TZ} + N_{S_Z}} \quad (17)$$

S_{NHT}	=	N-Saldo der Hoftorbilanz	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
E_{Betr}	=	N-Effizienz des Gesamtbetriebs	(%)
N_I	=	N-Immission	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{SYM}	=	Symbiotische N-Fixierung	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{SG}	=	N-Zufuhr mit Saatgut	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{WD_Z}	=	N-Zufuhr mit Wirtschaftsdüngern von anderen Betrieben	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{MD}	=	Mineral-N-Düngung	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{F_Z}	=	N-Menge im Zukaufsfutter	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{TZ}	=	N-Menge im Tierzukauf	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{S_Z}	=	N-Menge im Substratzukauf	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{PP}	=	N-Menge in pflanzlichen Marktprodukten	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{TP}	=	N-Menge in tierischen Marktprodukten	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{TV}	=	N-Menge in Tierverlusten	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{WD_A}	=	N-Abgabe mittels Wirtschaftsdünger	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)

Humusbilanz

Zusätzlich zum N-Saldo erfolgt die Angabe der Vorratsänderung des im Humus gebundenen Stickstoffs (ΔN_{org}). Die Ausweisung von ΔN_{org} ist nötig, da bei hohen Einsatzmengen organischer Dünger Humus aufgebaut und Stickstoff organisch gebunden wird. Der im Humus gespeicherte Stickstoff ist zunächst vor Verlusten geschützt, es steigt aber auch das N-Mineralisationspotenzial. Andererseits kann eine humuszehrende Fruchtfolge zu vermehrter N-Freisetzung und damit zu zusätzlichen N-Verlusten führen. Die Einbeziehung von ΔN_{org} hat somit zum Ziel, eine Über- oder Unterschätzung der N-Verlustpotenziale zu vermeiden.

Zur Berechnung der Humusbilanz wird eine weiterentwickelte Form der dynamischen Humuseinheiten-Methode nach Leithold (1997) verwendet (Hülsbergen 2003). Dabei werden die Bilanzparameter „Humusbedarf“ und „Humusersatzleistung“ dem Ertrags- und Düngungsniveau sowie den Standortbedingungen angepasst. Die Berechnung erfolgt in Humuseinheiten (HE), die definiert sind als 1 t Humus mit 50 kg N und 580 kg C.

In die Berechnung des Humusbedarfs humuszehrender Fruchtarten fließen der N-Entzug (inkl. Nebenprodukte) sowie der durch Immissionen zugeführte Stickstoff ein (Gleichung 18). Ebenfalls Eingang findet die optimale N-Zufuhr durch Mineraldünger, die dem N-Entzug der Hauptprodukte entspricht. Die Verwertungsraten des zugeführten N liegen, in linearer Abhängigkeit von der Ackerzahl, zwischen 45 und 85 % (Tab. A. 6). Daraus wird die Menge an Stallmist berechnet, die nötig ist, um die humuszeh-

rende Wirkung der Fruchtart auszugleichen. Über den Humifizierungskoeffizienten von Stallmist erfolgt schließlich die Berechnung des Humusbruttobedarfs. Darüber hinaus ist für jede Fruchtart ein maximaler (Tab. A. 7) sowie ein minimaler Humusbedarf festgelegt. Der minimale Humusbedarf ist abhängig von der Ackerzahl, wird in den hier betrachteten Fällen jedoch nie erreicht.

$$k_{HZ} = \frac{N_E - (N_{MD} * S_D) - (N_I * S_D)}{n_{St} * S_D} * h_{St} \quad (18)$$

k_{HZ}	=	Koeffizient der humuszehrenden Fruchtart (Humusbruttobedarf)	(HE ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_E	=	N-Entzug Haupt- und Nebenprodukte	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{MD}	=	Optimaler Mineral-N-Einsatz	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_I	=	N-Immission	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
S_D	=	System-Verwertungsrate für Dünger-N ¹	(%)
n_{St}	=	N-Gehalt im Stallmist (i. TM.)	(30 kg t ⁻¹)
h_{St}	=	Humifizierungskoeffizient der TM von Stallmist	(0,35 HE t ⁻¹)

Bei humusmehrenden Fruchtarten (Klee gras, Acker gras, Zwischenfrüchte) wird die Humusmehrerleistung in linearer Abhängigkeit vom Ertragsniveau abgeschätzt (Tab. A. 8).

Die Humusersatzleistung organischer Dünger (Wirtschaftsdünger, Stroh- und Gründüngung) wird über düngerspezifische Parameter berechnet und dem Humusbruttobedarf gegenübergestellt (Tab. A. 9). Übersteigt die rechnerisch im Humus gebundene Menge an Stickstoff die im organischen Dünger gespeicherte N-Menge (z. B. im Getreidestroh), so wird lediglich die im organischen Dünger vorhandene Stickstoffmenge als festgelegt angesehen.

Darstellung betrieblicher Stickstoffkreisläufe

Gesamtbetrieblich erfolgt die Darstellung der innerbetrieblichen Stickstoffflüsse in Form von Stickstoffkreisläufen. Die Kreisläufe enthalten alle Parameter betrieblicher Stickstoff-Inputs und -Outputs sowie die innerbetrieblichen Flüsse aus Flächenbilanz (Stroh-/Gründüngung), Stall- und Biogasbilanz. Die Outputs der Stallbilanz, tierische Marktprodukte und Tierverluste, werden zusammen als tierische Marktprodukte dargestellt. Im Ergebnis der Stickstoffbilanzierung werden der Bruttosaldo sowie die Bodenvorratsänderung (ΔN_{org}) angegeben. Ausgehend vom Stickstoffsaldo werden die Verlustpfade Ammoniakverluste, Denitrifikation und Nitratauswaschung angegeben (Berechnungsmethode im Folgenden dargestellt).

2.2.3. Berechnung der Stickstoffverlustpfade

Um aus dem Stickstoffsaldo die Höhe der Ammoniakverluste, der Denitrifikationsverluste und der Nitratverluste quantifizieren zu können, verfügt das Modell REPRO über ein Boden-N-Umsatztool (Abraham 2001). Zeitlicher Rahmen des N-Umsatztools ist das Kalenderjahr. Somit werden alle Verlustpfade

¹ Interpolierter Wert, abhängig von der Ackerzahl

als Summe des Zeitraums von 01.01. bis 31.12. des jeweiligen Jahres angegeben. Im Vergleich zum Betrachtungszeitraum der Stickstoffkreisläufe können daher Verschiebungen auftreten.

Im N-Umsatztool wird der Boden-Stickstoff in einen mineralischen, einen organischen und einen Humus-N-Pool (Abb. 4) aufgeteilt, die verschiedenen Umsetzungsprozessen unterliegen.

Der Umsatz des Humus-N-Pool ist an die Humusbilanz gekoppelt. Je nach Humuskoeffizient der zugeführten organischen Substanz wird ein Teil des organischen Stickstoffs (50 kg N pro Humuseinheit) im Humus gebunden. Der im Humus-Pool gebundene Stickstoff kann im Modell nicht höher sein als der N-Gehalt der zugeführten organischen Substanz. Eine mögliche N-Immobilisierung durch Stroh wird somit nicht berücksichtigt. Die N-Freisetzung aus dem Humus-Pool wird entsprechend der angebauten Fruchtarten modelliert. Dieser Fruchtarteneffekt berechnet sich aus dem Humusbedarf der jeweiligen Fruchtart (siehe Abschnitt Humusbilanz). Der im Humus-Pool verbleibende Stickstoff wird als nicht verlustgefährdet betrachtet. Es werden auch keine Mineralisations- oder Immobilisationsprozesse aus dem Stickstoff im Humus-Pool berücksichtigt.

Nach Abzug des Stickstoffs, der im Humus-Pool gespeichert wird, fließt der organische gebundene Stickstoff aus Wirtschaftsdüngern, Stroh- und Gründüngung in den organischen N-Pool. Dieser wird in Abhängigkeit von den Standortbedingungen (Witterung, Bodenart) zeitlich differenziert mineralisiert. Dazu wird mittels einer empirischen Formel die maximale Mineralisation aus dem Stickstoff im organischen Pool berechnet (Gleichung 20). Hierbei geht die „wirksame Mineralisierungszeit“ (WMZ) nach Franko (1993) ein, die von der Bodentextur (dem Gehalt an Feinschluff und Ton), der mittleren Lufttemperatur sowie dem Jahresniederschlag abhängig ist (Gleichung 21).

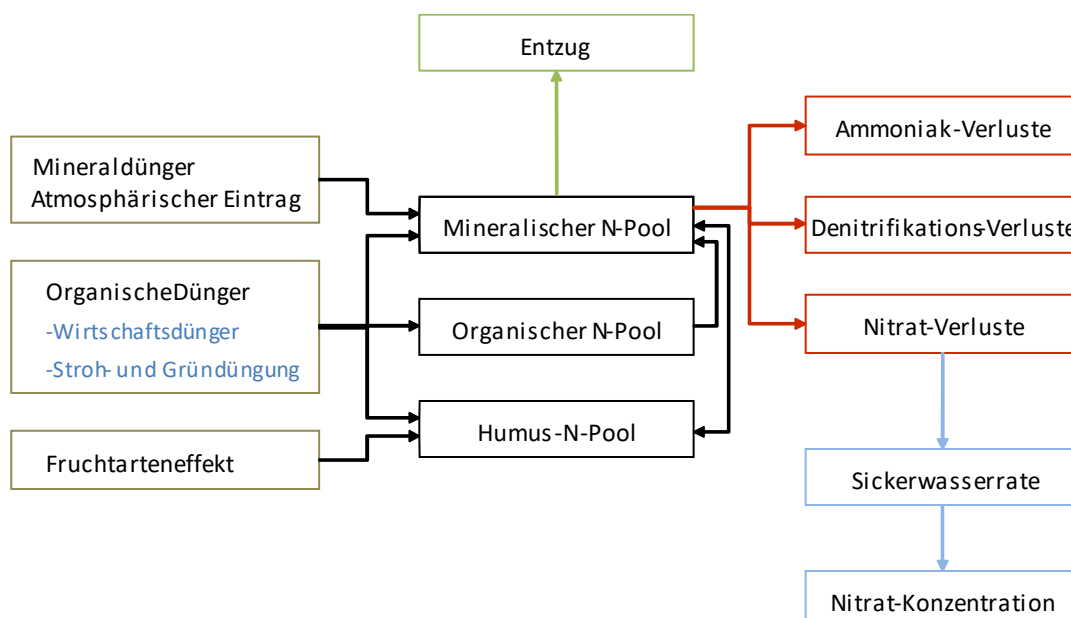


Abb. 4: Schema des N-Umsatztools zur Berechnung der Nitratauswaschung (Abraham 2001)

Für Stickstoff, der sich aus dem Vorjahr noch im organischen Pool befindet, ist die maximal mögliche Mineralisation gleich der tatsächlichen Mineralisation. Bei Düngerausbringung im Untersuchungsjahr wird mithilfe einer ebenfalls empirisch hergeleiteten Funktion in Abhängigkeit vom Ausbringungstermin schließlich der tatsächliche Anteil der Mineralisation aus dem organischen Pool berechnet (Gleichung 19 und 22) (Abraham 2001). Der freigesetzte Stickstoff fließt in den mineralischen N-Pool, der im organischen Pool verbleibende Stickstoff wird ins Folgejahr transferiert.

$$M_{OD_rel} = \frac{M_{OD_max} * MIN_{OD}}{100} \quad (19)$$

$$M_{OD_max} = 0,75 * WMZ + 2,5 \quad (20)$$

$$WMZ = P_0 + P_1 * T + P_2 * ND \quad (21)$$

$$MIN_{OD} = 1 - (0,227 + 0,163 * D + 0,000175 * D^2 + 2,22 * 10^{-6} * D^3 + 1,142 * 10^{-11} * D^5) \quad (22)$$

M_{OD_rel}	=	Mineralisation aus organischer Düngerfraktion	(%)
M_{OD_max}	=	Maximale Mineralisation aus organischem Dünger-N	(%)
WMZ	=	Wirksame Mineralisierungszeit	
T	=	Lufttemperatur (Jahresmittel)	(°C)
ND	=	Niederschlag (Jahressumme)	(mm)
P_x	=	Koeffizienten (abhängig von Bodentextur, siehe Tab. A. 15)	
MIN_{OD}	=	Vom Ausbringungstermin abhängige relative Mineralisation	(%)
D	=	Tag im Jahr der Düngerapplikation	

Die N-Zufuhr in den mineralischen Stickstoffpool erfolgt über die Mineraldüngung, die N-Immission, Saatgut, die mineralische N-Fraktion in Wirtschaftsdüngern (Ammoniumgehalt), die Mineralisierung des organischen Düngerstickstoffs und die Stickstofffreisetzung aus dem Humus. Als einziger N-Pool unterliegt er den Prozessen N-Entzug, N-Immobilisierung, Denitrifikation und N-Auswaschung sowie Ammoniakverlusten.

Für den mineralischen und den organischen Pool werden Anfangswerte benötigt, die nach mehrmaligem Simulationsdurchlauf über alle Untersuchungsjahre iterativ angenähert wurden. Die Abschätzung der Anfangswerte erfolgt individuell für jeden Teilschlag. Es wurden für Ackerflächen maximale Anfangswerte von 100 kg ha⁻¹ im mineralischen Pool und 400 kg ha⁻¹ im organischen Pool festgelegt.

Um die einzelnen Verlustpfade zuordnen zu können, werden zunächst Ammoniak-Verluste bei der Düngerausbringung berechnet und die Denitrifikationsverluste abgeschätzt. Nach Abzug dieser Verluste wird aus dem im mineralischen Pool verbleibenden Stickstoff schließlich die Nitratauswaschung berechnet.

Ammoniakverluste, die bei der Ausbringung von ammoniumhaltigen organischen Düngern und harnstoffhaltigen Mineraldüngern entstehen, werden mittels fester Verlustfaktoren berechnet. Für organische Dünger wurden diese in Anlehnung an Döhler (2002) in Abhängigkeit des Ammoniumgehalts der Düngemittel, der mittleren Lufttemperatur im jeweiligen Monat (Mittel der Jahre 2013 – 2015, Wetterstation Elsendorf-Horneck) sowie der typischen Einarbeitungszeit angesetzt (Tab. A. 16). Als Ausbringungstechnik wurde grundsätzlich Breitverteilung angenommen, verlustarme Ausbringungsmethoden werden vom Modell nicht berücksichtigt. Für Mineraldünger wurden die Verlustfaktoren aus REPRO Stammdaten verwendet (Tab. A. 17).

Die Abschätzung der Denitrifikation (N_2 und N_2O) erfolgt in Anlehnung an ein Verfahren nach Hermsmeyer (1996). Dabei werden die Standorte nach Becker (1993) in fünf Klassen eingeteilt, für die zunächst eine maximale Denitrifikation zwischen 15 und 35 $kg\ ha^{-1}$ ausgewiesen wird. Als Einflussfaktoren werden der Gehalt an organischer Bodensubstanz, die Bodenart, die Trockenrohdichte, die Feld- und Luftkapazität und der pH-Wert (sofern bekannt) berücksichtigt. Die aktuelle Denitrifikation wird nach Köhne (1992) geschätzt. Dabei fließen die maximale Denitrifikation und die aus dem mineralischen N-Pool berechnete Stickstoffkonzentration im Boden ein (siehe Gleichung 23).

$$N_{DV} = \frac{N_{DV(max)} * c(N)}{K + c(N)} \quad (23)$$

N_{DV}	=	aktuelle Denitrifikation	($kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$)
$N_{DV(max)}$	=	maximale Denitrifikation	($kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$)
$c(N)$	=	Nitrat-N-Konzentration im Boden (0-50cm)	($mg\ kg^{-1}$)
K	=	Konstante	($mg\ kg^{-1}$)
		(günstige Denitrifikationsbedingungen	$K = 6,7$
		mittlere Denitrifikationsbedingungen	$K = 4,0$
		ungünstige Denitrifikationsbedingungen	$K = 2,5$)

Zur Berechnung der Nitratkonzentration des Sickerwassers werden die Sickerwasserrate und der von der Austauschhäufigkeit abgeleitete Auswaschungsfaktor benötigt. Die Berechnung der Sickerwasserrate erfolgt nach einem für verschiedene Landnutzungsformen (Ackerland, Grünland, Wald, versiegelte Flächen) differenzierten Verfahren (Renger 1990), wie in Gleichung 24 bis 26 dargestellt.

$$SW = 0,92 (ND_{Wi}) + 0,61 (ND_V) - 153 (\log W_{pfl}) - 0,12 (ETP_W) + 109 \quad (24)$$

$$ETP_W = \frac{(RG + 90) * (T + 22)}{150 * (T + 123)} \quad (25)$$

$$AF = \frac{SW}{FK_{We}} \quad (\text{für } AF > 1 \text{ gilt } AF = 1) \quad (26)$$

SW	=	Sickerwasserrate	(mm a ⁻¹)
ND_{wi}	=	Niederschlag Winterperiode (Okt – März)	(mm a ⁻¹)
ND_v	=	Niederschlag Vegetationsperiode (April-Sept)	(mm a ⁻¹)
W_{pfl}	=	pflanzenverfügbares Bodenwasser (nutzbare Feldkapazität)	(mm)
ETP_w	=	potentielle Evapotranspiration (Formel nach Wendling)	(mm a ⁻¹)
RG	=	Globalstrahlung (Jahressumme)	(J cm ² a ⁻¹)
T	=	Temperatur (Jahresmittel, 2 m Höhe)	(°C a ⁻¹)
AF	=	Auswaschungsfaktor	
FK_{We}	=	Feldkapazität im effektiv durchwurzelten Raum	(mm)

Aus dem Stickstoff im mineralischen Pool wird mit Hilfe von Sickerwasserrate und Auswaschungsfaktor die Nitratkonzentration des Sickerwassers im Jahresmittel berechnet (Gleichung 27). Die Nitratverluste werden nur für positive Verlustwerte ausgewiesen.

$$N_{Konz} = \frac{(P + N_{lösl} + N_{MD} + N_I + N_{SG} + M_{OD} + M_{ODP} - N_E - \Delta N_t - N_{DV} - NH_3)}{SW} \quad (27)$$

* AF * 443

N_{konz}	=	Nitratkonzentration des Sickerwassers	(mg l ⁻¹)
P	=	Mineral-N-Pool aus dem Vorjahr	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
$N_{lösl}$	=	löslicher N in Wirtschaftsdünger	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{MD}	=	Mineral-N-Einsatz	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_I	=	N-Immission	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{SG}	=	N-Zufuhr im Saatgut	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
M_{OD}	=	Mineralisierung aus organischen Düngern	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
M_{ODP}	=	Mineralisierung aus organischem Dünger-N-Pool	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_E	=	N-Entzug	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
ΔN_t	=	Änderung des Boden-N-Vorrates	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
N_{DV}	=	Denitrifikationsverluste	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
NH_3	=	Ammoniakverluste organischer und mineralischer N-Dünger	(kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
AF	=	Auswaschungsfaktor	
SW	=	Sickerwasserrate	(mm a ⁻¹)

2.2.4. Untersuchung der N_{\min} -Vorräte in Böden

Auf ausgewählten Flächen der Untersuchungsbetriebe wurden Bodenproben genommen, um die Nitratstickstoffvorräte (N_{\min} -Vorräte)¹ zu bestimmen. Die Probenahme erfolgte zu jeweils drei Terminen pro Untersuchungsjahr – im Frühjahr vor Vegetationsbeginn, im Sommer nach der Getreideernte und im Spätherbst zu Vegetationsende. Die Frühjahrsprobenahme wurde bei Getreide bzw. vor Zuckerrüben (Anfang Februar) und vor Mais (Mitte März) durchgeführt. Die Sommerprobenahme war vom Zeitpunkt der Getreideernte abhängig. Die Beprobung im Herbst erfolgte nach Vegetationsende Mitte bis Ende November. Es wurden Untersuchungsflächen gewählt, die für den Betrieb jeweils standorttypisch sind und, wenn vorhanden, unterschiedliche Ertragszonen aufweisen.

Pro Betrieb wurden drei bis vier Schläge untersucht, auf denen ortsfeste Parzellen der Größe 20 x 10 m angelegt wurden. Auf jedem Schlag wurden zwei Ertragszonen (Hohertrag - HE, Niedrigertrag - NE) festgelegt, in denen sich jeweils 5 Parzellen befanden. Die Bestimmung der Ertragszonen erfolgte anhand der Karten der Bodenschätzung (LDBV 2011) sowie mit Hilfe von Satellitenbildern. Die Verteilung der Parzellen erfolgte möglichst gleichmäßig über die Ertragszonen. Dies führt aufgrund unterschiedlicher Größen der Ertragszonen zu variierenden Abständen zwischen den Parzellen. In jeder Parzelle wurden mit 12 Einstichen 3 Tiefen beprobt (0 – 30, 30 – 60, 60 – 90cm) und eine Mischprobe für jede Tiefe erstellt. Somit wurde im Laufe des Untersuchungszeitraumes Untersuchungszeitraums jede Parzelle mehrfach beprobt. Das Prinzip der Probenahme auf einer Betriebsfläche ist in Abb. 5 dargestellt.

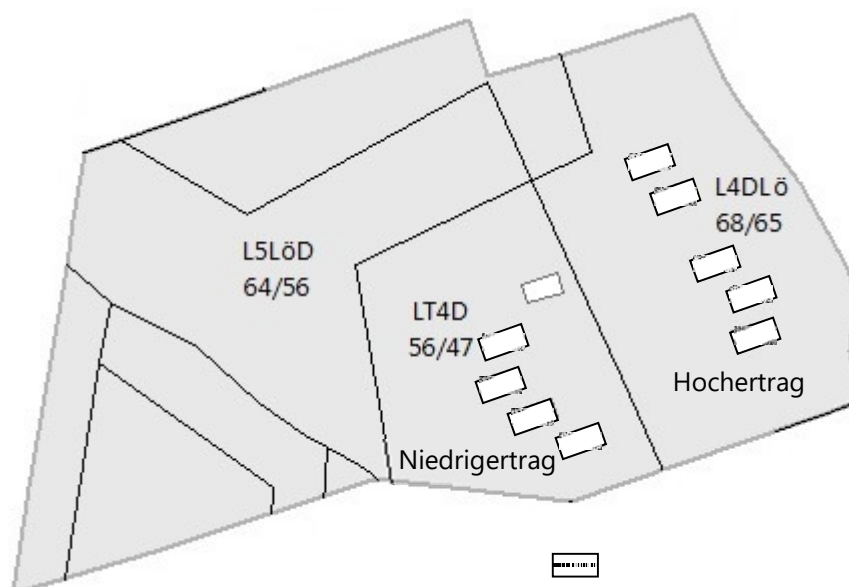


Abb. 5: Beispiel für die Positionierung der Parzellen zur N_{\min} -Beprobung mit Angabe der Klassenzeichen der Bodenschätzung

¹ Im Folgenden bezieht sich der Begriff N_{\min} ausschließlich auf Nitratstickstoff.

Die ersten Beprobungen wurden nach der Getreideernte 2014 durchgeführt, die letzten Proben nach Vegetationsende im Jahr 2016 genommen (Tab. A. 20). Im Herbst 2015 wurde die Anzahl an Parzellen pro Ertragszone auf vier reduziert sowie einige Schläge und Ertragszonen aus dem Untersuchungsprogramm genommen. Die Probenahme erfolgte im Getreidebestand mit Göttinger Bohrstöcken, auf Getreidestoppeln und in Zwischenfrüchten mit einem am Schlepper montierten Bodenproben-Entnahmegesetz. Unmittelbar nach der Probenahme wurden die Proben eingefroren und zur Analyse schonend wieder aufgetaut.

Die N_{min} -Analyse erfolgte nach Extraktion von 40 g Boden mittels 160 ml 0,0125 molarer $CaCl_2$ -Lösung und einstündiger Schüttelzeit mit Hilfe des Seal Autoanalyzer 3 (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten 2002). Nach Korrektur über den Wassergehalt des Bodens sowie der Annahme einer Trockenrohddichte von $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ erfolgte die Berechnung der N_{min} -N-Vorräte in kg ha^{-1} (Gleichung 28).

$$N_{min} = \left(\frac{K_{Ex}}{TS} * 3 * 1,5 \right) * \left(\frac{40 * (1 - TS) + 160}{160} \right) \quad (28)$$

N_{min}	=	N_{min} -Vorrat in 30 cm Boden	(kg ha^{-1})
K_{Ex}	=	Stickstoffkonzentration im Extrakt	($\text{mg } 100 \text{ g Boden}^{-1}$)
TS	=	Trockensubstanzgehalt Boden	(%)

2.2.5. Rammkernsondierungen

Um die unterhalb der durchwurzelte Zone verlagerten Mengen an Stickstoff und die Nitratgehalte im Sickerwasser bestimmen zu können, wurden auf 23 Flächen der untersuchten Betriebe Rammkernsondierungen bis maximal 9 m Tiefe durchgeführt. Darunter befanden sich 21 Ackerflächen, eine Grünlandfläche sowie eine Hopfenfläche. Es wurden überwiegend Flächen ausgewählt, auf denen auch N_{min} -Beprobungen stattfanden. Die Bohrungen wurden in den N_{min} -Parzellen positioniert. Pro Fläche wurde eine möglichst homogene Ertragszone bestimmt, in der jeweils drei Bohrungen mit einem Abstand von 20 – 160 m durchgeführt wurden. Der Abstand wurde durch die Lage der N_{min} -Parzellen und die Größe der Ertragszone bestimmt. Eine Ausnahme bildete Schlag 5 in Betrieb BG 2, bei dem das Einzugsgebiet einer Quelle untersucht werden sollte und daher bewusst in verschiedenen Ertragszonen an verschiedenen Stellen des Schlages gebohrt wurde. In jedem Betrieb wurde mindestens eine Hohertragszone und eine Niedrigertragszone beprobt, bei zwei Betrieben lagen die Ertragszonen im gleichen Schlag. Die Ertragszonen wurden in Hoch- und Niedrigertragszonen eingestuft. Die Einstufung erfolgte bei schlagspezifischer Ertragserfassung anhand der Ackerzahlen innerhalb eines Schlages, während bei Betrieben ohne schlagspezifische Ertragserfassung die Einstufung in Relation zum Betriebsmittel vorgenommen wurde. Im Betrieb MS 1 wurde der Schlag 3 im Abstand von 6 Monaten zweimal beprobt, um das Verlagerungsgeschehen abbilden zu können.

Bei der Bohrung wurden längsgeschlitzte Rohre (Schappen) in den Abschnitten 0 – 1 m, 1 – 3 m, 3 – 5 m, 5 – 7 m und 7 – 9 m in den Boden gerammt. In den Rohren wurde der Boden in 33 cm-Abschnitte unterteilt, entnommen und eine N_{min} -Analyse durchgeführt. Über den Wassergehalt wurde die Nitrat-

Konzentration im extrahierbaren Bodenwasser berechnet. Für jedes Profil wurden mittels Fingerprobe die Bodenart nach (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten 1997) bestimmt sowie optisch der Skelettgehalt in Volumenprozent geschätzt.

Bei den Bohrungen kam es gelegentlich zu einer Verschleppung von Oberboden in die oberste Schicht der einzelnen Schuppen. Waren diese in den Daten eindeutig als Verschleppung zu identifizieren, so wurden die Daten als Ausreißer betrachtet und verworfen. Als eindeutig wurden die Ausreißer dann betrachtet, wenn der Messwert mindestens 50 % höher lag als die umliegenden Messwerte. Der Ausschlag musste im Konzentrations- und im Mengenprofil zu erkennen sein.

Berechnung des Sickerwasseranfalls

Die Berechnung des Sickerwasseranfalls in den Tiefenprofilen erfolgte nach der in Gleichung 24 dargestellten Methodik, die für die jeweiligen Bohrpunkte angepasst wurde. Es wurde die potenzielle Evapotranspiration nach Haude (Renger 2002) verwendet. Zur Berechnung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers wurde die für jede Bohrung auf Basis der Bodenart bestimmte nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes zugrunde gelegt (Ad-hoc-AG Boden 2005). Die Bestimmung der nFK erfolgte auf Grundlage der für die einzelnen Bohrungen ermittelten Bodenart. Die auf diese Weise ermittelte Sickerwassermenge wurde nach Renger (2002) anhand der angebauten Fruchtart und der vorhandenen Hangneigung korrigiert.

Grundlage für die Sickerwasserberechnung für Ackerland (Gleichung 24) war die Fruchtart Wintergetreide ohne Zwischenfrucht. Entsprechende Korrekturfaktoren für abweichende Fruchtarten sind in Tab. 1 dargestellt. Für die Fruchtart Mais lagen keine Korrekturfaktoren vor, weshalb der Faktor von Wintergetreide angesetzt wurde.

Zudem wurden für Hänge in Abhängigkeit von Hangexposition und Hangneigung Zu- bzw. Abschläge zur Sickerwasserbildung vorgenommen (Tab. A. 21). Nordhängen wurde aufgrund der geringeren Sonneneinstrahlung und somit auch geringerer Evapotranspiration eine höhere Versickerungsrate zugeordnet, während diese bei Südhängen entsprechend vermindert wurde. Die Hangneigung an den jeweiligen Bohrpunkten wurde mit Hilfe des digitalen Geländemodells SRTM 3 (Farr 2007) ermittelt. Die Grundwasseroberfläche lag bei allen Ackerflächen tiefer als 2 m unterhalb der Geländeoberkante, weshalb von keinem kapillarem Aufstieg ausgegangen wird.

Aus der so berechneten Sickerwassermenge und der nutzbaren Feldkapazität der durchwurzelbaren Zone wurde anschließend anhand der in Abschnitt 2.2.3 dargestellten Methodik der Auswaschungsfaktor der einzelnen Bohrpunkte berechnet.

Tab. 1: Fruchtartenspezifische Zu- und Abschläge zur Sickerwasserrate

Fruchtart	Zu- /Abschlag (mm a ⁻¹)
Feldgemüse	50
Sommergetreide	30
Zuckerrüben	-10
Getreide mit Zwischenfrucht	-30

Die Betrachtung der Tiefenversickerung erfolgte in Jahresschritten vom 01.01. bis zum 31.12. des jeweiligen Kalenderjahres. Die Winterniederschläge (Gleichung 24) beinhalten somit den Zeitraum von 01.01. – 30.04. und 01.10. – 31.12. dieses Jahres.

Zur Berechnung der Verlagerungstiefe wurde zunächst die Wassermenge pro Schicht bestimmt. Dazu wurde der mit den N_{\min} -Analysen untersuchte Wassergehalt und der geschätzte Skelettgehalt verwendet (Gleichung 29). Auf Basis der zuvor berechneten Sickerwasserrate wurde damit die Verlagerungstiefe im jeweiligen Versickerungsjahr bestimmt (Gleichung 30).

$$WM_i = 150 * D_s * WG_i * (1 - Sk_i) \quad (29)$$

$$VT_m = \left(\frac{\sum_{k=1}^m SW_k}{\sum_{i=1}^n WM_i} * n + \frac{\sum_{k=1}^m SW_k - \sum_{i=1}^n WM_i}{WM_{n+1}} \right) * D_s \quad (30)$$

Wobei gilt:

$$\sum_{i=1}^n WM_i \leq \sum_{k=1}^m SW_k \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} WM_i > \sum_{k=1}^m SW_k \quad (32)$$

WM_i	=	Wassermenge pro Schicht i	(mm)
D_s	=	Schichtdicke	(dm)
WG_i	=	Wassergehalt der Schicht i (bezogen auf trockenen Boden)	(%)
Sk_i	=	Skelettgehalt der Schicht i	(%)
VT_m	=	Verlagerungstiefe aus Jahr m	(dm)
SW_k	=	Sickerwasserrate im Jahr k (vom Bohrzeitpunkt zurück)	(mm)

Unter Zugrundelegung der Verlagerungstiefe wurde schließlich die Nitratfracht im jeweiligen Versickerungsjahr berechnet. Dabei fanden nur die Nitratmengen unterhalb einer Tiefe von mindestens 67 cm Berücksichtigung, da hier von einem vernachlässigbaren Einfluss der Pflanzen ausgegangen wurde.

2.2.6. Untersuchungsbetriebe und Standortbedingungen

Für die Untersuchungen wurden 10 Betriebe¹ mit sehr unterschiedlicher Struktur und differenzierten Bodenbedingungen ausgewählt (Tab. 2, Tab. 3). Ziel war es, ein breites Spektrum an Bewirtschaftungssystemen abzubilden, mit unterschiedlichem Viehbesatz (0 bis > 2 GV ha⁻¹), unterschiedlichen Mengen an ausgebrachtem Wirtschaftsdüngern sowie mit unterschiedlichen Fruchtarten und Fruchtfolgen. Voraussetzung für die Teilnahme an den Untersuchungen war die Bereitschaft zur Mitarbeit im Projekt und zur Offenlegung betrieblicher Daten, die in ausreichender Qualität dokumentiert sein mussten. Darüber hinaus sollte der Betrieb in der zuvor definierten Untersuchungsregion liegen oder eine Kooperation mit einem Betrieb im Untersuchungsgebiet vorliegen.

Aufgrund der vorhandenen Strukturen im Projektgebiet liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Ackerbaubetrieben und Betrieben mit Schweinehaltung und Ackerbau. Um die Bandbreite an Bewirtschaftungssystemen zu erhöhen, wurden zudem zwei Betriebe mit Biogasanlage, ein Milchviehbetrieb und ein Betrieb mit Gurkenanbau (Betrieb MF_G 2) in die Betrachtungen aufgenommen. Das Untersuchungsgebiet ist zudem Teil der Hopfenanbauregion Hallertau, weshalb auch ein Hopfenbetrieb analysiert wurde.

Tab. 2: Kennzahlen der untersuchten Betriebe

Betrieb	Produktionsrichtung	Betriebsgröße ² (ha)	Organ. N-Zufuhr ² (kg/ha)	Viehbesatz ² (GV/ha) ³	Untersuchter Zeitraum
Ausgewertete Untersuchungsbetriebe¹					
MS 1	Schweinemast	107	160	3,2	2011 – 2015
MS 2	Schweinemast	63	205	5,7	2013 – 2015
BG 2	Schweinemast, Biogas, Marktfrucht	416	147	2,3	2013 – 2015
ZS	Ferkelerzeugung	33	130	7,3	2013 – 2015
MF_G 1	Marktfrucht (mit Gülleabnahme)	75	98	–	2011 – 2015
MF_G 2	Marktfrucht (mit Gülleabnahme)	103	96	–	2012 – 2015
HP	Hopfen, Marktfrucht	43	94	–	2013 – 2015
Zusätzliche Untersuchungsbetriebe					
BG 1	Schweinemast, Biogas	73	164	2,3	2011 – 2015
MV	Milcherzeugung	100	169	2,0	2012 – 2015
MF	Marktfrucht	94	18	–	2011 – 2015

¹ Im vorliegenden Forschungsbericht werden Ergebnisse von sieben Untersuchungsbetrieben ausgewertet. Anhand dieser Betriebe werden der gewählte methodische Ansatz und die damit erzielten Ergebnisse dargestellt. Der vollständige Datensatz von zehn Untersuchungsbetrieben ist Grundlage der Promotionschrift von M. Sc. Felix Forster sowie einer wissenschaftlichen Publikation.

² Zufuhr von organischem Stickstoff je ha landwirtschaftlicher Nutzfläche, Mittel der Jahre 2013 – 2015

³ Berechnung der GV ha⁻¹ nach (KTBL 2017)

Alle schweinehaltenden Betriebe geben Gülle aus ihrem Betrieb an umliegende Marktfruchtbetriebe ab. So besteht bei den untersuchten Betrieben ein Gülletransfer zwischen den Betrieben MS 2 und HP, sowie zwischen BG 2 und MF_G 2.

Für die folgenden Betrachtungen werden immer als Kernuntersuchungszeitraum die Jahre 2013 – 2015 zugrunde gelegt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu wahren. Werden weitere Jahre berücksichtigt, so ist dies gesondert ausgewiesen.

Tab. 3: Standortbeschreibung der Untersuchungsbetriebe, Höhenangabe bezogen auf den Betriebsitz

Betrieb	Höhenlage (m über NN)	Ackerzahl Mittel (von - bis)	Vorherrschender Bodentyp
MS 1	447	63 (46 – 78)	Parabraunerde / Braunerde aus Lösslehm
MS 2	492	52 (39 – 73)	Braunerde aus flachem Lösslehm über Molasseablagerungen
BG 2	460	60 (35 – 88)	Parabraunerde / Braunerde aus Lösslehm, teils flach über Molasseablagerungen
ZS	474	57 (44 – 70)	Parabraunerde / Braunerde aus Lösslehm
MF_G 1	440	64 (48 – 71)	Parabraunerde / Braunerde aus Lösslehm, Kolluvisol
MF_G 2	382	67 (49 – 72)	Parabraunerde / Braunerde aus Lösslehm, Kolluvisol
HP	476	60 (46 – 69)	Parabraunerde / Braunerde aus Lösslehm
BG 1	494	54 (34 – 67)	Braunerde aus flachem bis tiefem Lösslehm über Molasseablagerungen
MV	430	56 (28 – 73)	Parabraunerde / Braunerde aus Lösslehm, Gleye
MF	423	64 (31 – 77)	Parabraunerde / Braunerde aus Lösslehm, Gleye

Klima und Witterung

Die Witterung in den Untersuchungsjahren 2013 – 2016 zeigen Tab. 4 und Tab. 5. Das Jahr 2013 war durch ein kühles und sehr nasses Frühjahr geprägt, auf das v.a. im Juli eine ausgeprägte Trockenphase folgte. Der anschließende Winter 2013/14 zeigte sich sehr mild und trocken, während der Sommer 2014 durch feuchte Bedingungen und gemäßigte Temperaturen gekennzeichnet war. Im Herbst 2014 waren die Niederschläge durchschnittlich, die Temperaturen aber vergleichsweise warm. Ebenso verlief der Winter 2014 / 15 sehr mild, worauf im Jahr 2015 ein außergewöhnlich warmer und trockener Sommer folgte. Die Trockenperiode endete erst im Oktober / November mit leicht überdurchschnittlichen Niederschlägen. Wiederum folgte ein milder Winter mit hohen Niederschlägen im Januar und Februar. Hohe Niederschläge prägten auch den weiteren Witterungsverlauf 2016, darunter örtlich heftige Starkniederschlagsereignisse in den Monaten Mai und Juni. Die Herbstwitterung zeigte sich dagegen durchschnittlich.

Die Trockenphasen in den Jahren 2013 und 2015, aber auch das nasse Frühjahr 2013 führten zu außergewöhnlich niedrigen Maiserträgen in diesen Jahren (BML 2016). Das Jahr 2014 dagegen war aufgrund der günstigen Witterung von Rekorderträgen bei Getreide und Raps geprägt (BML 2016).

Tab. 4: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] in den Jahren 2013 – 2016 in der Untersuchungsregion mit Vergleich zum langjährigen Mittel (DWD 2016)

Monat	2013	2014	2015	2016	Langjähriges Mittel
Januar	0,0	1,8	1,6	0,7	-1,0
Februar	1,6	3,3	1,3	3,9	0,0
März	1,3	6,7	5,4	4,3	4,1
April	8,9	10,5	8,8	8,6	8,6
Mai	11,8	12,5	13,5	13,5	13,6
Juni	16,0	16,9	17,1	17,1	16,4
Juli	20,1	18,9	21,1	19,2	18,4
August	18,1	16,5	20,4	18,2	17,7
September	13,3	14,3	13,5	16,3	13,5
Oktober	10,0	11,2	8,4	8,1	8,8
November	4,2	5,7	6,8	3,6	3,4
Dezember	1,8	2,7	4,5	0,1	0,2
Mittel	8,9	10,1	10,2	9,5	8,6

Da im Jahr 2014 die Niederschläge in den Erntemonaten Juli und August vergleichsweise hoch waren, erfolgte die Ernte z.T. stark verzögert. Ähnlich wurde im Sommer 2016 aufgrund einer ungünstigen Niederschlagsverteilung vor allem die Weizenernte teils stark verzögert. Im Jahr 2015 erfolgte die Ernte von Körner- und Silomais wegen der starken Trockenheit bereits ab August und war zum Oktober nahezu flächendeckend abgeschlossen.

Tab. 5: Monatliche Niederschläge [mm] in den Jahren 2013 – 2016 in der Untersuchungsregion mit Vergleich zum langjährigen Mittel (DWD 2016)

Monat	2013	2014	2015	2016	Langjähriges Mittel
Januar	74	42	84	98	52
Februar	81	9	12	73	45
März	44	28	37	33	59
April	33	37	32	33	48
Mai	146	94	111	152	77
Juni	128	30	47	119	82
Juli	7	149	29	84	96
August	74	92	21	44	84
September	95	44	29	74	66
Oktober	58	80	64	30	57
November	59	37	72	69	57
Dezember	10	47	18	9	64
Summe	809	688	556	818	787

2.3. Ergebnisse von Teilprojekt 1

2.3.1. Betriebliche Stickstoffflüsse

2.3.1.1. Marktfruchtbetrieb mit Gülleabnahme MF_G 1

Betrieb MF_G 1 ist ein Marktfruchtbetrieb mit ca. 80 ha Fläche, der in größerem Umfang Gülle von einem Schweinemastbetrieb erhält. Die Böden der direkt um den Betrieb liegenden Flächen haben eine mittlere Ackerzahl von 64. Die Bodenqualität schwankt deutlich weniger (Ackerzahlen von 48 bis 71) als in den anderen Untersuchungsbetrieben.

Die dominierende Fruchtart in diesem Betrieb ist der Winterweizen (Tab. 6), der in der Fruchtfolge Raps / Zuckerrüben / Körnermais – Winterweizen – Winterweizen angebaut wird. Auf etwa 21 % werden keine Zuckerrüben angebaut und stattdessen Raps und Mais im ersten Fruchtfolgefeld gesät. Auf den rübenfähigen Schlägen wird nur in Ausnahmefällen Mais angebaut. Der im Betrieb produzierte Mais wird durch den kooperierenden Schweinemäster abgenommen.

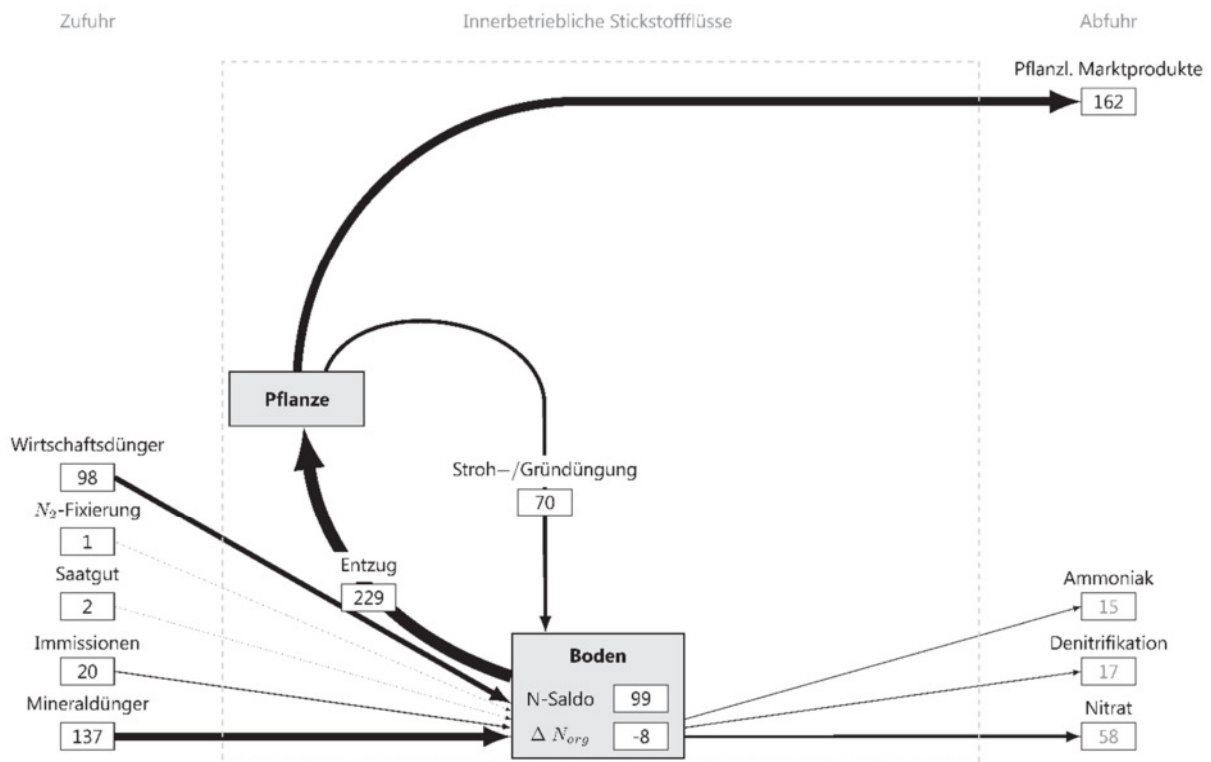


Abb. 6: Stickstoffkreislauf des Marktfruchtbetriebes MF_G 1.
N-Flüsse in $kg\ ha^{-1}$ im Mittel der Jahre 2013 – 2015. ΔN_{org} ist nicht im Saldo enthalten.

Auf Betriebsebene wurde ein N-Output in den Marktprodukten von $162\ kg\ ha^{-1}$ erzielt (Abb. 6). Der Mineral-N-Einsatz betrug $137\ kg\ ha^{-1}$, die Gülle-N-Zufuhr $98\ kg\ ha^{-1}$ im Mittel der Jahre 2013 – 2015. Unter Berücksichtigung aller N-Zufuhren und N-Entzüge ergab sich ein N-Saldo von $99\ kg\ ha^{-1}$. Aufgrund der negativen Humusbilanz wurden $-8\ kg\ ha^{-1}\ \Delta N_{org}$ (Abnahme des Boden- N_{org} -Vorrates) berechnet, trotz des Zwischenfruchtanbaus und der Gülledüngung. Ursachen lagen im hohen Humusbedarf entsprechend der Anbaustruktur und des hohen Ertragsniveaus.

Der Einsatz organischer Dünger führte zu berechneten Ammoniakverlusten in Höhe von 15 kg ha^{-1} . Mit dem Modellansatz wurden N-Verluste durch Denitrifikation in Höhe von 17 kg ha^{-1} sowie Nitrat-N-Verluste von 58 kg ha^{-1} berechnet.

Tab. 6: Stickstoffbilanz der wichtigsten Fruchtarten im Betrieb MF_G 1; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Winterweizen	Winterraps	Körnermais	Zuckerrüben	Zwischenfrüchte ¹
Flächenanteil	% der AF	63	16	10	9	16
Ertrag ²	dt ha ⁻¹	84	43	106	879	
N-Gehalt	% in TM	2,36 ³	3,68	1,60	0,78	
Gülle vor Saat	%	0	100	100	0	100
N-Entzug (Ernte)	kg ha ⁻¹	172	145	146	158	74
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	172	145	146	158	74
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹					
N-Zufuhr ⁴	kg ha ⁻¹	269	255	297	179	95
Saatgut	kg ha ⁻¹	3				
N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹					5
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	153	149	87	87	
Schweinegülle	kg ha ⁻¹	92	85	117		90
Gründüngung	kg ha ⁻¹			73	73	
N-Effizienz	%	64	57	49	88	77
N-Saldo	kg ha ⁻¹	97	110	150	22	22

Es wurden zu jeder Fruchtart 20 m^3 Gülle ausgebracht, zu Winterweizen im Frühjahr, zur Zwischenfrucht vor Zuckerrüben und im August vor Raps. Bei Körnermais wurde zur Zwischenfrucht und vor Mais Gülle appliziert. Die Gülleausbringung erfolgte in Breitverteilung. Als einziger untersuchter Betrieb wird in Betrieb MF_G 1 Qualitätsweizen erzeugt. Dies äußerte sich in etwas geringeren Erträgen (84 dt ha^{-1}) und höheren N-Gehalten als in vergleichbaren Betrieben. Die N-Effizienz der Winterweizenproduktion lag bei 64 %, der N-Saldo bei 97 kg ha^{-1} . Im Jahr 2015 wurde die Mineralstickstoffdüngung auf 127 kg ha^{-1} reduziert, was jedoch aufgrund geringerer N-Entzüge gleiche N-Salden zur Folge hatte. Die Düngung von Weizen nach Vorfrucht Weizen erfolgte sehr ähnlich zur Düngung von Weizen nach Blattfrüchten. Aufgrund einer einheitlichen Ernte der Schläge konnten die Erträge nicht differenziert erfasst werden. Bei Körnermais wurde trotz vergleichsweise hoher Erträge von 106 dt ha^{-1} ein hoher N-Saldo von 150 kg ha^{-1} erzielt. Die Ursache ist eine hohe mineralische und organische Düngung,

¹ Zwischenfruchtaufwuchs wird der Folgefrucht als Gründüngung angerechnet

² TS-Gehalt der Ernteprodukte: Getreide, Körnermais: 86 % TS, Raps: 91 % TS, Zuckerrüben: 23 % TS

³ N-Gehalt abweichend vom Tabellenwert (Tab. A.)

⁴ N-Zufuhr = N-Immission ($20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) + Saatgut + N₂-Fixierung + Gründüngung + Mineraldünger + Wirtschaftsdünger

die eine geringe N-Effizienz von 49 % zur Folge hatte. Zuckerrüben dagegen waren sehr stickstoffeffizient. Für die Jahre 2013 und 2014 wurden aufgrund hoher Zuckerrübenenerträge sogar leicht negative N-Salden berechnet.

Tab. 7: Modellergebnisse der Stickstoffverluste in Betrieb MF_G 1. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Modellergebnis
N-Saldo Boden	kg ha ⁻¹	99
N-Saldo Hoftor	kg ha ⁻¹	99
N-Effizienz Betrieb	%	62
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha ⁻¹	-8
Änderung org. Pool	kg ha ⁻¹	-8
Änderung min. Pool	kg ha ⁻¹	25
Ammoniak-N-Verluste	kg ha ⁻¹	15
Denitrifikation-N-Verluste	kg ha ⁻¹	17
Nitrat-N-Verluste	kg ha ⁻¹	58
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	184
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l ⁻¹	150

Die N-Effizienz auf Betriebsebene betrug im Zeitraum 2013 – 2015 62 %.

Die Sickerwasserrate war mit 184 mm a⁻¹ niedrig, was auf die tiefgründigen, lehmigen Böden sowie die hohe Evapotranspiration (Wetterstation Schönbrunn, LfL), zurückzuführen war (Tab. A. 19). Somit erreichte die modellierte Nitratkonzentration im Sickerwasser 150 mg l⁻¹ bei einem Nitratstickstoffaustrag von 58 kg ha⁻¹ (Tab. 7).

Aufgrund des hohen Flächenanteils trug die Fruchtart Winterweizen am stärksten zu den hohen Nitratausträgen bei. Der Grund liegt dabei in einer hohen Stickstoffdüngung, um das Ziel der Qualitätsweizenproduktion zu erreichen. Darüber hinaus wurden zur Fruchtart Körnermais N-Düngermengen appliziert, die den N-Entzug deutlich überstiegen und daher hohe Nitratausträge zur Folge hatten.

2.3.1.2. Marktfruchtbetrieb mit Gülleaufnahme MF_G 2

Bei Betrieb MF_G 2 besteht eine Kooperation mit Betrieb BG 2, von dem Biogasgärreste abgenommen werden. Der Betrieb liegt etwas außerhalb des Projektgebietes und verfügt über große Schläge mit guten, wenig wechselnden Böden (Ackerzahl im Mittel: 67), die direkt am Betrieb liegen. Einige Flächen befinden sich in den Isarauen und weisen anmoorigen Charakter auf. Diese Flächen haben eine mittlere Ackerzahl von 59 und können mit sehr geringem Düngereinsatz bewirtschaftet werden.

Die flächenmäßig wichtigste Fruchtart war im Untersuchungszeitraum Winterweizen mit 49 % Ackerflächenanteil, von dem etwa ein Drittel nach Vorfrucht Weizen angebaut wurde (Tab. 8). Auf 27 % der Flächen wurden Zuckerrüben angebaut, was einem Anbauabstand von 3 – 4 Jahren entspricht. Eine Besonderheit in Betrieb MF_G 2 ist, dass jedes Jahr ca. 16 % der Fläche an einen Gurkenproduzenten verpachtet wurden. Vorfrucht der Gurken waren meist Zuckerrüben, die Folgefrucht war Winterweizen. Im Jahr 2013 wurde zudem auf 18 % der Fläche Silomais angebaut und an Betrieb BG 2 verkauft.

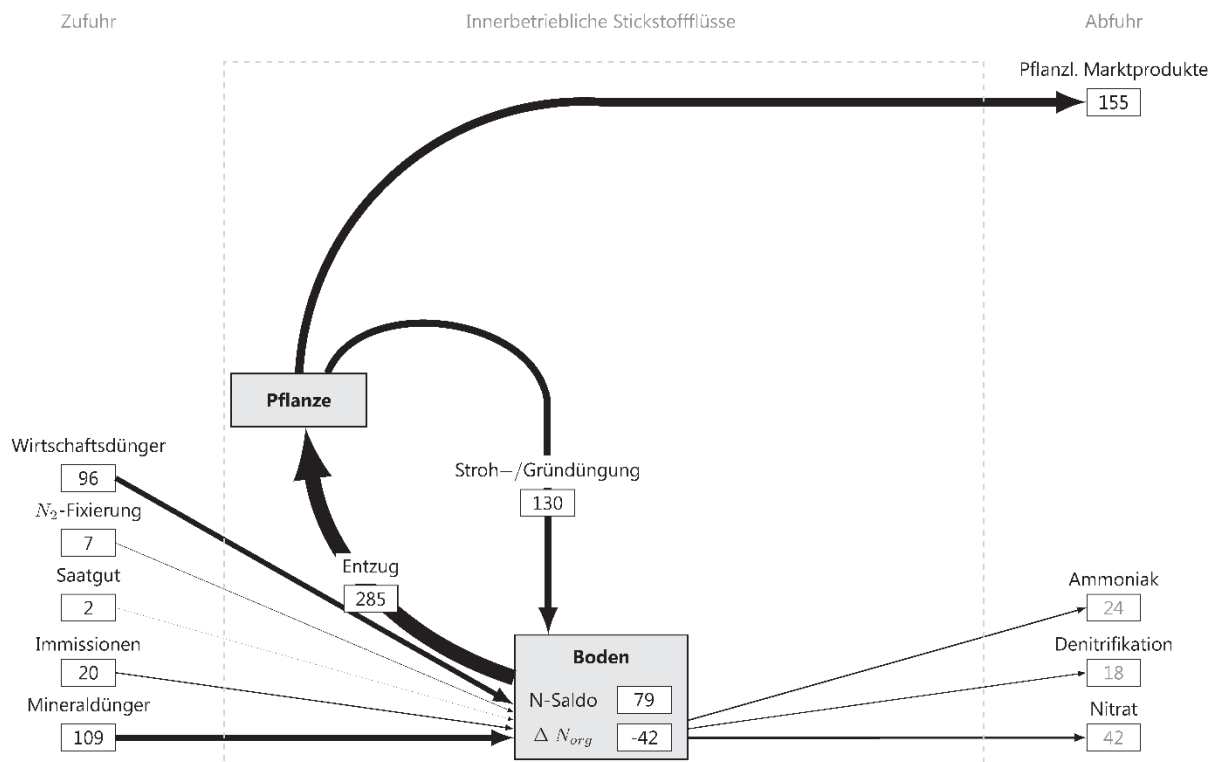


Abb. 7: Stickstoffkreislauf des Marktfruchtbetriebes MF_G 2.

N-Flüsse in kg ha⁻¹ im Mittel der Jahre 2013 – 2015. ΔN_{org} ist nicht im Saldo enthalten.

Die N-Zufuhr in Betrieb MF_G 2 setzte sich aus 109 kg ha⁻¹ aus Mineraldünger, 96 kg ha⁻¹ aus Wirtschaftsdüngern sowie 29 kg ha⁻¹ aus sonstigen Quellen zusammen. Dem stand eine N-Menge von 155 kg ha⁻¹ durch Verkauf pflanzlicher Marktprodukte gegenüber. Im Mittel der Jahre 2013 – 2015 erzielte Betrieb MF_G 2 mit 79 kg ha⁻¹ (Abb. 7) den geringsten Saldo der untersuchten Betriebe; dies war u.a. auf den Anbau von Zuckerrüben (Fruchtart mit geringem N-Saldo) zurückzuführen. Jedoch ist hierbei auch die N-Mineralisation und Änderung des Boden-N-Vorrats zu berücksichtigen. Im Mittel

des Betriebes betrug ΔN_{org} -42 kg ha^{-1} , was vor allem auf Fruchtarten (z.B. Zuckerrüben) mit negativer Humusbilanz zurückzuführen ist.

Tab. 8: Stickstoffbilanz der wichtigsten Fruchtarten im Betrieb MF_G 2; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Winterweizen ¹				Zucker- rüben	Zwfr ²
		gesamt	nach Weizen	nach Gurken	nach Rüben		
Flächenanteil	% der AF	49	15	15	12	27	32
Ertrag ¹	dt ha ⁻¹	98	97	102	99	817	
N-Gehalt	% in TM	2,21 ³	2,18 ³	2,27 ³	2,19 ³	0,78	
Gülle vor Saat	%	24	40	12	11		100
N-Entzug (Ernte)	kg ha ⁻¹	186	177	197	186	147	76
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	186	177	197	186	147	76
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹						
N-Zufuhr ⁴	kg ha ⁻¹	291	363	205	331	196	100
Saatgut	kg ha ⁻¹	3	3	3	3		1
N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹						17
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	128	162	61	177	101	
Biogasgärrest	kg ha ⁻¹	140	178	121	130		82
Gründüngung	kg ha ⁻¹					76	
N-Effizienz	%	64	49	98	57	75	76
N-Saldo	kg ha ⁻¹	105	186	8	145	50	24

Die Mineraldüngung zu Winterweizen nach Gurken betrug unter Berücksichtigung des Vorfruchteffektes und der zu erwartenden N-Nachlieferung im Mittel nur 61 kg ha^{-1} , womit ein hoher Kornertrag bei einem N-Saldo von nur 8 kg ha^{-1} erzielt wurde (Tab. 8). Dabei betrug die N-Effizienz im Mittel 98 %. Für die Jahre 2014 und 2015 wurde sogar ein negativer N-Saldo beim Weizenanbau nach Gurken ermittelt.

¹ TS-Gehalt der Ernteprodukte: Getreide, Körnermais: 86% TS, Zuckerrüben: 23% TS, Gurken: 6% TS

² Zwischenfruchtaufwuchs wird der Folgefrucht als Gründüngung angerechnet

³ N-Gehalt abweichend vom Tabellenwert (Tab. A.)

⁴ N-Zufuhr = N-Immission ($20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) + Saatgut + N₂-Fixierung + Gründüngung + Mineraldünger + Wirtschaftsdünger

Dem gegenüber standen deutlich höhere N-Salden bei Weizen nach Zuckerrüben in Höhe von 145 kg ha^{-1} . Ursache für die hohen N-Salden waren die deutlich höheren mineralischen und organischen Stickstoffgaben. Dabei wurde bereits im Herbst eine Mineral-N-Düngung von $30 - 45 \text{ kg ha}^{-1}$ appliziert, im Jahr 2013 sogar kombiniert mit einer Gülledüngung.

Weizen nach Vorfrucht Weizen wurde bereits im Sommer vor der Saat mit $12 - 18 \text{ m}^3$ Gülle gedüngt, worauf im Herbst ebenfalls $40 - 50 \text{ kg ha}^{-1}$ Mineral-N auf den Weizen gestreut wurden. Dies führte zu insgesamt sehr hohen Düngermengen und damit einem N-Saldo von 186 kg ha^{-1} und einer N-Effizienz von 49% bei Weizen nach Weizen. Hinsichtlich der Ertragshöhe waren bei Winterweizen nur geringe Vorfruchteffekte zu erkennen, allerdings sind hierbei auch die sehr unterschiedlichen N-Gaben zu berücksichtigen. So erzielte Weizen nach Gurken im Mittel 102 dt ha^{-1} , nach Rüben 99 dt ha^{-1} und nach Weizen 97 dt ha^{-1} . Die N-Gehalte waren ebenfalls bei Weizen nach Gurken am höchsten, während sie bei Weizen nach Weizen und nach Rüben etwa gleich waren.

Bei Zuckerrüben lag das Ertragsniveau mit 817 dt ha^{-1} im Mittel der Jahre etwas niedriger als bei den übrigen rübenanbauenden Betrieben. Aufgrund der für Zuckerrüben typischen moderaten Düngung lag der N-Saldo niedrig, bei 50 kg ha^{-1} und die N-Effizienz bei 75% .

Die Biogasgärreste wurden seit Frühjahr 2014 im Getreide mittels Schlitzgerät ausgebracht, wo zuvor Schleppschlauchtechnik zum Einsatz gebracht wurde. Im Sommer erfolgte die Ausbringung mit einem Güllegrubber direkt in den Boden. Da im Modell die Ausbringungstechnik nicht berücksichtigt wird, gelten die hohen Verlustfaktoren für Biogasgärreste.

Tab. 9: Modellergebnisse der Stickstoffverluste in Betrieb MF_G 2. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Modellergebnis
N-Saldo Boden	kg ha^{-1}	79
N-Saldo Hoftor	kg ha^{-1}	79
N-Effizienz Betrieb	%	67
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha^{-1}	-42
Änderung org. Pool	kg ha^{-1}	15
Änderung min. Pool	kg ha^{-1}	22
Ammoniak-N-Verluste	kg ha^{-1}	24
Denitrifikation-N-Verluste	kg ha^{-1}	18
Nitrat-N-Verluste	kg ha^{-1}	42
Sickerwasserrate	mm a^{-1}	141
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l^{-1}	136

Die gesamtbetriebliche N-Effizienz war mit 67 % relativ hoch. Neben der witterungsbedingten N-Anreicherung im mineralischen N-Pool wies Betrieb MF_G 2 eine Anreicherung im organischen N-Pool auf. Die Ursache hierfür liegt in den hohen organischen N-Mengen der Rübenblätter, welche die Anfangswerte des Pools nicht vollständig abbilden konnten.

Die Sickerwasserrate lag in Betrieb MF_G 2 sehr niedrig, da am Standort außerhalb des Projektgebietes die Niederschläge geringer und die Verdunstung höher waren als bei den übrigen Untersuchungsbetrieben (Wetterstation Feistenaich, LfL). Zudem verfügt der Betrieb über tiefgründige Böden mit einer hohen nutzbaren Feldkapazität. Die berechnete Nitratkonzentration im Sickerwasser lag somit bei 136 mg l^{-1} trotz einer relativ geringen N-Auswaschung von 42 kg ha^{-1} (Tab. 9).

Eine Ursache für die Nitratkonzentrationen von deutlich über 50 mg l^{-1} sind neben der geringen Sickerwasserrate die hohe N-Düngung der Weizenflächen nach Zuckerrüben und nach Weizen. Die aus dem Humuspool mineralisierten N-Mengen wurden in den Jahren 2013 – 2015 durch eine Anhebung der N-Menge im organischen und mineralischen N-Pool weitgehend ausgeglichen. In den folgenden Jahren kann die Boden-N-Vorratsänderung jedoch zu erhöhten modellierten N-Verlusten führen.

2.3.1.3. Hopfenbetrieb mit Gülleaufnahme und Marktfruchtanbau HP

Im Betrieb HP ist die wichtigste Fruchtart Hopfen mit einem Anbauanteil von 60 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Auf der restlichen Fläche werden, neben einem geringen Anteil an Stilllegungen, Winterweizen und Körnermais im Wechsel angebaut. Die Böden der arrondierten Flächen weisen generell eine gute ackerbauliche Eignung mit Ackerzahlen zwischen 46 und 69 (Mittel 60) auf. Zusätzlich zu einer dauerhaften Kooperation mit Betrieb MS 2 wurde im Jahr 2013 Biogasgülle von einem weiteren Betrieb aufgenommen.

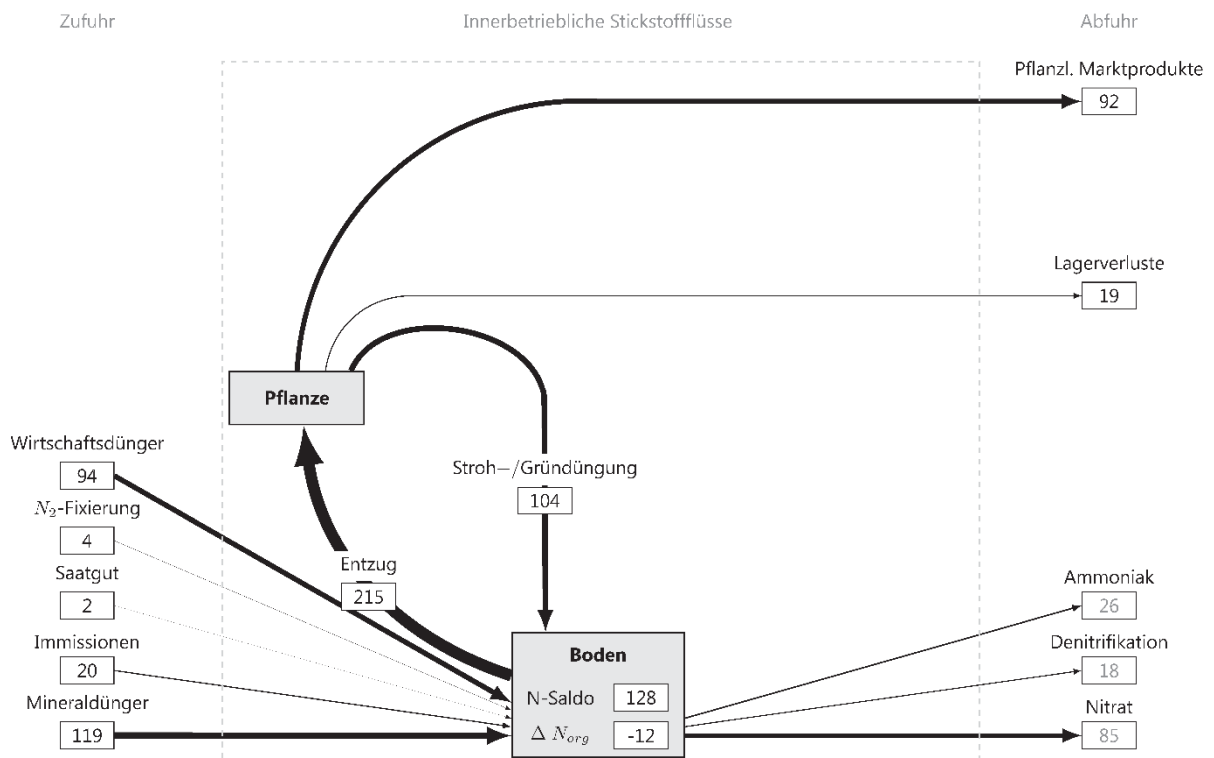


Abb. 8: Stickstoffkreislauf des Hopfenbetriebes HP.

N-Flüsse in $kg\ ha^{-1}$ im Mittel der Jahre 2013 – 2015. ΔN_{org} ist nicht im Saldo enthalten.

Hopfen ist durch sehr geringe Stickstoffentzüge über die Dolden gekennzeichnet, was zu einem gesamtbetrieblichen N-Output von nur $92\ kg\ ha^{-1}$ in Form pflanzlicher Marktprodukte führte (Abb. 8). Zudem traten bei Lagerung von Rebhäcksel Stickstoffverluste in Höhe von $19\ kg\ ha^{-1}$ auf. Die geringen N-Entzüge sowie eine N-Düngung von $94\ kg\ ha^{-1}$ über Gülle und $119\ kg\ ha^{-1}$ Mineraldünger-N führten zu einem gesamtbetrieblichen N-Saldo von $128\ kg\ ha^{-1}$. Zusätzlich wurde eine Stickstofffreisetzung aus dem Humuspool berechnet, da Hopfen eine stark negative Humusbilanz aufweist. Die Ammoniakverluste werden mit $26\ kg\ ha^{-1}$ abgeschätzt und die Denitrifikationsverluste mit $18\ kg\ ha^{-1}$. In den Ammoniakverlusten sind neben den Verlusten bei der Ausbringung von Wirtschafts- und Mineraldüngern auch die Verluste bei der Rebhäckselausbringung berücksichtigt. Damit ergeben sich Nitrat-N-Verluste in Höhe von $85\ kg\ ha^{-1}$.

Tab. 10: Stickstoffbilanz ausgewählter Fruchtarten im Betrieb HP. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Winterweizen ¹	Körnermais ¹	Zwischenfrüchte ²	Ackerland	Hopfen
Flächenanteil	% der AF	19	18	19	40	60
Ertrag	dt ha ⁻¹	89	96			19
N-Gehalt	% in TM	2,28 ³	1,60			3,18
Gülle vor Saat	%	0	100	100		
N-Entzug (Ernte)	kg ha ⁻¹	176	136	74	154	156
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	176	136	74	154	54
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹					102
N-Zufuhr ⁴	kg ha ⁻¹	314	343	82	348	262
Saatgut	kg ha ⁻¹	3		1	2	1
N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹				0	7
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	170	91		122	118
Wirtschaftsdünger ⁵	kg ha ⁻¹	120	157	81	169	45
Gründüngung	kg ha ⁻¹		75		36	70
N-Effizienz	%	56	40	90	45	60
N-Saldo	kg ha ⁻¹	138	207	8	163	106

Hopfen wies trotz geringer N-Entzüge über die Hopfendolden die geringsten N-Salden im Vergleich der angebauten Fruchtarten auf (Tab. 10). Dies lag zum einen daran, dass aufgrund der Lagerungsverluste nur ein Teil des Stickstoffs aus den Restpflanzen wieder auf die Flächen zurückgeführt wurde. Zum anderen erfolgte mit 118 kg ha⁻¹ über Mineraldünger und 45 kg ha⁻¹ über Wirtschaftsdünger eine verhaltene Stickstoffdüngung. Die zwischen den Reihen angebaute Zwischenfrucht führte zusätzlich zu einem N-Eintrag via Saatgut und N₂-Fixierung.

Hohe N-Salden zeigte vor allem Körnermais mit 207 kg ha⁻¹ aufgrund einer sehr hohen Düngung, die den Pflanzenentzug deutlich überschritt. Bei Winterweizen ist vor allem die sehr hohe Mineralstickstoffdüngung in Höhe von 170 kg ha⁻¹ hervorzuheben, die zu einem N-Saldo von 138 kg ha⁻¹ führte. Im Jahr 2013 betrug die Mineral-N-Düngung sogar 217 kg ha⁻¹, zu denen zusätzlich 144 kg ha⁻¹ Gülle-N gedüngt wurden.

Insgesamt belief sich die N-Effizienz der Ackerflächen somit auf niedrige 45 %, während bei Hopfen 60 % erreicht werden konnten. Die Gülle wurde vor allem auf den Ackerflächen ausgebracht, zum Teil jedoch auch in den Hopfenschlägen. In den Hopfenschlägen erfolgte die Gülleausbringung meist im Juni in den Bestand in Breitverteilung. Zwischen den Reihen erfolgten anschließend eine Bodenbearbeitung und die Ansaat einer Zwischenfrucht. Auf den Ackerflächen erfolgte die Gülleausbringung ab Frühjahr 2015 mittels Schleppschuhtechnik, zuvor in Breitverteilung.

¹ Getreide, Körnermais: 86% TS, Hopfen: 90% TS

² Zwischenfruchtaufwuchs wird der Folgefrucht als Gründüngung angerechnet

³ N-Gehalt abweichend vom Tabellenwert (Tab. A.)

⁴ N-Zufuhr = N-Immission (20 kg ha⁻¹ a⁻¹) + Saatgut + N₂-Fixierung + Gründüngung + Mineraldünger + Wirtschaftsdünger

⁵ Schweinegülle und Biogasgärrest

Tab. 11: Modellergebnisse der Stickstoffverluste von Ackerland und Hopfenflächen in Betrieb HP. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Ackerland	Hopfen	Betrieb
N-Saldo Boden	kg ha ⁻¹	163	106	128
N-Saldo Hoftor	kg ha ⁻¹			147
N-Effizienz Betrieb	%			39
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha ⁻¹	19	-33	-12
Änderung org. Pool	kg ha ⁻¹	0	1	0
Änderung min. Pool	kg ha ⁻¹	9	12	11
Ammoniak-N-Verluste	kg ha ⁻¹	20	31	26
Denitrifikation-N-Verluste	kg ha ⁻¹	19	18	18
Nitrat-N-Verluste	kg ha ⁻¹	96	78	85
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	187	188	188
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l ⁻¹	211	192	198

Die Modellierung der Stickstoffverluste spiegelt die höheren N-Salden des Ackerlands im Vergleich zu den Hopfenflächen wider. Auf den Ackerflächen wurden jedoch 19 kg ha⁻¹ im Humus-Pool gespeichert, während auf den Hopfenflächen eine Stickstofffreisetzung in Höhe von 33 kg ha⁻¹ berechnet wurde. Zudem traten auf den Hopfenflächen trotz des geringeren Einsatzes organischer Dünger (Rebhäcksel und Gülle) infolge der ungünstigen Ausbringung höhere Ammoniakverluste auf. Somit relativierte sich der Abstand zwischen Acker- und Hopfenflächen etwas und es wurde auf dem Ackerland eine N-Auswaschung von 96 kg ha⁻¹ ausgewiesen, auf Hopfenflächen von 78 kg ha⁻¹. Die Sickerwasserrate lag auf allen Flächen ähnlich bei 187 – 188 mm pro Jahr, was zu Nitratkonzentrationen von 192 – 211 mg l⁻¹ führte (Tab. 11). In der gesamtbetrieblichen Hoftorbilanz treten zudem die Stickstoffverluste bei der Rebhäcksellagerung in Erscheinung und erhöhen den N-Saldo auf 147 kg ha⁻¹.

Der Zielwert von 50 mg l⁻¹ Nitratkonzentration im Sickerwasser wurde sowohl auf den Ackerflächen als auch auf den Hopfenflächen verfehlt. Im Hopfen lagen die Ursachen in der vom Modell geschätzten N-Freisetzung aus dem Humus-Pool sowie einer Düngung über dem Pflanzenentzug. Der Grund für die hohen Düngermengen ist vor allem die schlechte Berücksichtigung der N-Menge im Rebhäcksel bei der Düngeplanung. Im Ackerland führt eine überhöhte mineralische und organische N-Düngung zu sehr hohen Nitratausträgen.

2.3.1.4. Schweinemastbetrieb MS 1

Bei Betrieb MS 1 handelt es sich um einen reinen Schweinemastbetrieb mit ca. 107 ha Fläche und 2.500 Mastplätzen. Dies entspricht einem Tierbesatz von 3,2 GV ha⁻¹. Der Betrieb bewirtschaftet überwiegend sehr gute Böden, mit Ackerzahlen von 46 bis 78 (Mittel 63), die zum Großteil hofnah liegen. Auf den Flächen, die fast ausschließlich Ackerland sind, wird Winterweizen, Wintergerste und Körnermais zur Verfütterung angebaut. Die Fruchtfolge war im Untersuchungszeitraum 2013 – 2015 Körnermais – Winterweizen – Wintergerste oder Körnermais – Winterweizen.

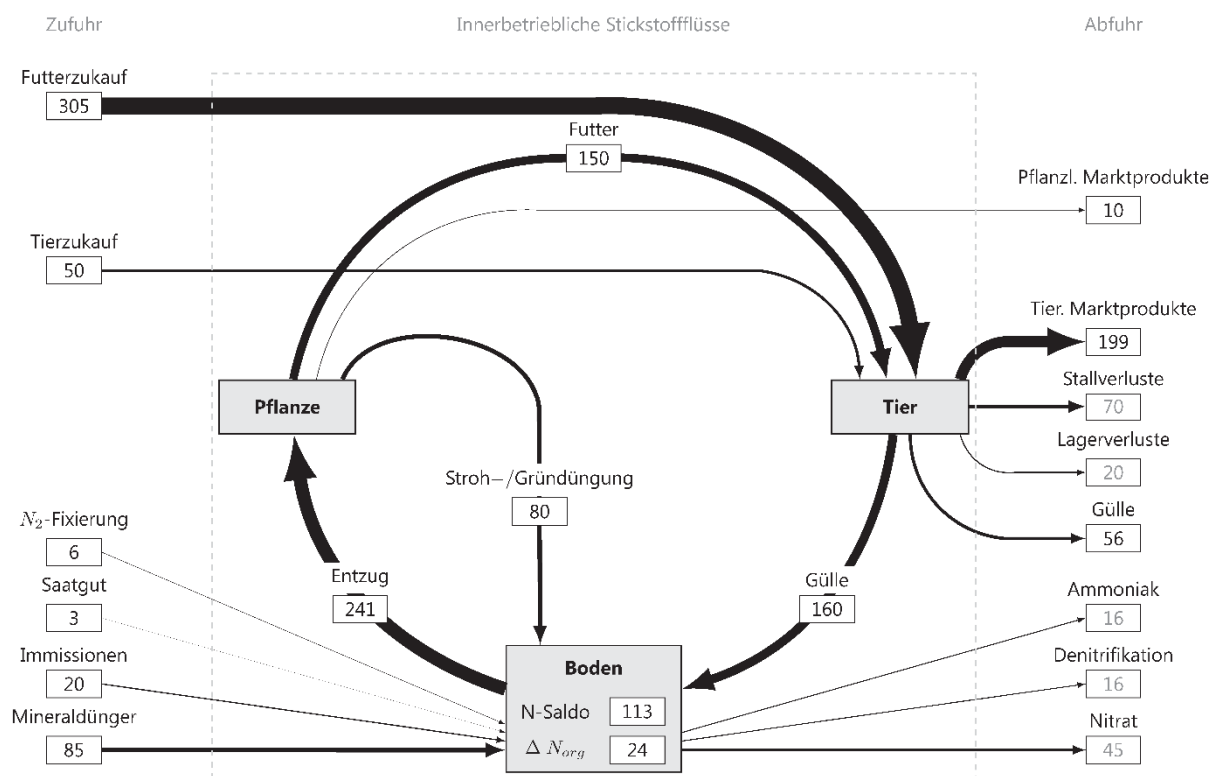


Abb. 9: Stickstoffkreislauf des Schweinemastbetriebes MS 1.

N-Flüsse in kg ha⁻¹ im Mittel der Jahre 2013 – 2015. ΔN_{org} ist nicht im Saldo enthalten.

Im betrieblichen Stickstoffkreislauf war die wichtigste Größe der Stickstoffzufuhr der Futterzukauf mit 305 kg ha⁻¹, gefolgt vom Zukauf an Mineraldüngern und dem Tierzukauf (Abb. 9). Die Abfuhr bestand hauptsächlich aus den im Betrieb produzierten Schlachtschweinen, mit einer Stickstoffmenge von 199 kg ha⁻¹. Daneben wurde in jedem Jahr ein Teil des angebauten Weizens verkauft (10 kg ha⁻¹ N), während in etwa gleicher Menge Gerste zugekauft wurde. Die Stickstoffverluste aus dem Stall mit Vollspaltenboden und dem offenen Güllelager beliefen sich auf insgesamt 90 kg ha⁻¹. Innerbetrieblich betrug der Stickstoffentzug der Ernteprodukte 160 kg ha⁻¹ und lag somit gleich mit der N-Zufuhr über Gülle. Von der anfallenden Gülle (216 kg ha⁻¹), wurden ca. 26 % (56 kg ha⁻¹) an einen Partnerbetrieb mit Biogasanlage abgegeben.

Es wurde somit ein betrieblicher N-Saldo von 113 kg ha⁻¹ erzielt, wovon 24 kg ha⁻¹ im Humus-Pool gespeichert wurden. Die Anreicherung im Humus-Pool war damit sehr hoch, was auf die Strohdüngung, den hohen Anteil an Zwischenfruchtanbau sowie die Gülledüngung zurückzuführen ist. Die modellierten N-Verluste beliefen sich auf 16 kg ha⁻¹ in Form vom Ammoniak und 45 kg ha⁻¹ als Nitratstickstoff.

Tab. 12: Kennzahlen der Schweinemast in Betrieb MS 1; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	
Mittlerer Jahresbestand	Stück	2.263
Tageszunahmen	g Tag ⁻¹	759
Anfangsgewicht	kg	30
Endgewicht	kg	119
Tierverluste	%	1,5
Futterverwertung ¹	kg kg ⁻¹	2,84
Proteingehalt Futter	% in 88 % TS	17,2
N-Anfall in Exkrementen	kg Tier ⁻¹	4,74
N-Effizienz tierische Produktion	%	32,3
Gülleanfall	m ³	5.432
N-Gehalt Gülle	kg m ⁻³	4,28

Die Schweinefütterung in Betrieb MS 1 ist gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an Nebenprodukten der Lebensmittelherstellung in der Futtermittelherstellung (24 % der Futter-TM). Zum Einsatz kamen dabei Schlempe aus der Alkoholherstellung, Süßmolke und Bierhefe. Zudem wurden Sojaschrot sowie geringere Mengen an Sojaschalen und Rapsschrot verfüttert (Tab. A. 22). Neben dem bereits erwähnten Zukauf an Gerste wurde im Jahr 2014 aufgrund der schlechten Ernte im Vorjahr Körnermais zugekauft. Das verfütterte Getreide wurde somit überwiegend selbst erzeugt, während der Futterzukauf in den Betrieb vor allem aus Eiweißfuttermitteln bestand. Bezogen auf die Trockenmasse lag der Anteil an Futterzukauf bei 44 %, während 67 % des verfütterten Stickstoffs aus Zukauf stammten. Bedingt durch den hohen Anteil an Nebenprodukten lag der mittlere Proteingehalt des Futters mit 17,2 % trotz der im Betrieb praktizierten dreiphasigen Fütterung vergleichsweise hoch (Tab. 12). Bei einer Futterverwertung von 2,84 führt dies zu einer Stickstoffverwertung in tierischen Produkten von 32 % und einem mittleren N-Anfall in Exkrementen von 4,74 kg pro Tier.

¹ Futtermenge (bei 88 % TS) pro kg Lebendgewichtszuwachs

Tab. 13: Stickstoffbilanz ausgewählter Fruchtarten im Betrieb MS 1; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Körner- mais ¹	Winter- weizen ¹	Winter- gerste ¹	Zwischen- früchte ²
Flächenanteil	% der AF	40	40	19	37
Ertrag	dt ha ⁻¹	96	107	100	
N-Gehalt	% in TM	1,60	2,10	1,92	
Gülle vor Saat	%	100	15	48	100
N-Entzug (Ernte)	kg ha ⁻¹	132	193	165	83
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	132	193	165	83
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹				
N-Zufuhr ³	kg ha ⁻¹	281	267	284	90
Saatgut	kg ha ⁻¹		3	3	1
N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹				16
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	57	106	108	
Schweinegülle	kg ha ⁻¹	125	138	152	73
Gründüngung	kg ha ⁻¹	78			
N-Effizienz	%	47	72	58	92
N-Saldo ⁴	kg ha ⁻¹	149	74	119	7

Auf Ebene der Fruchtarten wies Körnermais mit 149 kg ha⁻¹ den höchsten N-Saldo auf, was vor allem auf das mit 96 dt ha⁻¹ relativ geringe Ertragsniveau zurückzuführen ist (Tab. 13). Dies ist durch die z.T. witterungsbedingt niedrigen Maiserträge in den Jahren 2013 (77 dt ha⁻¹) und 2015 (83 dt ha⁻¹) zu erklären, die deutlich unter dem langjährigen Ertragsniveau des Betriebes lagen. Entsprechend war auch die N-Effizienz mit 47 % niedrig. Mit einer Mineraldüngung von 57 kg ha⁻¹ N und einer N-Zufuhr mit Gülle von 125 kg ha⁻¹ lag die Düngung zu Körnermais in einem moderaten Bereich.

Die N-Zufuhr mit Gründüngung aus den vorausgehenden Zwischenfrüchten ist mit 78 kg ha⁻¹ aber relativ hoch. Bei Winterweizen und Wintergerste erreichte Betrieb MS 1 ein sehr hohes Ertragsniveau, was bei Winterweizen zu einem vergleichsweise niedrigen N-Saldo von 74 kg ha⁻¹ führte. Der Anteil der Gülledüngung vor der Saat von Winterweizen betrug im Mittel der Jahre 15 %, wurde aber seit dem Jahr 2015 auf 0 % reduziert. Der N-Saldo von Wintergerste lag mit 119 kg ha⁻¹ höher, was durch niedrigere N-Entzüge und höhere Güllemengen zu begründen ist. Die hohen Güllemengen kamen vor allem dadurch zustande, dass fast die Hälfte der Gülle bereits vor der Saat ausgebracht wurde. Die Gülleausbringung im Betrieb erfolgte ab dem Jahr 2014 mit Schleppschuhverteiler.

¹ Getreide, Körnermais: 86% TS

² Zwischenfruchtaufwuchs wird der Folgefrucht als Gründüngung angerechnet

³ N-Zufuhr = N-Immission (20 kg ha⁻¹ a⁻¹) + Saatgut + N₂-Fixierung + Gründüngung + Mineraldünger + Wirtschaftsdünger

⁴ Die Auswertung der Pool-Veränderungen und N-Verlustpfade erfolgt in Abhängigkeit der Witterung und des jeweiligen Standortes auf Schlagebene. Auf eine Aggregation auf Fruchtartenebene wurde daher verzichtet

Tab. 14: Modellergebnisse der Stickstoffverluste in Betrieb MS 1; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Modell-ergebnis
N-Saldo Boden	kg ha ⁻¹	113
N-Saldo Hoftor	kg ha ⁻¹	204
N-Effizienz Betrieb	%	57
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha ⁻¹	24
Änderung org. Pool	kg ha ⁻¹	-7
Änderung min. Pool	kg ha ⁻¹	18
Ammoniak-N-Verluste	kg ha ⁻¹	16
Denitrifikation-N-Verluste	kg ha ⁻¹	16
Nitrat-N-Verluste	kg ha ⁻¹	45
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	186
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l ⁻¹	106

Im Mittel der Jahre 2013 – 2015 betrug die gesamtbetriebliche N-Effizienz 57 %; der N-Saldo der Hof-torbilanz 204 kg ha⁻¹. Die Sickerwasserrate lag aufgrund der geringen Niederschläge in den Jahren 2014 und 2015 sowie der lehmigen Böden in Betrieb MS 1 relativ niedrig mit 186 mm a⁻¹. Dies führte zu einer Nitrat-N-Auswaschung von 45 kg ha⁻¹ und Nitratkonzentrationen von 106 mg l⁻¹. Zum anderen beding-ten die niedrigen Niederschläge einen geringen Auswaschungsfaktor, weshalb im Mittel der Jahre eine Änderung des mineralischen N-Pool von 18 kg ha⁻¹ berechnet wurde (Tab. 14).

2.3.1.5. Schweinemastbetrieb MS 2

Der Betrieb MS 2 betreibt Schweinemast mit 2.550 Mastplätzen auf 62 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche. Der Tierbesatz beträgt 5,7 GV ha⁻¹. Mit Ackerzahlen von 39 – 73 (Mittel 52) weisen die Böden des Betriebs MS 2 das geringste Ertragspotenzial aller Untersuchungsbetriebe auf. Die Flächen liegen überwiegend hofnah, bis in maximal 6 km Hofentfernung. Die Betriebsfläche ist fast ausschließlich Ackerland, auf dem Körnermais, Winterweizen und Wintergerste für die Fütterung erzeugt wird. Bis zum Jahr 2012 wurden auf 12 ha der Betriebsfläche Hopfen angebaut. Dieser wurde Ende 2012 gerodet und es folgte 2 – 3 Jahre Körnermais. Durch diese Umstellung wurde ein hoher Maisanteil von 54 % der Betriebsfläche in den Jahren 2013 – 2015 erreicht (Tab. 16). Auf den übrigen Ackerflächen des Betriebes war die Fruchtfolge Körnermais – Winterweizen oder Körnermais – Winterweizen – Wintergerste.

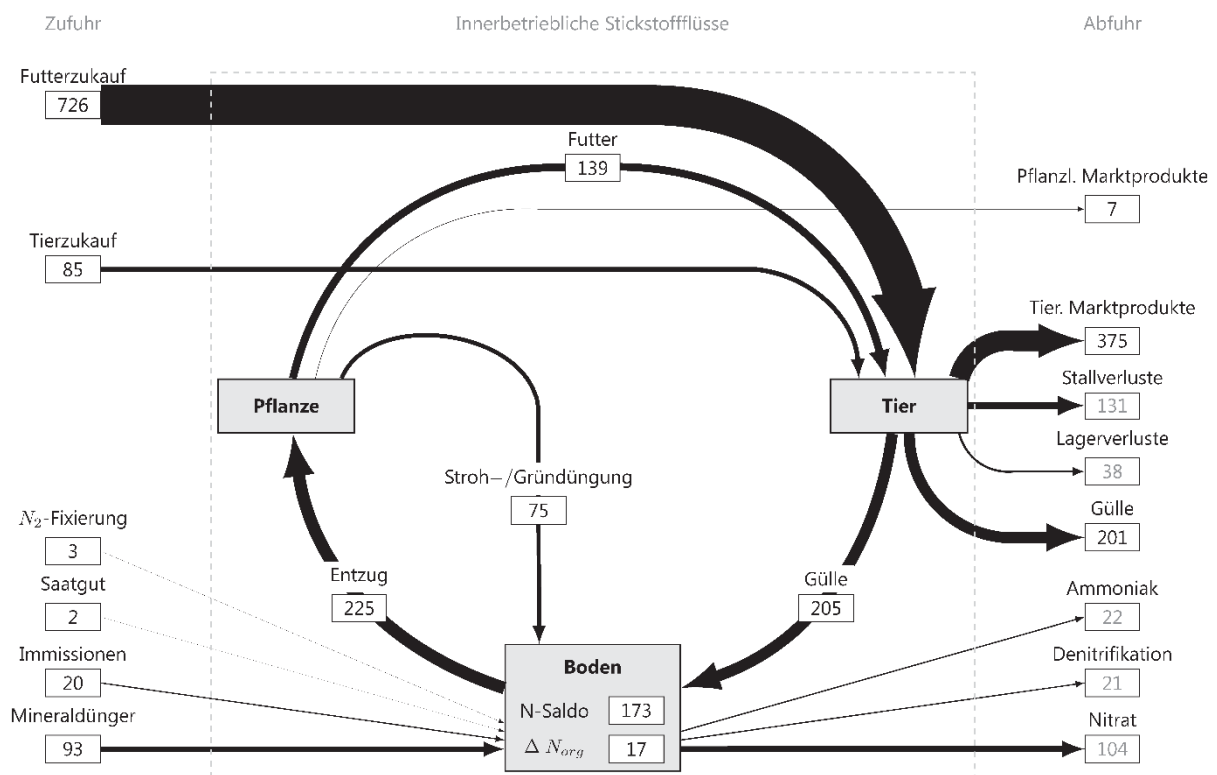


Abb. 10: Stickstoffkreislauf des Schweinemastbetriebs MS 2.

N-Flüsse in kg ha⁻¹ im Mittel der Jahre 2013 – 2015. ΔN_{org} ist nicht im Saldo enthalten.

Durch den hohen Viehbesatz ist der Betrieb auf Futterzukauf und Gülleabgabe angewiesen. Dazu besteht eine vertragliche Kooperation zur Gülleabgabe mit zwei Hopfen- und Ackerbaubetrieben. Der Futterzukauf war mit 726 kg ha⁻¹ die bei weitem bedeutendste Größe der betrieblichen Stickstoffzufuhr (Abb. 10). Dies führte bei einer N-Menge in den tierischen Marktprodukten von 375 kg ha⁻¹ zu einem Gülle-N-Anfall von 406 kg ha⁻¹. Etwa die Hälfte der Güllemenge wurde an die Partnerbetriebe abgegeben, 205 kg ha⁻¹ Gülle-N wurden auf den betriebseigenen Flächen ausgebracht.

Da die Stickstoffentzüge der Ernteprodukte in den Jahren 2013 – 2015 nur 146 kg ha^{-1} betragen, erzielte der Betrieb einen sehr hohen N-Saldo von 173 kg ha^{-1} . Die Boden-N-Vorratsänderung lag mit 17 kg ha^{-1} niedriger als in Betrieb MS 1. Eine Ursache hierfür sind die geringeren Ackerzahlen, die die System-Verwertungsrate für Dünger-N in der Humusbilanz beeinflussen (Tab. A. 6). Nach Abzug der im Humus-Pool sowie im organischen und mineralischen N-Pool gespeicherten Stickstoffmenge wurden vom Modell Stickstoffverluste in Höhe von 147 kg ha^{-1} berechnet. Davon wiederum gingen nach dem Modellberechnungen 104 kg ha^{-1} als Nitratstickstoff verloren.

Tab. 15: Kennzahlen der Schweinemast in Betrieb MS 2; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	
Mittlerer Jahresbestand	Stück	2.408
Tageszunahmen	g Tag^{-1}	815
Anfangsgewicht	kg	27
Endgewicht	kg	119
Tierverluste	%	1,3
Futterverwertung ¹	kg kg^{-1}	2,78
Proteingehalt Futter	% in 88 % TS	17,2
N-Anfall in Exkrementen	kg Tier^{-1}	4,65
N-Effizienz tierische Produktion	%	33,2
Gülleanfall	m^3	4.353
N-Gehalt Gülle	kg m^{-3}	5,87

Die täglichen Zunahmen waren mit 815 g pro Tag hoch. Bei 2.550 Mastplätzen wurde ein mittlerer Jahresbestand von ca. 2.400 Stück erreicht (Tab. 15). Die Fütterung erfolgte dreiphasig, mit einem geringen Einsatz an Nebenprodukten. Es wurde an Nebenprodukten ausschließlich Sauermolke verfüttert, die einen Rationsanteil von 6 % einnahm (Tab. A. 23). Als Eiweißfuttermittel wurden hohe Mengen an Soja- und Rapsextraktionsschrot verfüttert, weshalb ein hoher Proteingehalt von 17,2 % in der Ration erzielt wurde.

Die eingesetzten Futtermittel wurden zum Großteil zugekauft. Der Anteil an Zukaufsfutter betrug bezogen auf die Trockenmasse 72 %, bezogen auf die Stickstoffmenge 84 %. Mit einer Futterverwertung von 2,78 fielen $4,65 \text{ kg N}$ pro Tier in den Exkrementen an. Die Stickstoffverwertung der tierischen Produktion erreichte 33,2 %.

¹ Futtermenge (bei 88 % TS) pro kg Lebendgewichtszuwachs

Die Tiere werden auf Vollspalten gehalten, die Güllelagerung erfolgte in einer offenen Güllegrube, in der sich eine natürliche Schwimmdecke ausbildet. Hervorzuheben ist der vergleichsweise geringe Gülleanfall mit einem hohen N-Gehalt vom 5,87 kg pro m³ Gülle.

Tab. 16: Stickstoffbilanz der wichtigsten Fruchtarten im Betrieb MS 2; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Körner- mais ¹	Winter- weizen ¹	Winter- gerste ¹	Zwischen- früchte ²
Flächenanteil	% der AF	54	29	15	25
Ertrag	dt ha ⁻¹	100	101	90	
N-Gehalt	% in TM	1,41 ³	2,22 ³	2,19 ³	
Gülle vor Saat	%	100	26	53	100
N-Entzug (Ernte)	kg ha ⁻¹	123	192	169	87
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	123	192	169	87
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹				
N-Zufuhr ⁴	kg ha ⁻¹	297	355	364	129
Saatgut	kg ha ⁻¹		3	3	1
N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹				11
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	83	136	81	
Schweinegülle	kg ha ⁻¹	159	196	260	117
Gründüngung	kg ha ⁻¹	35			
N-Effizienz	%	41	54	46	67
N-Saldo	kg ha ⁻¹	175	163	195	42

Die hohen Stickstoffgehalte der Gülle führten trotz Düngermengen, die nie über 30 m³ ha⁻¹ lagen, zu sehr hohen Stickstoffzufuhren über Gülle. So wies beispielsweise Wintergerste, die zu etwa gleichen Teilen vor der Saat und im Frühjahr eine Gülledüngung erhielt, sehr hohe N-Zufuhren mit Gülle von 260 kg ha⁻¹ auf (Tab. 16). Diese führten trotz hoher Stickstoffentzüge und geringer Mineraldüngermengen zu einem N-Saldo von 195 kg ha⁻¹ im Mittel der Jahre 2011 – 2013. Bei Winterweizen lag der Anteil im Herbst ausgebrachter Gülle bei 26 %, was zu etwas niedrigeren Gülle-N-Zufuhren führte. Dennoch lag der N-Saldo trotz sehr hoher N-Entzüge von 192 kg ha⁻¹ bei 163 kg ha⁻¹. Sowohl bei Winterweizen als auch bei Wintergerste wurde die mineralische und organische N-Düngung im Jahr 2015 deutlich reduziert. Somit konnten N-Salden von 106 kg ha⁻¹ bei Winterweizen und 95 kg ha⁻¹ bei Wintergerste erzielt werden.

Körnermais hingegen konnte nur geringe Stickstoffentzüge von 123 kg ha⁻¹ erzielen. Ursache waren zum einen die geringen Erträge in den Jahren 2013 (79 dt ha⁻¹) und 2015 (87 dt ha⁻¹). Zum anderen zeigten Inhaltsstoffanalysen Stickstoffgehalte in den Maiskörnern (im Mittel 1,41 %), die teils deutlich unter den im Modell festgelegten Standardnährstoffgehalten (1,60 %) lagen (Tab. A. 3). Dies führte bei

¹ Getreide, Körnermais: 86% TS

² Zwischenfruchtaufwuchs wird der Folgefrucht als Gründüngung angerechnet

³ N-Gehalt abweichend vom Tabellenwert (Tab. A.)

⁴ N-Zufuhr = N-Immission (20 kg ha⁻¹ a⁻¹) + Saatgut + N₂-Fixierung + Gründüngung + Mineraldünger + Wirtschaftsdünger

einer N-Düngung über Gülle von 159 kg ha^{-1} zu einem N-Saldo von 175 kg ha^{-1} . Die Gülleausbringung erfolgte in den Jahren 2013 und 2014 mit Breitverteiler, ab Frühjahr 2015 durch einen Schleppschuhverteiler.

Tab. 17: Modellergebnisse der Stickstoffverluste in Betrieb MS 2; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Modell-ergebnis
N-Saldo Boden	kg ha^{-1}	173
N-Saldo Hoftor	kg ha^{-1}	345
N-Effizienz Betrieb	%	63
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha^{-1}	17
Änderung org. Pool	kg ha^{-1}	3
Änderung min. Pool	kg ha^{-1}	7
Ammoniak-N-Verluste	kg ha^{-1}	22
Denitrifikation-N-Verluste	kg ha^{-1}	21
Nitrat-N-Verluste	kg ha^{-1}	104
Sickerwasserrate	mm a^{-1}	199
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l^{-1}	210

Der N-Saldo nach Hoftorbilanz war infolge des hohen Tierbesatzes sehr hoch, bei 345 kg ha^{-1} . Dagegen lag die N-Effizienz mit 63 % vergleichsweise hoch, da große Mengen an Gülle aus dem Betrieb abgegeben wurden. Im Mittel der Jahre 2013 – 2015 betrug die Sickerwasserrate 199 mm a^{-1} (Tab. 17). Damit lag sie, aufgrund der sandigeren Böden, etwas höher als in anderen Betrieben der Untersuchungsregion. Aufgrund des hohen N-Saldos war die berechnete Nitratstickstoffauswaschung mit 104 kg ha^{-1} sehr hoch. Aus der Sickerwasserrate von 199 mm a^{-1} ergab sich eine Nitratkonzentration von 210 mg l^{-1} . Infolge einer Düngung, die den Pflanzenentzug deutlich überstieg, wurde das Ziel einer Nitratkonzentration unter 50 mg l^{-1} somit deutlich verfehlt. Ursache war hier vor allem die sehr hohe Gölledüngung, welche unter anderem durch die hohen N-Gehalte der Gülle bedingt war.

2.3.1.6. Schweinemast- und Biogasbetrieb BG

Der mit Abstand größte und am stärksten diversifizierte Betrieb ist der Schweinemast- und Biogasbetrieb BG. Der Betrieb nutzt mehrere Schweineställe mit insgesamt ca. 7.000 Mastplätzen, was einem Viehbesatz von 2,3 GV ha⁻¹ entspricht. Zudem besitzt der Betrieb eine Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 450 kW, in der die Schweinegülle sowie pflanzliche Substrate aus Eigenerzeugung und Zukauf vergoren werden. Im Mittel der Jahre 2013 – 2015 betrug die landwirtschaftliche Nutzfläche 416 ha bei einer Hofentfernung der Schläge von bis zu 20 km. Zur Abnahme der Gülle aus der Biogasanlage bestehen Kooperationen mit zahlreichen Ackerbaubetrieben. Entsprechend der Größe des Betriebs schwanken die Ackerzahlen der Flächen stark von 35 – 88. Insgesamt haben die Böden ein hohes Ertragspotenzial mit einer mittleren Ackerzahl von 60. Die wichtigsten Fruchtarten des Betriebs waren im Untersuchungszeitraum Winterweizen, Silo- und Körnermais sowie in geringerem Umfang Wintergerste, Zuckerrüben und Winterraps (3 % der AF). Neben Zuckerrüben und Raps wurde A-Weizen als Marktfrucht angebaut, während zur Verfütterung ausschließlich C-Weizen verwendet wurde. Eine feste Fruchtfolge gab es in Betrieb BG 2 nicht. Auf den betriebsfernen Flächen wurde überwiegend Mais und Weizen im Wechsel angebaut, Zuckerrüben wurden nur auf den sehr guten Flächen gesät.

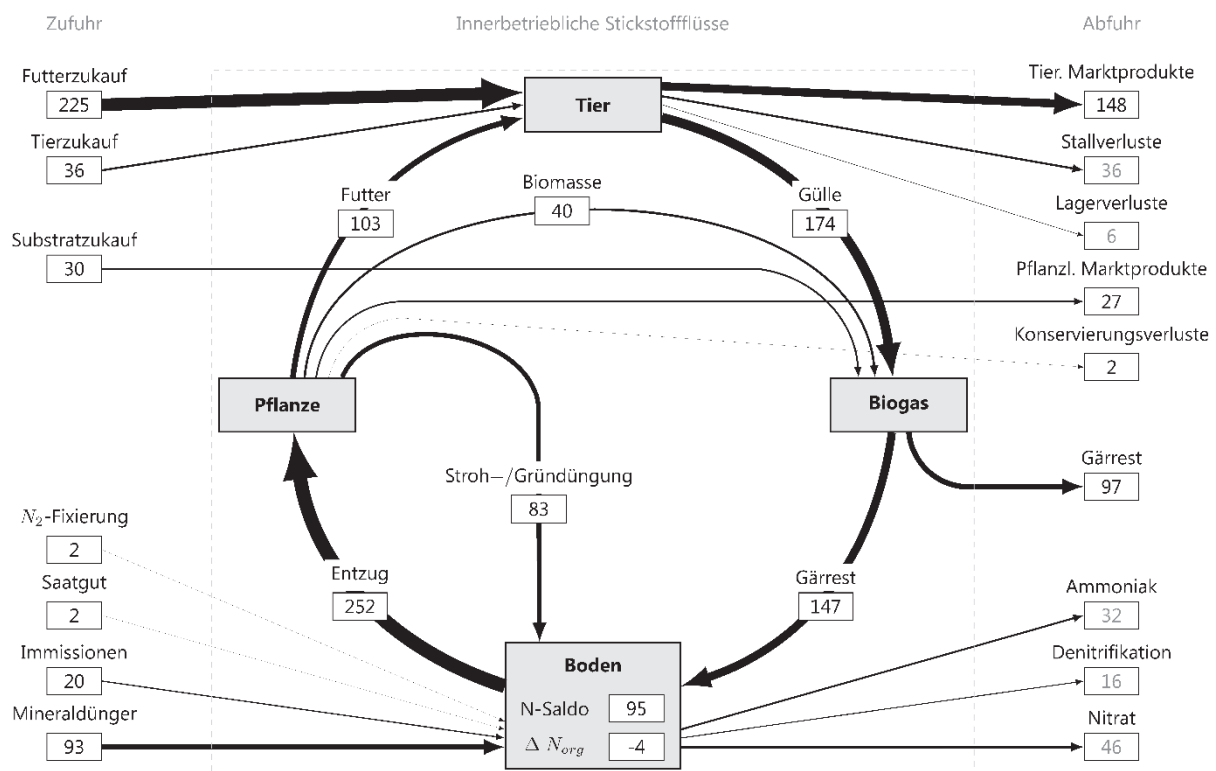


Abb. 11: Stickstoffkreislauf des Schweinemast- und Biogasbetriebs BG.

N-Flüsse in kg ha⁻¹ im Mittel der Jahre 2013 – 2015. ΔN_{org} ist nicht im Saldo enthalten.

Während die Proteinversorgung der Schweine überwiegend durch Zukauffutter erfolgte, lag der Substrat-N-Zukauf für die Biogasanlage relativ niedrig (Abb. 11). In einem der Schweineställe mit ca. 2.250

Mastplätzen war eine Abluftreinigungsanlage installiert, wodurch die Stall-N-Verluste verringert wurden; sie betragen gesamtbetrieblich 36 kg ha^{-1} . Bei der Lagerung von Schweinegülle traten zudem gasförmige Verluste auf, da die Gülle in offenen Vorgruben lagerte, bevor sie in die Biogasanlage transportiert wurde. In der Biogasanlage wurden pro Jahr 244 kg ha^{-1} Stickstoff umgesetzt. Von den anfallenden Gärresten wurden ca. 60 % auf den eigenen Flächen ausgebracht, während der Rest abgegeben wurde.

Der N-Entzug im Pflanzenbau lag in Betrieb BG sehr hoch bei 172 kg ha^{-1} . Dies war auf ein sehr hohes Ertragsniveau zurückzuführen (Tab. 19). Der N-Output mit pflanzlichen Marktprodukten war mit 27 kg ha^{-1} für einen Schweinemastbetrieb relativ hoch.

Die N-Zufuhr auf die Flächen in Höhe von 147 kg ha^{-1} über Gülle und 93 kg ha^{-1} über Mineraldünger führte zu einem N-Saldo von 95 kg ha^{-1} . Infolge des Anbaues der humuszehrenden Fruchtarten Silomais und Zuckerrüben berechnete das Modell eine Stickstofffreisetzung von 4 kg ha^{-1} aus dem Humus-Pool. Neben Ammoniak-N-Verlusten von 32 kg ha^{-1} und Denitrifikationsverlusten von 16 kg ha^{-1} wurden Nitratverluste von 46 kg ha^{-1} ausgewiesen.

Tab. 18: Kennzahlen der Schweinemast und Gärrestanfall in Betrieb BG 2; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	
Mittlerer Jahresbestand	Stück	6.359
Tageszunahmen	g Tag^{-1}	780
Anfangsgewicht	kg	30
Endgewicht	kg	122
Tierverluste	%	1,7
Futtermittelnutzung ¹	kg kg^{-1}	2,85
Proteingehalt Futter	% in 88 % TS	16,5
N-Anfall in Exkrementen	kg Tier^{-1}	4,56
N-Effizienz tierische Produktion	%	33,6
Gülleanfall	m^3	12.078
N-Gehalt Schweinegülle	kg m^{-3}	5,99
Gärrestanfall	m^3	22.535
N-Gehalt Gärrest	kg m^{-3}	4,48

Mit täglichen Zunahmen von 780 g pro Tag und Verlusten von $1,7 \%$ lagen die Tierleistungen in einem mittleren Bereich (Tab. 18). Es erfolgte eine dreiphasige Fütterung mit einem hohen Anteil an Nebenprodukten von 21% in der Futtermittelnutzung. Die Nebenprodukte waren überwiegend proteinarme Kartoffelschalen und Molke sowie zu einem geringen Anteil Bierhefe (Tab. A. 24). Als Eiweißträger kam hauptsächlich Sojaextraktionsschrot zum Einsatz. Der Anteil an Zukaufsfutter lag somit bei 48% der

¹ Futtermenge (bei 88 % TS) pro kg Lebendgewichtszuwachs

Trockenmasse und 69 % der N-Menge. So konnte in der Ration ein vergleichsweise niedriger Proteingehalt von 16,5 % sowie eine N-Effizienz der tierischen Produktion von 33,6 % erreicht werden. Bei einer vergleichsweise langen Mastphase von 30 kg bis 122 kg Lebendgewicht betrug der N-Exkrementanfall pro Tier 4,56 kg.

Die Schweinegülle wurde anschließend in der Biogasanlage vergoren, in der sie einen Anteil von etwa 23 % des Trockenmasseeinsatzes einnahm (Tab. A. 25). Dazu kamen im Untersuchungszeitraum 38 % Maissilage aus eigenem Anbau, 27 % Maissilage aus Zukauf sowie kleinere Menge Grassilagen und Getreide-GPS. Während der Substratzukauf 34 % der Trockenmasse einnahm, stammten nur 12 % des in der Biogasanlage eingebrachten Substrat-N aus dem Zukauf. In den Gärresten betrug die N-Gehalte 4,48 kg m⁻³.

Tab. 19: Stickstoffbilanz der wichtigsten Fruchtarten im Betrieb BG 2; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Winterweizen ¹	Silo-mais ¹	Körner-mais ¹	Wintergerste ¹		Zucker-rüben ¹	Zwfr. ²
					zwei-zeilig	mehr-zeilig		
Flächenanteil	% der AF	33	25	19	3	6	6	32
Ertrag	dt ha ⁻¹	107	453	102	96	97	979	
N-Gehalt	% in TM	2,04 ³	1,34	1,60	1,92	1,92	0,78	
Gülle vor Saat	%	0	91	100	63	0		100
N-Entzug (Ernte)	kg ha ⁻¹	186	204	140	159	161	176	81
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	186	204	140	159	161	176	81
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹							
N-Zufuhr ⁴	kg ha ⁻¹	276	264	267	375	221	191	99
Saatgut	kg ha ⁻¹	3			3	2		1
N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹							4
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	134	67	69	112	98	102	
Biogasgärrest	kg ha ⁻¹	120	123	127	244 ⁵	100		94
Gründüngung	kg ha ⁻¹		55	51			69	
N-Effizienz	%	67	77	52	42	73	92	82
N-Saldo	kg ha ⁻¹	90	60	127	217	60	15	18

Die Fruchtart Winterweizen erreichte mit 107 dt ha⁻¹ sehr hohe Erträge, allerdings mit niedrigen Proteingehalten (Tab. 19). Die N-Salden lagen aufgrund einer N-Düngung von 134 kg ha⁻¹ über Mineraldünger, sowie 120 kg ha⁻¹ über Gärreste, bei 90 kg ha⁻¹. Die N-Effizienz betrug 67 %. Eine Differenzierung zwischen A- und C-Weizen konnte aufgrund der Datenlage nicht erfolgen.

¹ Getreide, Körnermais: 86% TS, Zuckerrüben: 23% TS, Silomais: 32 % TS (nach Abzug der Konservierungsverluste)

² Zwischenfruchtaufwuchs wird der Folgefrucht als Gründüngung angerechnet

³ N-Gehalt abweichend vom Tabellenwert (Tab. A.)

⁴ N-Zufuhr = N-Immission (20 kg ha⁻¹ a⁻¹) + Saatgut + N₂-Fixierung + Gründüngung + Mineraldünger + Wirtschaftsdünger

⁵ Die zweizeilige Gerste wurde vor und nach der Saat mit Gülle gedüngt.

Sehr hoch waren die Erträge der Zuckerrüben mit 979 dt ha^{-1} , die aufgrund einer moderaten Düngung einen Saldo von sehr niedrigen 15 kg ha^{-1} und eine N-Effizienz von 92 % erzielten. Die Maiserträge waren dagegen durchschnittlich, wobei Silomais dennoch hohe N-Entzüge von 204 kg ha^{-1} zeigte und daher mit 60 kg ha^{-1} im Mittel der Jahre 2013 – 2015 einen niedrigen N-Saldo aufwies. Im Jahr 2015 wurde erstmals bei einem Teil der Maisschläge Gülle in den Maisbestand ausgebracht, was den Anteil an Gülle vor der Saat auf 91 % reduzierte (vgl. Tab. 19). Im Verlauf der Untersuchungsjahre wurde die Güllegabe zu Mais deutlich reduziert, von einer N-Gabe in Höhe von 165 kg ha^{-1} zu Silo- und Körnermais im Jahr 2013 auf 85 kg ha^{-1} zu Silomais im Jahr 2015. Die Reduktion der Gülle-N-Menge wurde durch eine vermehrte Gülleabgabe aus dem Betrieb erreicht.

Bei Wintergerste wies vor allem die zweizeilige Gerste, die nach Weizen angebaut wurde, einen hohen N-Saldo von 217 kg ha^{-1} und eine geringe N-Effizienz von 42 % auf. Hier wurde im Ansaatjahr immer vor und nach der Saat mit Gülle gedüngt, was sich zu enormen Düngermengen summierte. Im Gegensatz dazu lag der N-Saldo der mehrzeiligen Gerste, die nach Silomais angebaut wurde und im Herbst keine Düngung erhielt, bei niedrigen 60 kg ha^{-1} . Im Jahr 2014 erzielte die mehrzeilige Wintergerste aufgrund einer sehr niedrigen Mineraldüngung sogar einen negativen N-Saldo. Die Gülle wurde zum Teil mittels Schleppschuh und zum Teil in Breitverteilung ausgebracht.

Tab. 20: Modellergebnisse der Stickstoffverluste in Betrieb BG 2. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Modell-ergebnis
N-Saldo Boden	kg ha^{-1}	95
N-Saldo Hoftor	kg ha^{-1}	138
N-Effizienz Betrieb	%	66
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha^{-1}	-4
Änderung org. Pool	kg ha^{-1}	6
Änderung min. Pool	kg ha^{-1}	-1
Ammoniak-N-Verluste	kg ha^{-1}	32
Denitrifikation-N-Verluste	kg ha^{-1}	16
Nitrat-N-Verluste	kg ha^{-1}	46
Sickerwasserrate	mm a^{-1}	194
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l^{-1}	99

Der N-Saldo nach Hoftorbilanz betrug 138 kg ha^{-1} . Aufgrund der Gülleabgabe war die betriebliche N-Effizienz mit 66 % hoch. Die Sickerwasserrate lag mit 194 mm^{-1} in einem mittleren Bereich, die modellierte Nitratkonzentration betrug 99 mg l^{-1} (Tab. 20). Damit erzielte Betrieb BG vergleichsweise niedrige Nitratkonzentrationen im Sickerwasser, die jedoch den Zielwert von 50 mg l^{-1} überschritten. Hier zeigten vom Betriebsleiter durchgeführte Optimierungsschritte, die vor allem in einer Erhöhung der Gülleabgabe bestanden, erste Erfolge. Dennoch lag das Düngungsniveau bei einzelnen Fruchtarten (Wintergerste, Körnermais) deutlich über dem N-Entzug. Da zudem die Maiserträge in den Jahren 2013 und 2015 deutlich unter dem betriebsüblichen Ertragsniveau blieben, wurde der Zielwert für die Nitratkonzentration nicht erreicht.

2.3.1.7. Ferkelerzeugungsbetrieb ZS

Der Betrieb ZS betreibt eine gewerbliche Ferkelerzeugung mit ca. 450 Zuchtsauen und einen Ackerbaubetrieb mit 33 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche. Etwa ein Viertel der geborenen Ferkel wird nach dem Absetzen verkauft, der Rest wird im Betrieb bis ca. 30 kg LM aufgezogen. Im Untersuchungszeitraum 2013 – 2015 wurde die Schweinehaltung von 416 auf 474 Zuchtsauen vergrößert. Der Tierbesatz lag damit bei 7,3 GV ha⁻¹ im Mittel der Jahre.

Die Flächen liegen direkt um die Hofstelle, auf der sich auch die Schweineställe befinden. Die Böden weisen Ackerzahlen zwischen 44 und 70 auf (Mittel 57). Auf den Ackerflächen wurde die Fruchtfolge Körnermais / Winterraps – Winterweizen – Wintergerste angebaut, wobei seit dem Jahr 2015 Winterraps vollständig durch Körnermais ersetzt wurde. Weizen und Gerste wurden in der betrieblichen Schweinehaltung verfüttert, Körnermais und Winterraps wurden verkauft.

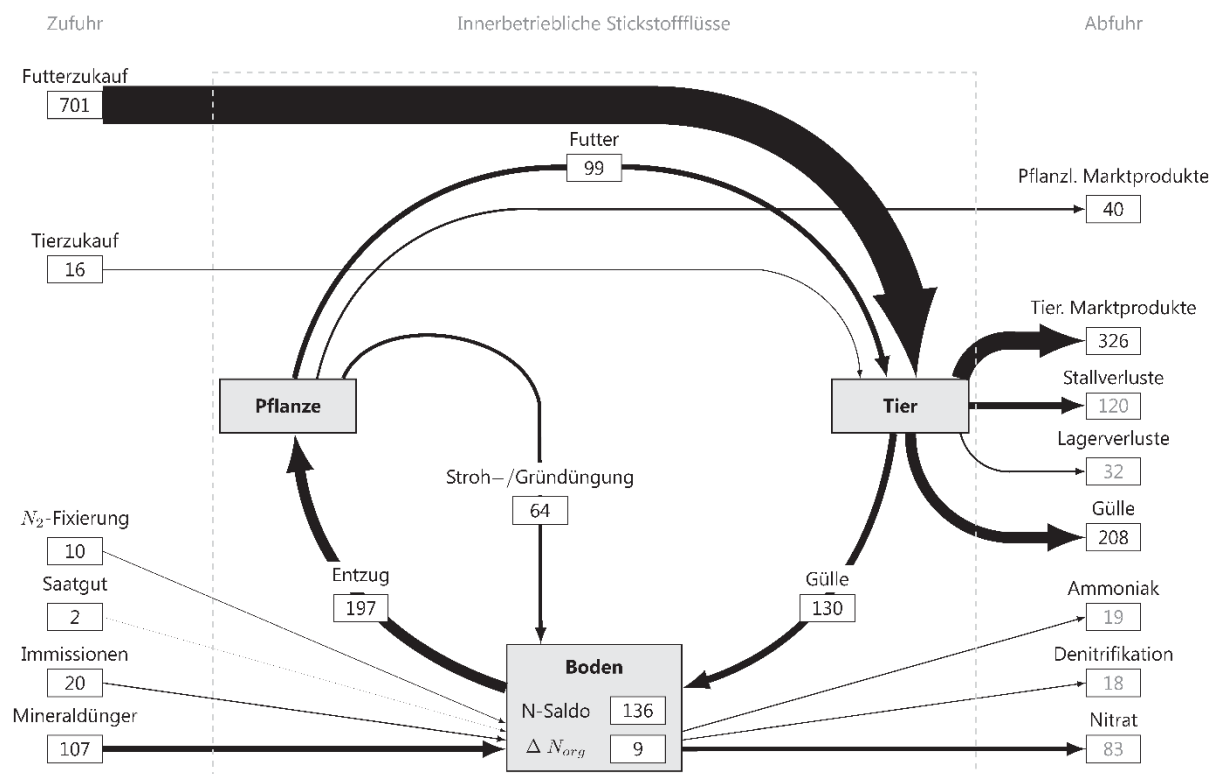


Abb. 12: Stickstoffkreislauf des Ferkelerzeugungsbetriebs ZS.

N-Flüsse in kg ha⁻¹ im Mittel der Jahre 2013 – 2015. ΔN_{org} ist nicht im Saldo enthalten.

Die Tierhaltung erfolgt in Betrieb ZS weitgehend flächenunabhängig. Dies ist daran zu erkennen, dass der Großteil der Futternährstoffe in den Betrieb importiert wird, diesen jedoch über die tierischen Marktprodukte und die Gülleabgabe weitgehend auch wieder verlässt (Abb. 12). Auf den Betriebsflächen wurden mit der Gülle 130 kg ha⁻¹ Stickstoff ausgebracht sowie 107 kg ha⁻¹ über Mineraldünger.

Dem gegenüber standen Ernte-N-Entzüge von vergleichsweise geringen 139 kg ha^{-1} . Von diesen N-Entzügen gingen 99 kg ha^{-1} als Futter in die Tierhaltung, während 40 kg ha^{-1} als pflanzliche Marktprodukte verkauft wurden.

Der N-Saldo belief sich auf 136 kg ha^{-1} . Die Ammoniak-N-Verluste wurden mit 19 kg ha^{-1} berechnet, als Nitrat-N gingen 83 kg ha^{-1} verloren.

Tab. 21: Kennzahlen der Ferkelerzeugung in Betrieb ZS. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	
Mittlerer Jahresbestand Sauen	Stück	451
Bestandesergänzung	%	36,8
Würfe je Sau	Anzahl a ⁻¹	2,44
Geborene Ferkel	Anzahl Sau ⁻¹	41,3
Ferkelverluste	%	16,7
Mittlerer Jahresbestand Ferkel	Stück	1.528
Anfangsgewicht	kg	7
Endgewicht	kg	31
Verluste Ferkelaufzucht	%	5,13
Proteingehalt Futter	% in 88 % TS	15,5
N-Effizienz tierische Produktion	%	36,9
Gülleanfall	m ³	3.951
N-Gehalt Gülle	kg m ⁻³	2,87

Die Tierleistungen der Ferkelerzeugung waren in Betrieb ZS außergewöhnlich hoch (Tab. 21). So konnten pro Sau und Jahr 34,4 abgesetzte Ferkel erzeugt werden, bei einer Bestandesergänzungsrates von 37 %. Die Fütterung wurde gemeinsam für die Ferkelerzeugung und die Ferkelaufzucht erfasst. Dabei wurden sowohl für die Sauen als auch für die Aufzuchtferkel feste Futtermischungen verwendet, die aus Zukaufsfutter und eigenerzeugtem Getreide am Hof gemischt wurden (Tab. A. 26). Der Anteil an Zukaufsfutter belief sich auf 83 % der Trockenmasse und 88 % der N-Menge im Futter. Im Mittel lag der Proteingehalt des Futters bei 15,5 %.

Die N-Effizienz der tierischen Produktion lag insgesamt sehr hoch bei 36,9 %, was vor allem durch eine sehr hohe N-Effizienz der Ferkelaufzucht erreicht wurde. Eine Besonderheit der Zuchtsauenerzeugung besteht darin, dass durch die Einträge von Produktionsabwasser in die Gülle relativ hohe Güllemengen mit geringem Stickstoffgehalt von $2,87 \text{ kg m}^{-3}$ anfielen.

Tab. 22: Stickstoffbilanz der wichtigsten Fruchtarten im Betrieb ZS. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Winterweizen ¹	Wintergerste ¹	Körnermais ¹	Winterrips ¹	Zwischenfrüchte ²
Flächenanteil	% der AF	31	31	23	9	25
Ertrag	dt ha ⁻¹	98	78	93	44	
N-Gehalt	% in TM	2,20 ³	1,92	1,60	3,68	
Gülle vor Saat	%	59	87	100	71	100
N-Entzug (Ernte)	kg ha ⁻¹	184	130	128	146	80
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	184	130	128	146	80
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹					
N-Zufuhr ⁴	kg ha ⁻¹	259	235	337	264	112
Saatgut	kg ha ⁻¹	3	3			1
N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹					56
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	136	130	53	129	
Schweinegülle	kg ha ⁻¹	100	81	172	115	55
Gründüngung	kg ha ⁻¹		2	91		
N-Effizienz	%	71	55	38	55	72
N-Saldo	kg ha ⁻¹	76	106	208	119	32

Die geringen gesamtbetrieblichen Nährstoffentzüge lassen sich durch die niedrigen Erträge von Wintergerste und Körnermais erklären (Tab. 22). Diese haben vor allem bei Körnermais sehr hohe N-Salden zur Folge, zumal hier enorme Güllemengen von 60 m³ ha⁻¹ appliziert wurden. Dadurch lag der N-Saldo von Körnermais im Mittel der Jahre bei 208 kg ha⁻¹, mit einer entsprechend niedrigen N-Effizienz von 38 %.

Bei Wintergerste und Winterraps betragen die N-Effizienz 55 % und die N-Salden bei 106 kg ha⁻¹ und 119 kg ha⁻¹. Hier wurde der Großteil der Gülle bereits im Sommer vor der Saat von Gerste und Raps ausgebracht und nur geringe N-Entzüge von 130 und 146 kg ha⁻¹ erzielt. Winterweizen hingegen erzielte bei hohen Erträgen von 98 dt ha⁻¹ einen moderaten N-Saldo von 76 kg ha⁻¹ sowie eine sehr gute N-Effizienz von 72 %. Dies wurde erreicht, obwohl mehr als die Hälfte der Gülle noch im Herbst vor der Weizenaussaat appliziert wurde. Die Gülleausbringung erfolgte mittels Breitverteiler.

¹ Getreide, Körnermais: 86% TS, Raps: 91% TS, Zuckerrüben: 23% TS

² Zwischenfruchtaufwuchs wird der Folgefrucht als Gründüngung angerechnet

³ N-Gehalt abweichend vom Tabellenwert (Tab. A.)

⁴ N-Zufuhr = N-Immission (20 kg ha⁻¹ a⁻¹) + Saatgut + N₂-Fixierung + Gründüngung + Mineraldünger + Wirtschaftsdünger

Tab. 23: Modellergebnisse der Stickstoffverluste in Betrieb ZS. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Parameter	ME	Modellergebnis
N-Saldo Boden	kg ha ⁻¹	136
N-Saldo Hoftor	kg ha ⁻¹	282
N-Effizienz Betrieb	%	67
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha ⁻¹	9
Änderung org. Pool	kg ha ⁻¹	-1
Änderung min. Pool	kg ha ⁻¹	8
Ammoniak-N-Verluste	kg ha ⁻¹	19
Denitrifikation-N-Verluste	kg ha ⁻¹	18
Nitrat-N-Verluste	kg ha ⁻¹	83
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	204
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l ⁻¹	179

Die gesamtbetriebliche N-Effizienz war mit 67 % sehr hoch. Ursachen waren neben der hohen N-Effizienz der tierischen Produktion die Gülleabgabe an andere Betriebe. Der N-Saldo auf Hoftorebene war dagegen mit 278 kg ha⁻¹ infolge des hohen Tierbesatzes sehr hoch. Die Ammoniak-Verluste waren mit 19 kg ha⁻¹ etwas erhöht aufgrund der Gülleausbringung im Sommer.

Betrieb ZS bewirtschaftet überwiegend lehmige Böden bei relativ geringer Verdunstung (Wetterstation Eschenhart, LfL), weshalb die Sickerwassermenge in einem mittleren Bereich lag. Somit ergab sich eine modellierte Nitratkonzentration im Sickerwasser von 179 mg l⁻¹ (Tab. 23).

2.3.1.8. Vergleich der betrieblichen Ergebnisse

Gesamtbetrieb

Die Zusammenfassung der betrieblichen N-Bilanzierung zeigt in den Marktfruchtbetrieben generell geringere gesamtbetriebliche N-Inputs als in den tierhaltenden Betrieben (Tab. 24). Dabei stiegen die Gesamt-N-Inputs enorm an, je stärker der Viehbesatz zunahm bzw. wenn eine Biogasanlage in das Betriebssystem integriert wurde. Die Boden-N-Inputs (Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, N-Immision, Saatgut, N₂-Fixierung), die von außen in die Betriebe gelangten, unterschieden sich, je nach Betriebssystem, deutlich. So lagen diese in den Marktfruchtbetrieben zwischen 234 und 258 kg ha⁻¹ und in den Veredelungsbetrieben zwischen 114 und 139 kg ha⁻¹. Die N-Zufuhr durch Futter- und Substratzukauf stiegen mit zunehmendem Tierbesatz deutlich an.

Die betrieblichen N-Outputs waren in den viehstarken Betrieben ebenfalls am höchsten. Dabei nahm jedoch die Abgabe von Wirtschaftsdüngern mit steigendem Tierbesatz einen immer größeren Anteil an den N-Outputs ein. Die N-Outputs in Form von Marktprodukten lagen bei den Marktfruchtbetrieben MF_G 1 und MF_G 2 auf einem ähnlichen Niveau wie im Betrieb mit Schweinemast und Biogasanlage BG. Dagegen lagen die N-Outputs im Hopfenbetrieb HP nur bei 92 kg ha⁻¹, während Betrieb MS 1, vor allem aber die Betriebe ZS und MS 2 N-Outputs von über 200 kg ha⁻¹ in Form von Marktprodukten hatten.

Der N-Saldo auf Hoftorebene beinhaltet neben dem N-Saldo der betrieblichen Flächen die N-Verluste aus den Ställen, den Güllelagern sowie Verluste bei der Silagelagerung und der Rebhäcksellagerung. Somit war der Hoftor-N-Saldo auf den Betrieben mit hohem Tierbesatz deutlich höher als der flächenbezogene N-Saldo. Biogasanlagen wirkten nicht erhöhend auf den Hoftor-N-Saldo, da dort in der Regel keine N-Verluste auftreten (bzw. im Modell keine N-Verluste angenommen wurden). Da die N-Verluste in Stall und Lager im Modell mit festen Faktoren an die Gülle-N-Menge gekoppelt sind, spielt hier zudem die Effizienz der Tierhaltung eine Rolle, weshalb beispielsweise Betrieb ZS trotz des höheren Viehbesatzes von 7,3 GV ha⁻¹ einen niedrigeren Hoftor-N-Saldo erzielte als Betrieb MS 2 mit 5,7 GV ha⁻¹. Ein hoher Hoftor-N-Saldo trotz eines moderaten Tierbesatzes, wie z. B. in Betrieb MV, kann dennoch Hinweise darauf geben, dass Optimierungspotenziale vorhanden sind.

Die N-Effizienz des Gesamtbetriebes war bei den Marktfruchtbetrieben identisch mit der N-Effizienz des Pflanzenbaues und wurde nur bei Betrieb HP durch die N-Verluste bei der Rebhäcksellagerung verringert. In den tierhaltenden Betrieben beeinflusste neben der N-Effizienz von Tierhaltung und Pflanzenbau die Gülleabgabe maßgeblich die gesamtbetriebliche N-Effizienz. Dies führte dazu, dass in Betrieben mit hohem Anteil an Gülleabgabe (Betriebe MS 2, BG, ZS) die betriebliche N-Effizienz sogar höher lag als die Effizienz der pflanzlichen Produktion. Zur Beurteilung der betrieblichen Leistungen ist daher in tierhaltenden Betrieben die N-Effizienz differenziert für Pflanzenbau und Tierproduktion zu bewerten.

Tierische Produktion

In der tierischen Produktion spiegelte die N-Effizienz vor allem die gehaltene Tierart wider. So lag die N-Effizienz der Schweinemastbetriebe mit 32 bis 34 % auf einem sehr ähnlichen Niveau, was durch grundsätzlich ähnliche Haltungsbedingungen und Fütterungsregime zu erklären ist. Betrieb ZS erreichte mit 37 % die höchste N-Effizienz der tierischen Produktion, was maßgeblich auf die hohe N-

Effizienz der Ferkelaufzucht von 44 – 51 % sowie die generell sehr gut geführte Tierhaltung zurückzuführen war.

Pflanzliche Produktion

Im Hinblick auf die Nitratauswaschung stellt die Ebene der pflanzlichen Produktion die entscheidende Ebene dar, da N-Überschüsse im Pflanzenbau in Form von Nitratauswaschung verlorengehen können.

Es zeigte sich, dass mit zunehmender N-Zufuhr durch Gülle meist auch die Gesamt-N-Zufuhr anstieg. Daher lagen die N-Zufuhren der viehhaltenden Betriebe mit 264 bis 323 kg ha⁻¹ höher als die der Marktfruchtbetriebe mit 234 bis 258 kg ha⁻¹. Andererseits war die Mineral-N-Menge in der Regel bei den Marktfruchtbetrieben höher als in den tierhaltenden Betrieben, wenngleich die Mineraldüngung offenbar nicht immer optimal an die Gülledüngung angepasst wurde.

In Betrieben, die hauptsächlich Getreide, Körnermais, Raps und Zuckerrüben anbauten, lagen die mittleren N-Entzüge zwischen 139 und 162 kg ha⁻¹. Höher waren die Entzüge dagegen im Betrieb BG aufgrund des Anbaues von Silomais und Ackergras bzw. der Erzeugung von Ganzpflanzensilagen. Auch die geernteten Hopfenpflanzen in Betrieb HP wiesen relativ hohe N-Entzüge auf, von denen ein großer Teil jedoch als Düngung (Rebhäcksel) auf die Felder zurückgeführt wurde.

Die N-Effizienz des Pflanzenbaus betrug zwischen 45 und 67 %, wobei die Marktfruchtbetriebe die höchste N-Effizienz erreichten, während die N-Effizienz mit zunehmendem Gülleeinsatz tendenziell sank. Ebenso zeigte das Beispiel von Betrieb BG, dass durch den Anbau von Kulturen mit hohem N-Entzug eine höhere N-Effizienz erzielt werden kann. Betriebsindividuelle Unterschiede führten jedoch dazu, dass keine eindeutigen Trends zu erkennen waren.

Entsprechend stiegen auch die N-Salden mit zunehmendem Einsatz an Wirtschaftsdüngern tendenziell an. Ursachen hierfür liegen in den Ammoniakverlusten, die im N-Saldo enthalten sind, aber auch in der geringeren Ausnutzung des in der Gülle enthaltenen Stickstoffs. Zudem ist zu erkennen, dass Betriebe mit negativer Boden-N-Vorratsänderung (ΔN_{org}) meist geringere N-Salden erzielten als Betriebe mit positiver Humusbilanz. Die Fruchtfolgen der Marktfruchtbetriebe und der Betriebe mit Biogasanlage wurden mit den Humusbilanzen als humuszehrend bewertet. Dagegen führte die Bewirtschaftung der schweinehaltenden Betriebe zu einem Humusaufbau und damit zu einer N-Aufspeicherung im Boden.

Tab. 24: Übersicht der Ergebnisse aus N-Bilanzierung und N-Umsatzmodellierung. Darstellung der N-Flüsse. Mittelwerte der Jahre 2013 – 2015.

			Marktfrucht			Tierhaltend					
			MF_G 2	HP	MF_G 1	BG	MS 1	ZS	MS 2		
Betrieb	N-Input	kg ha ⁻¹	234	239	258	408	469	856	929		
		N-Input Boden	kg ha ⁻¹	234	239	258	117	114	139	118	
		N-Input Stall / Biogas	kg ha ⁻¹				291	355	717	811	
		N-Output	kg ha ⁻¹	155	92	162	272	265	574	583	
			Marktprodukte	kg ha ⁻¹	155	92	162	175	209	366	382
			Wirtschaftsdünger	kg ha ⁻¹				97	56	208	201
		N-Effizienz	%	67	39	62	66	57	67	63	
		N-Saldo Hoftor	kg ha ⁻¹	79	147	99	138	204	282	345	
Tier	N-Zufuhr Stall	kg ha ⁻¹				364	505	816	950		
		Tierische Marktprodukte	kg ha ⁻¹			148	199	326	375		
		N-Effizienz	%			34	32	37	33		
Boden	N-Zufuhr gesamt	kg ha ⁻¹	234	281	258	264	274	269	323		
		Mineraldünger	kg ha ⁻¹	109	119	137	93	85	107	93	
		Wirtschaftsdünger	kg ha ⁻¹	96	94	98	147	160	130	205	
		N-Entzug (Ernte)	kg ha ⁻¹	155	154	162	172	160	139	146	
		N-Effizienz Pflanze	%	67	55	62	64	65	51	45	
		N-Saldo	kg ha ⁻¹	79	128	99	95	113	136	174	
		ΔN_{org}	kg ha ⁻¹	-42	-12	-8	-4	24	9	17	
Verluste	Ammoniak-N	kg ha ⁻¹	24	26	15	32	16	19	22		
Boden	Denitrifikation-N	kg ha ⁻¹	18	18	17	16	16	18	21		
	Nitrat-N	kg ha ⁻¹	42	85	58	46	45	83	104		

Modellierte N-Verluste

Ammoniakverluste entstehen in geringem Maße bei der Anwendung von Mineraldünger, vor allem aber bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern. Hier zeigte sich vor allem Unterschiede zwischen Schweinegülle und Biogasgärresten. Die angenommenen Verlustfaktoren für Biogasgärreste liegen deutlich über den Verlustfaktoren von Schweinegülle (Tab. A. 16). Dies führte zu hohen berechneten Ammoniakverlusten in den Betrieben MF_G 2, und BG. In Betrieb HP kamen ungünstige Ausbringungsbedingungen bei der Gülledüngung im Sommer zu Hopfen sowie die N-Verluste nach der Rebhäckselausbringung hinzu.

Die berechneten Denitrifikations-N-Verluste betragen 16 bis 21 kg ha⁻¹, abhängig von den Standortbedingungen, aber auch von der N-Konzentration im Boden, und damit vom N-Saldo abzüglich der Boden-N-Vorratsänderung und der Ammoniakverluste. Somit zeigten Betriebe mit hohen N-Salden tendenziell höhere Denitrifikationsraten.

Auch die modellierte Nitratauswaschung spiegelte vor allem die unterschiedlichen N-Salden der Betriebe wider, nach Abzug der Boden-N-Vorratsänderung und der Ammoniakverluste. Zudem waren jahresbedingte Schwankungen vorhanden, z. B. durch die starke Trockenheit im Jahr 2015. Diese führte zu einer starken N-Anreicherung im mineralischen N-Pool am Ende des Jahres 2015.

Bei der Festlegung der Anfangswerte für den mineralischen N-Pool wurde darauf geachtet, dass dieser im Mittel der Jahre konstant blieb, weshalb die Anfangswerte überwiegend hoch angesetzt wurden. Betriebe, von denen bereits aus den Jahren 2011 und 2012 Daten aufgenommen wurden (MS 1, BG, MF_G 1, MF_G 2), profitierten daher davon, dass der mineralische N-Pool im Jahr 2013 bereits etwas abgereichert war.

Dennoch können die berechneten Werte wichtige Hinweise auf das differenzierte Nitrataustragspotenzial der Betriebe liefern. So wurden mit 42 – 46 kg ha⁻¹ die geringsten Werte in den Betrieben MF_G 2, BG und MS 1 berechnet, die auch die höchste N-Effizienz der pflanzlichen Produktion zeigten. Die N-Salden liefern dagegen nur unter Berücksichtigung der Boden-N-Vorratsänderung entsprechende Hinweise. Dringenden Optimierungsbedarf zeigen die Ergebnisse in den Betrieben HP, ZS und MS 2, die modellierte Nitratfrachten zwischen 74 und 104 kg ha⁻¹ aufwiesen. Hier wurden vor allem aufgrund von geringen N-Entzügen und hohen N-Zufuhren hohe N-Salden erzielt, zu denen in den Betrieben HP und BG 1 eine negative Boden-N-Vorratsänderung kommt. Eine modellierte Nitratkonzentration von unter 50 mg l⁻¹ im Sickerwasser konnte damit jedoch in keinem Beispiel erzielt werden (in Tab. 24 nicht dargestellt).

2.3.2. Ergebnisse der N_{\min} -Analysen

2.3.2.1. N_{\min} -Vorräte nach der Ernte

Die Nachernte- N_{\min} -Proben wurden auf Winterweizen- und Wintergerstenschlägen sowie in den Jahren 2015 und 2016 auf einzelnen Rapsschlägen genommen.

Dabei lagen die N_{\min} -Vorräte nach Weizen und nach Gerste meist auf einem ähnlichen Niveau, während die Vorräte nach Winterrapsschlag signifikant erhöht waren (Tab. 25). Bei Winterweizen zeigte sich zudem ein Jahreseffekt mit einem Minimum im Jahr 2015. Bei Wintergerste dagegen wurde eine leichte Erhöhung der Vorräte über die Jahre festgestellt, die jedoch nicht signifikant war.

Tab. 25: N_{\min} -Vorräte nach der Getreideernte in 0 – 90 cm Tiefe in kg ha^{-1} . Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Kruskal-Wallis-Test)

Fruchtart ¹	n ²	Mittelwert	Min	Max	2014	2015	2016
WW	221	28 a	3	83	33 a	20 b	33 a
WG	130	26 a	4	90	23 n.s.	28 n.s.	32 n.s.
WRa	17	56 b	15	98		56 n.s.	56 n.s.

Eine multiple Regressionsanalyse zum Einfluss verschiedener Parameter auf den Nachernte- N_{\min} -Vorrat von Winterweizen zeigte, dass der Jahreseffekt am besten durch die Niederschlagsmenge von Februar bis zur Probenahme und die Temperatur im Juli erklärt werden kann (Tab. 26). So nahmen die N_{\min} -Vorräte mit steigender Niederschlagsmenge zu und mit erhöhter Julitemperatur ab. Der Faktor Niederschlag bis zum Probenahmetermin beinhaltet zudem den Zeitpunkt der Probenahme, was bedeutet, dass der N_{\min} -Vorrat bei später Probenahme zunimmt.

Tab. 26: Einfluss wichtiger Variablen auf die N_{\min} -Vorräte nach der Winterweizenernte. Ergebnisse der Regressionsanalyse. 209 Beobachtungen. Basisvorfrucht Gurken.

	R ²	b	se b	β	p
Modell	0,38				
Intercept		59,40	28,23		0,037
Niederschlag Feb – Probenahme		0,05	0,01	0,30	0,001
Temperatur Juli		-2,06	1,23	-0,14	0,095
N-Saldo		0,12	0,02	0,41	< 0,001
Vorfrucht KM		-21,37	4,98		< 0,001
Vorfrucht SM		-22,67	5,03		< 0,001
Vorfrucht WRa		-4,19	5,40		0,438
Vorfrucht WW		-15,91	6,29		0,012
Vorfrucht ZR		-22,61	6,36		< 0,001

¹ WW: Winterweizen; WG: Wintergerste; WRa: Winterrapsschlag

² Anzahl beprobter Parzellen (4 – 5 Parzellen pro Ertragszone)

Zudem fand sich ein Einfluss der Vorfrucht, da vor allem die Vorräte bei Winterweizen nach Gurken und nach Winterraps höher waren als nach Mais- und Zuckerrüben vorfrucht. Winterweizen nach Gurken oder nach Winterweizen wurde jedoch nur im Jahr 2015 beprobt, weshalb hier möglicherweise Jahres- und Standorteffekte das Ergebnis beeinflussten. Neben der Vorfrucht zeigte sich als wichtigster Einflussfaktor der N-Saldo des Weizens (ausgedrückt durch ein β von 0,41). Insgesamt liefert das Modell mit einem R^2 von 0,38 nur eine relativ geringe Erklärung der tatsächlichen N_{\min} -Vorräte.

Bei Wintergerste konnte kein Faktor mit signifikantem Einfluss auf die N_{\min} -Vorräte nach der Ernte nachgewiesen werden. Für Winterraps war die Anzahl der Proben zu gering, um eine Regressionsanalyse durchführen zu können. Zudem konnte bei keiner der betrachteten Kulturen ein eindeutiger Einfluss des Bodens bzw. der beprobten Ertragszone auf den N_{\min} -Vorrat festgestellt werden.

2.3.2.2. N_{\min} -Vorräte im Herbst

Einfluss der Fruchtarten

Die Herbst- N_{\min} -Proben zeigten die niedrigsten Vorräte bei Winterraps und Zwischenfrüchten mit 18 bzw. 28 kg ha⁻¹ (Tab. 27). Bei Zwischenfrüchten war der N_{\min} -Vorrat im Jahr 2015 mit 50 kg ha⁻¹ ungewöhnlich hoch, was auf lückige Bestände der früh gesäten Zwischenfrüchte in Folge der Trockenheit im Sommer 2015 zurückzuführen war. Gut entwickelte Bestände von Raps und Zwischenfrüchten führten jedoch immer zu geringen Herbst- N_{\min} -Vorräten. Mit 39 kg ha⁻¹ fanden sich zudem niedrige Vorräte bei Winterweizen nach Zuckerrüben. Es folgten Getreide nach Winterweizen oder nach Mais, mit Vorräten von 71 bis 95 kg ha⁻¹, welche sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Relativ hohe Vorräte wurden bei Winterweizen nach Winterraps (124 kg ha⁻¹), bei unbestellten Feldern nach Getreide (132 kg ha⁻¹) und bei Hopfen (142 kg ha⁻¹) gemessen.

Tab. 27: N_{\min} -Vorräte im Herbst in 0 – 90 cm Tiefe in kg ha⁻¹. Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Kruskal-Wallis-Test)

Fruchtart ¹	Vorfrucht ¹	n	Mittelwert	Min	Max	2014	2015	2016
WRa	WW, WG	33	18 a	0	62	19 n.s.	17 n.s.	21 n.s.
ZF	WW, WG	197	28 a	0	216	14 a	50 b	23 ab
WW	ZR	21	39 ab	14	79	23 a	73 b	35 ab
WG, WW	WW	112	71 bc	16	223	42 a	90 b	100 b
WW, WG	SM	85	91 cd	19	196	55 a	122 b	84 ab
WW, WG	KM	90	95 cd	14	256	86 n.s.	105 n.s.	95 n.s.
WW	WRa	16	124 cd	75	197		123 n.s.	125 n.s.
Brache	WW, WG	20	132 d	66	268		138 n.s.	110 n.s.
Hopfen	Hopfen	15	142 cd	56	286		195 b	97 a
WW	Gurken	8	295 d	242	322		295	

¹ WW: Winterweizen; WG: Wintergerste; WRa: Winterraps; ZF: Zwischenfrucht; ZR: Zuckerrüben; KM: Körnermais; SM: Silomais; Brache: Pflugfurche vor Probenahme

Bei allen beprobten Fruchtarten waren deutliche Jahreseinflüsse erkennbar. So war, mit Ausnahme von Winterrapsschlägen, immer ein Maximum im Jahr 2015 und ein Minimum im Jahr 2014 zu erkennen, welches in den meisten Fällen auch signifikant war. Die Ursache hierfür ist in den Witterungsbedingungen und den Ertragsniveaus der einzelnen Jahre zu finden. So war das Jahr 2014 durch sehr gute Wachstumsbedingungen mit hohen Erträgen und hohen N-Entzügen gekennzeichnet. Das Jahr 2015 war dagegen sehr heiß und trocken, was neben niedrigen Erträgen vermutlich zu einer hohen Mineralisation im Herbst geführt hat. Zudem könnten im Oktober einsetzende Niederschläge die Mineralisation verstärkt haben. Das Jahr 2016 nahm dagegen von den Ertrags- und Witterungsbedingungen eine mittlere Stellung ein.

Die deutlich erhöhten Vorräte von Winterweizen nach Winterraps oder nach Gurken sowie von Hopfen und unbestellten Flächen sind daher zum Teil auch auf die generell hohen N_{\min} -Vorräte der Jahre 2015 und 2016 zurückzuführen. Dennoch wiesen diese Fruchtarten auch in den Jahren 2015 und 2016 überwiegend die höchsten Vorräte auf.

Einfluss der Ertragszonen

Im Herbst wurden oftmals unterschiedliche N_{\min} -Vorräte in den beprobten Ertragszonen festgestellt. In Tab. 28 sind nur Flächen berücksichtigt, die über zwei Ertragszonen verfügten. Es zeigte sich in den meisten Fällen ein höherer N_{\min} -Vorrat in der Hohertragszone (HE) im Vergleich zur Niedrigertragszone (NE). Statistisch signifikant war dieser Unterschied jedoch nur bei Getreide nach Körnermais sowie bei Brache nach Wintergerste. Bei Hopfen dagegen war der N_{\min} -Vorrat der Niedrigertragszone signifikant höher als in der Hohertragszone, was vermutlich auf eine unterschiedliche Bestandesführung zurückzuführen war, da die Hopfenertragszonen nach dem Ertragspotenzial der Hopfensorten und nicht nach Bodenkarte ausgewählt wurden.

Tab. 28: N_{\min} -Vorräte im Herbst von Hoch- und Niedrigertragszone in 0 – 90 cm Tiefe in $kg\ ha^{-1}$. * statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0,05$, Wilcoxon Rang Summen Test)

Fruchtart ¹	Vorfrucht ¹	n	Mittelwert		2014		2015		2016	
			HE	NE	HE	NE	HE	NE	HE	NE
WRa	WW, WG	16	32	16			41	13	24	19
ZF	WW, WG	171	28	32	15	13	47	66	25*	15*
WG, WW	WW	102	80	65	40	36	104*	78*	110	90
WW, WG	SM	77	101	82	78*	31*	133	128	77	91
WW, WG	KM	84	115*	83*	121*	71*	113	97	109*	81*
WW	WRa	8	157	118					157	118
Brache	WW, WG	8	222*	133*			222*	133*		
Hopfen	Hopfen	15	93*	186*			125	247	69*	125*
WW	Gurken	8	291	299			291	299		

¹ WW: Winterweizen; WG: Wintergerste; WRa: Winterraps; ZF: Zwischenfrucht; ZR: Zuckerrüben; KM: Körnermais; SM: Silomais; Brache: Pflugfurche vor Probenahme

Dieser Unterschied zwischen Hoch- und Niedrigertragszone trat in den drei Untersuchungsjahren, jedoch mit unterschiedlicher Ausprägung, auf. Bei Getreide nach Mais traten die Unterschiede vor allem im Jahr 2014 auf, während sich 2016 nach Silomais das Verhältnis der Ertragszonen sogar umkehrte, wenngleich nicht signifikant. Bei Zwischenfrüchten lag der N_{\min} -Vorrat im Jahr 2015 in der Niedrigertragszone sogar höher als in der Hohertragszone, was wahrscheinlich durch den oft schlechteren Aufgang und somit den größeren Lücken in der Niedrigertragszone zu begründen ist. Die geringen Unterschiede bei Winterweizen nach Gurken sind wahrscheinlich auf ähnliche Bodenbedingungen der Ertragszonen im beprobten Schlag zurückzuführen. Zudem waren die Unterschiede im betrachteten Jahr 2015 generell weniger ausgeprägt.

Die stärkere Anreicherung in den Hohertragszonen fand trotz in der Regel geringerer N-Salden dieser Bereiche statt. Offenbar weisen diese Standorte eine höhere Mineralisationsleistung infolge besseren Aufspeicherungsvermögens und geringerer langjähriger Verluste auf.

Einfluss von N-Düngung und N-Bilanz

Effekte der N-Düngung und einzelner N-Bilanzparameter auf den Herbst- N_{\min} -Vorrat konnten nur zum Teil gefunden werden. Bei Fruchtartenkombinationen mit einer Beobachtungsanzahl von weniger als 40 konnten keine Analysen durchgeführt werden, da nicht zwischen Standort-, Bewirtschaftungs- und Jahreseffekten unterschieden werden konnte.

Ein Einfluss der langjährigen Bewirtschaftung zeigte sich bei Winterweizen oder Wintergerste nach Körnermais (Tab. 29). Hier wurde ein steigender N_{\min} -Vorrat bei steigendem langjährigem N-Saldo und langjähriger Boden-N-Vorratsänderung gefunden. Zudem führte eine Gülledüngung zur Maisstoppel zu einem Anstieg der N_{\min} -Vorräte. Der Jahreseinfluss bzw. der Einfluss der Witterung konnte am besten durch den Niederschlag im September vor der Probenahme erklärt werden.

Tab. 29: Einfluss wichtiger Variablen auf die N_{\min} -Vorräte im Herbst bei Winterweizen oder Wintergerste nach Körnermais. Ergebnisse der Regressionsanalyse. 90 Beobachtungen.

	R ²	b	se b	β	p
Modell	0,51				
Intercept		-113,52	37,33		0,003
Niederschlag Sep		-0,51	0,21	-0,19	0,016
N-Saldo langjährig		0,72	0,13	0,51	< 0,001
Δ Norg langjährig		1,54	0,29	0,43	< 0,001
Ackerzahl		1,84	0,44	0,38	< 0,001
N-Düngung Herbst		0,44	0,11	0,31	< 0,001

Bei Wintergerste oder Winterweizen nach Winterweizen wurde nur ein geringer Einfluss der Düngung zur Gerste auf den N_{\min} -Vorrat nachgewiesen ($\beta = 0,01$, Tab. 30). Zudem zeigte sich in der Regressionsanalyse ein höherer N_{\min} -Vorrat bei Winterweizen im Vergleich zu Wintergerste. Den bei weitem größten Einfluss hatte jedoch das Jahr, das durch keinen der überprüften Parameter gut beschrieben werden konnte. Zusätzlich erwiesen sich die Septemberniederschläge als wichtiger Einflussfaktor ($\beta = -16,98$), neben den Niederschlägen von Oktober bis zur Probenahme mit geringem Einfluss ($\beta = -0,65$).

Tab. 30: Einfluss wichtiger Variablen auf die N_{min} -Vorräte im Herbst bei Winterweizen oder Wintergerste nach Winterweizen. Ergebnisse der Regressionsanalyse. 112 Beobachtungen.

	R^2	b	se b	β	p
Modell	0,57				
Intercept		856,19	260,60		0,001
Niederschlag Okt – Probenahme		-0,96	0,19	-0,65	< 0,001
Niederschlag Sep		-17,12	6,27	-16,98	0,007
N-Düngung Herbst		0,41	0,11	0,01	< 0,001
Kultur Winterweizen		43,84	12,05		< 0,001
Jahr 2015		-188,44	88,42		< 0,001
Jahr 2016		537,03	197,58		< 0,001

Bei den Zwischenfrüchten konnte kein Einfluss der Bewirtschaftung gefunden werden. Die N_{min} -Vorräte wurden hier offenbar vor allem durch die Witterung und den Zwischenfruchtbestand beeinflusst (Tab. A. 27). Höhere Niederschläge und höhere Temperaturen führten dabei zu einem besseren Wachstum der Zwischenfrucht und damit zu niedrigeren N_{min} -Vorräten. Die frühere Saat der Zwischenfrüchte nach Wintergerste führte jedoch zu keiner Verringerung der N_{min} -Vorräte, es wurden sogar tendenziell höhere Vorräte festgestellt.

Dagegen konnte bei Getreide nach Silomais weder ein Einfluss der Bewirtschaftung, noch der Witterung gefunden werden. Offenbar wurden diese durch kleinräumige Standorteffekte überdeckt.

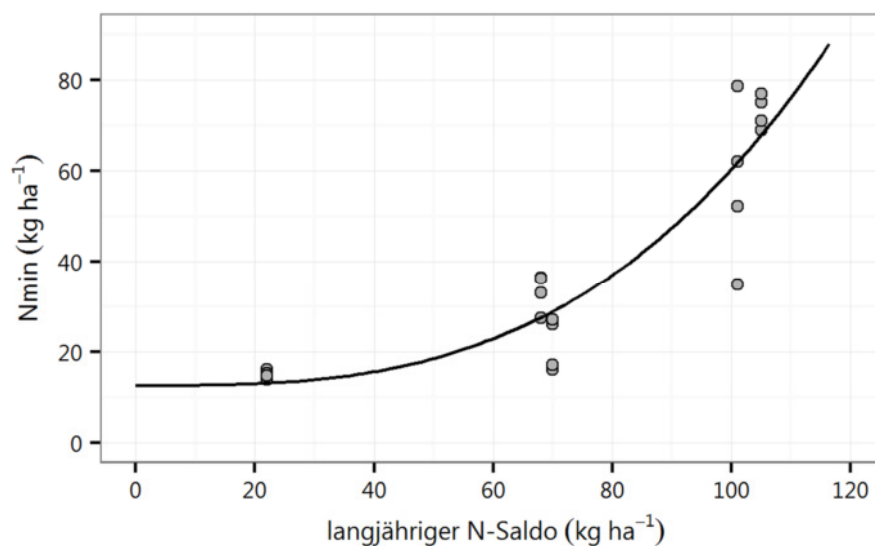


Abb. 13: N_{min} -Vorräte im Herbst bei Winterweizen nach Zuckerrüben in 0 – 90 cm Tiefe in Abhängigkeit vom langjährigen N-Saldo. 21 Beobachtungen.

Gleichung der Regressionskurve: $N_{min} = 12,52 + 0,000048 (N\text{-Saldo})^3$. $R^2 = 0,84$.

Trotz der geringen Anzahl an Proben konnte bei Winterweizen nach Zuckerrüben ein guter Zusammenhang zwischen dem langjährigen N-Saldo der Fläche und dem N_{\min} -Vorrat im Herbst gefunden werden (Abb. 13). Möglich wurde dies, da Zuckerrüben überwiegend auf sehr guten Standorten angebaut werden und daher die Böden der beprobten Schläge relativ ähnlich waren. Es ist dabei ein überproportionaler Anstieg der N_{\min} -Vorräte bei steigendem N-Saldo zu erkennen. Zu beachten ist jedoch, dass, aufgrund der geringen Anzahl an Schlägen, auch Jahreseffekte vorhanden sein könnten (vgl. Tab. 27).

2.3.2.3. N_{\min} -Vorräte im Frühjahr

Einfluss der Fruchtarten

Im Frühjahr waren nur wenig signifikante Unterschiede zwischen den N_{\min} -Vorräten der Fruchtarten erkennbar (Tab. 31). So waren nur bei Wintergerste die N_{\min} -Vorräte signifikant niedriger als bei Winterweizen, Brache und Hopfen. Dabei wurden bei Winterweizen die Ergebnisse des Schlages mit Winterweizen nach Gurken entfernt, da dieser mit 172 kg ha^{-1} um ein vielfaches höhere N_{\min} -Vorräte aufwies wie vergleichbare Flächen. Die Beprobung im März, die vor einem Anbau von Mais durchgeführt wurde, zeigte dagegen deutlich höhere N_{\min} -Vorräte bei der gepflügten Fläche im Vergleich zu den Zwischenfrüchten. Hier scheint es sich jedoch um einen Einzelfall zu handeln, da diese Fläche vor der Pflugfurche mit Gülle gedüngt wurde. Bei der im Februar beprobten Fläche ohne Düngung wurden deutlich niedrigere Werte gefunden.

Jahresunterschiede waren auch im Frühjahr erkennbar, wenngleich in unterschiedlicher Ausprägung. So waren bei Winterraps und Wintergerste die Vorräte 2016 höher als 2015, bei Winterraps auch signifikant. Bei Winterweizen war der Unterschied nur sehr gering, während Zwischenfrüchte tendenziell im Jahr 2016 höhere N_{\min} -Vorräte zeigten.

Tab. 31: N_{\min} -Vorräte im Frühjahr in 0 – 90 cm Tiefe in kg ha^{-1} . Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Kruskal-Wallis-Test). * statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0,05$, Wilcoxon Rang Summen Test).

Fruchtart ¹	n	Mittelwert	Min	Max	2015	2016
Beprobung Februar						
WRa	17	29 ab	12	63	18*	33*
WG	65	31 a	3	117	25	49
WW	157	43 b	3	138	42	44
ZF	27	45 ab	7	112	46	41
Brache	8	56 b	38	87		56
Hopfen	8	91 b	34	165		91
Beprobung März						
ZF	111	59 a	4	148	61	55
Brache	8	151 b	124	184		151

¹ WW: Winterweizen; WG: Wintergerste; WRa: Winterraps; ZF: Zwischenfrucht; ZR: Zuckerrüben; Brache: Pflugfurche vor Probenahme

Einfluss der Ertragszonen

Beim Vergleich der Hohertragszonen mit den Niedrigertragszonen zeigten sich bei Ackerkulturen und Beprobung im Februar meist höhere N_{\min} -Vorräte im Hohertrag als im Niedrigertrag (Tab. 32). Statistisch signifikant war dieser Unterschied jedoch nur bei Winterweizen im Jahr 2015. Bei Hopfen dagegen war das Verhältnis, wie schon bei den Herbst- N_{\min} -Proben, umgekehrt.

Bei den Zwischenfrüchten, die im März beprobt wurden, war nur im Frühjahr 2015 ein leicht erhöhter Vorrat in den Hohertragszonen festzustellen. Eine mögliche Ursache hierfür ist ein besseres Wachstum der Zwischenfrüchte in der Hohertragszone und in der Folge eine höhere Mineralisation aus den Ernterückständen im Frühjahr. Bei der gepflügten Fläche dagegen waren die Vorräte im Hohertrag signifikant höher als im Niedrigertrag, womit sich der im Herbst gefundene Trend fortsetzte.

Tab. 32: N_{\min} -Vorräte im Frühjahr von Hoch- und Niedrigertragszone in 0–90 cm Tiefe in $kg\ ha^{-1}$. * statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0,05$, Wilcoxon Rang Summen Test)

Fruchtart mit Vorfrucht	n	Mittelwert		2015		2016	
		HE	NE	HE	NE	HE	NE
Beprobung Februar							
WRa	8	36	35			36	35
WG	57	26	21	28	22	14	14
WW	106	53*	35*	57*	32*	49	37
ZF	9	30	22	30	22		
Hopfen	8	54*	129*			54*	129*
Beprobung März							
ZF	109	62	54	67	56	54	54
Brache	8	169*	134*			169*	134*

Einfluss von N-Düngung und N-Bilanz

Um zu bestimmen, welchen Einfluss die Bewirtschaftung auf die N_{\min} -Vorräte im Frühjahr ausübt, wurden Kombinationen aus Vorfrucht und Nachfrucht betrachtet. Für Wintergetreide zeigten multiple Regressionsanalysen einen deutlichen Einfluss der Niederschläge von Oktober bis zum Probenahmeterrain und damit des Zeitpunktes der Probenahme auf die N_{\min} -Vorräte (Tab. 33, Tab. 34, Tab. A. 28). Zudem zeigte sich in den Regressionsanalysen für Getreide der bereits gefundene Jahreseffekt mit höheren Vorräten im Jahr 2016.

Bei Winterweizen nach Körnermais wurde ein signifikanter Einfluss des langjährigen N-Saldos, des N-Saldos der Vorfrucht Körnermais sowie der Ackerzahl und der N-Düngung zu Maisstroh gefunden (Tab. 33). Den größten Effekt hatte jedoch die Witterung (ausgedrückt durch Niederschlag und Jahr) und der Standort (ausgedrückt durch die Ackerzahl).

Tab. 33: Einfluss wichtiger Variablen auf die N_{min} -Vorräte im Frühjahr bei Winterweizen nach Körnermais. Ergebnisse der Regressionsanalyse. 64 Beobachtungen.

	R ²	b	se b	β	p
Modell	0,73				
Intercept		776,90	71,33		< 0,001
Niederschlag Okt – Probenahme		-3,45	0,32	-1,79	< 0,001
Jahr 2016		78,94	8,35		< 0,001
N-Saldo Vorfrucht		0,13	0,04	0,32	0,002
Δ Norg langjährig		0,91	0,16	0,48	< 0,001
Ackerzahl		1,88	0,29	0,63	< 0,001
N-Düngung Herbst		0,38	0,06	0,48	< 0,001

Ähnliche Ergebnisse fanden sich bei Wintergerste nach Winterweizen, wobei jedoch kein Einfluss des N-Saldos der Vorfrucht oder des Standortes gefunden wurde (Tab. A. 28). Ein Bewirtschaftungseinfluss zeigte sich somit nur über die N-Düngung zur Saat. Bei Winterweizen nach Silomais hatte ebenfalls die Witterung maßgeblichen Einfluss, während der Effekt der Ackerzahl signifikant, aber weniger ausgeprägt war (Tab. 34). Ein Einfluss der Bewirtschaftung dagegen konnte nicht gefunden werden.

Tab. 34: Einfluss wichtiger Variablen auf die N_{min} -Vorräte im Frühjahr bei Winterweizen nach Silomais. Ergebnisse der Regressionsanalyse. 48 Beobachtungen.

	R ²	b	se b	β	p
Modell	0,58				
Intercept		588,64	96,64		< 0,001
Niederschlag Okt – Probenahme		-2,31	0,35	-1,25	< 0,001
Jahr 2016		71,88	10,31		< 0,001
Ackerzahl		0,60	0,30	0,22	0,050

Bei den N_{min} -Vorräten der Märzbeobachtung von Zwischenfrüchten wurde kein Jahreseinfluss gefunden (Tab. 35). Es zeigten sich vor allem Effekte der Vorfrucht und des Standortes. Den größten Einfluss hatte die Bodenvorratsänderung, die Hinweise zum Mineralisationspotenzial des Standortes liefert.

Tab. 35: Einfluss wichtiger Variablen auf die N_{min} -Vorräte im Frühjahr bei Zwischenfrüchten mit Beprobung im März. Ergebnisse der Regressionsanalyse. 112 Beobachtungen.

	R ²	b	se b	β	p
Modell	0,60				
Intercept		30,04	10,29		0,004
Δ Norg langjährig		0,50	0,09	0,40	< 0,001
N-Saldo Zwischenfrucht		0,25	0,08	0,23	0,002
Ackerzahl		0,72	0,19	0,26	< 0,001
Vorfrucht Winterweizen		-21,28	5,30		< 0,001

2.3.3. Nitrataustrag ausgewählter Flächen

2.3.3.1. Tiefenprofile und Modellergebnisse ausgewählter Schläge

Schlag 3 in Betrieb MS 1

In Betrieb MS 1 wurden auf dem Schlag 3 zweimal im Abstand von sechs Monaten Tiefbohrungen durchgeführt. Bei dem Standort handelt es sich um einen tiefgründigen Lösslehm Boden, der nach Bodenschätzung als L3LÖD 79/74 bewertet ist. Die beprobte Stelle ist als Hohertragszone eingestuft, weshalb die Erträge vermutlich über denen in der N-Bilanzierung verwendeten mittleren Erträge des Schlages lagen.

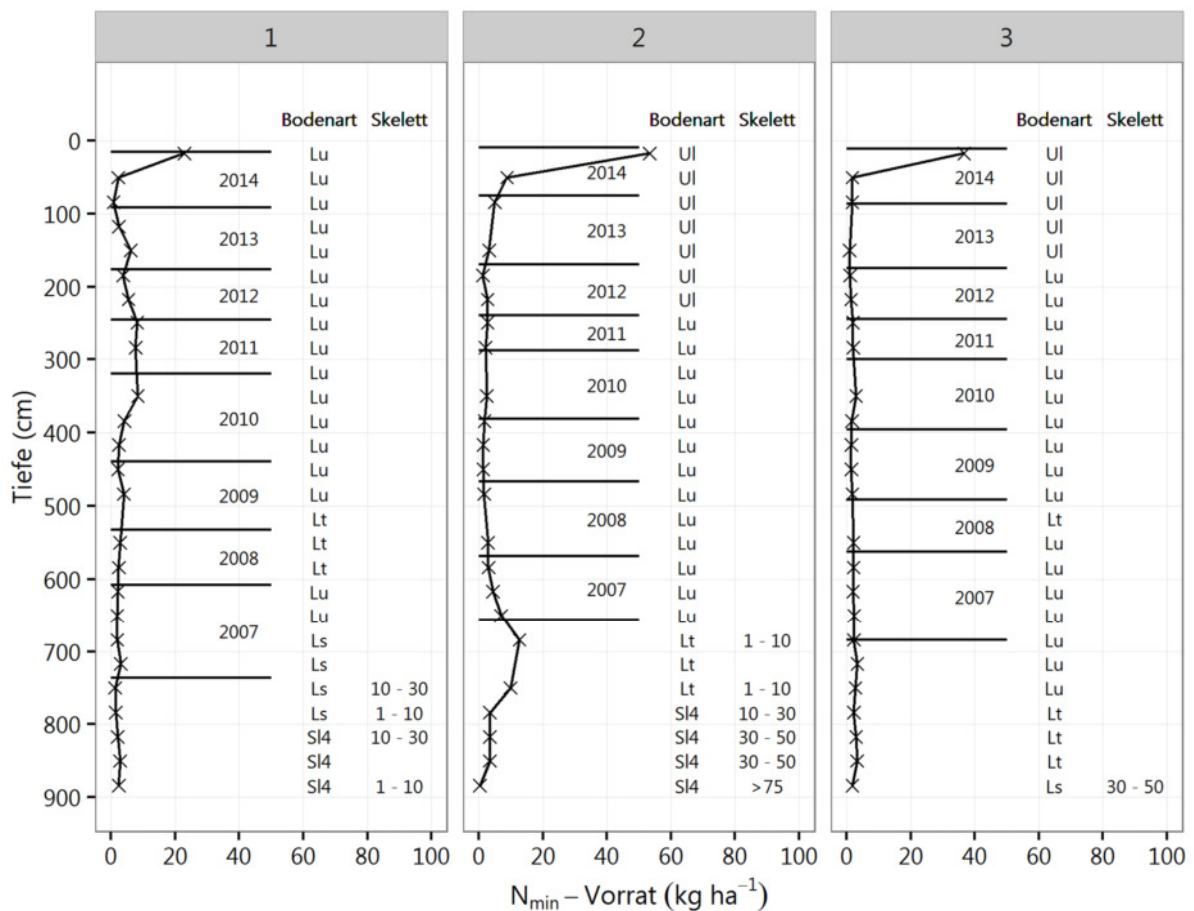


Abb. 14: N_{min} -Tiefenprofil von Schlag 3 in Betrieb MS 1 mit Zuordnung zum Versickerungsjahr.

Probenahme am 27.08.2015.

Es wurden sowohl in der Bohrung vom 27.08.2015 als auch in der Bohrung vom 11.03.2016 nur sehr geringe N-Mengen gefunden (Abb. 14 und Abb. 15). Ebenso wurden keine Ausschläge gefunden, die auf besondere Auswaschungsereignisse hindeuten. Jedoch konnte festgestellt werden, dass sich die Bodenart, v.a. des Unterbodens, zwischen den beiden Bohrzeitpunkten unterschied; die zweite Bohrung wurde wahrscheinlich nicht exakt am gleichen Punkt durchgeführt wie die erste Bohrung. Die Bohrungen fanden in 10 x 20 m großen Parzellen statt, in denen auch die N_{min} -Proben gezogen wurden. Daher kann der Abstand zwischen den beiden Bohrungen mehrere Meter betragen haben.

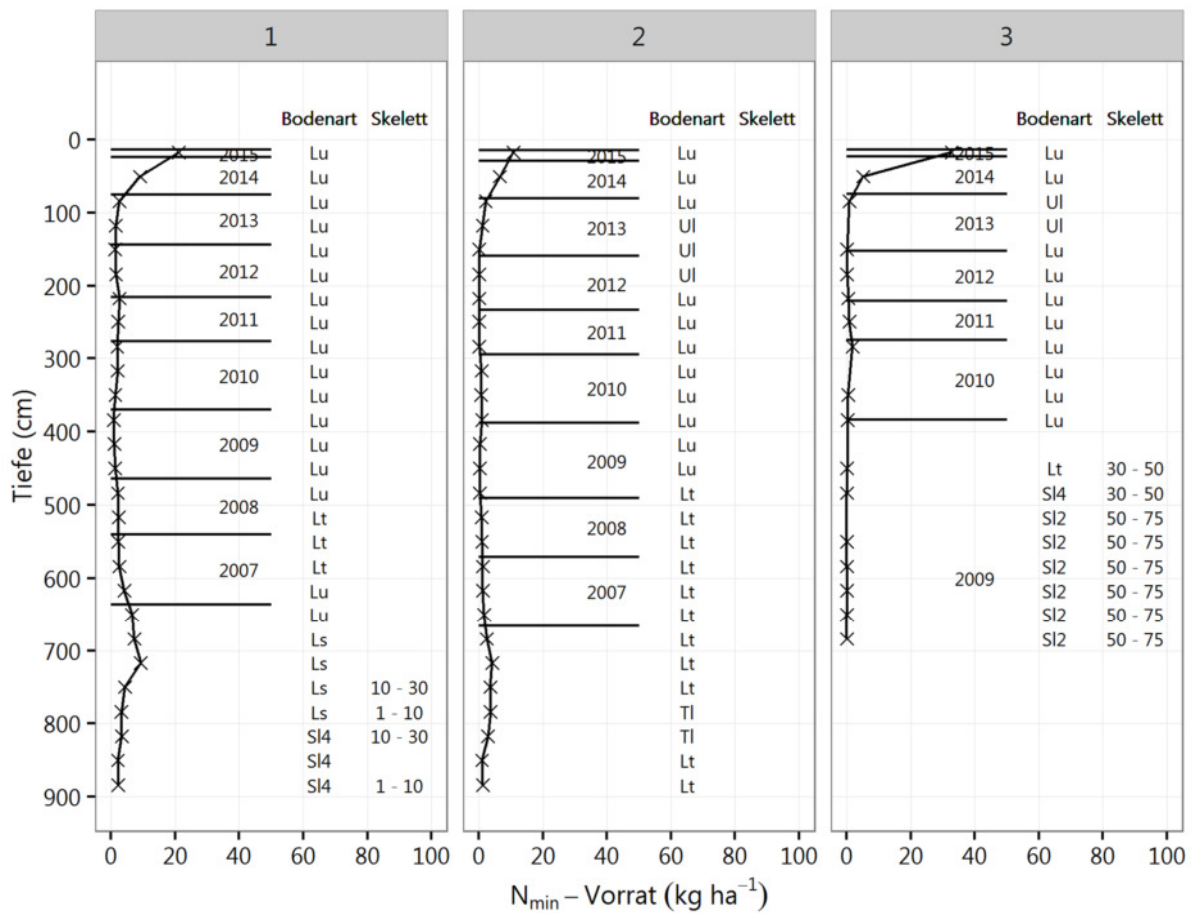


Abb. 15: N_{min} -Tiefenprofil von Schlag 3 in Betrieb MS 1 mit Zuordnung zum Versickerungsjahr.

Probenahme am 11.03.2016

Die Ergebnisse zeigen, dass selbst auf einer im Oberboden sehr homogenen Teilfläche im Unterboden kleinräumig starke Bodentexturunterschiede auftreten können. Die Unterschiede in den Bodenarten der Bodenschicht 0 bis 4 m liegen im Fehlerbereich der durchgeführten Fingerprobe. Auffällig ist zudem, dass sich N-Mengen bei der zweiten Bohrung zum Teil rechnerisch in geringerer Tiefe befanden als bei der ersten Bohrung (Beispiel: N-Fracht aus 2013 in Parzelle 1 in der Bohrung 2015 in 91 – 176 cm Tiefe, in der Bohrung 2016 in 75 – 143 cm Tiefe). Eine Ursache liegt im höheren Wassergehalt des Oberbodens im Frühjahr 2016. Diese Wassermenge wurde in der Berechnung des Sickerwasseranfalls nicht berücksichtigt, weshalb es hier zu Verschiebungen kam. Die Unterschiede in der Bodenart des durchwurzelbaren Raumes führten zudem zu Unterschieden in der berechneten Sickerwassermenge für die beiden Bohrungen (Tab. 36).

Neben diesen Unterschieden, die sich durch Fehler bei der Probenahme und im Modell erklären ließen, wurde im Jahr 2016 eine geringere N-Menge im Profil gefunden als 2015. Hierfür gibt es mehrere mögliche Erklärungen: (1) Die Bohrpunkte könnten im Jahr 2016 zufällig an Stellen mit geringerer Nitratfracht vorgenommen worden sein. Dies könnte vor allem in Parzelle 1 der Fall sein. (2) Die größte Nitratfracht wurde womöglich in den Grobporen transportiert, weshalb sie nach einem Jahr das Profil unter Umständen bereits verlassen hatte. Dies könnte im unteren Bereich von Parzelle 2 eine Rolle spielen. (3) Ein Nitratabbau über die gesamte Profiltiefe ist nicht auszuschließen. Hinweise darauf, in Form einer mit der Tiefe abnehmenden Nitratfracht, gab es jedoch nicht.

Tab. 36: Schlag 3 in Betrieb MS 1: Vergleich der N-Bilanzergebnisse und der N-Umsatzmodellierung mit den in Tiefenprofilen gemessenen Nitratausträgen (Mittelwerte pro Ertragszone). Darstellung wichtiger Kenngrößen.

Parameter	ME	2011 Körner- mais ²	2012 Winter- weizen ²	2013 Winter- gerste ² + Zwfr	2014 Körner- mais ²	2015 Winter- weizen ² + Zwfr	Mittel ¹
N-Bilanz							
Ertrag	dt ha ⁻¹	132	106	90	134	108	
N-Entzug (Ernte) ³	kg ha ⁻¹	182	191	149	184	195	
Mineraldünger-N	kg ha ⁻¹	73	131	116	31	86	87
Gülle-N	kg ha ⁻¹	132	171	235	130	194	172
N-Saldo	kg ha ⁻¹	120	134	146	93	51	109
N-Umsatz							
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha ⁻¹	58	12	25	55	23	35
Änderung org. Pool	kg ha ⁻¹	54	-25	-25	42	-44	0
Änderung min. Pool	kg ha ⁻¹	-7	12	-22	-13	23	0
Ammoniak-N	kg ha ⁻¹	10	25	22	6	23	17
Denitrifikation	kg ha ⁻¹	17	18	17	2	15	14
Nitrat-N	kg ha ⁻¹	45	111	52	1	10	44
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	230	265	276	173	103	209
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l ⁻¹	86	187	84	2	42	80
Hochertragszone 2015							
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	207	235	229	152	42	254
Auswaschungsfaktor	%	52	59	57	38	11	64
Nitrat-N ⁴	kg ha ⁻¹	8	6	8			8
Nitratkonzentration Sickerwasser ⁴	mg l ⁻¹	17	12	15			13
Hochertragszone 2016							
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	218	246	240	163	53	265
Auswaschungsfaktor	%	54	61	60	40	13	66
Nitrat-N ⁴	kg ha ⁻¹	2	1	2			3
Nitratkonzentration Sickerwasser ⁴	mg l ⁻¹	4	2	4			5

Insgesamt wurden die Nitratfrachten vom Modell überschätzt (Tab. 36). Da eine N-Anreicherung im Humus-N-Pool von 35 kg ha⁻¹ berechnet wurde, ist davon auszugehen, dass in erheblichem Umfang ein

¹ Bilanz: Mittel der Jahre 2011 – 2015. Messung: Mittelwert aller Bohrungen pro Ertragszone.

² Getreide, Körnermais: 86% TS

³ Ohne N-Entzug der Zwischenfrucht

⁴ Angabe bei Verlagerungstiefe unterhalb 67 cm

Nitratabbau durch Denitrifikation stattfand. Auf Basis der vorliegenden Daten kann nicht angegeben werden, ob die Denitrifikation vor allem im Oberboden oder im Unterboden stattfand. Die berechnete Denitrifikation im Oberboden in Höhe von 14 kg ha^{-1} scheint jedoch zu gering zu sein.

Schlag 1 in Betrieb MF_G 1

In Betrieb MF_G 1 wurde die Niedrigertragszone eines der betrieblichen Schläge beprobt. Nach Bodenschätzung ist die Zone als LT4D 57/52 eingestuft, wobei in zwei der drei Profile ab einer Tiefe von 33 cm der Boden stark sandig ist. Bemerkenswert ist die deutlich unterschiedliche Textur im Unterboden von Parzelle 1, die nur etwa 50 m entfernt von den beiden anderen Parzellen lag (Abb. 16).

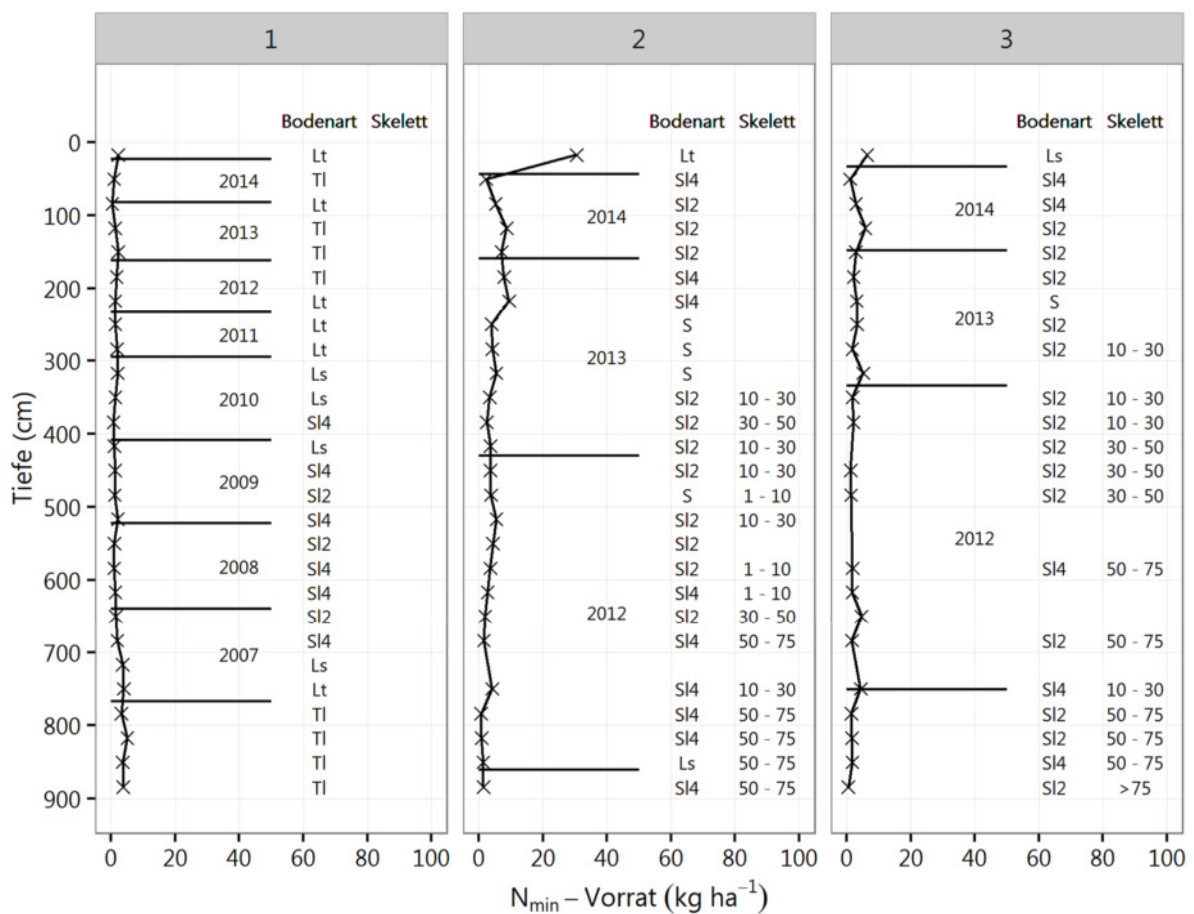


Abb. 16: N_{\min} -Tiefenprofil von Schlag 1 in Betrieb MF_G 1 mit Zuordnung zum Versickerungsjahr.

Probenahme am 26.08.2015.

Der tonige Boden in Parzelle 1 führte offenbar zu einem deutlichen Nitratabbau, weshalb im Mittel des gesamten Profils nur $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ an Nitratstickstoff gefunden wurden. In den beiden Profilen mit sandigeren Böden lagen dagegen höhere Nitrat-N-Mengen vor. Der Vergleich mit den Ergebnissen der N-Bilanzierung und der N-Umsatz-Modellierung zeigte eine deutliche Überschätzung der Nitratauswaschung durch das Modell, obwohl in der beprobten Ertragszone wahrscheinlich ein niedrigerer Ertrag im Vergleich zum Schlagdurchschnitt und somit auch höhere N-Salden erzielt wurden.

Vom Modell wurden aufgrund des hohen N-Saldo von $125 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und der geringen N-Speicherung im Humuspool von $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine sehr hohe N-Auswaschung von $83 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ berechnet (Tab. 37). Aufgrund des Nitratabbaus in Profil 1 lag der mittlere Nitrataustrag bei $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, in den Profilen 2 und 3 bei $39 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bzw. $21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Ein Vergleich zwischen Modellwerten und Messwerten in den Einzeljahren erscheint in diesem Fall wenig sinnvoll, da das Jahr 2011 nur noch in Profil 1 erfasst wurde, bei dem generell niedrige N-Mengen gefunden wurden.

Tab. 37: Schlag 1 in Betrieb MF_G 1: Vergleich der N-Bilanzergebnisse und der N-Umsatzmodellierung mit den in Tiefenprofilen gemessenen Nitratausträgen (Mittelwerte pro Ertragszone). Darstellung wichtiger Kenngrößen.

Parameter	ME	2011 Winter- weizen ²	2012 Winter- raps ³	2013 Winter- weizen ² + Zwfr	2014 Körner- mais ²	2015 Winter- weizen ²	Mittel ¹
N-Bilanz							
Ertrag	dt ha ⁻¹	81	43	83	117	75	
N-Entzug (Ernte) ⁴	kg ha ⁻¹	170	142	174	161	147	159
Mineraldünger-N	kg ha ⁻¹	138	190	160	86	125	140
Gülle-N	kg ha ⁻¹	87	87	181	153	102	122
N-Saldo	kg ha ⁻¹	79	155	119	171	104	125
N-Umsatz							
Boden-N-Vorratsänderung	kg ha ⁻¹	-7	-7	10	39	-9	5
Änderung org. Pool	kg ha ⁻¹	-5	-16	5	49	-29	1
Änderung min. Pool	kg ha ⁻¹	-12	-42	-19	16	64	2
Ammoniak-N	kg ha ⁻¹	27	5	28	9	12	16
Denitrifikation	kg ha ⁻¹	19	18	18	17	18	18
Nitrat-N	kg ha ⁻¹	144	110	76	40	47	83
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	248	283	295	191	122	228
Nitratkonzentration Sickerwasser	mg l ⁻¹	256	173	114	92	172	161
Niedrigertragszone							
Sickerwasserrate	mm a ⁻¹	239	272	258	182	102	285
Auswaschungsfaktor	%	86	98	93	66	35	103
Nitrat-N ⁵	kg ha ⁻¹	3	22	20			22
Nitratkonzentration Sickerwasser ⁴	mg l ⁻¹	5	36	32			34

¹ Bilanz: Mittel der Jahre 2011 – 2015. Messung: Mittelwert aller Bohrungen pro Ertragszone.

² Getreide, Körnermais: 86% TS

³ Winterraps: 91% TS

⁴ Ohne N-Entzug der Zwischenfrucht

⁵ Angabe bei Verlagerungstiefe unterhalb 67 cm

2.3.3.2. Beziehung zwischen Modellwerten und Messwerten

Langjähriges Mittel

Im folgenden Abschnitt wird die in den Tiefenprofilen ermittelte langjährige Nitratauswaschung in Beziehung zu den Modellwerten gesetzt. Dazu wurde der Mittelwert der modellierten Nitratauswaschung aus allen Untersuchungsjahren berechnet, bei einem Untersuchungszeitraum zwischen 3 und 6 Jahren pro Schlag. Für die Nitratauswaschung wurde der Mittelwert aller vollständig erfassten Verlagerungsjahre unterhalb einer Tiefe von 67 cm betrachtet. Es wurde der Mittelwert über alle drei Bohrungen pro Schlag gebildet.

Das Ergebnis des Vergleichs sowie die Einstufung der beprobten Ertragszonen zeigt Abb. 17. Man erkennt einen Zusammenhang zwischen Modell- und Messergebnissen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,42. Dabei liegen die Werte der Hohertragszonen relativ nah an der Regressionsgerade, während die Werte der Niedrigertragszone sehr starken Streuungen unterliegen. Tendenziell weisen die Punkte in der Niedrigertragszone, die oberhalb der Regressionsgerade liegen, sandigere Bodenarten auf, während die lehmigeren Böden überwiegend unterhalb der Gerade liegen.

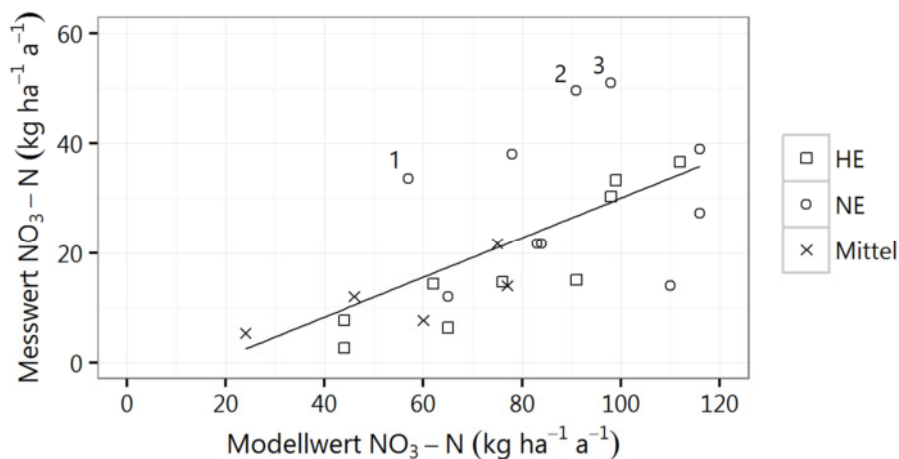


Abb. 17: Vergleich von gemessener mit modellierter langjähriger Nitratstickstoffauswaschung auf Ackerflächen. Mittelwerte pro Fläche und Ertragszone. 24 Beobachtungen.

$$y = -6,21 + 0,36x. R^2 = 0,42.$$

Der Vergleich enthält wenige Ausreißer, die in der Abbildung mit Ziffern von 1 bis 3 versehen wurden. Punkt 1 war ein Schlag, auf dem nur aus einem Zeitraum von 3 Jahren Bewirtschaftungsdaten erfasst wurden. In diesem Zeitraum war die Fruchtfolge Winterweizen – Grünroggen – Silomais – Winterweizen (Zwischenfrucht). Durch sehr hohe Entzüge der Fruchtarten Grünroggen und Silomais im Jahr 2014 wurde generell ein sehr niedriger N-Saldo berechnet, welcher offenbar zu einer Unterschätzung der langjährigen Nitratausträge führte. Die Punkte 2 und 3 stammen von Schlägen, in denen eine ausgeprägte Hoch- und Niedrigertragszone vorhanden war und in denen beide Ertragszonen beprobt wurden. Dabei lag jeweils in den Niedrigertragszonen der Nitrataustrag deutlich oberhalb der Regressionsgerade, was einer Unterschätzung des Nitrataustrags durch das Regressionsmodell entspricht. Dies ist durch die Modellierung auf Ebene des Gesamtschlags zu erklären, bei der die N-Salden der Niedrigertragszone vermutlich unterschätzt wurden und möglicherweise bodenbedingt N-Verluste vermehrt als

Nitrat auftraten. Werden diese Ausreißer aus der Regression entfernt, so ergibt sich eine deutliche Verbesserung des Modells auf ein Bestimmtheitsmaß von 0,58 (Abb. 18).

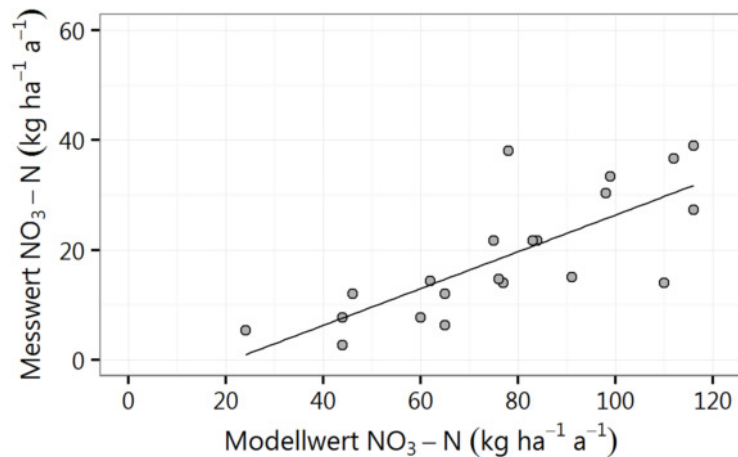


Abb. 18: Vergleich von gemessener mit modellierter langjähriger Nitratstickstoffauswaschung auf Ackerflächen nach Ausreißerkontrolle. Mittelwerte pro Fläche und Ertragszone.

$$21 \text{ Beobachtungen. } y = -7,11 + 0,34x. R^2 = 0,58.$$

Der Zusammenhang zwischen Modellwerten und Messwerten ist nachweisbar, obwohl die Zeiträume der N-Umsatzmodellierung nicht genau übereinstimmten mit den Zeiträumen, die in den Tiefenprofilen erfasst wurden. Die Steigung der Regressionsgeraden von 0,34 bzw. 0,36 zeigt, dass das Modell die ausgewaschene Nitrat-N-Menge überschätzt.

Korrelationsanalysen zeigen, wie bei den einjährigen Daten, einen Zusammenhang zwischen dem N-Saldo und der Nitratfracht (Tab. 38). Die Korrelation wurde auch bei den langjährigen Daten besser, wenn die Faktoren Boden-N-Vorratsänderung und Ammoniakverluste in den N-Saldo mit einbezogen wurden. Durch Einbeziehung der Denitrifikation und durch die Modellierung der Nitratfracht konnte nur eine geringfügige Verbesserung der Korrelation erreicht werden.

Der Auswaschungsfaktor zeigte in den langjährigen Betrachtungen keinen signifikanten Einfluss auf der Nitratfracht. Standortbedingte Unterschiede in der Nitratauswaschung scheinen somit bereits im N-Saldo ausreichend erfasst worden zu sein (mit Ausnahme der beiden Bohrungen im Niedrigertragsbereich, die als Ausreißer entfernt wurden).

Tab. 38: Korrelation von langjährigen N-Salden und Modellwerten zur gemessenen Nitratfracht auf Ackerschlägen. Mittelwerte pro Schlag, Ausreißer entfernt. Spearman Rang Korrelation. 21 Beobachtungen.

	r	p
N-Saldo	0,64	0,002
N-Saldo inkl. N _{org}	0,70	0,001
N-Saldo inkl. N _{org} abzgl. NH ₃	0,82	< 0,001
N-Saldo inkl. N _{org} abzgl. NH ₃ und Denitrifikation	0,82	< 0,001
Nitratfracht modelliert	0,82	< 0,001

N-Wiederfindung

Eine Gegenüberstellung der modellierten Ammoniak- und Denitrifikationsverluste sowie der Boden-N-Vorratsänderung zum N-Saldo der beprobten Flächen zeigt Abb. 19.

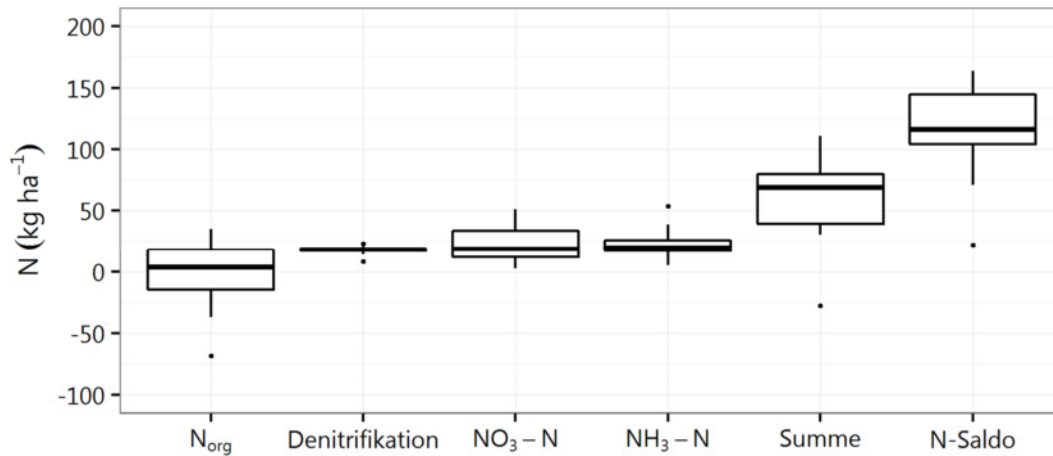


Abb. 19: Vergleich der Modellwerte für Ammoniak- und Denitrifikationsverluste sowie für die Boden-N-Vorratsänderung (N_{org}) und der gemessenen Nitratverluste mit dem N-Saldo der Ackerflächen. 24 Beobachtungen.

Es zeigten sich im Median eine Boden-N-Vorratsänderung von 4 kg ha^{-1} , Ammoniak-N-Verluste von 20 kg ha^{-1} und Denitrifikationsverluste von 18 kg ha^{-1} . Der Messwert für die ausgewaschene N-Menge lag bei 18 kg ha^{-1} , womit die Summe der N-Verluste inklusive Boden-N-Vorratsänderung 69 kg ha^{-1} betrug. Der Median des flächenbezogenen N-Saldos belief sich dagegen auf 116 kg ha^{-1} , womit sich eine fehlende N-Menge von 50 kg ha^{-1} und damit 59 % des N-Saldos ergab. Verglichen mit den modellierten Nitratverlusten wurden sogar nur 24 % der berechneten N-Menge gemessen.

2.4. Diskussion von Teilprojekt 1

2.4.1. Betriebliche Stickstoffflüsse und Bewirtschaftung

2.4.1.1 *Gesamtbetrieb*

N-Saldo nach Hoftorbilanz

In den Untersuchungen betrugen die Hoftor-N-Salden 79 bis 345 kg ha⁻¹. Damit lagen die N-Salden überwiegend über dem Mittelwert deutscher Betriebe von ca. 100 kg ha⁻¹ (UBA 2017), jedoch meist unter den Werten von Regionen/Ländern mit intensiver Tierhaltung, wie beispielsweise den Niederlanden mit einem N-Saldo von 300 kg ha⁻¹ (Leip 2011). In den Marktfruchtbetrieben lagen die Hoftor-N-Salden niedriger als in den tierhaltenden Betrieben, was vor allem auf die Stall- und Lagerverluste der Tierhaltung zurückzuführen ist.

In den untersuchten Marktfruchtbetrieben betrugen die N-Salden 79 bis 99 kg ha⁻¹ (ohne Berücksichtigung des Hopfenbetriebs); sie waren im Vergleich zu aktuellen Literaturwerten relativ hoch (Buckley 2015, Schmid 2015, Domburg 2000). Ältere Untersuchungen zeigten dagegen auch in Marktfruchtbetrieben zum Teil sehr hohe N-Salden bis über 150 kg ha⁻¹ (Schröder 1996).

In den schweinehaltenden Betrieben wurden Hoftor-N-Salden von 204 – 345 kg ha⁻¹ ermittelt, die deutlich über den von Nielsen (2005) gefunden mittleren N-Salden dänischer schweinehaltender Betriebe von 128 kg ha⁻¹ lagen. Dies ist vor allem auf einen geringeren Tierbesatz (1,54 GV ha⁻¹), aber auch auf geringere Mengen eingesetzter mineralischer und organischer N-Dünger der dänischen Betriebe zurückzuführen. In Dänemark bewirkten vor allem politische Maßnahmen eine enge Flächenbindung der Tierhaltung sowie stärkere Restriktionen bei der Düngung eine Verringerung der N-Salden in vergangenen Jahren (Dalgaard 2014). Hingegen fand Bassanino (2007) in Schweinemastbetrieben in Norditalien mit einem mittleren Viehbesatz von 21,4 GV ha⁻¹ N-Salden von durchschnittlich 486 kg ha⁻¹. Dies zeigt das Problem, dass grundsätzlich ein sehr hoher Viehbesatz in der Schweinehaltung möglich ist, da Futter nahezu unbegrenzt zugekauft werden kann (Dalgaard 2012, Domburg 2000). Damit einher gehen hohe Hoftor-N-Salden, insbesondere, wenn nicht in ausreichendem Maße Gülle an andere Betriebe abgegeben wird.

Dies trifft auch zu, wenn die Schweinehaltung mit einer Biogasanlage gekoppelt wird, wie in den Betrieben BG 1 und BG 2. Aufgrund eines geringeren Viehbesatzes (und damit geringeren Stall- und Lagerverlusten), sowie hoher Mengen an Gülleabgaben lagen die Hoftor-N-Salden der beiden Biogasbetriebe mit 185 und 138 kg ha⁻¹ jedoch auf einem relativ moderaten Niveau. Grundsätzlich führt die Integration von Biogasanlagen in tierhaltende Betriebe zu einer deutlichen Intensivierung der N-Kreisläufe (vgl. Böswirth 2017), da meist neben Gülle auch pflanzliche Substrate (vor allem Mais) vergoren werden. Dies kann die N-Salden weiter erhöhen, sofern nicht in ausreichendem Maße Gärreste aus dem Betrieb abgegeben werden (Taube 2013).

Insgesamt wird der N-Saldo deutlich vom betrieblichen Management beeinflusst, wenngleich Nielsen (2005) den Betriebstyp als entscheidenden Einflussfaktor herausstellt. Der Vergleich mit Literaturdaten zeigt, dass die N-Salden der hier untersuchten Betriebe in einem Bereich lagen, der auch in anderen Untersuchungen gefunden wurde. Jedoch belegen die Vergleiche die hohe Bewirtschaftungs- und Düngungsintensität aller Untersuchungsbetriebe der Region Hohenthann, insbesondere der schweinehaltenden Betriebe. Die Verbindung zwischen der Intensität der Betriebe und den N-Salden zeigten beispielsweise Untersuchungen von Oenema (2011) und Humphreys (2008) bei Milchviehbetrieben. Die Beispiele aus Dänemark und den Niederlanden zeigen, dass geringere N-Salden in schweinehaltenden Betrieben grundsätzlich zu erreichen sind.

N-Effizienz Gesamtbetrieb

Im Allgemeinen sinkt die betriebliche N-Effizienz mit zunehmendem Tierbesatz, sofern keine Abgabe von Gülle aus dem Betrieb erfolgt (Powell 2010). Aufgrund der bereits beschriebenen Effekte der Gülleabgabe wiesen die viehstarken Betriebe zum Teil eine hohe N-Effizienz auf. In diesem Zusammenhang muss zwischen der N-Effizienz im engeren Sinne (bezogen auf den N-Output in pflanzlichen und tierischen Marktprodukten) und der Gesamt-N-Effizienz auf Betriebsebene unter zusätzlicher Berücksichtigung der Gülleabgabe in andere Betriebe unterschieden werden.

Im Mittel der EU-Länder liegt die N-Effizienz auf Betriebsebene erstaunlich niedrig bei ca. 31 %, mit Schwankungen zwischen 15 und 50 % (Leip 2011). Die N-Effizienz der in der Region Hohenthann untersuchten Betriebe war mit 35 bis 67 % meist deutlich höher. Erfolgt keine Gülleabgabe, so ist die N-Effizienz in Marktfruchtbetrieben am höchsten und sinkt mit dem Tierbesatz bzw. der stärkeren Spezialisierung auf tierische Veredlung (Buckley 2015, Domburg 2000).

Tierbesatz

Der Tierbesatz beeinflusst den Hoftor-N-Saldo in entscheidendem Maße, und damit auch den flächenbezogenen N-Saldo, wie die eigenen Untersuchungsergebnisse, aber auch die Ergebnisse anderer Autoren zeigen. Aus diesem Grund wurde beispielsweise in Dänemark der Tierbesatz auf 1,4 GV ha⁻¹ beschränkt (Nielsen 2005). Isermann & Isermann (1998) empfehlen eine radikale Absenkung auf einen Viehbesatz von 0,5 GV ha⁻¹ im deutschen Mittel, um eine umweltverträgliche Landwirtschaft zu gewährleisten; sie fordern hierzu auch Änderungen des Ernährungsstils (weniger tierische Lebensmittel).

Oftmals wird der maximale Tierbesatz nicht direkt durch den Besatz an Großvieheinheiten festgelegt, sondern indirekt durch die Menge an ausgebrachten organischen Düngern je Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche begrenzt, z. B. in der gültigen Düngeverordnung mit einer maximalen N-Zufuhr von 170 kg ha⁻¹ im Betriebsmittel (DüV 2017). Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass eine Gülleabgabe aus den Betrieben berücksichtigt und Veränderungen im N-Anfall aufgrund unterschiedlicher Fütterung einbezogen werden. Gutser (2010) empfehlen eine mittlere jährliche N-Zufuhr von 80 bis 120 kg ha⁻¹ über organische Dünger, um eine optimale N-Verwertung und damit möglichst geringe N-Verluste zu erreichen. Dies entspricht in etwa der N-Zufuhr der untersuchten Marktfruchtbetriebe.

2.4.1.2. Pflanzenbau

Flächenbezogener N-Saldo

Europaweit liegt der mittlere flächenbezogene N-Saldo bei 55 kg ha⁻¹, in Deutschland bei 80 kg ha⁻¹ und in den Niederlanden bei 256 kg ha⁻¹ (Leip 2011). Dies zeigt bereits die sehr hohe Variabilität der N-Salden, die auch in vielen anderen Studien gefunden wurde. Dabei lagen die höchsten N-Salden oftmals in viehhaltenden Betrieben vor, wenngleich auch Marktfruchtbetriebe teilweise sehr hohe Überschüsse aufwiesen (z. B. Anglade 2015, Gaudino 2014, Bassanino 2007, de Ruijter 2007).

Im Vergleich zu anderen Untersuchungen lagen die in der Region Hohenthann gefundenen N-Salden von 79 bis 174 kg ha⁻¹ zwar über dem deutschen Mittelwert und damit insgesamt vergleichsweise hoch. Sie erreichen jedoch nicht das Niveau einiger „Hot Spots“ in Europa.

N-Effizienz pflanzliche Produktion

Weltweit liegt die N-Effizienz der pflanzlichen Produktion bei ca. 42 %, und damit relativ niedrig (Zhang 2015). Aufgrund der Vielzahl an negativen Umweltwirkungen, die mit einer schlechten Stickstoffverwertung einhergehen, wird eine Verbesserung der N-Effizienz als unbedingt notwendig erachtet (Rockström 2009). Als Zielwert für die N-Effizienz in Europa nennen Zhang (2015) einen Wert von 75 %, während sie die aktuelle N-Effizienz auf 52 % beziffern. Leip (2011) dagegen geben mit 65 % eine höhere N-Effizienz der pflanzlichen Produktion in Europa an, während Deutschland mit ca. 68 % eine noch etwas höhere N-Effizienz aufweist.

Die in der Untersuchungsregion Hohenthann gefundene N-Effizienz von 45 bis 67 % lag im Bereich der Literaturwerte. Dennoch zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass Optimierungsmöglichkeiten vorhanden sind, die genutzt werden müssen, wenn die N-Effizienz auf 75 % gesteigert werden soll. Untersuchungen aus Praxisbetrieben in Deutschland und Frankreich belegen, dass unter optimaler Bewirtschaftung sogar eine N-Effizienz von bis zu 90 % im Pflanzenbau erreicht werden kann (Anglade 2015, Schmid 2015, Küstermann 2010).

Die N-Effizienz der pflanzlichen Produktion ist abhängig von den Boden- und Witterungsbedingungen sowie von der betrachteten Fruchtart (Oenema 2010). So ist die N-Effizienz von Grünland oder Ackergras in der Regel hoch, während sie bei Fruchtarten mit kurzer Vegetationsdauer, wie z. B. Sommergetreide, meist niedriger ist. Ein entscheidender Einflussfaktor ist zudem die Düngung. Ungedüngte Kulturen weisen grundsätzlich eine hohe N-Effizienz auf, da sie nur Stickstoff aus dem Bodenpool aufnehmen, während mit steigender N-Düngung die N-Effizienz tendenziell abnimmt (Lassaletta 2014, Tilman 2002). Dies führt dazu, dass extensiver genutzte Flächen in der Regel eine höhere N-Effizienz aufweisen als intensiv genutzte (Leip 2011). Darüber hinaus liegt die N-Effizienz von organischer Düngung nahezu immer unter der N-Effizienz der mineralischen N-Düngung (Schröder 2005). Die Ursache hierfür liegt neben Ammoniak-Verlusten darin, dass ein erheblicher Anteil des organisch gebundenen Stickstoffs aus Wirtschaftsdüngern zunächst im Boden immobilisiert und nur langsam wieder freigesetzt wird. Da die Mineralisation aus dem Bodenpool oft nicht synchron zum Pflanzenbedarf erfolgt, sind die N-Verluste meist höher als beim gezielten Einsatz von Mineraldüngern (Gutser 2010). Allerdings erfordert die exakte Ermittlung der N-Effizienz organischer und mineralischer N-Dünger eine sehr lange Versuchsdauer (Dauerfeldexperimente) unter Berücksichtigung der N-Immobilisierung und N-Mineralisation (Hülsbergen 2003).

In Feldversuchen wurde vielfach bewiesen, dass eine kombinierte organisch-mineralische Düngung zu höheren Erträgen führt als eine rein mineralische Düngung (Albert 2013, Zorn 2010, Hülsbergen 2003, Lang 1999, Panse 1995, Knittel 1992). Dies kann das zum Teil extrem hohe Ertragsniveau in den viehhaltenden Betrieben der Untersuchungsregion Hohenthann mit erklären. Bei überhöhten Einsatzmengen organischer und mineralischer Dünger können jedoch auch negative Ertragseffekte auftreten (Albert 2013, Maidl 1989).

Somit ist die Beurteilung der N-Effizienz immer unter Berücksichtigung des Einsatzes organischer Dünger zu sehen. Unter den Bedingungen der Untersuchungsregion ist das Ziel einer möglichst hohen N-Effizienz vor allem durch ein optimiertes Gülle-Management (z.B. Verzicht auf Gülleapplikation Herbst, Anpassung der Güllemengen und Anwendungstermine an den Pflanzenbedarf) sowie die noch bessere Berücksichtigung der ausgebrachten Gülle bei der Bemessung der Mineral-N-Gaben zu erreichen. Mo-

derne Technologien der N-Bedarfsermittlung von Pflanzenbeständen sowie der Einsatz der sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung sind wichtige Ansatzpunkte zur Erhöhung der N-Effizienz im Pflanzenbau.

Um die N-Effizienz der pflanzlichen Produktion sicher beurteilen und Verbesserungsansätze ableiten zu können, ist eine Betrachtung der einzelnen Fruchtarten und ihrer N-Effizienz nötig. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass Fruchtarten in Fruchtfolgen angebaut werden und zum Teil ein Nährstofftransfer zwischen den Kulturen stattfindet. Dies kann dazu führen, dass einzelne Fruchtfolgeglieder sehr geringe oder hohe N-Salden aufweisen, die von der Vor- oder Folgefrucht wieder ausgeglichen werden. Ein hoher Anteil sehr N-effizienter Fruchtarten, wie Zuckerrüben, Silomais oder Klee gras, erleichtert es zudem, im Mittel der Fruchtfolge eine hohe N-Effizienz zu erzielen (Godinot 2015, Sylvester-Bradley 2009).

2.4.1.3. Tierhaltung

Die untersuchten viehhaltenden Betriebe wiesen einen Tierbesatz von 2,0 bis 7,3 GV ha⁻¹ auf, womit alle Betriebe vergleichsweise viehstark sind. In allen untersuchten Betrieben kann durch eine Effizienzsteigerung in der Tierhaltung der Anfall an Wirtschaftsdüngern gesenkt und damit der betriebliche Stickstoffkreislauf entlastet werden.

N-Effizienz

Die N-Effizienz der tierischen Produktion spiegelt auch die gehaltene Tierart und Produktionsrichtung wider. In den untersuchten Mastschweinebetrieben wurde eine N-Effizienz von 32 bis 34 % ermittelt. Damit lagen diese sehr nah an der von Hou (2016) und Dourmad (1999) angegebenen mittleren N-Effizienz von 33 % in europäischen Betrieben.

Im Zuchtsauenbetrieb ZS wurde mit 37 % eine sehr hohe N-Effizienz erzielt. Dies wurden vor allem durch eine N-effiziente Ferkelaufzucht (N-Effizienz: 46 %) erzielt, während in der Ferkelproduktion die N-Effizienz bei 25 % lag. Damit waren die Werte etwas höher als die von Dourmad (1999) genannten Mittelwerte für Frankreich, Dänemark und die Niederlande, die in der Ferkelaufzucht bei 45 % und in der Ferkelproduktion bei 23 % lagen.

Fütterung Mastschweine

Die N-Ausscheidungen sowie die N-Effizienz der Schweinemast werden vor allem durch den mittleren Proteingehalt des Futters und die Futtermittelverwertung bestimmt. Die Futtermittelverwertung der untersuchten Betriebe lag zwischen 2,77 und 2,97 kg Futter (88 % TS) pro kg Zuwachs, und war damit deutlich über dem europäischen Durchschnitt von ca. 3,3 : 1 (umgerechnet auf 88 % TS, Hou 2016). Im Vergleich zu anderen Betrieben in Bayern, die im Jahr 2015 eine Futtermittelverwertung von 2,82 erzielten, bewegten sich die untersuchten Betriebe dagegen in einem ähnlichen Bereich (Landeskuratorium der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern e. V. 2015).

Die mittleren Proteingehalte der Rationen der untersuchten Betriebe betragen 15,8 bis 17,7 %. Grundsätzlich ist eine Absenkung des mittleren Proteingehalts auf bis zu 12 % möglich, wie viele Untersuchungen zeigen (Le 2007, Canh 1998, Tuitoek 1997). In der Praxis wird dies jedoch in der Regel nicht erreicht, da für solche Rationen die ausschließliche Verfütterung sehr hochwertiger Futtermittel und

die Zulage vieler essenzieller Aminosäuren nötig ist. Die Ration muss zudem möglichst gut an das Wachstumsstadium der Tiere angepasst sein. In den untersuchten Betrieben werden zum Teil Nebenprodukte aus der Lebensmittelherstellung eingesetzt, die häufig ein ungünstiges Aminosäurenverhältnis sowie eine niedrige Verdaulichkeit der Aminosäuren aufweisen (Aarnink 2007). Da bestimmte essenzielle Aminosäuren als Zulage sehr teuer sind (Pierer 2016, van Vuuren 2015), und da aufgrund der variablen Inhaltsstoffe von Futtermitteln oft Sicherheitszuschläge gemacht werden, liegen die Proteingehalte in der Praxis meist deutlich höher als 12 %.

Dennoch zeigen praktische Rationsempfehlungen, dass bei derzeitigen Proteingehalten eine Fütterungsoptimierung möglich ist. Eine proteinoptimierte Fütterung ist zudem ein Beitrag zur Reduzierung von Eiweiß-Futterimporten (DLG 2016, LfL 2014). Im Hinblick auf die Variabilität der Proteingehalte im Futter ist jedoch eine exakte Kenntnis der Inhaltsstoffe der Futtermittel nötig, um Leistungseinbußen bei einer Proteinabsenkung zu vermeiden.

N-Anfall in der Mastschweinehaltung

Mit dem beschriebenen Futterregime lagen die N-Ausscheidungen pro Mastschwein in einem Bereich von 4,37 bis 4,74 kg pro Tier. Niederländische Betriebe liegen im Vergleich dazu mit N-Ausscheidungen von 4,26 kg pro Tier etwas darunter (Dourmad 1999). Beim Vergleich der N-Ausscheidungswerte ist zu beachten, dass diese stark von der betrachteten Mastphase abhängig sind und die in den untersuchten Betrieben gemästeten Schweine im europäischen Vergleich mit ca. 120 kg Lebendgewicht erst sehr spät geschlachtet werden (vgl. Hou 2016). Bei dem gegebenen Effizienzniveau von 33 % stellen Dourmad (1999) fest, dass durch eine Anpassung der Fütterung die N-Ausscheidungen ohne Erhöhung der Futterkosten um 20 – 30 % gesenkt werden könnten. Ein hohes Potenzial zur Reduzierung der N-Ausscheidungen zeigen auch die sehr praxisnahen Rationsempfehlungen der DLG (2016), mit denen die N-Ausscheidungen pro Tier auf 3,86 g pro Tier gesenkt werden könnten.

N-Anfall in der Ferkelerzeugung

In der Ferkelerzeugung und Ferkelaufzucht können durch Steigerung der Leistungen und durch einen verminderten N-Gehalt im Futter die N-Ausscheidungen reduziert werden. Die Tierleistung betrifft hier die Anzahl aufgezogener Ferkel pro Sau, die Remontierungsrate und die täglichen Zunahmen der Ferkel (Tamminga 2003). In der Fütterung kann, wie in der Mastschweinefütterung, durch Aminosäurezulage und durch die Verwendung hochwertiger Futtermittel mit geringem Proteingehalt der Gesamtproteingehalt der Ration reduziert werden (Aarnink 2007). Die sehr guten Leistungsdaten und die hohe N-Effizienz in Betrieb ZS deuten jedoch darauf hin, dass in diesem Betrieb nur geringe Spielräume zur Absenkung der N-Ausscheidungen vorhanden sind.

2.4.2. Mess- und Modellwerte zu N_{\min} -Vorräten und Nitratausträgen

2.4.2.1 N_{\min} -Vorräte bis 90 cm Bodentiefe

Die Untersuchungen zeigten, dass die N_{\min} -Vorräte zu den unterschiedlichen Zeitpunkten in erster Linie von der angebauten Fruchtart und der Vorfrucht sowie von Standort- und Witterungsfaktoren abhängen. Einflüsse der Bewirtschaftung (N-Düngung) waren dagegen nur zum Teil nachweisbar und wurden oft von anderen Faktoren überlagert.

Witterungseinflüsse auf die N_{\min} -Vorräte wurden analog zu Schweigert (2004) und Bechtel (2008) durch Regressionsanalysen unter Einbeziehung der Faktoren Temperatur und Niederschlag getestet. Dabei erwiesen sich unterschiedliche Faktoren als signifikant, die zudem eine unterschiedliche Gewichtung in den Regressionsmodellen aufwiesen. Wahrscheinlich ist dies auch auf den mit 2 bis 3 Jahren relativ kurzen Untersuchungszeitraum zurückzuführen. In den Analysen von Schweigert (2004) und Bechtel (2008) standen jeweils Zeitreihen von mindestens 10 Jahren zur Verfügung. Dennoch konnte auch bei dem kurzen Untersuchungszeitraum gezeigt werden, dass die Witterung deutlichen Einfluss auf die N_{\min} -Vorräte zu den verschiedenen Zeitpunkten hat. Darüber hinaus fand sich durch Niederschlagsfaktoren oftmals ein Einfluss des Probenahmetermins auf die gemessenen Werte, auf den bereits Schweigert (2004) hingewiesen hatte.

N_{\min} -Vorräte nach der Ernte

Die höchsten Nachernte- N_{\min} -Vorräte wurden nach Winterraps gemessen, während sich die N_{\min} -Vorräte von Weizen und Gerste nur wenig unterschieden. Diese Ergebnisse decken sich mit Erkenntnissen von Beaudoin (2005) und Sieling (1999).

Nach der Winterweizenernte wurde ein Einfluss des N-Saldos auf die N_{\min} -Vorräte gefunden, wie er auch von Wendland (2016), D'Haene (2014) und Beaudoin (2005) nachgewiesen wurde. Nach den Vorfrüchten Winterraps, Winterweizen und Gurken wurden höhere N_{\min} -Vorräte gefunden als nach den Vorfrüchten Mais oder Zuckerrüben. Neben dem direkten Vorfruchteffekt kann eine Erklärung darin liegen, dass Winterweizen nach Winterraps in Marktfruchtbetrieben angebaut wurde, die tendenziell höhere und zeitlich spätere Spätdüngungsgaben ausbrachten. Nach Sieling (1999) wird der Nachernte N_{\min} -Vorrat vor allem durch die Mineraldüngung beeinflusst, weniger durch die Gülledüngung. Die N_{\min} -Vorräte nach Winterweizen lagen mit einem Mittelwert von 28 kg ha⁻¹ niedriger als in anderen Untersuchungen, in denen Werte zwischen 25 und 52 kg ha⁻¹ ermittelt wurden (Wendland 2016, Schulz 2015, D' Haene 2014, Beaudoin 2005). Auch bei Wintergerste lagen die N_{\min} -Vorräte niedriger als in anderen Untersuchungen (Wendland 2015, Beaudoin 2005).

Möglicherweise ist das geringe N_{\min} -Niveau darauf zurückzuführen, dass in den tierhaltenden Betrieben ein Großteil der Dünger-N-Menge mit den ersten beiden N-Gaben appliziert wird (Hülsbergen 2016). Dies führt zur Ausbildung üppiger Bestände mit hohen N-Aufnahmen und damit auch geringen Rest- N_{\min} -Vorräten im Boden (Schulz 2015, Brennan 2014, Blankenau 2002, Maidl 1998, Alcoz 1993).

N_{\min} -Vorräte im Herbst

Die festgestellte Reihenfolge der Fruchtarten in Bezug auf die N_{\min} -Vorräte im Herbst deckt sich mit Erkenntnissen von Beaudoin (2005) und Bechtel (2008). Dagegen war das Niveau bei im Herbst mit Getreide bestellten Flächen höher als in anderen Untersuchungen (Wendland 2016, D' Haene 2014, Bechtel 2008, Ten Berge 2007, Köhler 2006, Beaudoin 2005, Sieling 1999). Als wesentliche Ursache für

die hohen Werte ist das hohe Niveau der N-Salden der untersuchten Betrieben zu nennen. Eine weitere Ursache sind die überwiegend lehmigen Böden in der Untersuchungsregion, auf denen zumeist höhere Werte gefunden werden als auf sandigen Böden (Beaudoin 2005, Bechtel 2008). Dies zeigte auch der Vergleich zwischen den Hoch- und Niedrigertragszonen, trotz höherer N-Salden in den Niedrigertragszonen. Dabei ist die Ursache vermutlich eine höhere N-Auswaschung auf sandigen Böden, welche eine geringere N-Anreicherung im Boden und damit eine geringere Mineralisation im Herbst zur Folge hat (Beaudoin 2005). Dagegen ist in den tonigen Niedrigertragsbereichen vermutlich ein höherer N-Abbau durch Denitrifikation eine Ursache für eine geringere N-Anreicherung im Herbst (Hoffmann 1999). Darüber hinaus wirkte die Düngung zu Wintergerste sowie zum Teil zu Winterweizen vermutlich erhöhend auf die N_{\min} -Vorräte (Wendland 2015, Sieling 1999).

Ein direkter Einfluss der Düngung konnte in der Literatur vor allem für die N_{\min} -Vorräte nach Mais gefunden werden (Wendland 2016, Haene 2014, Kayser 2011, Ten Berge 2007, Köhler 2006). Ein ähnlicher Zusammenhang war hier nur für Körnermais zu finden, während bei Silomais wahrscheinlich der Datensatz zu klein war. Bei Körnermais zeigte sich ein Einfluss des langjährigen N-Saldos auf die N_{\min} -Vorräte im Herbst. Dies deckt sich mit Aussagen von Köhler (2006), wonach die langjährige Bewirtschaftung erheblichen Einfluss auf die N_{\min} -Vorräte nach Mais hat. Darüber hinaus fand sich bei Zuckerrüben ein Zusammenhang zwischen langjährigem N-Saldo und N_{\min} -Vorräten im Herbst, der bei bisherigen Untersuchungen nicht zutage trat. Dabei ist jedoch auf die geringe Stichprobengröße von fünf Schlägen hinzuweisen.

N_{\min} -Vorräte im Frühjahr - N_{\min} -Dynamik über Winter

Die Frühjahrs- N_{\min} -Vorräte der Getreideflächen hingen in erster Linie vom N_{\min} -Vorrat im Herbst ab, wie es bereits von Schroth (1992) beschrieben wurde. Die im Herbst gefundenen Unterschiede setzten sich somit im Frühjahr fort, wenn auch mit geringerer Ausprägung, infolge des generellen Abbaus der N_{\min} -Vorräte. Dabei zeigt ein Vergleich mit den N_{\min} -Vorräten aus jährlichen Erhebungen in Bayern ein niedriges Niveau bei den in der Region Hohenthann untersuchten Flächen (vgl. LfL 2016). Zusammen mit dem hohen Niveau der Herbst- N_{\min} -Vorräte bedeutet dies einen vergleichsweise hohen Abbau über Winter. Beaudoin (2005) fanden deutlich geringere Veränderungen der N_{\min} -Vorräte über Winter. Die Verminderung der N_{\min} -Vorräte fand vor allem in den oberen Schichten (0 – 60 cm) statt, wie es auch von Hofman (1981) in Versuchen auf lehmigen Böden gefunden wurde. Die Tatsache, dass dabei im Mittel keine Zunahme in der untersten Schicht (60 – 90 cm) gefunden wurde, ist als Hinweis darauf zu sehen, dass neben der Nitrat-Auswaschung auch Abbauprozesse durch Denitrifikation sowie Immobilisationsprozesse stattfanden. Kaiser (2000) konnten in Untersuchungen zeigen, dass etwa 50 % der jährlichen Denitrifikation über Winter stattfindet. Zudem fanden Ruser (2001) auf einem dem Untersuchungsgebiet vergleichbaren Standort im Tertiärhügelland, dass die Denitrifikation über Winter in erster Linie vom N_{\min} -Vorrat im Oberboden abhängt, der in der Untersuchungsregion Hohenthann oft sehr hoch war. Hinzu kommt, dass nahezu alle der betrachteten Flächen langjährig mit Gülle gedüngt wurden, was eine erhöhte Denitrifikation aufgrund der Zufuhr einer C-Quelle für die Bodenmikroorganismen bedeuten kann (Sieling 2006, Kaiser 2000, Rochette 2000, Petersen 1999).

Bei Winterraps veränderten sich die N_{\min} -Vorräte über Winter dagegen kaum. Raps konnte Stickstoff somit sehr effektiv vor einer N-Auswaschung über Winter konservieren.

Zwischenfrüchte führten hingegen durch eine Mineralisation aus der abgestorbenen Biomasse zu steigenden N_{\min} -Vorräten im Frühjahr, wie es auch von Hofman (1981) gefunden wurde. Dabei fand eine N-Anreicherung in allen Schichten statt, vor allem bei den gut entwickelten Zwischenfrüchten nach

Wintergerste. Es gab somit nach dem Absterben der Zwischenfrucht bis zum Probenahmetermin im März bereits eine deutliche Tiefenverlagerung. Wird anschließend Mais gesät, der nur eine zögerliche N-Aufnahme im Jugendstadium aufweist (Valta 2000), so besteht die große Gefahr einer N-Tiefenverlagerung unterhalb der Durchwurzelungstiefe. Auch bei den beprobten Zwischenfrüchten zeigten sich geringere N_{\min} -Vorräte als bei den jährlichen Erhebungen in Bayern (LfL 2016). Die Mineralisation auf den mit Zwischenfrüchten bestellten Schlägen war damit offenbar geringer als im bayerischen Durchschnitt. Es konnte aber eine Abhängigkeit von der Vorfrucht gefunden werden, die zeigt, dass die Mineralisationsrate aus den Rückständen gut entwickelter Zwischenfrüchte höher ist, als nach schlechter entwickelten Zwischenfrüchten. Insgesamt konnte jedoch nicht geklärt werden, ob die generell niedrigeren N_{\min} -Vorräte mit der Entwicklung oder Zusammensetzung der Zwischenfrüchte oder mit den Bodenbedingungen zusammenhängen.

Die N_{\min} -Vorräte der beiden Hopfenschläge lagen mit 91 kg ha^{-1} etwas über dem bayerischen Durchschnitt des Jahres 2016 mit 80 kg ha^{-1} (Portner 2016). Die Unterschiede zwischen den Sorten, nach denen die Ertragszonen eingeteilt wurden, waren jedoch stärker ausgeprägt als im Mittel Bayerns. Die Unterschiede wurden offenbar vor allem durch stark unterschiedliche N-Entzüge der Sorten verursacht, da die Düngung der Niedrigertragsorte niedriger war als die der Hohertragsorte (siehe auch Portner (2012)).

Fazit und Gesamtbewertung N_{\min} -Untersuchungsergebnisse

Die N_{\min} -Vorräte wurden hauptsächlich durch die angebaute Fruchtart und die Fruchtfolge sowie die Witterung beeinflusst. Daneben zeigte sich, abhängig von Fruchtart und Jahr, ein Einfluss der Bodenbedingungen am jeweiligen Standort. Einflüsse der Bewirtschaftung ließen sich im Einzelfall nur schwer nachweisen, wobei einige Trends erkennbar waren. So waren die untersuchten Flächen durch überwiegend geringe N_{\min} -Vorräte im Frühjahr und nach der Ernte gekennzeichnet, während im Herbst auf Flächen mit Wintergetreide oft sehr hohe Werte auftraten.

Die hohen N_{\min} -Vorräte im Herbst sind wahrscheinlich durch eine langjährig hohe N-Zufuhr (Gülle) auf die Flächen zu begründen, die hohe Rest- N_{\min} -Vorräte nach Mais, aber auch ein insgesamt hohes N-Mineralisationspotenzial der Böden zur Folge haben (Köhler 2006). Aufgrund eines hohen Einflusses von Standort und Witterung konnte der Einfluss der Düngung bzw. des N-Saldos nur teilweise nachgewiesen werden. Grundsätzlich bestätigen die Ergebnisse der N_{\min} -Analysen jedoch die in der betrieblichen Stickstoffbilanzierung gefundenen hohen N-Überschüsse.

Dagegen zeigten die N_{\min} -Analysen nach der Ernte und im Frühjahr vergleichsweise niedrige Vorräte. Dabei ließen sich die geringen N_{\min} -Vorräte nach der Ernte zumindest teilweise durch die Bestandesführung erklären, die oft zu dichten Beständen und damit hohen N-Aufnahmen (auch im Stroh) führte. Dagegen scheinen die geringen N_{\min} -Vorräte im Frühjahr eine standortspezifische Besonderheit zu sein. Zwar zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit von den N_{\min} -Vorräten im Herbst, jedoch wurden die mineralischen Stickstoffvorräte im Boden über Winter durch Auswaschung, Denitrifikation oder Immobilisationsprozesse stark vermindert. Die fehlende N-Anreicherung in der untersten Bodenschicht sowie die geringen N-Mengen, die in den Tiefenprofilen gefunden wurden, deuten darauf hin, dass in den untersuchten Standorten die N-Verluste durch Denitrifikation eine große Rolle spielen. Zudem wurde eine starke Standortabhängigkeit gefunden, mit unterschiedlicher N_{\min} -Dynamik und vermutlich höheren N-Auswaschungsverlusten bei stark sandigen Böden und höheren Denitrifikationsverlusten bei tonigen Böden. Um die tatsächlichen Verlustpfade zweifelsfrei aufklären zu können, wären jedoch weitere Untersuchungen, vor allem Messungen der Denitrifikationsverluste, nötig.

Unsicherheiten hinsichtlich der N-Verluste über Winter erklären auch den nicht vorhandenen Zusammenhang zwischen den N_{\min} -Vorräten im Herbst und der Nitratauswaschung. Jedoch konnten die N_{\min} -Vorräte auf stark sandigen Standorten durchaus Hinweise auf die Nitratauswaschung liefern, was sich mit vielen Ergebnissen in der Literatur deckt (Myrbeck 2014, de Ruijter 2007, Köhler 2006). Werden Standort, Fruchtart und Jahreswitterung berücksichtigt, so stellen die N_{\min} -Vorräte im Herbst einen Indikator für die langjährige Bewirtschaftung der Flächen dar. Jedoch unterliegen die N_{\min} -Vorräte einer hohen Variabilität, was bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen ist.

2.4.2.2. Nitratmengen im Unterboden

Der Vergleich der in den Tiefenprofilen ermittelten Nitratverlagerung mit der in der N-Umsatz-Modellierung berechneten Nitratauswaschung zeigte bei langfristiger Betrachtung einen guten Zusammenhang zwischen Mess- und Modellwerten. Bei Betrachtung von Einzeljahren war dieser Zusammenhang nicht gegeben, was hauptsächlich auf die bereits erwähnten methodischen Unsicherheiten zurückzuführen ist. Generell wurde jedoch eine deutliche Überschätzung der Nitratauswaschung durch das verwendete Modell festgestellt.

Beziehungen zwischen Modell- und Messwerten

Die Überschätzung der Nitratverluste deutet darauf hin, dass (a) die Verluste durch Denitrifikation oder durch Ammoniakausgasung unterschätzt wurden oder (b) die Boden-N-Vorratsänderung höher ist als angenommen. Eine weitere Möglichkeit ist, dass (c) andere Verlustpfade eine Rolle spielen, die im Modell nicht berücksichtigt wurden. Hinzu kommt, dass auch bei der Rammkernsondierung und der darauf basierenden Ermittlung der Nitratvorräte sowie der Abschätzung der Sickerwasserbildung ebenfalls zahlreiche Fehlerquellen existieren.

Ammoniakverluste unterliegen generell einer hohen Variabilität. Die Verlustkoeffizienten bei der Gülleausbringung lagen bei Betrieben mit Einsatz von Schweinegülle im Mittel zwischen 12 und 16 % des NH_4-N , während sie beim Einsatz von Biogasgärresten zwischen 26 und 32 % des NH_4-N betragen. Die niedrigeren Verlustkoeffizienten bei Schweinegülle werden von einigen Untersuchungen gestützt (Ni 2012, Sommer 2006, Misselbrook 2005), und durch eine gute Infiltration sowie einen im Vergleich zu Biogasgülle niedrigen pH-Wert begründet. Andererseits wurden beispielsweise in Untersuchungen von Huijsmans (2003) und Sjøgaard (2002) höhere Verluste bei der Ausbringung von Schweinegülle gefunden. Hohe Verluste bei der Ausbringung von Rindergülle oder Biogasgärresten fanden auch Wulf (2002), Horlacher (1990), Sjøgaard (2002) und Misselbrook (2005), während geringe Verluste seltener auftraten (Sommer 2006). Es ist daher möglich, dass die Ammoniakverluste bei der Ausbringung von Schweinegülle in einigen Fällen zu niedrig angesetzt wurden, während bei Biogasgärresten die Verlustkoeffizienten besser mit in der Literatur gefundenen Werten übereinstimmen.

Die N-Verluste durch Denitrifikation wurden mit dem verwendeten Modell auf ca. 18 kg ha^{-1} berechnet. Damit liegt die Größenordnung in einem ähnlichen Bereich, wie von Kroeze (2003) für Ackerböden angegeben oder wie in den Schätzrahmen von Keller (2013) und (LBEG 2007) angegeben. Dagegen nehmen Rösemann (2015) Denitrifikationsverluste in Höhe von 9,2 % des zugeführten Stickstoffs an (inklusive Ernte- und Wurzelrückstände). Dies würde im Modellbetrieb ca. $35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ entsprechen. Noch weiter gehen Velthof (2009), indem sie in Berechnungen mit Hilfe des Modells MITERRA-EUROPE

die Denitrifikationsverluste für Deutschland auf 78 % des N-Überschusses (nach Abzug von NH_3 -Verlusten und Oberflächenabfluss) beziffern. Die höheren Verluste im Vergleich zu vielen Messungen begründen sie dadurch, dass in den Messungen oft nur Oberböden betrachtet wurden und viele methodische Probleme bei der Messung der Denitrifikation auftreten, weshalb die denitrifizierte Menge in der Regel unterschätzt würden. Nach diesem Ansatz würde die denitrifizierte N-Menge der hier untersuchten Schläge 75 kg ha^{-1} betragen, was zu einer sehr guten Schätzung der gemessenen Nitratmenge führen würde. Die Annahme derart hoher Denitrifikationsraten stützen auch Ergebnisse von Funk (1996) von tiefgründigen Lössstandorten im niederbayerischen Gäuboden (ca. 70 km vom Untersuchungsstandort entfernt). Sie fanden im Unterboden N-Abbauraten von bis zu 300 kg ha^{-1} über einen Zeitraum von 2 Monaten, während die geringste Abbauraten bei 15 kg ha^{-1} über 5 Monate lag. Damit ist die Verringerung der Nitratmenge auf Schlag 3 in Betrieb MS 1 (Abschnitt 3.3.1) ebenfalls durch einen derartigen Abbau zu erklären. Auch Untersuchungen von Flessa (1995) und Kaiser (2000) wiesen auf die hohe Bedeutung der Denitrifikation in der Untersuchungsregion hin. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass bei den in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen die Denitrifikationsverluste deutlich unterschätzt wurden.

Die Berücksichtigung der berechneten Boden-N-Vorratsänderung (ΔN_{org}) konnte trotz der beschriebenen Unsicherheiten den Zusammenhang zwischen N-Saldo und Nitratauswaschung verbessern. Dies deutet darauf hin, dass in vielen Böden noch kein Fließgleichgewicht erreicht wurde und somit nach wie vor Mineralisations- bzw. Immobilisationsprozesse stattfinden. Die Größenordnung von ΔN_{org} lag dabei im Vergleich zur Einsatzmenge an organischen Düngern in vielen Betrieben niedrig. Jedoch wird gerade beim Einsatz von Gülle ein hoher Anteil in den Folgejahren remineralisiert und somit nicht dauerhaft im Humuspool gespeichert (Gutser 2005). Dies bestätigen auch hohe Bodenmineralisationsraten, die auf Messparzellen gefunden wurden (Hülsbergen 2016). Die Richtigkeit der berechneten Werte konnte anhand der erhobenen Daten jedoch nicht überprüft werden und sollte daher Gegenstand künftiger Untersuchungen sein.

Im hier betrachteten Untersuchungsgebiet mit vielen hängigen Flächen können zudem Stickstoffverluste durch Oberflächenabfluss auftreten. Die N-Menge im Oberflächenabfluss hängt von der Hangneigung, der Landnutzung, dem Niederschlagsüberschuss, der Bodentextur und der Gründigkeit des Bodens ab (Velthof 2009). Bei den Bedingungen in der Untersuchungsregion könnte somit bis zu ca. 10 % des applizierten Düngestickstoffs (mineralisch und organisch) durch Oberflächenabfluss verlorengehen. Für Deutschland geben Velthof (2009) für den Oberflächenabfluss einen Verlustfaktor von 4 % des applizierten Düngestickstoffs an. Zhou (2016) dagegen fanden in Lysimeterversuchen mit 11 % Hangneigung durch Oberflächenabfluss N-Mengen in Höhe von 10 % des ausgewaschenen Stickstoffs. Auch Korsath (2000) fanden bei Hangneigungen von 2 – 8 % N-Mengen im Oberflächenabfluss, die zwischen 5 und 11 % der ausgewaschenen N-Menge entsprachen. Bei den untersuchten Schlägen ist jedoch zu beachten, dass die N-Mengen aus dem Oberflächenabfluss oftmals noch innerhalb der Schläge abgelagert werden, und somit an den Hangfüßen zu einem vermehrten N-Eintrag führen. Es bleibt festzuhalten, dass Oberflächenabfluss in der untersuchten Region sicherlich einen relevanten Verlustpfad darstellt. Die tatsächlichen Verluste sind jedoch stark von Bedingungen der Schläge abhängig, weshalb die Einschätzung der tatsächlichen Verluste schwierig ist.

Ein weiterer Verlustpfad, der in den Betrachtungen dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurde, ist die Auswaschung von gelöstem organischen Stickstoff (DON). Van Kessel (2009) beziffern die Höhe der DON-Auswaschung auf etwa ein Drittel der ausgewaschenen Nitrat-N-Menge. Sie stellen auch fest, dass die DON-Verluste in der Regel zunehmen, wenn die Zufuhr an organischer Substanz erhöht wird.

Dies kann durch die Zufuhr über Pflanzenmaterial, z. B. den Anbau von Zwischenfrüchten oder Klee gras oder durch die Düngung mit Wirtschaftsdüngern erfolgen. Die zitierten Studien stammen zum Großteil von Grünlandflächen mit teils sehr hohen Düngergaben. Auf Ackerflächen scheinen die DON-Verluste etwas geringer zu sein, was auch die Versuche von Zhou (2016) zeigten, in denen DON und NH_4 einen Anteil von 9 – 17 % am ausgewaschenen Stickstoff hatten. Somit ist davon auszugehen, dass auch bei den hier betrachteten Flächen N-Verluste durch DON-Auswaschung auftraten. Da es zu diesem Thema vor allem von Ackerflächen nur sehr wenige Studien gibt, kann der tatsächliche Umfang jedoch nicht abgeschätzt werden.

Vergleich der Ertragszonen

Entgegen den Erwartungen konnte keine klare Differenzierung zwischen den Hoch- und Niedrigertragszonen im Hinblick auf die Nitratauswaschung gefunden werden. So war der Zusammenhang zwischen der berechneten und der gemessenen Nitratauswaschung vor allem in den Hoch- und Mittlerertragszonen gegeben, während die Werte der Niedrigertragszonen zum Teil erhebliche Streuungen aufwiesen. Die Einstufung der Ertragszonen erfolgte in der Art, dass in der Hohertragszone eher von einer Unterschätzung des Ertrags und in der Niedrigertragszone eher von einer Überschätzung des Ertrags ausgegangen wurde. Entsprechend wäre erwartet worden, dass die Nitratauswaschung im Hohertrag überschätzt und im Niedrigertrag unterschätzt werden würde.

Eine Ursache liegt vermutlich darin, dass die Hohertragszonen in der Regel deutlich größer waren als die Niedrigertragszonen. Dies führt dazu, dass mit einer schlagspezifischen Ertragsschätzung der Ertrag der Hohertragszonen in der Regel gut geschätzt werden kann, während dieser in den Niedrigertragszonen nicht bekannt ist. Aus diesem Grund wurde die Bodenzusammensetzung im Modell vor allem an der Bodenart der Hohertragszone orientiert, was zu einem entsprechenden Fehler bei der Schätzung des Nitrataustrags in der Niedrigertragszone geführt haben könnte. Die gezeigte starke Unterschätzung der Nitratausträge bei sandigeren Böden lässt sich womöglich ebenfalls darauf zurückzuführen, dass diese Zonen nur einen kleinen Anteil des gesamten Schlags einnahmen und daher die Schätzung entsprechend fehlerbehaftet war.

Vor allem mit unterschiedlichen N-Salden begründete auch Nieder (1995) die deutlich höhere N-Auswaschung auf sandigen im Vergleich zu lehmigen Standorten. Hoffmann (1999) nennen als weiteren Grund eine höhere Denitrifikation auf lehmigen Standorten. Sie beziffern den Anteil der Denitrifikation auf etwa ein Drittel des Unterschieds zwischen sandigen und lehmigen Böden, während die anderen zwei Drittel durch Ertragsunterschiede begründet werden können.

2.5. Anhang zu Abschnitt 2.

Tab. A. 1: Angenommene Erträge und N-Entzüge von Zwischenfrüchten zur Gründüngung.

Art	Vorfrucht	TM-Ertrag (dt ha ⁻¹)	N-Entzug (kg ha ⁻¹)
Senf	Alle	32	76
Phacelia	Alle	33	73
Leg-/Nichtleg-Gemenge	Weizen	25	76
Leg-/Nichtleg-Gemenge	Gerste	32	97

Tab. A. 2: Zuordnung der Wetterstationen zu den untersuchten Betrieben.

Betrieb	Niederschlagsstation	Wetterstation
MS 1	Hohenthann (DWD)	Schönbrunn (LfL)
MS 2	Hohenthann (DWD)	Schönbrunn (LfL)
BG 1	Hohenthann (DWD)	Eschenhart (LfL)
BG 2	Hohenthann (DWD)	Schönbrunn (LfL)
MV	Hohenthann (DWD)	Elsendorf (DWD)
ZS	Hohenthann (DWD)	Eschenhart (LfL)
MF	Hohenthann (DWD)	Eschenhart (LfL)
MF_G 1	Hohenthann (DWD)	Schönbrunn (LfL)
MF_G 2	Feistenaich (LfL)	Feistenaich (LfL)
HP	Hohenthann (DWD)	Dietrichsdorf (LfL)

Tab. A. 3: Koeffizienten zur Berechnung des Stickstoffentzugs von Feldfrüchten.

Produkt	TM (%)	N (% i.TM.)	Quelle
Getreide			
Braugerste	86,0	1,60	DüV Anlage 1
Körnermais (Silage)	86,0	1,60	LfL (2014)
Körnermais (trocken)	86,0	1,64	LfL (2014)
Wintergerste	86,0	1,92	DüV Anlage 1
Winterweizen (E)	86,0	2,45	DüV Anlage 1
Winterweizen (A)	86,0	2,28	DüV Anlage 1
Winterweizen (B+C)	86,0	2,10	DüV Anlage 1
Stroh (Weizen, Gerste)	86,0	0,58	DüV Anlage 1
Futterpflanzen			
Ackergras	35,0	2,40	DüV Anlage 1
Getreide GPS	35,0	1,60	DüV Anlage 1
Grassilage 1. Schnitt	35,0	2,89	LfL (2012)
Grassilage 2. Schnitt	35,0	2,77	LfL (2012)
Grassilage 3. Schnitt	35,0	2,71	LfL (2012)
Grassilage 4. + 5. Schnitt	35,0	2,97	LfL (2012)
Heu	86,0	1,84	LfL (2012)
Kleegrassilage (Kleeanteil <60%)	35,0	2,65	DüV Anlage 1
Silomais	32,0	1,34	LfL (2012)
Sonstige Früchte			
Grünroggen	16,0	2,38	LfL (2012)
Gurken (Einlege-)	6,0	2,83	DüV Anlage 1
Pappel dreijährig	100,0	0,58	Vetter (2010)
Riesenweizengras	32,0	1,20	Heinz (2013)
Winterraps	91,0	3,68	DüV Anlage 1
Zuckerrüben	23,0	0,78	DüV Anlage 1
Hopfen			
Dolden	90,0	3,18	Portner (2012)
Restpflanze	21,5	2,60	Portner (2012)

Tab. A. 4: HP/NP-Verhältnis und TS-Gehalt der Nebenprodukte.

Fruchtart	NP-TM (%)	HP/NP
Gurken	15	0,40
Körnermais	86	1,25
Sommergerste (Brau)	86	1,43
Sommerweizen	86	1,25
Wintergerste	86	1,25
Winterraps	86	0,63
Winterweizen	86	1,25
Zuckerrüben	15	1,43

Tab. A. 5: Koeffizienten zur Berechnung der N₂-Fixierung von Feldfrüchten (REPRO-Stammdaten).

Fruchtart	N _{dfa}	r _{TM}	r _N
Hauptfrüchte			
Dauerstilllegung	0,80	0,90	0,60
Klee gras	0,90	0,75	0,70
Wiese, extensiv	0,80	0,90	0,60
Wiese, intensiv	0,80	0,85	0,60
Zwischenfrüchte			
Klee	0,60	0,60	0,70
Leg./Nichtleg.-Gemenge	0,60	1,00	0,60

Tab. A. 6: Stickstoffverwertungsraten in Abhängigkeit der Ackerzahl zur Berechnung des Humusbedarfs humuszehrender Fruchtarten (REPRO-Stammdaten).

Ackerzahl	N-Verwertungsrate (%)
10	45
40	65
70	75
100	85

Tab. A. 7: Maximaler Humusbedarf der humuszehrenden Feldfrüchte in Humuseinheiten (REPRO-Stammdaten).

Fruchtart	HE ha ⁻¹
Getreide-GPS	-1,05
Körnermais	-1,05
Silomais	-2,03
Winterraps	-1,05
Winter-/Sommergerste	-1,05
Winter-/Sommerweizen	-1,05
Zuckerrüben	-3,45

Tab. A. 8: Humusmehrerleistung und Basisertrag der humusmehrenden Feldfrüchte (REPRO-Stammdaten).

Fruchtart	Basis- TM-Ertrag (dt ha ⁻¹)	HE ha ⁻¹
Hauptfrüchte		
Ackergras	120	1,05
Klee gras 1. Hauptnutzungsjahr	120	2,10
Klee gras 2. Hauptnutzungsjahr	120	1,80
Dauerstilllegung	45	0,75
Zwischenfrüchte		
Klee	25	0,30
Leg-/Nichtleg-Gemenge	25	0,20
Ölrettich	25	0,15
Phacelia	25	0,15
Senf	25	0,15

Tab. A. 9: Humusersatzleistung organischer Dünger (REPRO-Stammdaten).

Fruchtart	HEt ⁻¹ TM
Wirtschaftsdünger	
Biogasgülle	0,19
Rindermist (Rottemist)	0,28
Rindergülle	0,20
Schweinegülle	0,18
Stroh	
Körnermais	0,16
Winterraps	0,12
Winter-/Sommergerste	0,14
Winter-/Sommerweizen	0,16
Gründüngung	
Gurken-Restpflanze	0,075
Rebhäcksel	0,12
Stilllegung	0,10
Zuckerrübenblatt	0,075
Zwischenfrucht	0,10

Tab. A. 10: Koeffizienten zur Berechnung der Stickstoffmenge im Zukauffutter.

Produkt	TM (%)	N (% i.TM.)	Quelle
Getreide			
Körnermais (Silage)	86,0	1,60	LfL (2014)
Körnermais (trocken)	86,0	1,64	LfL (2014)
Wintergerste	86,0	1,92	DüV Anlage 1
Winterweizen (B+C)	86,0	2,10	DüV Anlage 1
Eiweißfutter			
Rapsextraktionsschrot	88,0	6,28	LfL (2014)
Sojaextraktionsschrot (44% RP)	88,0	8,00	LfL (2014)
Sojaextraktionsschrot (48% RP)	88,0	8,73	LfL (2014)
Brauerei- und Brennereiprodukte			
Bierhefe, frisch	10,0	8,40	LfL (2014)
Biertreber, siliert	24,7	3,98	LfL (2011)
Weizenschlempe ¹	30,0	5,76	LfL (2014)
Rüben- und Nebenprodukte			
Trockenschnitzel	90,6	1,33	LfL (2011)
Melasse (Zuckerrübe)	78,0	2,16	LfL (2011)
Kartoffel- und Nebenprodukte			
Kartoffelschalen, gedämpft	10,8	2,52	LfL (2014)
Molkereiprodukte			
Milchzuckermelasse, RP-arm	22,5	1,71	LfL (2014)
Permeatmolke	5,0	0,64	LfL (2014)
Sauermolke	5,6	2,57	LfL (2014)

Tab. A. 11: N-Gehalt in tierischen Produkten, Tierzukauf und Tierverlusten (DLG 2014).

Produkt	N-Gehalt
	g kg ⁻¹
Schweine	25,60
Rinder (Fleckvieh)	26,00
Milch (3,6% Eiweiß)	5,64

¹ TS-Gehalt angepasst

Tab. A. 12 Koeffizienten zur Berechnung der Ammoniak-Stallverluste.

Tierart	Stallsystem	Ammonium-Anteil (%)	Emissionsfaktor (% des NH ₄ -N)	Quelle
Milchkühe	Laufstall, Gülle	57	19,7	Dämmgen (2010a)
	Tiefstreu	57	19,7	Dämmgen (2010a)
Rinder	Tiefstreu	57	19,7	Dämmgen (2010a)
Mastschweine	Voll- od. Teilspaltenboden	76	30,0	Dämmgen (2010b)
Zuchtsauen mit Ferkel	Spaltenboden	77	34,0	Dämmgen (2010b)
Aufzuchtferkel	Spaltenboden	76	30,0	Rösemann (2011)

Tab. A. 13: Koeffizienten zur Berechnung der Ammoniak-Verluste im Düngerlager.

Tierart	Düngerart	Abdeckung	Ammonium-Anteil (%)	Emissionsfaktor (% des NH ₄ -N)	Quelle
Rind / Biogas	Gülle	Offen	55	15,0	Dämmgen (2010a)
		Feste Abdeckung	55	1,5	Rösemann (2015)
		Natürliche Schwimmdecke	55	4,5	Rösemann (2015)
		Unter Spaltenboden	55	4,5	Rösemann (2015)
	Mist		42	60,0	Dämmgen (2010a)
Schweine	Gülle	Offen	65	15,0	Dämmgen (2010b)
		Feste Abdeckung	65	1,5	Rösemann (2015)
		Natürliche Schwimmdecke	65	10,5	Rösemann (2015)
		Unter Spaltenboden	65	10,5	Rösemann (2015)

Tab. A. 14: Koeffizienten zur Berechnung der Denitrifikationsverluste (N₂, N₂O und NO) im Düngerlager.

Düngerart	Abdeckung	Emissionsfaktor (% des gesamt-N)	Quelle
Gülle	Offen	0	Rösemann (2015)
	Feste Abdeckung	2,05	Rösemann (2015)
	Natürliche Schwimmdecke	2,05	Rösemann (2015)
	Unter Spaltenboden	0,82	Rösemann (2015)
Mist		4,10	Rösemann (2015)

Tab. A. 15: Koeffizienten zur Berechnung der wirksamen Mineralisierungszeit (Franko 1993).

Feinanteil (Feinschluff, Ton)	P ₀	P ₁	P ₂
6,0	9,0870	3,3541	0,015698
8,0	10,2234	3,1825	0,013250
11,5	14,5547	3,0629	0,003204
15,0	23,0218	2,1824	-0,009797
22,0	23,6263	2,1698	-0,027260
32,0	22,9473	2,0054	-0,032320
44,0	22,9300	1,8676	-0,031780

Tab. A. 16: Koeffizienten zur Berechnung der Ammoniakverluste bei der Ausbringung organischer Dünger.

Düngerart	Ausbringungstermin	Einarbeitung nach	Lufttemperatur (°C)	Verluste (% des NH ₄ -N)
Biogasgärrest	Getreide – März	Keine	5	30
	Maissaat – April	4 h	9	18
	Hopfen – Juli	4 h (2/3 d. Fläche)	20	50
	Getreidestoppel – August	4 h	18	36
	Maisstoppel – Oktober	4 h	10	18
Rindergülle	Getreide – März	Keine	5	30
	Maissaat – April	4 h	9	18
	Getreidestoppel – August	4 h	18	36
	Maisstoppel – Oktober	4 h	10	18
	Grünland – März	Keine	5	36
	Grünland – Juni	Keine	17	60
	Grünland – Oktober	Keine	10	50
Schweinegülle	Getreide – März	Keine	5	12
	Maissaat – April	4 h	9	6
	Hopfen – Juli	4 h (2/3 d. Fläche)	20	30
	Getreidestoppel – August	4 h	18	24
	Maisstoppel – Oktober	4 h	10	6

Tab. A. 17: Koeffizienten zur Berechnung der Ammoniakverluste bei der Ausbringung mineralischer Dünger.

Düngerart	Verluste (% des Gesamt-N)
Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung	10
Harnstoff	10
Kalkammonsalpeter	3
NK-, NP- und NPK-Dünger	3
Sonstige N-Dünger	3

Tab. A. 18: Winter- und Sommerniederschläge der den Untersuchungsbetrieben am nächsten gelegenen Niederschlagsstationen.

Station		2011	2012	2013	2014	2015	2016
Hohenthann (DWD)	ND _{wi}	294	316	327	242	288	313
	ND _v	468	485	482	445	269	506
Feistenaich (LfL)	ND _{wi}	211	278	252	207	246	280
	ND _v	474	505	511	405	331	473

Tab. A. 19: Evapotranspiration nach Wendling der den Untersuchungsbetrieben am nächsten gelegenen Wetterstationen.

Wetterstation	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Dietrichsdorf (LfL)	814	784	736	776	813	793
Elsendorf-Horneck (DWD)	692	677	626	633	639	598
Eschenhart (LfL)	691	675	624	630	634	595
Feistenaich (LfL)	796	780	735	757	807	767
Schönbrunn (LfL)	786	751	723	749	782	761

Tab. A. 20a: Schläge mit Ackerzahlen und Zeitraum der N_{min} Probenahme.

Betrieb	Schlag	Ertrags- zone	Acker- zahl	Bodenart (Boden- schätzung)	Beginn Probenahme	Ende Probenahme
MS 1	Schlag 1	HE	71	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	59	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
	Schlag 2	HE	65	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	47	LT	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
	Schlag 3	HE	76	L	Herbst 2014	Frühjahr 2016
		NE	57	L	Herbst 2014	Frühjahr 2016
MS 2	Schlag 1	HE	59	L	Herbst 2014	Herbst 2016
		NE	46	SL	Herbst 2014	Herbst 2016
	Schlag 2	HE	56	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	42	SL	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
	Schlag 3	HE	54	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	46	SL	Nach Ernte 2014	Herbst 2015
BG 1	Schlag 1	HE	62	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	38	IS	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
	Schlag 2	HE	63	L	Herbst 2014	Herbst 2016
		NE	49	L	Herbst 2014	Herbst 2016
	Schlag 3	HE	58	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2015
		NE	40	IS	Nach Ernte 2014	Frühjahr 2016
BG 2	Schlag 1	HE	66	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	54	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
	Schlag 2	HE	52	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	42	sL	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
	Schlag 3	HE	62	L	Herbst 2014	Herbst 2015
		NE	52	LT	Herbst 2014	Herbst 2015
Schlag 4	HE	65	L	Frühjahr 2015	Herbst 2016	
	NE	64	sL	Frühjahr 2015	Frühjahr 2016	
MV	Schlag 1	HE	59	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	31	IS	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
	Schlag 2	HE	65	L	Herbst 2014	Herbst 2016
		NE	60	L	Herbst 2014	Herbst 2016
	Schlag 3	HE	61	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2015
		NE	37	IS	Nach Ernte 2014	Herbst 2015
ZS	Schlag 1	HE	67	L	Nach Ernte 2015	Herbst 2016
		NE	46	LT	Nach Ernte 2015	Herbst 2016
	Schlag 2	HE	67	L	Nach Ernte 2015	Herbst 2016
		NE	48	sL	Nach Ernte 2015	Herbst 2015
	Schlag 3	HE	58	L	Herbst 2015	Herbst 2016
		NE	44	LT	Herbst 2015	Herbst 2016

Tab. A. 20b: Schläge mit Ackerzahlen und Zeitraum der N_{min} Probenahme.

Betrieb	Schlag	Ertragszone	Ackerzahl	Bodenart (Bodenschätzung)	Beginn Probenahme	Ende Probenahme
MF	Schlag 1-1	HE	68	L	Herbst 2014	Herbst 2016
	Schlag 1-2	HE	68	L	Herbst 2014	Herbst 2015
	Schlag 2	HE	61	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
		NE	45	SL	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
	Schlag 3	HE	70	L	Nach Ernte 2014	Herbst 2016
MF_G 1	Schlag 1	HE	60	L	Herbst 2014	Herbst 2016
		NE	52	LT	Herbst 2014	Herbst 2016
	Schlag 2-1	HE	67	L	Herbst 2014	Herbst 2016
	Schlag 2-2	HE	64	L	Herbst 2014	Herbst 2015
	Schlag 3	HE	70	L	Herbst 2014	Herbst 2016
		NE	64	L	Herbst 2014	Frühjahr 2015
MF_G 2	Schlag 1	HE	65	L	Herbst 2015	Herbst 2016
		NE	54	LT	Herbst 2015	Herbst 2016
	Schlag 2	HE	63	L	Herbst 2015	Herbst 2016
		NE	54	LT	Herbst 2015	Herbst 2016
	Schlag 3	HE	68	L	Herbst 2015	Nach Ernte 2016
HP	Schlag 1	HE	68	L	Nach Ernte 2015	Frühjahr 2016
		NE	50	L	Nach Ernte 2015	Frühjahr 2016
	Schlag 2	HE	61	L	Herbst 2015	Herbst 2016
		NE	47	L	Herbst 2015	Herbst 2016
	Schlag 3	HE	69	L	Herbst 2015	Herbst 2016
	Schlag 4	NE	63	L	Herbst 2015	Herbst 2016

Tab. A. 21: Mittlere Zu- und Abschläge zur Sickerwasserbildung [$mm a^{-1}$] pro Prozent Hangneigung in Abhängigkeit von Hangposition und Bodenart.

Hangposition	Sand (70 mm nFK _{We})	Lehm (150 mm nFK _{We})	Schluff (240 mm nFK _{We})
Nordhang	2,3	2,7	3,0
Südhang	-2,0	-2,2	-2,4
NO/NW-Hänge	1,7	1,8	1,7
SO/SW-Hänge	-1,3	-1,4	-1,3

Tab. A. 22: Im Betrieb MS 1 eingesetzte Futtermittel mit Inhaltsstoffen; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Futtermittel	Herkunft	Menge (t)	TS-Gehalt (%)	Anteil (%)	N-Gehalt (% in TM)
Körnermais	Eigenerzeugung	418	86,0	23,1	1,60
Winterweizen	Eigenerzeugung	405	86,0	22,2	2,10
Wintergerste	Eigenerzeugung	188	86,0	10,2	1,92
Schlempe	Zukauf	530	30,0	10,1	5,76
Süßmolke	Zukauf	543	22,5	7,8	1,71
Sojaextraktionsschrot	Zukauf	103	88,0	5,8	8,00
Bierhefe	Zukauf	599	15,0	5,7	8,40
Mineralfutter	Zukauf	73	95,0	4,4	2,50
Wintergerste	Zukauf	57	86,0	3,1	1,92
Rapsextraktionsschrot	Zukauf	49	88,0	2,8	6,38
Körnermais	Zukauf	52	86,0	2,7	1,60
Sojaschalen	Zukauf	35	90,0	2,0	2,09

Tab. A. 23: Im Betrieb MS 2 eingesetzte Futtermittel mit Inhaltsstoffen; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Futtermittel	Herkunft	Menge (t)	TS-Gehalt (%)	Anteil (%)	N-Gehalt (% in TM)
Körnermais	Eigenerzeugung	312	86,0	15,1	1,42
Winterweizen	Eigenerzeugung	176	86,0	8,7	2,21
Wintergerste	Eigenerzeugung	83	86,0	4,0	2,18
Körnermais	Zukauf	331	86,0	16,6	1,43
Wintergerste	Zukauf	272	86,0	13,5	2,11
Sojaextraktionsschrot	Zukauf	267	88,0	13,5	8,73
Winterweizen	Zukauf	198	86,0	9,5	2,17
Rapsextraktionsschrot	Zukauf	140	88,0	7,1	6,28
Sauermolke	Zukauf	1.751	5,6	5,6	2,57
Mineralfutter	Zukauf	65	95,0	3,6	2,27
Triticale	Zukauf	30	86,0	1,5	2,09
Melasse	Zukauf	15	78,0	0,6	2,16
Winterroggen	Zukauf	9	86,0	0,5	1,74
Permeatmolke	Zukauf	33	5,0	0,1	0,64

Tab. A. 24: Im Betrieb BG eingesetzte Futtermittel mit Inhaltsstoffen; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Futtermittel	Herkunft	Menge (t)	TS-Gehalt (%)	Anteil (%)	N-Gehalt (% in TM)
Körnermais	Eigenerzeugung	1.213	86	22,9	1,60
Winterweizen	Eigenerzeugung	1.163	86	22,2	2,01
Wintergerste	Eigenerzeugung	374	86	7,1	1,92
Sojaextraktionsschrot	Zukauf	647	88	12,5	8,23
Kartoffelschalen gedämpft	Zukauf	4.100	14	12,5	2,52
Körnermais	Zukauf	350	86	6,8	1,60
Bierhefe	Zukauf	2.552	8	4,5	8,40
Molke proteinarm	Zukauf	3.232	5	3,5	1,71
Mineralfutter	Zukauf	167	95	3,5	2,02
Wintergerste	Zukauf	146	86	2,7	1,92
Winterweizen	Zukauf	94	86	1,8	2,10

Tab. A. 25: Im Betrieb BG eingesetzte Biogassubstrate mit Inhaltsstoffen; Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Substrat	Herkunft	Menge (t)	TS-Gehalt (%)	Anteil (%)	N-Gehalt (% in TM)
Maissilage	Eigenerzeugung	3.078	32	38,1	1,34
Schweinegülle	Eigenerzeugung	12.078	5	23,4	11,99
Ackergrassilage	Eigenerzeugung	185	36	2,6	2,40
Getreide-GPS	Eigenerzeugung	112	30	1,3	2,12
Grassilage	Eigenerzeugung	64	35	0,9	2,40
Kleegrassilage	Eigenerzeugung	23	35	0,3	2,65
Maissilage	Zukauf	2.172	32	26,9	1,34
Körnermais	Zukauf	109	86	3,6	1,60
Winterroggen	Zukauf	57	86	1,9	1,76
Grassilage	Zukauf	54	35	0,7	2,40
Kartoffelschalen roh	Zukauf	85	11	0,4	1,67

Tab. A. 26: Am Betrieb ZS eingesetzte Futtermittel mit Inhaltsstoffen. Mittel der Jahre 2013 – 2015.

Futtermittel	Herkunft	Menge (t)	TS-Gehalt (%)	Anteil (%)	N-Gehalt (% in TM)
Winterweizen	Eigenerzeugung	101	86,0	9,9	2,20
Wintergerste	Eigenerzeugung	84	86,0	8,2	1,92
Sauenfutter tragend	Zukauf	451	88,4	44,2	2,30
Sauenfutter säugend	Zukauf	96	88,4	9,5	3,12
Ferkel Prestarter	Zukauf	23	88,0	2,3	4,46
Ferkelaufzuchtfutter I	Zukauf	98	88,9	9,8	3,19
Ferkelaufzuchtfutter II	Zukauf	160	89,3	16,1	3,74
Ferkelaufzuchtfutter III	Zukauf	63	88,9	5,9	4,06

Tab. A. 27: Einfluss wichtiger Variablen auf die N_{min} -Vorräte im Herbst bei Zwischenfrüchten. Ergebnisse der Regressionsanalyse. 197 Beobachtungen.

	R ²	b	se b	β	p
Modell	0,40				
Intercept		216,52	17,38		< 0,001
Niederschlag Okt – Probenahme		-0,65	0,09	-0,40	< 0,001
Niederschlag Sep		-0,55	0,10	-0,31	< 0,001
Temperatur Okt		-10,09	1,40	-0,43	< 0,001
Vorfrucht Winterweizen		-16,47	4,01		< 0,001

Tab. A. 28: Einfluss wichtiger Variablen auf die N_{min} -Vorräte im Frühjahr bei Wintergerste nach Winterweizen. Ergebnisse der Regressionsanalyse. 56 Beobachtungen.

	R ²	b	se b	β	p
Modell	0,79				
Intercept		667,34	60,26		< 0,001
Niederschlag Okt – Probenahme		-2,59	0,23	-1,37	< 0,001
Jahr 2016		84,81	6,69		< 0,001
Δ Norg langjährig		0,48	0,11	0,35	< 0,001
N-Düngung Herbst		0,14	0,06	0,19	0,018

2.6. Literatur zu Abschnitt 2.

- Aarnink A, Verstegen M (2007): Nutrition, key factor to reduce environmental load from pig production. *Livestock Science* 109, 194–203.
- Abraham J (2001): Auswirkungen von Standortvariabilitäten auf den Stickstoffhaushalt ackerbaulich genutzter Böden unter Berücksichtigung der Betriebsstruktur, der standortspezifischen Bewirtschaftung und der Witterungsbedingungen. Shaker, Aachen.
- Ad-hoc-AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Schweizerbart, Hannover.
- Albert E, Grunert M (2013): Wirkung einer langjährig differenzierten mineralisch-organischen Düngung auf Ertrag, Humusgehalt, N-Bilanz und Nährstoffgehalte des Bodens. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59, 1073–1098.
- Alcoz MM, Hons FM, Haby VA (1993): Nitrogen-fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil-nitrogen. *Agron. J.* 85, 1198–1203.
- Anglade J, Billen G, Garnier J, Makridis T, Puech T, Tittel C (2015): Nitrogen soil surface balance of organic vs conventional cash crop farming in the Seine watershed. *Agricultural Systems* 139, 82–92.
- Bassanino M, Grignani C, Sacco D, Allisiardi E (2007): Nitrogen balances at the crop and farm-gate scale in livestock farms in Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 122, 282–294.
- Battini F, Agostini A, Boulamanti AK, Giuntoli J, Amaducci S (2014): Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: case study of a dairy farm in the Po Valley. *Sci Total Environ* 481, 196–208.
- Böswirth, T. (2017): Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Energie- und Treibhausgasbilanzierung landwirtschaftlicher Biogassysteme. Dissertation. Technische Universität München.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2014): Futterberechnung für Schweine - LfL-Information.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2016a): Agrarmeteorologie Bayern. www.wetter-by.de.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2016b): Bei Mais die Düngung richtig berechnen. http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/stickstoffduengung_mais_2016.pdf. Accessed 26 March 2017.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2016c): N-Düngung zu Wintergetreide und Winterraps: Mittlere Nmin-Werte in Bayern. http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/stickstoffduengung_winterraps_2016.pdf. Accessed 26 March 2017.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2013) *Übersichtsbodenkarte von Bayern 1:25.000*
- Beaudoin N, Saad JK, van Laethem C, Machet JM, Maucorps J, Mary B (2005): Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111, 292–310.
- Bechtel A (2008): Abschätzung regionaler Nitratreinträge in das Grundwasser unter Verwendung von Nmin-Daten. *Verl. Siedlungswasserwirtschaft, Karlsruhe*.
- Becker KW (1993): Bedingungen und Ausmaß der Denitrifikation als Nitrat-Filter im Wasserkreislauf. In: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (ed) *Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft*
- Blankenau K, Olf H-W, Kuhlmann H (2002): Strategies to Improve the Use Efficiency of Mineral Fertilizer Nitrogen Applied to Winter Wheat. *J Agron Crop Sci* 188, 146–154.

- Børsting CF, Kristensen T, Misciattelli L, Hvelplund T, Weisbjerg MR (2003): Reducing nitrogen surplus from dairy farms. Effects of feeding and management. *Livestock Production Science* 83, 165–178.
- Brennan J, Hackett R, McCabe T, Grant J, Fortune RA, Forristal PD (2014): The effect of tillage system and residue management on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat in a cool Atlantic climate. *Europ J Agronomy* 54, 61–69.
- Buckley C, Wall DP, Moran B, Murphy PNC (2015): Developing the EU Farm Accountancy Data Network to derive indicators around the sustainable use of nitrogen and phosphorus at farm level. *Nutr Cycl Agroecosyst* 102, 319–333.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2016): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2015: Reihe: Daten-Analysen.
- Canh T, Aarnink A, Schutte J, Sutton A, Langhout D, Verstegen M (1998): Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing–finishing pigs. *Livestock Production Science* 56, 181–191.
- Clemens J, Trimborn M, Weiland P, Amon B (2006): Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112, 171–177.
- D’Haene K, Salomez J, Neve S de, Waele J de, Hofman G (2014): Environmental performance of nitrogen fertilizer limits imposed by the EU Nitrates Directive. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 192, 67–79.
- Daatselaar CHG, Reijs JR, Oenema J, Doornwaard GJ, Aarts HFM (2015): Variation in nitrogen use efficiencies on Dutch dairy farms. *J Sci Food Agric* 95, 3055–3058.
- Dalgaard T, Bienkowski JF, Bleeker A, Dragosits U, Drouet JL, Durand P, Frumau A, Hutchings NJ, Kedziora A, Magliulo V, Olesen JE, Theobald MR, Maury O, Akkal N, Cellier P (2012): Farm nitrogen balances in six European landscapes as an indicator for nitrogen losses and basis for improved management. *Biogeosciences* 9, 5303–5321.
- Dalgaard T, Hansen B, Hasler B, Hertel O, Hutchings NJ, Jacobsen BH, Stoumann Jensen L, Kronvang B, Olesen JE, Schjørring JK, Sillebak Kristensen I, Graversgaard M, Termansen M, Vejre H (2014): Policies for agricultural nitrogen management—trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environ Res Lett* 9, 1–16.
- de Ruijter FJ, Boumans, L. J. M., Smit AL, van den Berg M (2007): Nitrate in upper groundwater on farms under tillage as affected by fertilizer use, soil type and groundwater table. *Nutr Cycl Agroecosyst* 77, 155–167.
- DLG (Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft) (2014): Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2016a): Niederlassung Weihenstephan.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2016b): DWD Climate Data Center, Niederlassung Weihenstephan.
- DLG (Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft) (2016): Leitfaden zur nachvollziehbaren Umsetzung stark N-/P-reduzierter Fütterungsverfahren bei Schweinen. DLG-Merkblatt 418.
- Döhler H, Eurich-Menden B, Dämmigen U, Osterburg B, Lüttich M, Bergschmidt A, Berg W, Brunsch R (2002): BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahre 2010.
- Domburg P, Edwards AC, Sinclair AH, Chalmers NA (2000): Assessing nitrogen and phosphorus efficiency at farm and catchment scale using nutrient budgets. *J Sci Food Agric* 80, 1946–1952.

- Dourmad J, Sève B, Latimier P, Boisen S, Fernández J, van der Peet-Schwering, C, Jongbloed A (1999): Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livestock Production Science* 58, 261–264.
- Farr TG, Rosen PA, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shafer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D, Alsdorf D (2007): The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* 45.
- Flessa H, Dörsch P, Beese F (1995): Seasonal variation of N₂O and CH₄ fluxes in differently managed arable soils in southern Germany. *Journal of Geophysical Research* 100, 23115–23124.
- Franko U, Oelschlägel B, Schenk S (1993): Modellierung von Bodenprozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen: UFZ-Bericht 3/1995, Bad Lauchstädt.
- Funk R, Maidl F-X, Fischbeck G (1996): Nitratabbau in tieferen Bodenschichten süddeutscher Ackerstandorte auf Löß. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 159, 207–213.
- Gaudino S, Goia I, Grignani C, Monaco S, Sacco D (2014): Assessing agro-environmental performance of dairy farms in northwest Italy based on aggregated results from indicators. *Journal of Environmental Management* 140, 120–134.
- Godinot O, Leterme P, Vertès F, Faverdin P, Carof M (2015): Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop livestock farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 857–868.
- Gutser R, Ebertseder T, Schraml M, von Tucher S, Schmidhalter U (2010): Stickstoffeffiziente und umweltschonende organische Düngung. In: KTBL (ed) Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden: KTBL/vTI-Tagung vom 8. - 10. Dezember 2010 im Bildungszentrum Kloster Banz in Bad Staffelstein. KTBL, Darmstadt, pp. 31–50.
- Gutser R, Ebertseder T, Weber A, Schraml M, Schmidhalter U (2005): Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *J Plant Nutr Soil Sci* 168, 439–446.
- Hartl W, Erhart E, Bonell M, Wechselberger K, Putz B, Ableidinger C, Albert R, Watzka M, Wanek W (2010): Verluste der oberirdischen Biomasse von abfrostenden Begrünungspflanzen durch Ausgasung vor der Einarbeitung in den Boden: Endbericht.
- Hermesmeyer D, van der Ploeg R (1996): Schätzung der Denitrifikation in landwirtschaftlich genutzten Böden. II. Ergebnisse und Bewertung. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 159, 445–452.
- Hoffmann M, Johnsson H (1999) A method for assessing generalised nitrogen leaching estimates for agricultural land. *Environmental Modelling and Assessment* 4, 35–44.
- Hofman G, van Ruymbekke M, Ossemerct C, Ide G (1981): Residual nitrate nitrogen in sandy loam soils in a moderate marine climate. *Pedologie* 31, 329–346.
- Horlacher D, Marschner H (1990): Schätzrahmen zur Beurteilung von Ammoniakverlusten nach Ausbringung von Rinderflüssigmist. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 153, 107–115.
- Hou Y, Bai Z, Lesschen JP, Staritsky IG, Sikirica N, Ma L, Velthof GL, Oenema O (2016): Feed use and nitrogen excretion of livestock in EU-27. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 218, 232–244.
- Huijsmans J, Hol J, Vermeulen GD (2003): Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. *Atmospheric Environment* 37, 3669–3680.
- Hülsbergen K-J (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker, Aachen.

- Hülsbergen K-J, Maidl F-X, Forster F, Prücklmaier J (2016): Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement: Zwischenbericht, Technische Universität München.
- Humphreys J, O'Connell K, Casey IA (2008): Nitrogen flows and balances in four grassland-based systems of dairy production on a clay-loam soil in a moist temperate climate. *Grass and Forage Science* 63, 467–480.
- Isermann K, Isermann R (1998): Food production and consumption in Germany: N flows and N emissions. *Nutr Cycl Agroecosyst* 52, 289–301.
- Kaiser E-A, Ruser R (2000): Nitrous oxide emissions from arable soils in Germany — An evaluation of six long-term field experiments. *J Plant Nutr Soil Sci* 163, 249–259.
- Kayser M, Benke M, Isselstein J (2011): Little fertilizer response but high N loss risk of maize on a productive organic-sandy soil. *Agron. Sustain. Dev.* 31, 709–718.
- Keller L, Wendland F (2013): Berechnung der potenziellen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser auf Kreisebene für die Bundesrepublik Deutschland: Endbericht.
- Knittel H, Lang H (1992): Auswirkungen der Gülledüngung auf Ertrag, N-Bilanz und Nmin-Verlauf in einem Dauerversuch. *Agribiological research* 45, 257–265.
- Köhler K, Duynisveld WHM, Böttcher J (2006): Nitrogen fertilization and nitrate leaching into groundwater on arable sandy soils. *J Plant Nutr Soil Sci* 169, 185–195.
- Köhne C, Wendland F (1992): Modellgestützte Berechnung des mikrobiellen Nitratabbaus im Boden: Interner Bericht, KFA-STE-IB 1/92, Forschungszentrum Jülich.
- Korsaeth A, Eltun R (2000): Nitrogen mass balances in conventional, integrated and ecological cropping systems and the relationship between balance calculations and nitrogen runoff in an 8-year field experiment in Norway. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 79, 199–214.
- Kroeze C, Aerts R, van Breemen N, van Dam D, van der Hoek K, Hofschreuder P, Hoosbeek M, de Klein J, Kros H, van Oene H, Oenema O, Tietema A, van der Veeren R, de Vries W (2003): Uncertainties in the fate of nitrogen I: An overview of sources of uncertainty illustrated with a Dutch case study. *Nutr Cycl Agroecosyst* (66), 43–69.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2017): Großvieheinheitenrechner 2.1. <http://daten.ktbl.de/gvrechner/>. Accessed 11 January 2017.
- Küstermann B, Christen O, Hülsbergen K-J (2010): Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135, 70–80.
- LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie) (2007): Diffuse Nitrat- und Phosphatbelastung - Ergebnisse der EUWRRL in Niedersachsen: GeoBerichte 2, Hannover.
- LDBV (Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung): Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung, Bodenschätzungskarte.
- LKV (Landeskuratorium der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern e. V.) (2015): Fleischleistungsprüfung in Bayern 2015, München.
- Lang H, Dressel J (1999): Langzeitwirkung der Stickstoffdüngung IOSDV - Standort Limburgerhof (Deutschland): 3. Teil (Zusammenwirken von organischer und mineralischer N-Düngung, N-Nachwirkung). *Archives of Agronomy and Soil Science* 44, 539–561.
- Lassaletta L, Billen G, Grizzetti B, Anglade J, Garnier J (2014): 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: The relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ Res Lett* 9, 105011.

- Le PD, Aarnink AJA, Jongbloed AW, Peet-Schwering, C M C Van der, Ogink NWM, Versteegen MWA (2007): Effects of dietary crude protein level on odour from pig manure. *Animal an international journal of animal bio-science* 1, 734–744.
- Leip A, Britz W, Weiss F, de Vries W (2011): Farm, land, and soil nitrogen budgets for agriculture in Europe calculated with CAPRI. *Environmental Pollution* 159, 3243–3253.
- Leithold G, Hülsbergen K-J, Michel D, Schönmeier H (1997): Humusbilanzierung - Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. In: Diepenbrock W, Kaltschmitt M, Nieberg H, Reinhardt G (eds) *Umweltverträgliche Pflanzenproduktion: Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen; Fachtagung am 11. und 12. Juli 1996 in Wittenberg ; schriftliche Fassung der Beiträge*. Zeller, Osnabrück.
- Maidl FX, Fischbeck G (1989): Effect of Long-term Application of Farmyard Manure on Growth and Quality of Sugar Beet. *J Agron Crop Sci* 162, 248–255.
- Maidl F-X, Stickse E, Retzer F, Fischbeck G (1998): Effect of Varied N-fertilization on Yield Formation of Winter Wheat under Particular Consideration of Mainstems and Tillers. *J Agron Crop Sci* 180, 15–22.
- Misselbrook TH, Nicholson FA, Chambers BJ (2005): Predicting ammonia losses following the application of livestock manure to land. *Bioresource Technology* 96, 159–168.
- Myrbeck Å, Stenberg M (2014): Changes in N leaching and crop production as a result of measures to reduce N losses to water in a 6-yr crop rotation. *Soil Use Management*.
- Nevens F, Verbruggen I, Reheul D, Hofman G (2006) Farm gate nitrogen surpluses and nitrogen use efficiency of specialized dairy farms in Flanders: Evolution and future goals. *Agricultural Systems* 88, 142–155.
- Ni K, Pacholski A, Gericke D, Kage H (2012): Analysis of ammonia losses after field application of biogas slurries by an empirical model. *J Plant Nutr Soil Sci* 175, 253–264.
- Nieder R, Kersebaum KC, Richter J (1995): Significance of nitrate leaching and long term N immobilization after deepening the plough layers for the N regime of arable soils in N.W. Germany. *Plant Soil* 173, 167–175.
- Nielsen AH, Kristensen IS (2005): Nitrogen and phosphorus surpluses on Danish dairy and pig farms in relation to farm characteristics. *Livestock Production Science* 96, 97–107.
- Oenema J, Burgers S, Verloop K, Hooijboer A, Boumans L, Berge Ht (2010): Multiscale Effects of Management, Environmental Conditions, and Land Use on Nitrate Leaching in Dairy Farms. *J Environ Qual* 39, 2016.
- Oenema J, van Ittersum M, van Keulen H (2012): Improving nitrogen management on grassland on commercial pilot dairy farms in the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 162, 116–126.
- Oenema J, van Keulen H, Schils R, Aarts H (2011): Participatory farm management adaptations to reduce environmental impact on commercial pilot dairy farms in the Netherlands. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 58, 39–48.
- Panse A, Maidl F-X, Dennert J, Müller R, Fischbeck G (1995): Ertragsbildung, Bestandesaufbau und Stickstoffverwertung von Winterweizen bei kombinierter Gülle- und Mineraldüngung. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 158, 221–229.
- Petersen SO (1999): Nitrous Oxide Emissions from Manure and Inorganic Fertilizers Applied to Spring Barley. *J Environ Qual* 28, 1610.
- Pierer M, Amon B, Winiwarter W (2016): Adapting feeding methods for less nitrogen pollution from pig and dairy cattle farming: Abatement costs and uncertainties. *Nutr Cycl Agroecosyst* 104, 201–220.

- Portner J, Brummer A (2016): N_{min}-Untersuchung 2016. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/hopfen_nmin_2016.pdf. Accessed 30 March 2017
- Portner J, Roßbauer G, Bauer M (2012): Nährstoffaufnahme des Hopfens.
- Powell JM, Gourley C, Rotz CA, Weaver DM (2010): Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environmental Science & Policy* 13, 217–228.
- Powell JM, Rotz CA (2015): Measures of nitrogen use efficiency and nitrogen loss from dairy production systems. *J Environ Qual* 44, 336–344.
- Renger M (2002): Sicker- und Fließzeiten von Nitrat aus dem Wurzelraum ins Grundwasser in Abhängigkeit von den Standortbedingungen, insbesondere Boden und Gestein. Akad. für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Renger M, Wessolek G, König F, Swartjes C, Fahrenhorst B, Kaschianian B (1990): Modelle zur Ermittlung und Bewertung von Wasserhaushalt, Stoffdynamik und Schadstoffbelastbarkeit in Abhängigkeit von Klima, Bodeneigenschaften und Nutzung: Bericht, Bonn.
- Rochette P, van Bockove E, Prevos D, Anders DA, Cote D, Bertrand N (2000): Soil carbon and nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 18th consecutive year: II. Nitrous oxide fluxes and mineral nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1396–1403.
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson A, Chapin FS, Lambin EF, Lenton TM, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber HJ, Nykvist B, Wit CA de, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder PK, Constanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell RW, Fabry VJ, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley JA (2009): A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475.
- Rösemann C, Haenel H-D, Dämmgen U, Freibauer A, Wulf S, Eurich-Menden B, Döhler H, Schreiner C, Bauer B, Osterburg B (2015): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2013: Report on methods and data (RMD) submission 2015. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- Ruser R, Flessa H, Schilling R, Beese F, Munch JC (2001): Effect of crop-specific field management and N fertilization on N₂O emissions from a fine-loamy soil. *Nutr Cycl Agroecosyst* 59, 177–191.
- Scheller P (2008): Untersuchungen zum Stickstoff-Überschuss und den Möglichkeiten seiner Verminderung in Futterbaubetrieben mit hohem Grünlandanteil auf Niedermoor. Dissertation, Justus-Liebig-Universität.
- Schmid H, Hülsbergen K-J (2015): Ressourceneffizienz im Pflanzenbau und der Milchviehhaltung - Untersuchungskonzept und erste Ergebnisse. In: Hülsbergen K-J, Rahmann G (eds): Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme - Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben: Forschungsergebnisse 2013 - 2014. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- Schröder J (2005): Revisiting the agronomic benefits of manure: A correct assessment and exploitation of its fertilizer value spares the environment. *Bioresource Technology* 96, 253–261.
- Schröder JJ, van Asperen P, van Dongen G, Wijnands FG (1996): Nutrient surpluses on integrated arable farms. *Europ J Agronomy* 5, 181–191.
- Schroth E (1992): N-Umsatz und potentielle N-Belastungen beim Körnermaisbau in Betrieben des Kraichgaus und der Rheinebene. Dissertation, Universität Hohenheim.
- Schulz R, Makary T, Hubert S, Hartung K, Gruber S, Donath S, Döhler J, Weiss K, Ehrhart E, Claupein W, Piepho H-P, Pekrun C, Müller T (2015): Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany. *The journal of agricultural science* 153, 575–587.

- Schweigert P, Pinter N, van der Ploeg, Rienk R. (2004) Regression analyses of weather effects on the annual concentrations of nitrate in soil and groundwater. *J Plant Nutr Soil Sci* 167(3):309–318
- Sieling K, Brase T, Svib V (2006): Residual effects of different N fertilizer treatments on growth, N uptake and yield of oilseed rape, wheat and barley. *Europ J Agronomy* 25, 40–48.
- Sieling K, Günther-Borstel O, Teebken T, Hanus H (1999): Soil mineral N and N net mineralization during autumn and winter under an oilseed rape - winter wheat - winter barley rotation in different crop management systems 132, 127–137.
- Søgaard H, Sommer S, Hutchings N, Huijsmans J, Bussink D, Nicholson F (2002): Ammonia volatilization from field-applied animal slurry—the ALFAM model. *Atmospheric Environment* 36, 3309–3319.
- Sommer SG, JENSEN LS, Clausen SB, SØGAARD HT (2006): Ammonia volatilization from surface-applied livestock slurry as affected by slurry composition and slurry infiltration depth. *The journal of agricultural science* 144, 229.
- Sylvester-Bradley R, Kindred DR (2009): Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *Journal of experimental botany* 60, 1939–1951.
- Tamminga S (2003): Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production. *Livestock Production Science* 84, 101–111.
- Taube F, Schütte J, Kluß C (2013): Auswirkungen der Berücksichtigung von Gärresten auf den Anfall organischer Dünger in einer novellierten Düngeverordnung - dargestellt am Beispiel Schleswig-Holstein. *Berichte über Landwirtschaft Sonderheft* 219, 1–21.
- Ten Berge HFM, Burgers SLGE, van der Meer HG, Schroder JJ, van der Schoot JR, van Dijk W (2007): Residual inorganic soil nitrogen in grass and maize on sandy soil. *Environmental Pollution* 145, 22–30.
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S (2002): Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677.
- Tuitoek K, Young LG, de Lange C, Kerr BJ (1997): The Effect of Reducing Excess Dietary Amino Acids on Growing-Finishing Pig Performance: An Evaluation of the Ideal Protein Concept. *Journal of Animal Science* 75, 1575–1583.
- UBA (Umweltbundesamt) (2015): Hintergrundbelastungsdaten Stickstoff. <http://gis.uba.de/website/depo1/>. Accessed 02 March 2015.
- UBA (Umweltbundesamt) (2017): Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft und Stickstoffüberschuss. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/landwirtschaft/naehrstoffeintraege-aus-der-landwirtschaft#textpart-1>. Accessed 24 April 2017.
- Valta R (2000): Optimierung der Flüssigmistverwertung im Maisanbau durch verlustfreie Applikation der Gülle und bedarfsgerechte N-Düngungsmassnahmen. *Utz, München*.
- van Kessel C, Clough T, van Groenigen JW (2009): Dissolved organic nitrogen: An over-looked pathway of nitrogen loss from agricultural systems? *J Environ Qual* 38, 393–401.
- van Vuuren AM, Pineiro C, van der Hoek KW, Oenema O (2015): Economics of Low Nitrogen Feeding Strategies. In: Reis S, Howard C, Sutton MA (eds) *Costs of ammonia abatement and the climate co benefits*. Springer, [Place of publication not identified], pp. 35–51.
- Velthof GL, Oudendag D, Witzke HP, Asman WAH, Klimont Z, Oenema O (2009): Integrated assessment of nitrogen losses from agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE. *J Environ Qual* 38, 402–417.

- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) (1997): Methode D 2.1 Bestimmung der Bodenart des Feinbodens mit der Fingerprobe. In: Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (ed) Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungs-methodik (VDLUFA-Methodenbuch): Bd. I Die Untersuchung von Böden, 2nd edn.
- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) (2002): Methode A 6.1.4.1 Bestimmung von mineralischem Stickstoff (Nitrat und Ammonium) in Bodenprofilen (N_{\min} -Labormethode). In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch): Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4th edn. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Wendland M, Offenberger K, Euba M, Heigl L, Schmidt M (2015): N-Düngung zu Wintergerste anhand verschiedener Düngesysteme (DSN, N-Sensor und N-Simulation) mit und ohne organische Düngung.
- Wendland M, Offenberger K, Heigl L, Schmidt M (2016a): Organische und mineralische Düngung zu Winterweizen unter Einbeziehung von DSN, N-Sensoren und N-Simulation: Versuchsergebnisse aus Bayern 2012 bis 2014.
- Wendland M, Offenberger K, Heigl L, Schmidt M (2016b): Unterschiedliche organische Düngemengen zu Silomais unter Einbeziehung von DSN und N-Simulation: Versuchsergebnisse aus Bayern 2012 – 2015.
- Wulf S, Maeting M, Clemens J (2002): Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: I. Ammonia volatilization. *J Environ Qual* 31, 1789–1794.
- Zhang X, Davidson EA, Mauzerall DL, Searchinger TD, Dumas P, Shen Y (2015): Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51–59.
- Zhou M, Zhu B, Brüggemann N, Dannenmann M, Wang Y, Butterbach-Bahl K (2016): Sustaining crop productivity while reducing environmental nitrogen losses in the subtropical wheat-maize cropping systems: A comprehensive case study of nitrogen cycling and balance. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 231, 1–14.
- Zorn W, Schröter H (2010): Wirkung differenzierter organisch-mineralischer Düngung auf Ertrag, N-Bilanz und Humusgehalt im Boden im Dauerdüngungsversuch Bad Salzungen nach 43 Jahren. VDLUFA Schriftenreihe 66, 236–244.

3. Maßnahmen zur Minderung von Nitratausträgen mit dem Schwerpunkt „teilflächenspezifische Stickstoffdüngung“ (Teilprojekt 2)

Josef Prücklmaier, Franz-Xaver Maidl, Kurt-Jürgen Hülsbergen

3.1. Untersuchungsziele und Forschungsansatz in Teilprojekt 2

Die landwirtschaftlichen Flächen des Untersuchungsgebietes haben für bayerische Verhältnisse eine relativ hohe Schlaggröße von teilweise über 8 ha und sind zum Teil sehr heterogen. Bodenübergänge von lehmiger Braunerde bis zu kiesigen Auflagen innerhalb eines Feldes sind keine Seltenheit. Daraus ergeben sich Teilflächen mit unterschiedlichem Ertragspotenzial und unterschiedlicher Stickstoffnachlieferung. Bisher wurden die Schläge einheitlich gedüngt, auch wenn sie deutlich unterschiedliche Bodeneigenschaften und Ertragspotenziale aufweisen. Dies kann zur Über- und Unterversorgung der Pflanzenbestände und geringer N-Effizienz führen. Ein Untersuchungsschwerpunkt war daher die teilflächenspezifische sensorgestützte N-Düngung.

Weitere gravierende Probleme der Stickstoffdüngung in der Untersuchungsregion sind die langjährig hohen Güllegaben sowie die schwer kalkulierbare N-Düngewirkung der Gülle. Aufgrund stark schwankender N-Gehalte der Gülle und der großen Variabilität der Ammoniakverluste bei der Ausbringung in Abhängigkeit von der Gülleapplikationstechnik und der Witterung ergibt sich eine große zeitliche und mengenmäßige Variabilität der N-Wirkung.

Um Möglichkeiten zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen, wurden auf Praxisschlägen Düngeversuche durchgeführt. Die Wirkungen unterschiedlicher N-Düngungsvarianten auf die Ertragsbildung, die Produktqualität (Rohproteingehalte), die N-Aufnahme sowie die N-Salden und die N-Effizienz wurden untersucht. Geprüft wurden unterschiedliche N-Düngerformen (Gülle, Mineral-N), N-Aufwandmengen sowie eine unterschiedliche Verteilung der N-Gaben; die schlageinheitliche Düngung der Landwirte dient als Vergleichsvariante.

Im Jahr 2015 wurde die Zahl der Düngevarianten deutlich erhöht, um genauere Auswertungen durchführen zu können, ob die bestehenden Düngealgorithmen für Wintergerste und Winterweizen auch für Bedingungen mit hohen Mengen organischer Dünger zutreffen bzw. um die Algorithmen gegebenenfalls entsprechend anpassen zu können. Zusätzlich wurden die Düngeversuche in zwei Bereiche mit unterschiedlicher Düngung zu Vegetationsbeginn unterteilt, in einen Bereich mit organischer Düngung und einen Bereich ohne organische Düngung. Damit kann die N-Effizienz der organischen Düngung gezielt analysiert werden.

Das im Jahr 2014 entwickelte und erprobte Schlepper-Sensorsystem kam im Jahr 2015 auf Praxisflächenschlägen im Untersuchungsgebiet zum Einsatz, um gesamte Schläge zu erfassen und die Stickstoffversorgung der Pflanzen teilflächenspezifisch zu analysieren. Auch wurde das Untersuchungsgebiet erheblich vergrößert und die Zahl der mit dem Schlepper-Sensorsystem im Forschungsprojekt untersuchten Flächen deutlich erhöht.

Des Weiteren wurde, um die Leistungsfähigkeit der sensorgestützten teilflächenspezifischen Düngung nach Algorithmus unter Praxisbedingungen zu prüfen, ein Düngevergleich von Landwirt und TUM-Düngesystem angelegt. Dazu wurde ein Feld von einem sehr guten Landwirt in zwei Bereiche geteilt. Eine Hälfte des Schlages wurde betriebsüblich (nach Landwirt), die andere Hälfte des Schlages nach TUM-Sensor-System gedüngt. Die Resultate wurden nach Ende der Vegetation ausgewertet und statistisch verglichen.

3.2. Material und Methoden

3.2.1. Charakterisierung der Versuchsstandorte

Das Untersuchungsgebiet für die Anlage der Feldversuche auf Praxisschlägen umfasst die Gemeinden Hohenthann, Pfeffenhausen und Rottenburg an der Laaber und befindet sich im Donautal im unterbayerischen Hügelland (Roßberg et al. 2007), Landkreis Landshut mit der Gemeinde Hohenthann als Mittelpunkt des Untersuchungsgebietes (48°39'34.2"N, 12°05'34.3"E, 487 m ü. NN).

In den Jahren 2014, 2015 und 2016 wurden die Wirkungen unterschiedlicher Stickstoffdüngewarianten (gestaffelte Mineral-N-Gaben, unterschiedliche Güllegaben), Düngesysteme DSN (Wendland 2012), BEFU (Förster 2013) und sensorgestützte N-Düngung (Spicker 2016, Maidl 2011) bei Wintergerste, Winterweizen und Mais in Parzellenversuchen auf Praxisschlägen untersucht.

Als Versuchsflächen wurden möglichst ebene und homogene Flächen ausgewählt, um die Voraussetzungen für den Einsatz der Parzellentechnik und die Versuchsdurchführung zu erfüllen. Bei der Flächenauswahl wurde zudem die Anfahrtmöglichkeit zu den Versuchspartellen beachtet, um die Pflanzenbestände möglichst wenig zu schädigen und die Landwirte im Arbeitsablauf nicht einzuschränken. Die Versuchsflächen sollten optimal mit Grund- und Mikronährstoffen versorgt sein, damit die Spektralmessungen nicht durch Nährstoffmangelsymptome beeinflusst werden (Masoni 1996). Entsprechend wurden Bodenanalysen auf allen Versuchsschlägen durchgeführt (Tab. 39 bis Tab. 41b). Als Versuchsflächen wurden größere heterogene Schläge ausgewählt, auf denen unter Beachtung der Bodenschätzungskarten Hoch- und Niedrigertragszonen für die Versuchsanlage festgelegt werden konnten.

Je nach Schlag lagen Ackerzahl und nutzbare Feldkapazität in der Hohertragszone zumeist deutlich höher als in der Niedrigertragszone. Auch die N-Speicherfähigkeit ergab zwischen den Ertragszonen ähnliche bzw. leicht höhere Werte in der Hohertragszone. Die Laboruntersuchungen für die Vorräte an P und K ergaben über alle Versuchsschläge in den Jahren ausreichend bis sehr hoch versorgte Schläge in den Gehaltsklassen C bis E.

Tabelle 39: Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte im Jahr 2014, differenziert nach Hoch- und Niedrigertragszonen (¹Bodenschätzung (LDBV); ²LfU, 2013; eigene Messungen)

	WW_2014_1		WW_2014_2		WG_2014_1		WG_2014_2	
	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Ertragszone	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Bodenart ¹	IS	L	SL	L	L	L	LT	L
Ackerzahl ¹	38	67	46	63	58	66	47	71
nFK ² [mm]	150	193	163	192	212	212	192	212
pH	6,9	6,5	5,9	6,2	6,0	6,8	6,1	7,3
P [mg 100 g ⁻¹]	18,9	12,8	10,4	22,6	9,7	12,9	22,2	13,5
K [mg 100 g ⁻¹]	23,6	18,5	21,9	39,3	29,9	13,6	37,3	23,0
C _t [%]	1,29	1,43	1,46	2,35	1,44	1,52	1,56	1,48
N _t [%]	0,10	0,16	0,13	0,21	0,13	0,13	0,12	0,13
N _{hwl} [mg kg ⁻¹]	81	62	54	57	58	52	43	40

¹ Bodenschätzung (LDBV)

² LfU (2013)

Tabelle 40: Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte im Jahr 2015, differenziert nach Hoch- und Niedrigertragszonen (¹Bodenschätzung; ²LfU, 2013; eigene Messungen)

	WW_2015_1		WW_2015_2		WG_2015_1		WG_2015_2		Mais_2015_1		Mais_2015_2	
	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Ertragszone												
Bodenart ¹	sL	L	LT	L	SL	L	SL	L	IS	L	LT	L
Ackerzahl ¹	64	65	52	59	46	63	45	61	38	67	47	71
nFK ² [mm]	212	212	192	193	163	192	212	150	150	193	192	212
pH	6,3	6,7	6,0	6,2	5,9	6,2	6,4	6,6	6,9	6,5	6,1	7,3
P [mg 100 g ⁻¹]	6,0	8,7	4,4	6,7	10,4	22,6	10,0	7,8	18,9	12,8	22,2	13,5
K [mg 100 g ⁻¹]	14,2	14,2	18,2	20,6	21,9	39,3	25,3	19,0	23,6	18,5	37,3	23,0
C _t [%]	1,25	1,20	1,20	1,33	1,46	2,35	1,21	1,26	1,29	1,43	1,56	1,48
N _t [%]	0,11	0,10	0,12	0,11	0,13	0,21	0,10	0,11	0,10	0,16	0,12	0,13
N _{hwl} [mg kg ⁻¹]	67	60	84	79	54	57	56	53	81	62	43	40

¹ Bodenschätzung (LDBV)² LfU (2013)

Tabelle 41a: Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte im Jahr 2016, differenziert nach Hoch- und Niedrigertragszonen (¹Bodenschätzung; ²LfU, 2013; eigene Messungen)

Ertragszone	WW_2016_1		WW_2016_2		WW_2016_3		WW_2016_4		Mais_2016_1		Mais_2016_2	
	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Bodenart ¹	LT	L	L	L	sL	L	sL	L	L	L	LT	L
Ackerzahl ¹	47	71	63	66	43	58	46	68	47	63	46	63
nFK ² [mm]	192	212	212	212	196	196	212	150	212	212	192	192
pH	6,1	7,3	6,4	7,3	7,0	6,5	6,2	6,9	6,5	6,3	7,3	6,5
P [mg 100 g ⁻¹]	22,2	13,5	8,7	13,3	39,1	23,6	8,9	14,3	5,2	11,7	31,7	12,5
K [mg 100 g ⁻¹]	37,3	23,0	17,4	15,7	41,2	34,7	25,6	17,6	14,3	19,7	33,5	21,0
C _t [%]	1,56	1,48	1,35	1,39	2,05	1,80	1,26	1,17	1,16	1,19	1,53	1,33
N _t [%]	0,12	0,13	0,13	0,14	0,18	0,17	0,12	0,12	0,09	0,11	0,13	0,12
N _{hwl} [mg kg ⁻¹]	43	40	67	80	61	54	77	81	69	52	51	77

¹ Bodenschätzung (LDBV)² LfU (2013)

Tabelle 41b: Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte im Jahr 2016, differenziert nach Hoch- und Niedrigertragszonen (¹Bodenschätzung; ²LfU, 2013; eigene Messungen)

Ertragszone	WG_2016_1		WG_2016_2		WG_2016_3		WG_2016_4	
	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Bodenart ¹	L	L	sL	L	LT	L	sL	L
Ackerzahl ¹	60	65	50	59	47	52	48	67
nFK ² [mm]	212	212	163	163	192	196	212	212
pH	6,8	7,1	6,1	7,2	6,7	6,6	6,7	7,0
P [mg 100 g ⁻¹]	10,5	3,3	15,1	9,6	21,2	24,3	23,5	12,9
K [mg 100 g ⁻¹]	18,7	8,0	23,1	14,3	34,8	31,2	24,4	13,4
C _t [%]	1,32	1,24	1,68	1,41	1,95	1,64	1,57	1,52
N _t [%]	0,11	0,12	0,15	0,13	0,17	0,15	0,14	0,14
N _{hwl} [mg kg ⁻¹]	76	61	92	51	69	80	114	75

3.2.2. Klimatische Bedingungen und Witterung im Untersuchungszeitraum

Zur Charakterisierung von Klima und Witterung des Untersuchungsgebietes werden Daten von der nächstgelegenen Wetterstation Landshut (Stations-ID 2831, Daten verfügbar bis 03/2008) und der Wetterstation Landshut-Reithof (Stations-ID 13710, Daten verfügbar ab 04/2008) verwendet (Tab. 42, Tab. 43). Das Untersuchungsgebiet hat eine mittlere Jahrestemperatur von 8,8°C und mittlere Jahresniederschläge von 720 mm. Die durchschnittliche Anzahl der jährlichen Vegetationstage betrug in den letzten Jahrzehnten im Mittel 235 mit 1.635 Sonnenstunden (DWD 2016).

¹ Bodenschätzung (LDBV)

² LfU (2013)

Tab. 42: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] im Versuchszeitraum 2014 bis 2016 sowie das langjährige Temperaturmittel (1981 - 2010) im Untersuchungsgebiet (DWD 2016).

	Versuchsjahr			\bar{x} 1981 - 2010
	2014	2015	2016	
Januar	1,7	1,3	0,8	-0,7
Februar	3,6	-1,2	3,8	0,3
März	7,7	5,5	4,4	4,4
April	10,8	9,3	8,9	8,8
Mai	12,5	13,4	13,3	13,4
Juni	17,6	17,3	17,1	16,5
Juli	18,9	21,7	19,5	18,5
August	16,4	21,8	18,6	18,3
September	14,7	13,8	17,2	13,7
Oktober	11,2	8,5	8,4	9,1
November	5,6	7,4	3,7	3,7
Dezember	2,5	4,9	0,2	0,2
Mittel	10,2	10,3	9,6	8,8

Tab. 43: Monatliche Niederschlagsmengen [mm] im Versuchszeitraum 2014 bis 2016 sowie das langjährige Niederschlagsmittel (1981 - 2010) im Untersuchungsgebiet (DWD 2016)

	Versuchsjahr			\bar{x} 1981 - 2010
	2014	2015	2016	
Januar	35	75	84	41
Februar	10	14	74	31
März	23	37	35	48
April	57	58	34	45
Mai	84	155	159	77
Juni	31	82	89	91
Juli	155	30	82	87
August	92	23	87	81
September	58	43	90	63
Oktober	81	69	33	57
November	36	68	64	52
Dezember	43	13	6	46
Summe	705	667	837	720

Im Vergleich zum langjährigen Mittel ging dem Untersuchungsjahr 2014 ein sehr milder Winter 2013/2014 voraus. Auch das Frühjahr 2014 war durch deutlich höhere Temperaturen als im langjährigen Mittel geprägt, so dass die Vegetation bereits im März mit 22 Vegetationstagen begann. Die Niederschlagsverteilung im Jahr 2014 mit überdurchschnittlich hohen Regenmengen von Mai bis August

war für die Bestandesentwicklung und die Ertragsbildung sehr günstig. Im Vegetationsjahr konnten durch die relativ hohen Temperaturen und das Ausbleiben von Dürreperioden überdurchschnittlich hohe Erträge erzielt werden.

Im Versuchsjahr 2015 entsprachen die Durchschnittstemperaturen und die Länge des Winters etwa dem Mittel der Jahre. Mitte März waren gute Voraussetzungen für den Beginn der Vegetation und die Befahrbarkeit der Flächen gegeben. Die Vegetationszeit war im Jahr 2015 durch hohe Niederschläge bis zum Monat Mai gekennzeichnet, wodurch auch 2015 gute Wintergersten- und Winterweizenerträge möglich waren. Allerdings hatten die sehr hohen Temperaturen und die gleichzeitig deutlich geringeren Niederschläge von Juni bis August, Ertragseinbußen bei der Fruchtart Mais zur Folge.

Das Versuchsjahr 2016 war durch einen milden Winter geprägt. Dennoch war der Vegetationsbeginn erst im April, bedingt durch die niedrigen Tagesmitteltemperaturen. Die Niederschlagsmengen in der Vegetationszeit waren 2016 weit höher als im langjährigen Mittel. Dadurch war im Getreideanbau ein intensiver Pflanzenschutz notwendig, um auf den stetigen Infektionsdruck zu reagieren. Aufgrund der Regenfälle war die Erntezeit von Qualitäts-Winterweizen auf wenige Tage begrenzt, die Fallzahl und das Hektolitergewicht wurden negativ beeinflusst.

3.2.3. Versuchsbeschreibung

Im Untersuchungsgebiet wurden auf Praxisschlägen Düngeversuche angelegt, um einerseits die Wirkungen unterschiedlicher N-Düngungsvarianten auf die Ertragsbildung, die Produktqualität (Rohproteingehalt), die N-Aufnahme sowie die N-Salden und die N-Effizienz zu untersuchen und zum anderen die Düngealgorithmen für die Sensordüngung für Bedingungen mit langjährig hoher organischer Düngung überprüfen und ggf. anpassen zu können. Geprüft wurden unterschiedliche N-Düngerformen (Gülle, Mineral-N), N-Aufwandmengen sowie eine unterschiedliche Verteilung der N-Gaben. In ausgewählten Versuchen kamen die Düngeysteme DSN und BEFU sowie das sensorgestützte TUM-Dünge-system zur Anwendung; die schlageinheitliche Düngung der Landwirte diente als Vergleichsvariante. Zur Weiterentwicklung der Applikationsalgorithmen der Sensordüngung für Standorte mit langjährig hoher organischer Düngung wurden in der Regel zu vier Terminen Pflanzenproben genommen und der Trockenmasseertrag sowie die N-Aufnahme bestimmt.

3.2.3.1. Versuchsbeschreibung und Versuchsanlage 2014

Aufgrund der milden Witterung waren zu Beginn der Untersuchungen (01.03.2014) bei den am Projekt beteiligten Landwirten keine landwirtschaftlichen Flächen zu finden, die nicht bereits organisch (Gülle) und mineralisch (Mineral-N zu Vegetationsbeginn) gedüngt waren.

Die für Anlage der Düngeversuche ausgewählten Flächen wurden unter Verwendung der Bodenschätzungskarte und der Erfahrungen der Landwirte in Ertragszonen (Hoch- und Niedrigertragszonen) eingeteilt (Abb. 20).

In der Hoch- und Niedrigertragszone wurde jeweils ein randomisierter Stickstoffdüngungsversuch mit vierfacher Wiederholung in Doppelparzellen – Teilung in eine Beprobungsparzelle und eine Mähdruschparzelle – angelegt.

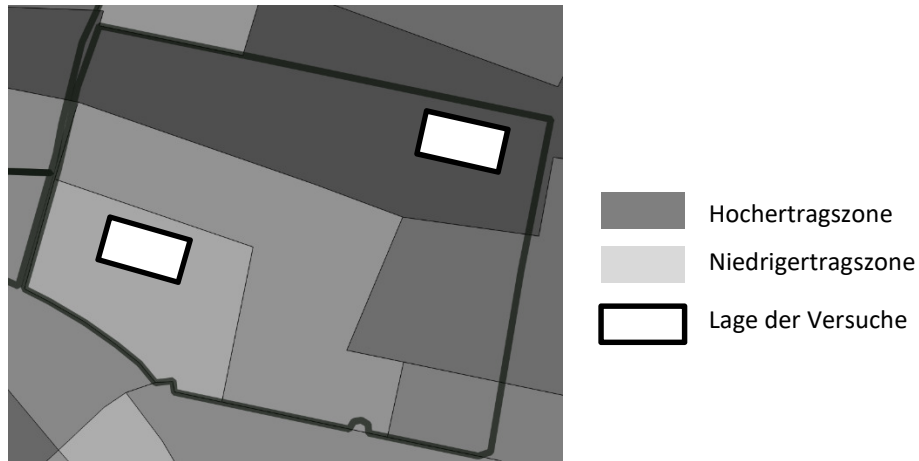


Abb. 20: Beispiel für die Lage der Versuche in der Hoch- und Niedrigertragszone nach Bodenschätzung

Die N-Düngestufen zu Winterweizen und Wintergerste zeigen die Tab. 44 und Tab. 45.

Tab. 44: Düngestufen des N-Steigerungsversuchs bei Winterweizen 2014 (* = durch den Landwirt festgelegt)

*Herbst	*Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-N	Gülle-N	Mineral-N	Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
0	110	55	0	0
0	110	55	30	0
0	110	55	60	0
0	110	55	30	40
0	110	55	90	40

Tab. 45: Düngestufen des N-Steigerungsversuchs bei Wintergerste 2014 (* = durch den Landwirt festgelegt)

*Herbst	*Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-N	Gülle-N	Mineral-N	Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
175	100	55	0	0
175	100	55	90	0
175	100	55	30	40
175	100	55	60	40
175	100	55	90	40
175	100	55	30	70

Die benötigten Parzellenflächen wurden ausgesteckt und durch Spritzung einer Glyphosat-Mischung in einer Größe von 10 x 1,55 m voneinander abgegrenzt. In jeder Ertragszone ergaben sich damit im Weizenversuch 40 Parzellen (bei 5 Varianten mit 4 Wiederholungen in Doppelparzellen) und im Gerstenversuch 48 Parzellen (bei 6 Varianten mit 4 Wiederholungen in Doppelparzellen). Die Stickstoffsteigerungsversuche wurden mit Plabplan (Utz 2014) blockweise randomisiert angelegt (Abb. 21).

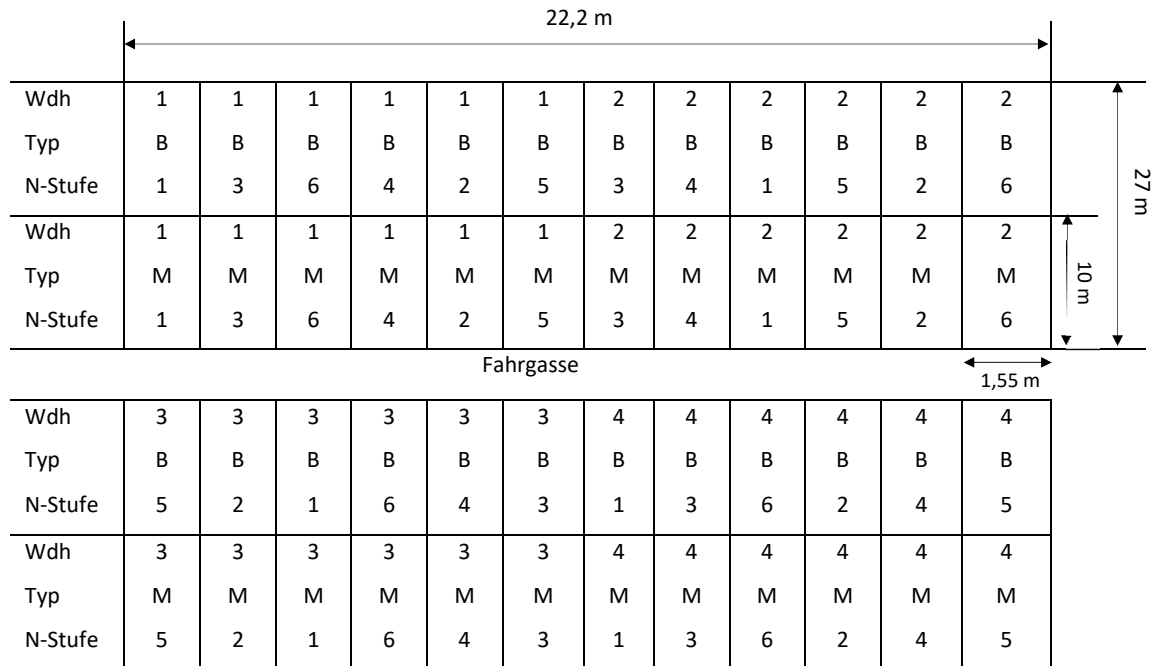


Abb. 21: Anlageschema 2014, Hohertragszone Wintergerste, gleiches Prinzip der Versuchsanlage in Niedrigertragszone und bei Winterweizen, B = Beprobungsparzelle, M = Mähdruschparzelle

3.2.3.2. Versuchsbeschreibung und Versuchsanlage 2015

Für die Versuchsanlage im Jahr 2015 wurden zwei Wintergerstenschläge, zwei Winterweizenschläge und zwei Maisschläge ausgewählt.

Durch die frühzeitige Planung der Versuche konnte vermieden werden, dass die Versuchsflächen vor der Versuchsanlage durch die Landwirte gedüngt wurden. Die Versuche konnten in definierten Ertragszonen nach der Bodenschätzungskarte angelegt werden (Abb. 22).

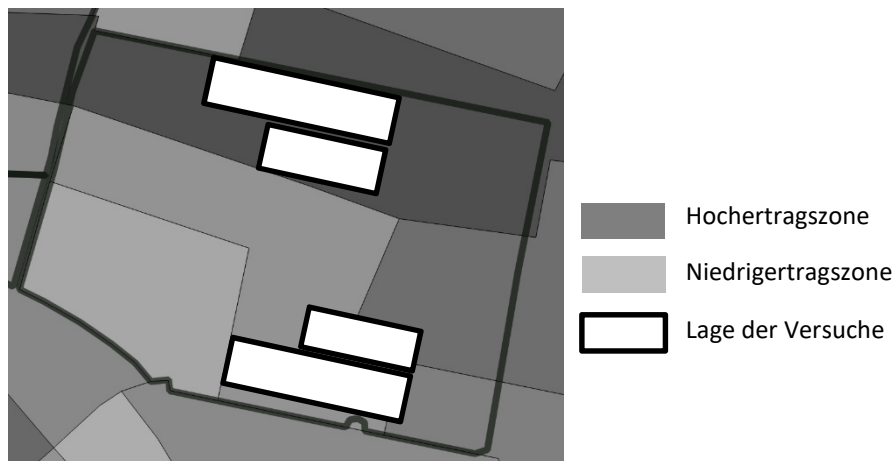


Abb. 22: Beispiel für die Lage der Versuchsbereiche in der Hoch- und Niedrigertragszone nach Bodenschätzungskarte im Jahr 2015, kurzer Block = mit Gülledüngung, langer Block = ohne Gülledüngung

Im Jahr 2015 wurden die Düngeversuche in zwei Teilversuche mit organischer Düngung (Gülle) und ohne organische Düngung zu Vegetationsbeginn unterteilt, um die Wirkung und die N-Effizienz der organischen Düngung in Kombination mit gestaffelten Mineral-N-Gaben zu analysieren.

Die Zahl der Düngevarianten wurde gegenüber dem Jahr 2014 deutlich erhöht. Zusätzlich wurden die Versuchsvarianten um die Varianten „Düngung nach Sensor“ und „Düngung nach Landwirt“ erweitert.

Die N-Düngestufen zu Winterweizen, Wintergerste und Mais zeigen die Tab. 46, Tab. 47 und Tab. 48.

Tab. 46: Dünge­stufen des N-Steigerungsversuches bei Winterweizen 2015 (* = durch den Landwirt festgelegt, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt)

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-Gesamt-N	Mineral-N		Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
0	0		0	0
0	30		30	0
0	30		60	0
0	30		30	40
0	30		60	40
0	30		90	40
0	60		30	0
0	60		60	0
0	60		30	40
0	60		60	40
0	60		90	40
0	60		18 ¹	66 ¹

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-Gesamt-N	*Gülle-Gesamt-N	Mineral-N	Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
0	95	0	0	0
0	95	0	30	0
0	95	0	60	0
0	95	0	30	40
0	95	0	60	40
0	95	0	90	40
0	95	0	26 ¹	77 ¹
0	95	40	35 ²	50 ²

Tab. 47: Dünge­stufen des N-Steigerungsversuches bei Wintergerste 2015 (* = durch den Landwirt festgelegt, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt)

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-Gesamt-N	Mineral-N		Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
97	0		0	0
97	40		90	0
97	40		30	40
97	40		60	40
97	40		90	40
97	40		30	40
97	80		90	0
97	80		30	40
97	80		60	40
97	80		90	40
97	80		30	40
97	80		76 ¹	15 ¹

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-Gesamt-N	*Gülle-Gesamt-N	Mineral-N	Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
97	76	0	0	0
97	76	0	90	0
97	76	0	30	40
97	76	0	60	40
97	76	0	90	40
97	76	0	30	70
97	76	0	57 ¹	0 ¹
97	76	65 ²	60 ²	0 ²

Tab. 48: Dünge­stufen des N-Steigerungsversuches bei Mais 2015 (* = durch den Landwirt festgelegt, ¹ = Düngung nach Landwirt)

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 15	EC 34
Gülle-Gesamt-N	Mineral-N		Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
78	0		0	0
78	70		0	0
78	120		0	0
78	170		0	0
78	70		50	0
78	120		50	0
78	70		100	0
78	120		100	0
78	70		0	50
78	70		0	100

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 15	EC 34
Gülle-Gesamt-N	*Gülle-Gesamt-N	Mineral-N	Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
78	150	0	0	0
78	150	0	50	0
78	150	0	100	0
78	150	0	0	50
78	150	0	0	100
78	150	90	0 ¹	0 ¹

Die Parzellen wurden in Winterweizen und Wintergerste analog zur Versuchsanlage 2014 angelegt. Die Fläche einer Parzelle betrug 10 x 1,55 m. Je nach Düngungsvarianten ergaben sich bei Weizen und Gerste 320 Parzellen (20 Varianten, 4 Wiederholungen, Doppelparzellen, zwei Ertragszonen) je Schlag.

Die Größe einer Maisparzelle betrug 10 m x 8 Maisreihen (Reihenabstand 0,75 m); insgesamt wurden 128 Parzellen (16 Varianten, 4 Wiederholungen, zwei Ertragszonen) je Schlag angelegt. Die Versuche wurden mit Plabplan (Utz 2014) blockweise randomisiert, getrennt nach organischer bzw. anorganischer Düngung angelegt (Abb. 23, Abb. 24).

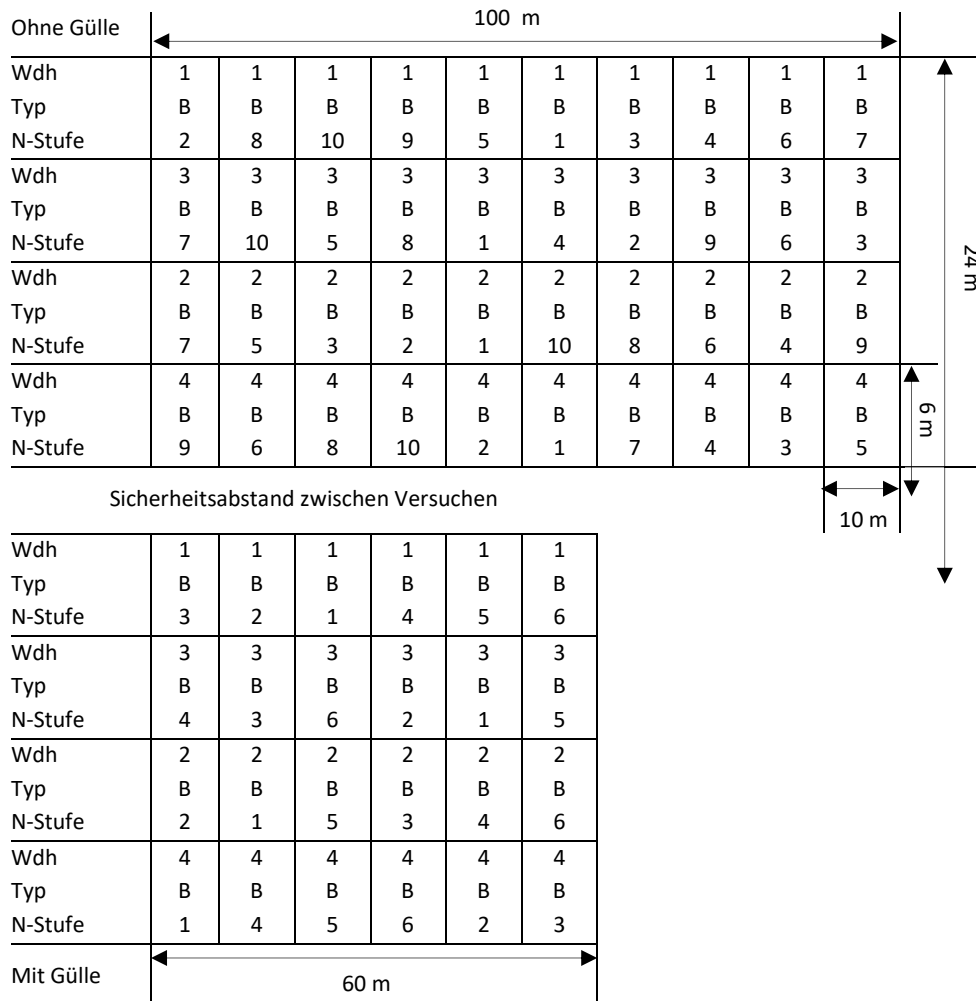


Abb. 24: Anlageschema 2015, Hohertragszone Mais, Niedrigertragszone analog, B = Beprobungsparzelle

3.2.3.3. Versuchsbeschreibung und Versuchsanlage 2016

Der Aufbau der Versuche erfolgte analog zur Versuchsanlage 2015; zusätzlich wurden Varianten der Düngesysteme DSN (Wendland 2012) und BEFU (Förster 2013) eingefügt. Bei den Fruchtarten Wintergerste und Winterweizen wurde der Stickstoffsteigerungsversuch auf jeweils einem Schlag durchgeführt. Um bei der Fruchtart Mais weitere Untersuchungen zu Sensorsystemen durchzuführen und mehr Messdaten zu gewinnen, wurden auf zwei Schlägen entsprechende Versuche angelegt.

Die N-Düngestufen zu Winterweizen, Wintergerste und Mais zeigen die Tab. 49, Tab. 50, Tab. 51.

Tab. 49: Dünge­stufen des N-Steigerungsversuches bei Winterweizen 2016 (* = durch den Landwirt festgelegt, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, ³ = Düngung nach DSN, ⁴ = Düngung nach BEFU)

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-Gesamt-N	Mineral-N		Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
0	0	0	0	0
0	30	30	30	0
0	30	60	60	0
0	30	30	30	40
0	30	60	60	40
0	30	90	90	40
0	60	30	30	0
0	60	60	60	0
0	60	30	30	40
0	60	60	60	40
0	60	90	90	40
0	70	70 ¹	70 ¹	60 ¹
0	75	60 ³	60 ³	60 ³
0	75	30 ⁴	30 ⁴	60 ⁴

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-Gesamt-N	*Gülle-Gesamt-N	Mineral-N	Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
0	90	0	0	0
0	90	0	30	0
0	90	0	60	0
0	90	0	30	40
0	90	0	60	40
0	90	0	90	40
0	90	30	60	40
0	90	0	70 ¹	55 ¹
0	90	45 ³	35 ³	60 ³
0	90	30 ⁴	40 ⁴	50 ⁴
0	90	40 ²	40 ²	30 ²

Tab. 50: Dünge­stufen des N-Steigerungsversuches bei Wintergerste 2016 (* = durch den Landwirt festgelegt, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, ³ = Düngung nach DSN, ⁴ = Düngung nach BEFU)

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-Gesamt-N	Mineral-N		Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
54	0		0	0
54	40		90	0
54	40		30	40
54	40		60	40
54	40		90	40
54	40		30	40
54	80		90	0
54	80		30	40
54	80		60	40
54	80		90	40
54	80		30	40
54	75		0 ¹	50 ¹
54	60 ³		35 ³	60 ³
54	65 ⁴		40 ⁴	50 ⁴

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 32	EC 39
Gülle-Gesamt-N	*Gülle-Gesamt-N	Mineral-N	Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
54	66	0	0	0
54	66	0	90	0
54	66	0	30	40
54	66	0	60	40
54	66	0	90	40
54	66	0	30	70
54	66	30	60	40
54	66	0	25 ¹	60 ¹
54	66	40 ³	20 ³	60 ³
54	66	35 ⁴	60 ⁴	30 ⁴
54	66	45 ²	55 ²	0 ²

Tab. 51: Dünge­stufen des N-Steigerungsversuches bei Mais 2016 (* = durch den Landwirt festgelegt, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, ³ = Düngung nach DSN, ⁴ = Düngung nach BEFU)

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 15	EC 34
Gülle-Gesamt-N	Mineral-N		Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
75	0		0	0
75	70		0	0
75	120		0	0
75	170		0	0
75	70		50	0
75	120		50	0
75	70		100	0
75	120		100	0
75	70		0	50
75	70		0	100
75	50		40 ¹	90 ¹
75	160 ³		0 ³	0 ³
75	95 ⁴		65 ⁴	0 ⁴

*Herbst	Vegetationsbeginn		EC 15	EC 34
Gülle-Gesamt-N	*Gülle-Gesamt-N	Mineral-N	Mineral-N	Mineral-N
[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]
75	150	0	0	0
75	150	0	50	0
75	150	0	70	0
75	150	0	100	0
75	150	0	0	50
75	150	0	0	100
75	150	0	25 ¹	50 ¹
75	150	105 ³	0 ³	0 ³
75	150	20 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
75	150	30 ²	0 ²	60 ²

3.2.4. Messparzellen

Zusätzlich zu den Parzellenversuchen zur Stickstoffsteigerung wurden in den Praxis schlägen sog. Messparzellen mit einer Größe von 20 m x halbe Fahrgassenbreite in den Hoch- und Niedrigertragszonen in fünffacher Wiederholung angelegt. Die Bewirtschaftung der Messparzellen entsprach der des Schlages. Die Festlegung der Ertragszonen erfolgte nach der Bodenschätzungskarte (Abb. 25). Die Anlage von Messparzellen erfolgte aus zwei Gründen. Zum einen dienten sie der Feststellung der Streuung und Heterogenität von Biomassebildung und N-Aufnahme. Zum anderen dienten sie als Vergleichsparzellen zwischen Hand- und Schleppersensorsystem.



Abb. 25: Lage der Messparzellen innerhalb des Schlages nach Bodenschätzungskarte

Im Untersuchungsjahr 2014 wurden in den Messparzellen keine Pflanzenproben entnommen, sondern mit Hilfe eines Sensorsystems der Ertrag und die N-Aufnahme indirekt bestimmt.

In den Untersuchungsjahren 2015 und 2016 wurde analog zu den Versuchspartellen eine Pflanzenprobenentnahme nach EC-Stadien durchgeführt.

3.2.5. Düngung der Versuche

Die Düngung der Versuchspartellen erfolgte zu den in den Tab. 49, 50 und 51 aufgeführten EC-Stadien. Für die erste Düngegabe wurde Ammoniumsulfatsalpeter (ASS, 26 % N, 15 % S) verwendet, um die Bestände ausreichend mit Schwefel zu versorgen und somit einen Mangel auszuschließen. Für die weiteren Düngegaben wurde Kalkammonsalpeter (KAS, 27 % N) verwendet. Der Mineraldünger wurde innerhalb des Versuches mit einem Partellen-Kastendüngerstreuer (Fiona) ausgebracht (Spicker 2016, Limbrunner & Maidl 2009).

3.2.6. Beprobung der Versuche

In den Winterweizen- und Wintergerstenversuchen wurden zu EC 30, EC 32, EC 39, EC 49, EC 65, EC 92 in einem Teil der Doppelparzellen Biomasseschnitte durchgeführt. Dazu wurden in den Schnittparzellen zu jedem Termin jeweils sechs Reihen mit je einer Länge von 1,55 m entnommen. Die Schnitte erfolgten bodennah mit einem Abstand von wenigen cm mit handelsüblichen Akku-Rasenkantenschere. Zeitgleich zu den Pflanzenschnittterminen erfolgte die Sensormessung im anderen Teil der Doppelparzelle, der Mähdruschparzelle bzw. Messparzelle. Die Sensorwerte ergeben sich als Mittelwert aus sieben Messungen pro Parzelle. Auf den Messparzellen wurden ebenfalls zum gleichen Termin die Sensormessungen und Pflanzenschnitte durchgeführt.

In den Maisversuchen wurden zu EC 15, EC 34, EC 50, EC 70 (Silomaisreife), EC 92 (Körnermaisreife) Biomasseschnitte in jeder Parzelle durchgeführt. Mit Astscheren wurden bis EC 34 18 Pflanzen pro Parzelle gewonnen und zu den späteren Zeitpunkten 12 Pflanzen pro Parzelle. Zur Körnermaisreife wurden von 18 Pflanzen je Parzelle die Kolben geerntet und gedroschen.

3.2.7. Sensorsysteme

In den Versuchen wurden folgende Sensorsysteme verwendet:

- Handy Spec (Tec 5): Handgetragen, multispektraler Sensorkopf (360 nm – 900 nm),
- Compact Spec (Tec 5): Schleppergetragen, multispektraler Sensorkopf (360 nm – 900 nm).

Die Sensormessungen erfolgten in den Versuchs- und Messparzellen mit einem handgetragenen Gerät (Handy Spec, Tec 5). Diese Technik ist für Parzellenversuche sehr gut geeignet und wurde in den drei Versuchsjahren verwendet.

Um Gesamtschlaganalysen in verschiedenen Pflanzenbeständen durchzuführen, wurde ein neues schleppergetragenes Sensorsystem gebaut (Compact Spec, Tec5, Abb. 26). Dieses System kam ab Frühjahr 2015 im Untersuchungsgebiet auf verschiedenen Praxisschlägen zum Einsatz. Darunter waren auch die Schläge, auf denen sog. Messparzellen angelegt waren, um so einen Vergleich des schleppergetragenen Sensorsystems mit dem bewährten Handsystem zu erhalten.

3.2.7.1. Sensorvergleich Schleppergerät / Handgerät

Um die beiden Sensorsysteme (hand- bzw. schleppergetragen) vergleichen zu können, wurden im Jahr 2014 drei N-Steigerungsversuche mit den Fruchtarten Ackersenf, Sommerhafer und Ölrettich mit vierfacher Wiederholung durchgeführt. Es wurden diese Kulturen gewählt, da das schleppergetragene System erst ab August verfügbar war. Jeder Versuch wurde randomisiert angelegt. Die Mineral-N-Stufen waren 0 kg ha^{-1} , 30 kg ha^{-1} , 60 kg ha^{-1} und 90 kg ha^{-1} .

Die Messköpfe des Schleppersystems sind an einem Ausleger montiert und befinden sich etwa 3 m links bzw. rechts vom Schlepper (Abb. 26). In der Mitte des Schlepper-Sensor-Systems befindet sich ein Referenzkanal, der die Sonneneinstrahlung erfasst. Eine Messfrequenz von bis zu 10 Messungen pro Sekunde kann eingestellt werden. Im Regelfall wurde mit einer Frequenz von 1 Hz gemessen. Zusätzlich werden zu jedem Sensorwert die GPS-Koordinaten abgespeichert, wodurch jede Messung geostatistisch dargestellt und ausgewertet werden kann.

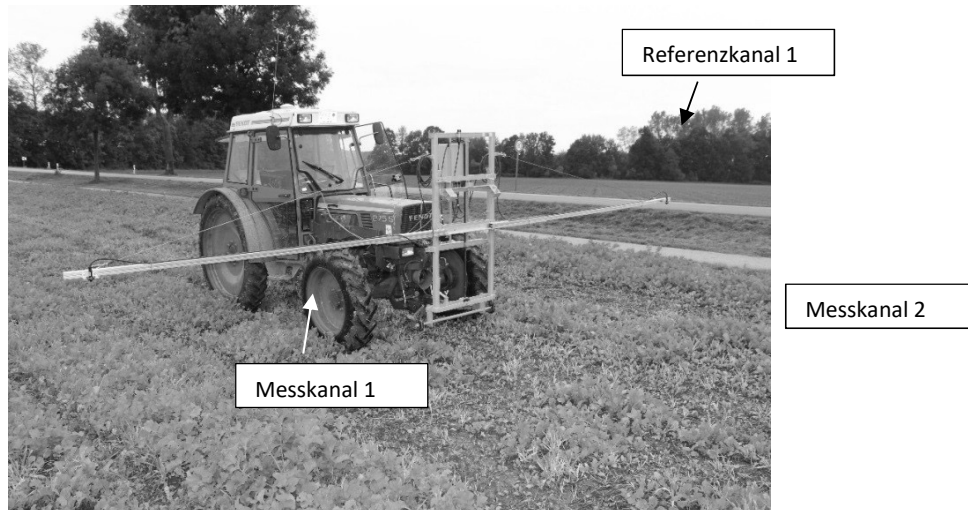


Abb. 26: Multispektrales schleppergetragenes Sensorsystem Tec 5

Die spektralen Vergleichsmessungen zwischen dem Hand- und Schleppersystem wurden mehrfach durchgeführt; sie erfolgten zeitgleich bzw. in sehr enger Abfolge. Um einen möglichen Unterschied der beiden Systeme bzgl. des Sonnenstandes und der Bewölkung zu prüfen, wurde von 8 Uhr bis 18 Uhr im zweistündigen Rhythmus die gesamte Versuchsanlage spektral gemessen. Um die Wiederholbarkeit der Messung zu überprüfen, wurde ein Großteil der Parzellen mehrmals täglich in zehnfacher Wiederholung gemessen. Dadurch konnten Schwankungen innerhalb des Sensorsystems erkannt werden.

3.2.7.2. Schlepper-Sensormessungen

Das Schlepper-Sensorsystem kam in den Jahren 2015 und 2016 auf den Versuchsschlägen im Projektgebiet zum Einsatz. Dabei wurde im selben EC-Stadium wie mit dem Handgerät gemessen, sodass die Messwerte in den angelegten Messparzellen verglichen und evtl. Korrekturen durchgeführt werden konnten.

Das Sensorsystem wurde mit einem hochleistungsfähigen Glonass GPS-Gerät (Trimble 2014) ausgestattet. Dadurch konnte die Genauigkeit der Messpunkte zu den GPS-Koordinaten auf unter 15 cm verbessert werden. Somit konnten teilschlagspezifische Karten erzeugt werden, die die N-Aufnahme im jeweiligen EC Stadium zeigen.

Außerdem wurde in den Jahren 2015 und 2016 ein Vergleich des TUM-Düngesystems mit einer betriebsüblichen Düngung auf Winterweizenschlägen durchgeführt. Nach der Sensormessung wurde eine teilschlagspezifische Düngeempfehlung erstellt, wobei der Weizen-Düngealgorithmus (Maidl 2011) angewendet wurde. Die Datenvisualisierung mit entsprechender Düngeempfehlung in Form einer Karte erfolgte durch das Geoinformationssystem Q-Gis (QGis 2015).

3.2.8. Laboranalysen

3.2.8.1. Bodenanalysen

Zur Charakterisierung der Untersuchungsstandorte wurden bodenchemische Analysen durchgeführt. Um den Kalkzustand der Böden zu ermitteln, wurde der pH-Wert in einer CaCl_2 Lösung (VDLUFA 2016) auf jedem Versuchsschlag in allen drei Versuchsjahren gemessen.

Um die Nährstoffversorgung der Ackerkrume einschätzen zu können, wurden Phosphat- und Kaliumgehalte im CAL-Extrakt gemessen (VDLUFA 1991).

Die Messung des Kohlenstoffvorrates als heißwasserlöslicher Kohlenstoff (VDLUFA 2004) und organischer Kohlenstoff (VDLUFA 2016) dient als Indikator der Bodenfruchtbarkeit.

Als besonders wichtiger Parameter zur Ermittlung der im Frühjahr verfügbaren Stickstoffmenge auf den Versuchsfeldern wurde der N_{\min} -Gehalt gemessen (VDLUFA 2002). Diese N-Menge war eine Voraussetzung, um nach den angewendeten Düngesystemen die benötigten N-Düngegaben im Vegetationsjahr ermitteln zu können.

3.2.8.2. Pflanzenanalysen

Die Messungen der Gesamt-N- bzw. Rohproteingehalte erfolgte nach jedem Biomasseschnitt und nach der Ertragsbestimmung (durch Parzellenmähdrescher) anhand von Teilproben. Für die Fruchtarten Wintergerste und Winterweizen konnte der N-Gehalt durch NIRS-Analyse (XDS, FOSS) und hinterlegten Kalibrationskurven ermittelt werden. Für die Fruchtart Mais wurden die Gesamt-N-Gehalte mit einem Elementaranalysator (Vario Max, ELEMENTAR) gemessen (VDLUFA 2004).

3.2.9 Statistische Auswertungen

Die Dokumentation der gewonnenen Daten und die Erstellung der Tabellen erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel. Sämtliche statistische Auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm R (Rgui 2014) durchgeführt. Die Berechnung der dargestellten Regressionen, der Bestimmtheitsmaße sowie die varianzanalytischen Untersuchungen erfolgten mit R, die anschließende bildliche bzw. tabellarische Darstellung in Excel.

Die grundlegende Auswertung erfolgte durch Bildung des Mittelwertes und der Standardabweichung innerhalb der Wiederholungen. Als statistisches Werkzeug wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung angewendet mit dem Faktor N-Düngestufe und den abhängigen Variablen Körnertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz. Zur Sicherstellung der Durchführbarkeit einer Varianzanalyse wurde auf Normalverteilung geprüft und ein Shapiro-Wilk-Test angewendet.

In den aufgeführten Tabellen wird die Signifikanz bei $p < 0,05$ durch unterschiedliche Buchstaben dargestellt.

3.3. Ergebnisse von Teilprojekt 2

3.3.1. Stickstoffdüngerversuche bei Winterweizen

3.3.1.1. Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2014

Winterweizen-Düngungsversuch WW_2014_1

Der Versuchsschlag WW_2014_1 war zu Versuchsbeginn bereits vom Landwirt einheitlich mit 110 kg ha⁻¹ Gülle-N im Frühjahr und 55 kg ha⁻¹ Mineral-N im Frühjahr zu Vegetationsbeginn gedüngt. Eine Herbst-Güllegabe fand auf diesem Schlag nicht statt. Somit waren zu Versuchsbeginn auf allen Versuchspartellen bereits 165 kg ha⁻¹ Stickstoff ausgebracht. Die weiteren Düngergaben zu EC 32 und EC 39 wurden im Versuch variiert (0 bis 130 kg ha⁻¹ N, Tab. 52).

In allen nachfolgenden Auswertungen entspricht der N-Entzug der im Korn gebundenen N-Menge⁶⁶; der N-Entzug im Stroh wird nicht dargestellt. Als Referenzvariante zu den Düngungsvarianten zur Ermittlung der N-Effizienz dient die zu EC 32 und EC 39 ungedüngte Variante.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Hohertragszone

In der Hohertragszone (schluffiger Boden, Ackerzahl > 60) des Schlages lagen die Weizenerträge auf einem hohen Niveau⁶⁷. In der Referenzvariante wurden 127,3 dt ha⁻¹ erreicht. Durch eine Düngung zu EC 32 / EC 39 wurde der Ertrag auf max. 144,7 dt ha⁻¹ gesteigert (signifikanter Ertragsanstieg ab N 3).

Tab. 52: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2014, Hohertragszone, Herbst = 0 kg ha⁻¹, WW_2014_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
N 1	110	55	0	0	127,3 a	8,9 a	172,9 a	-7,9 a	
N 2	110	55	30	0	134,7 ab	9,0 a	184,7 ab	10,3 a	39,4 a
N 3	110	55	60	0	140,3 bc	10,1 ab	214,7 b	10,3 a	69,6 b
N 4	110	55	30	40	140,3 bc	10,6 b	224,1 b	10,9 a	73,1 b
N 5	110	55	90	40	144,7 c	12,6 c	275,0 c	20,0 a	78,5 b

Zusätzliche Mineral-N-Düngergaben (gegenüber der Referenzvariante N 1) steigerten in der Hohertragszone die Proteingehalte signifikant von 9 % bis 12,6 %. Die höchsten Proteingehalte (Nahrungsweizen-Qualität) wurden in der höchstgedüngten Variante (N 5) erzielt. Der N-Entzug betrug in der Referenzvariante 173 kg ha⁻¹, in der Variante N 5 275 kg ha⁻¹; bei einer zusätzlichen Mineral-N-Zufuhr von 130 kg ha⁻¹ (N 5) entspricht dies einer N-Effizienz von 78,5 % (bezogen auf die N-Gaben zu EC 32 /

⁶⁶ Die Definition der N-Effizienz ist in Teilprojekt 2 enger gefasst als in Teilprojekt 1 (siehe Gleichung 2). Es geht in den Versuchen um die N-Effizienz der Düngung und in TP 1 um die N-Effizienz im gesamten System.

⁶⁷ Es ist darauf hinzuweisen, dass die Partellenerträge wegen der auftretenden Randeffekte ca. 15 % erhöht sind gegenüber den Erträgen eines Schlages (unter sonst gleichen Bedingungen).

EC 39). Unter den Versuchsbedingungen (im geprüften N-Düngebereich) stieg die N-Effizienz mit steigenden N-Gaben (von N2 zu N3 signifikant). Die in der Hohertragszone ermittelten N-Salden der Varianten N2 bis N 5 lagen mit 10 bis 20 kg ha⁻¹ sehr niedrig; für die Referenzvariante wurde sogar ein negativer N-Saldo (-7,9 kg ha⁻¹) ermittelt (kein signifikanter Unterschied, Tab. 52).

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Niedrigertragszone

In der Niedrigertragszone (sandig-kiesige Böden, Ackerzahl < 30) betrug der gemessene Ertrag der Referenzvariante (N 1) 86 dt ha⁻¹ (68 % von HE⁶⁸). Durch eine N-Düngung zu EC 32 / EC 39 wurde der Ertrag bis maximal 108 dt ha⁻¹ (75 % von HE) gesteigert (signifikante Ertragsdifferenz ab N 2). Bereits in der Stufe N 2 (30 kg ha⁻¹ Mineral-N zu EC 32) wurde der Höchstertrag von 100 dt ha⁻¹ erreicht; weitere N-Gaben erhöhten den Ertrag nicht signifikant. Allerdings stiegen die N-Entzüge bis auf 191 kg ha⁻¹ (70 % von HE) in der höchstgedüngten Variante.

Tab. 53: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. N Steigerungsversuch, Hohenthann, 2014, Niedrigertragszone, Herbst = 0 kg ha⁻¹, WW_2014_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
N 1	110	55	0	0	86,0 a	7,9 a	103,0 a	62,0 a	
N 2	110	55	30	0	99,6 b	8,2 a	123,6 a	71,4 a	68,7 a
N 3	110	55	60	0	106,1 b	9,1 ab	146,8 b	78,2 a	72,9 a
N 4	110	55	30	40	102,1 b	10,0 b	155,1 b	79,9 a	74,3 a
N 5	110	55	90	40	107,9 b	11,8 c	191,3 c	103,7 b	67,9 a

Die N-Effizienz in der Niedrigertragszone lag im Bereich von 68 bis 74 % (kein sign. Unterschied). In der Variante N 4 wurde die höchste Effizienz bei einem N-Entzug von 155 kg ha⁻¹ erreicht. Die ermittelten Rohproteingehalte betragen höchstens 11,8 % (N 5) und lagen unter den Anforderungen für Qualitätsweizen. Die N-Salden im Niedrigertragsbereich waren auf relativ hohem Niveau (62 bis 104 kg ha⁻¹) (Tab. 53) und lagen somit ein mehrfaches höher als im Hohertragsbereich (vgl. Tab. 52). Somit ist auf diesen Flächen mit erhöhten N-Verlusten und Nitratausträgen zu rechnen.

Die experimentellen Ergebnisse zum Winterweizen im Jahr 2014 belegen deutlich den Einfluss der unterschiedlichen Bodenqualität (Bodentextur, Ackerzahl, nutzbare Feldkapazität; vgl. Tab. 39) auf die Ertragsbildung, die Produktqualität und die Stickstoffverlustpotenziale.

Bei hohen N-Gaben zu Vegetationsbeginn (in diesem Versuch 110 kg ha⁻¹ Gülle-N und 55 kg ha⁻¹ Mineral-N) genügten relativ geringe N-Düngermengen zu EC 32 bzw. EC 39, um das standortspezifische Ertragspotenzial auszuschöpfen. Die Notwendigkeit einer schlagdifferenzierten N-Düngung zeigt sich insbesondere in den unterschiedlichen N-Salden (hohe N-Überschüsse im Niedrigertragsbereich).

⁶⁸ Zum Vergleich von Hohertragszone (HE) und Niedrigertragszone (NE) werden die Parameter Ertrag, N-Entzug, N-Effizienz, N-Saldo der jeweiligen Versuchsvariante in Relation gestellt.

Winterweizen-Düngungsversuch WW_2014_2

Der Versuchsschlag WW_2014_2 wurde im Herbst einheitlich mit 75 kg ha⁻¹ Gülle-N gedüngt. Im Frühjahr erfolgte eine Gülle-N-Gabe in Höhe von 85 kg ha⁻¹ und eine Mineral N-Applikation von 70 kg ha⁻¹ schlageinheitlich. Zu Vegetationsbeginn waren auf den Versuchspartellen somit bereits 155 kg ha⁻¹, bzw. unter Berücksichtigung der Herbst-Güllegabe sogar 230 kg ha⁻¹ Stickstoff ausgebracht. Die weiteren Düngegaben erfolgten nach Versuchsplan. Als Referenzvariante diente die zu EC 32 und EC 39 ungedüngte Variante.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Hohertragszone

In der Hohertragszone (lehmiger Boden, Ackerzahl > 60) wurden sehr hohe Weizenerträge erzielt. Auf der Referenzvariante konnten 149 dt ha⁻¹ geerntet werden. Eine zusätzliche Mineral-N-Gabe von 30 kg ha⁻¹ (N 2) steigerte den Ertrag bis über 160 dt ha⁻¹. Weitere Düngemengen hatten keine Ertrags- effekte zur Folge.

Tab. 54: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. N Steigerungsversuch, Hohenthann, 2014, Hohertragszone, Herbst = 75 kg ha⁻¹, WW_2014_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
N 1	85	70	0	0	148,7 a	7,7 a	173,3 a	56,7 ab	
N 2	85	70	30	0	162,9 b	9,2 b	225,8 b	34,2 a	174,9 a
N 3	85	70	60	0	160,6 ab	9,6 b	234,1 b	55,9 ab	101,3 b
N 4	85	70	30	40	160,8 ab	9,9 b	240,1 b	59,9 b	95,4 b
N 5	85	70	90	40	164,8 b	10,8 c	269,5 c	90,5 c	74,0 b

Die Proteingehalte waren generell sehr niedrig. Die höchstgedüngte Variante N 5 erreichte den signifikant höchsten Proteingehalt von 10,8 %. Verantwortlich hierfür dürfte nicht die hohe N-Menge an sich, sondern das hohe späte N-Angebot sein. Der N-Entzug stieg bis zur höchstgedüngten Variante N 5 auf 269 kg ha⁻¹. Die N-Effizienz erreichte in der Stufe N 2 den höchsten Wert mit 175 %, d.h. der N-Entzug stieg in dieser Variante (gegenüber der Referenzvariante) deutlich stärker als die N-Zufuhr. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit einer termingerechten N-Düngung. Die höchstgedüngte Variante N 5 erreichte eine N-Effizienz von 74 %. Aufgrund vorausgegangener hoher N-Düngermengen (Gülle im Herbst und Frühjahr, plus hohe Mineral-Düngung zu VB) reichte eine moderate N-Gabe (N 2 mit 30 kg N ha⁻¹ zu EC 32) aus, um den Höchstertrag mit der größten N-Effizienz zu erzielen, allerdings bei geringen Proteingehalten.

Der geringste N Saldo wurde in der Stufe N 2 ermittelt. In der höchstgedüngten Variante N 5 wurde der signifikant höchste N-Saldo von 90 kg ha⁻¹ berechnet (Tab. 54). Bei hoher Düngung zu VB steigert zwar die Spätdüngung den Rohproteingehalt, jedoch ist in diesen Fällen die N-Effizienz der Spätdüngung besonders schlecht, wie das Beispiel in Tabelle 54 belegt.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Niedrigertragszone

Auf der Niedrigertragszone (sandiger Lehm, Ackerzahl < 50) betrug der Ertrag der Referenzvariante 104 dt ha⁻¹ (70 % von HE, vgl. Tab. 54 und Tab. 55). In der Variante N 1 wurde bereits der Höchstertag erreicht; zusätzliche Düngergaben bewirkten keinen weiteren Ertragsanstieg. Dies zeigt, dass Stickstoff nur ein Faktor für die Ertragsbildung ist; schlechte Bodenbedingungen (Böden niedriger AZ) setzen nur geringe N-Gaben in Ertrag um.

Tab. 55: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. N Steigerungsversuch, Hohenthann, 2014, Niedrigertragszone, Herbst = 75 kg ha⁻¹, WW_2014_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
N 1	85	70	0	0	104,5 a	10,5 a	164,4 a	65,6 a	
N 2	85	70	30	0	102,2 a	12,1 ab	183,5 ab	76,5 a	63,7 a
N 3	85	70	60	0	98,2 a	13,1 bc	192,1 ab	97,9 a	46,1 a
N 4	85	70	30	40	97,9 a	14,4 c	209,6 b	90,4 a	64,6 a
N 5	85	70	90	40	101,7 a	14,0 c	211,3 b	148,7 b	36,1 a

Der Proteingehalt wurde durch zusätzliche späte Düngegaben bis 14 % gesteigert; ab Düngevariante N 3 (13,1 %) wurde Qualitätsweizen erzeugt. Ab Variante N 4 war der N Entzug mit > 200 kg ha⁻¹ signifikant gegenüber der Referenzvariante erhöht. Die höchste N Effizienz wurde in den Varianten N 2 und N 4 (> 60 %) erzielt. Der N-Saldo stieg von 66 kg ha⁻¹ (N 1) auf 149 kg ha⁻¹ (N 5), mit Berücksichtigung der Herbst-Güllegabe (in Tab. 55 nicht dargestellt) von 141 kg ha⁻¹ (N 1) auf 224 kg ha⁻¹ (N 5).

Unter den Versuchsbedingungen (hohe Güllegaben im Herbst und Frühjahr, zusätzliche Mineral-N-Gaben zu Vegetationsbeginn) waren somit in der Niedrigertragszone keine weiteren N-Gaben zu EC 32 und EC 39 notwendig, um das standortspezifische Ertragspotenzial auszuschöpfen. Aufgrund der extrem hohen N-Gaben (230 kg ha⁻¹) bis Vegetationsbeginn bestanden somit keine Möglichkeiten zur gezielten N-Düngung in Abhängigkeit von der Bestandsentwicklung.⁶⁹

Vermutlich war bereits in der Variante N 1 der Bestand überversorgt. Durch eine bessere Verteilung der N-Düngergabe zu Vegetationsbeginn sowie zu späteren Zeitpunkten (EC 32 und EC 39) hätten bessere Ergebnisse (höhere Erträge mit akzeptablen Proteingehalten) erreicht werden können.

3.3.1.2. Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2015

Schlag WW_2015_01

Im Herbst 2014 wurde auf Schlag WW_2015_1 nach der Vorfrucht Silomais keine Gülle ausgebracht. Dadurch war bei der Anlage der Versuche im Jahr 2015 eine ungedüngte Nullparzelle vorhanden. Im

⁶⁹ Zu den Versuchsbedingungen (hohe Herbst- und Frühjahrsgüllegaben und zusätzliche Mineral-N-Gaben zu Vegetationsbeginn) ist anzumerken, dass dies durchaus der gängigen Praxis in der Region Hohenthann zu Beginn der Untersuchungen entsprach. Erst im weiteren Verlauf des Projektes verzichteten die am Projekt beteiligten Landwirte auf eine Herbst-Gülleapplikation.

Teilversuch mit organischer Düngung wurden 95 kg ha⁻¹ Gülle-N appliziert. Es wurden wesentlich mehr Düngegaben als im Vorjahr geprüft (Tab. 56). Für die Sensorvarianten (N 12, N 19) wurde auf Basis der Bodenschätzungskarte ein Zielertrag von 100 dt ha⁻¹ mit einem Proteingehalt von 12 % angenommen.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Hohertragszone, ohne Gülledüngung

In der Hohertragszone (lehmiger Boden, Ackerzahl 65) erreichte der Ertrag der Nullvariante N 1 108 dt ha⁻¹. Im Versuch ohne Gülledüngung steigerten Mineral-N-Gaben den Kornertrag auf maximal 146 dt ha⁻¹ bei einer N-Zufuhr von 160 kg ha⁻¹ in drei Gaben (N 10). Noch höhere N-Zufuhren (Variante N 11) bewirkten keine weitere Ertragssteigerung (Tab. 56). Zu beachten ist die fehlende Ertragswirkung höherer N-Gaben zu VB. Hohe N-Gaben zu VB mindern die N-Effizienz und erhöhen den N-Saldo.

Tab. 56: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Hohertragszone, Herbst = 0 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 13) bzw. auf N 13 (N 14 bis N 20), WW_2015_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gülledüngung									
N 1	0	0	0	0	108,1 a	8,2 a	134,1 a	-134,1 a	
N 2	0	30	30	0	129,6 b	9,6 bc	187,5 bc	-127,5 ab	88,9 b
N 3	0	30	60	0	135,2 bcd	9,7 bcd	199,5 bcd	-109,5 abc	72,6 ab
N 4	0	30	30	40	137,7 bcd	9,7 bcd	203,1 bcde	-103,1 bcd	69,0 ab
N 5	0	30	60	40	141,8 cd	10,8 ef	230,5 efgh	-100,5 bcde	74,1 ab
N 6	0	30	90	40	144,8 d	10,8 ef	236,7 gh	-76,7 def	64,1 ab
N 7	0	60	30	0	130,5 bc	9,1 ab	179,2 b	-89,2 cde	50,1 a
N 8	0	60	60	0	136,7 bcd	10,2 cde	210,0 cdefg	-90,0 cde	63,2 ab
N 9	0	60	30	40	137,2 bcd	9,9 bcde	205,6 bcdef	-75,6 def	55,0 a
N 10	0	60	60	40	145,9 d	10,6 def	232,9 fgh	-72,9 ef	61,7 ab
N 11	0	60	90	40	142,7 d	11,4 f	244,8 h	-54,8 f	58,3 a
N 12 ¹	0	60	18	66	140,7 bcd	10,2 cde	216,9 defgh	-73,2 ef	57,0 a
Versuch mit Gülledüngung									
N 13	95	0	0	0	121,4 a	8,1 a	148,1 a	-53,1 A	(14,7)
N 14	95	0	30	0	126,0 a	8,9 ab	169,4 ab	-44,4 Ab	71,1 a
N 15	95	0	60	0	134,4 b	9,3 bc	188,9 bc	-33,9 ab	68,0 a
N 16	95	0	30	40	136,9 bc	10,1 cd	208,6 cd	-43,6 ab	86,5 a
N 17	95	0	60	40	144,7 cd	10,5 de	228,3 de	-33,3 ab	80,2 a
N 18	95	0	90	40	155,7 e	11,1 e	260,9 f	-35,9 ab	86,8 a
N 19 ¹	95	0	25	77	143,7 cd	10,8 de	233,8 e	-36,0 ab	86,6 a
N 20 ²	95	40	35	50	151,0 de	10,9 de	248,9 ef	-28,9 b	80,6 a

Die Sensorvariante N 12 erreichte mit 140 dt ha⁻¹ einen der höchsten Erträge aller Versuchsvarianten (kein signifikanter Ertragsunterschied zu Variante N 10). Durch das sensorgestützte Düngesystem wurden aufgrund der Pflanzenentwicklung zu EC 32 nur 18 kg ha⁻¹ Mineral-N appliziert. Die relativ geringe Gesamt-N-Zufuhr (144 kg ha⁻¹) ist auf die Vorgabe eines Zielertrages von 100 dt ha⁻¹ zurückzuführen. Andererseits wurde hier die N-Düngermenge mit dem Applikationsalgorithmus für Standorte ohne organische Düngung berechnet (diese haben eine geringere N-Mineralisation). Die Erarbeitung eines speziellen Applikationsalgorithmus für Standorte mit hoher organischer Düngung sollte im Rahmen dieses Projekts erarbeitet werden.

In der ungedüngten Referenzvariante N 1 betrug der Korn-N-Entzug 134 kg ha⁻¹; dies zeigt das hohe N-Mineralisationspotenzials dieses Standortes nach langjähriger intensiver Gülledüngung. Der N-Entzug stieg durch Mineral-N-Düngung bis maximal 245 kg ha⁻¹ (N 11). Aufgrund der hohen Erträge und N-Entzüge ergaben sich in allen gedüngten Varianten deutlich negative N-Salden (-127 bis -55 kg ha⁻¹), was auf die hohe N-Nachlieferung aus dem Boden-N-Pool unter den Standort- und Witterungsbedingungen hinweist. Auch in der Sensorvariante N 12 wurde ein negativer N-Saldo (-73 kg ha⁻¹) ermittelt. Diese Ertragsdaten machen deutlich, dass auf Standorten, auf denen N-Vorräte angereichert wurden, diese Vorräte ohne Ertragsverluste auch wieder abgebaut werden können. Auffallend ist zudem die sehr verhaltene Düngung in der Landwirtsvariante (N 20), vermutlich ein Effekt der Mitarbeit in diesem Projekt. Die höchste N-Effizienz (88 %) erreichte die Variante N 2 bei einer N-Zufuhr von 60 kg ha⁻¹. Bei höheren N-Gaben war die N-Effizienz zum Teil deutlich geringer; sie betrug in der Variante N 7 nur 50 %, in der Sensorvariante 57 %.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Hohertragszone, mit Gülledüngung

Im Versuch mit Gülledüngung wurde auf Mineral-N-Gaben zu Vegetationsbeginn verzichtet (außer in der Variante „nach Landwirt“ (N 20)). Die Referenzvariante N 13 (ohne Mineral-N) erreichte bei einer Gülle-N-Zufuhr von 95 kg ha⁻¹ zu Vegetationsbeginn 121 dt ha⁻¹ Kornertrag; damit war der Ertrag bei alleiniger Gülleanwendung etwa 12 % höher als in der ungedüngten Variante N 1.

Mineral-N-Gaben steigerten den Kornertrag signifikant auf maximal 156 dt ha⁻¹ (N 18). Damit übertraf der Höchstertag bei kombinierter organisch-mineralischer Düngung den Maximalertrag bei alleiniger Mineral-N-Anwendung (146 dt ha⁻¹, N 10).

Die Variante nach Landwirt (N 20) erreichte mit 151 dt ha⁻¹ einen sehr hohen Ertrag. In der Sensorvariante (N 19) wurde kein Mineral-N zu Vegetationsbeginn gedüngt, da Gülle appliziert wurde und ein Teil des Gülle-N als pflanzenverfügbar angenommen wurde. Zu EC 32 erfolgte nach Sensor und Düngalgorithmus nur eine sehr geringe N-Gabe von 25 kg ha⁻¹ aufgrund der Bestandesentwicklung zu diesem Zeitpunkt. Dafür wurde zu EC 39 eine höhere N-Gabe (77 kg ha⁻¹) mit dem Sensorsystem ermittelt; als Zielertrag waren 100 dt ha⁻¹ angenommen. Der Ertrag der Sensorvariante war mit 144 dt ha⁻¹ ebenfalls sehr hoch (kein signifikanter Unterschied zur Variante nach Landwirt). Die relativ hohe N-Gabe in der Variante Sensor zu EC 39 verdeutlicht die Notwendigkeit eines speziellen Applikationsalgorithmus für Standorte mit hoher organischer Düngung.

Die N-Effizienz der Gülle war gering (15 %), die des Mineral-N überwiegend hoch bis maximal 87 %. Trotz der relativ hohen Gülle-N-Zufuhr waren in allen Versuchsvarianten negative N-Salden festzustellen (-29 bis -53 kg ha⁻¹).

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Niedrigertragszone, ohne Gülledüngung

Das Ertragsniveau in der Niedrigertragszone (sandiger Lehm, Ackerzahl > 60) war auch relativ hoch (Tab. 57), aber doch deutlich niedriger als im Hohertragsbereich des Schlages. Auf der Nullvariante wurde ein Ertrag von 86 dt ha⁻¹ erreicht (80 % von HE). Der N-Entzug war dabei mit 107 kg ha⁻¹ ebenfalls deutlich niedriger als in der Hohertragszone (80 % von HE), was auf eine geringere N-Nachlieferung und/oder ungünstigere Bodenbedingungen hinweist.

Der Maximalertrag des Versuchs wurde in der Variante N 6 mit 134 dt ha⁻¹ erreicht, das entspricht 92 % des Maximalertrages der Variante N 6 im Hohertragsbereich. Die Sensorvariante brachte einen Ertrag von 125 dt ha⁻¹ (kein sign. Unterschied zu N 6) bei einer N-Zufuhr von 161 kg ha⁻¹. In der Sensorvariante wurden nach dem Weizen-Algorithmus 27 kg ha⁻¹ zu EC 32 und 74 kg ha⁻¹ zu EC 39 appliziert. Ferner zeigte sich wiederum kein positiver Ertragseffekt einer erhöhten Düngung zu VB. Häufig waren die mit 60 kg ha⁻¹ gedüngten Varianten sogar niedriger im Ertrag als die mit 30 kg ha⁻¹ gedüngten Varianten.

Tab. 57: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. N Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Niedrigertragszone, Herbst = 0 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 13) bzw. auf N 13 (N 14 bis N 20), WW_2015_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gülledüngung									
N 1	0	0	0	0	86,4 a	8,2 a	107,3 a	-107,3 a	
N 2	0	30	30	0	123,6 b	9,0 ab	166,3 bcd	-106,5 a	98,6 c
N 3	0	30	60	0	113,3 b	9,1 abc	154,9 bc	-64,9 bcd	52,9 a
N 4	0	30	30	40	130,5 b	9,8 bcde	193,3 cdef	-93,3 ab	86,0 bc
N 5	0	30	60	40	127,2 b	10,6 efg	202,7 defg	-72,7 abc	73,4 abc
N 6	0	30	90	40	134,4 b	11,3 gh	228,4 fg	-68,4 abcd	75,7 abc
N 7	0	60	30	0	115,1 b	8,5 a	148,0 b	-58,0 bcd	45,2 a
N 8	0	60	60	0	120,3 b	9,5 bcd	173,2 bcde	-53,2 bcd	54,9 ab
N 9	0	60	30	40	126,6 b	9,9 cde	189,4 cde	-59,4 bcd	63,2 ab
N 10	0	60	60	40	127,1 b	10,9 fgh	210,2 efg	-50,2 cd	64,3 ab
N 11	0	60	90	40	132,2 b	11,8 h	235,7 g	-45,7 cd	67,6 abc
N 12 ¹	0	60	27	74	124,5 b	10,1 def	190,3 cdef	-28,8 d	52,2 a
Versuch mit Gülledüngung									
N 13	95	0	0	0	101,3 a	8,2 a	125,3 a	-30,3 ab	(19,0)
N 14	95	0	30	0	119,4 b	9,0 ab	162,3 b	-37,3 a	123,3 b
N 15	95	0	60	0	119,1 b	9,0 ab	160,6 b	-5,6 bc	58,7 a
N 16	95	0	30	40	119,1 b	9,6 bc	172,4 bc	-7,4 bc	67,2 a
N 17	95	0	60	40	127,7 bc	9,8 bc	188,9 cd	6,1 c	63,6 a
N 18	95	0	90	40	129,4 bc	11,3 d	220,7 e	4,3 c	73,3 a
N 19 ¹	95	0	31	77	135,2 c	10,4 cd	212,5 de	-9,0 abc	83,4 a
N 20 ²	95	40	35	50	138,0 c	10,4 cd	217,0 e	-3,0 c	73,3 a

Die Rohproteingehalte waren im Versuch zum Teil sehr niedrig. Die höchste N-Zufuhr mit 190 kg ha^{-1} (N 11) bewirkte zwar keinen weiteren Ertragsanstieg, erhöhte aber den RP-Gehalt auf 11,8 %.

Die N-Effizienz der gedüngten Varianten lag zwischen 45 % (N 7) und 99 % (N2, bei einer N-Gabe von 30 kg ha^{-1}). Die Sensorvariante erzielte nur 52 % N-Verwertung, vermutlich weil die letzte (relativ hohe) N-Gabe nicht optimal verwertet wurde (der RP-Gehalt betrug 10,1 %).

In allen Versuchsvarianten wurde wie im Hohertragsbereich negative N-Salden festgestellt.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Niedrigertragszone, mit Gülledüngung

Die Referenzvariante (N 13) im Versuch mit Gülledüngung hatte einen Ertrag von 101 dt ha^{-1} bei einem N-Entzug von 125 kg ha^{-1} . Die entspricht einer Gülle-N-Verwertung von 19 %.

Die Variante N 19 (Sensor) und N 20 (Landwirt) erreichten mit 135 bzw. 138 dt ha^{-1} die Höchsterträge im Versuch. Dieser Vergleich bestätigt wiederum, bei Gülledüngung zu VB führt eine zusätzliche Mineral-N-Gabe zu keinen positiven Ertragseffekten. Neben der nur gering gedüngten Variante N 14 erzielte die Sensorvariante die höchste N-Effizienz (83 %) bei einer nahezu ausgeglichenen N-Bilanz.

Auch in diesem Versuch lag der Maximalertrag bei kombinierter organisch-mineralischer Düngung etwas über dem Ertrag bei alleiniger Mineral-N-Anwendung.

Schlag WW_2015_02

Auf der Fläche WW_2015_2 wurde im Herbst 2014 keine Düngegabe durchgeführt. Zu Vegetationsbeginn wurden auf dem Versuch mit Gülledüngung einheitlich 70 kg ha^{-1} Gülle-N appliziert. Die weiteren Düngegaben wurden nach Versuchsplan durchgeführt. Dabei wurden für die Sensorvarianten N 12 und N 19 im Hohertragsbereich 90 dt ha^{-1} und im Niedrigertragsbereich 80 dt ha^{-1} als Zieldertrag festgesetzt.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Hohertragszone, ohne Gülledüngung

In der Hohertragszone (lehmyger Boden, Ackerzahl 59) wurden in der Referenzvariante 56 dt ha^{-1} erreicht. Mineral-N-Gaben steigerten den Ertrag bis über 110 dt ha^{-1} .

Der N-Entzug auf der Nullparzelle betrug 78 kg ha^{-1} ; dies sind nur 58 % des N-Entzuges der Nullvariante auf Schlag WW_2015_01. Die belegt das unterschiedliche Ertragspotenzial und N-Nachlieferungvermögen der beiden im Jahr 2015 untersuchten Weizenschläge.

Die Sensorvariante N 12 erzielte neben der Variante N 11 hervorragende Ergebnisse mit dem Höchstertrag von 113 dt ha^{-1} , dem höchsten RP-Gehalt und N-Entzug sowie einer relativ hohen N-Effizienz von 65 %. Im Versuch ohne Gülledüngung waren alle N-Salden negativ.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Hohertragszone, mit Gülledüngung

Die Gülledüngung zeigte eine hohe Ertragswirkung (Tab. 58). In der Variante N 13 (nur Gülle) wurden 90 dt ha^{-1} geerntet, das ergab eine (theoretische) N-Verwertung von 80 % in Bezug auf die Referenzvariante N 1. Bei der Interpretation dieser Werte ist allerdings zu beachten, dass die Varianten N 1 und N 13 auf zwei getrennten Versuchsflächen (Versuch ohne und Versuch mit Gülledüngung) lagen, so dass auch Bodenunterschiede dieses Ergebnis beeinflusst haben könnten.

Zusätzliche Mineral-N-Gaben hatten nur noch verhältnismäßig geringe ertragssteigernde Wirkung. So betrug der Maximalertrag 108 dt ha^{-1} (N 17).

Der Landwirt (Variante N 20) entschied sich, zusätzlich zur Güllegabe eine sehr hohe Mineral-N-Startgabe zu Vegetationsbeginn (90 kg ha⁻¹) auszubringen. Der Vergleich mit anderen N-Varianten zeigt jedoch, dass eine zusätzliche mineralische N-Gabe zu VB nicht notwendig war. Wegen fehlender Ertragswirksamkeit führte diese Düngestrategie zu einem relativ hohen N-Saldo von 78 kg ha⁻¹ (die einzige Versuchsvariante mit positivem N-Saldo). Entsprechend gering war die N-Verwertung mit 28 %.

Hingegen konnte die Sensorvariante (N 19) überzeugen. Bei gleichem Ertrag wie die Variante N 19 konnte 115 kg ha⁻¹ Mineral-N eingespart werden bei einem leicht negativen N-Saldo.

Tab. 58: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. N Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Hohertragszone, Herbst = 0 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 13) bzw. auf N 13 (N 14 bis N 20), WW_2015_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gülledüngung									
N 1	0	0	0	0	56,5 a	9,1 ab	78,3 a	-78,3 A	
N 2	0	30	30	0	87,3 b	9,3 abc	124,9 b	-64,9 Ab	77,6 a
N 3	0	30	60	0	92,3 bc	9,0 a	126,3 b	-36,3 Bc	53,3 a
N 4	0	30	30	40	95,2 bc	9,6 abcd	139,8 bc	-39,8 Bc	61,5 a
N 5	0	30	60	40	99,2 bcd	10,1 bcd	151,6 bc	-21,6 C	56,3 a
N 6	0	30	90	40	106,5 cd	10,4 cd	168,4 cd	-8,4 C	56,3 a
N 7	0	60	30	0	91,8 bc	8,7 a	122,8 b	-32,8 Bc	49,4 a
N 8	0	60	60	0	97,8 bcd	9,3 abc	139,1 bc	-19,1 C	50,6 a
N 9	0	60	30	40	98,8 bcd	10,4 cd	156,0 bc	-26,0 C	59,7 a
N 10	0	60	60	40	106,5 cd	10,4 d	169,0 cd	-9,0 C	56,6 a
N 11	0	60	90	40	112,0 d	11,9 e	201,7 d	-11,7 C	64,9 a
N 12 ¹	0	55	55	75	113,0 d	11,6 e	198,0 d	-11,3 C	64,7 a
Versuch mit Gülledüngung									
N 13	70	0	0	0	90,3 a	9,7 a	134,6 a	-64,6 A	(80,4)
N 14	70	0	30	0	95,7 ab	10,1 ab	146,5 ab	-46,5 Ab	39,6 a
N 15	70	0	60	0	98,2 ab	10,9 abc	163,0 abc	-33,0 Ab	47,4 a
N 16	70	0	30	40	103,0 ab	10,8 abc	170,6 abc	-30,6 Ab	51,4 a
N 17	70	0	60	40	108,1 b	12,0 cd	197,0 cd	-27,0 Ab	62,4 a
N 18	70	0	90	40	107,5 b	13,1 d	214,8 d	-14,8 B	61,7 a
N 19 ¹	70	0	30	55	102,3 ab	11,6 bcd	180,1 bcd	-23,8 Ab	57,4 a
N 20 ²	70	90	60	50	101,3 ab	12,5 cd	191,4 cd	78,5 C	28,4 a

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Niedrigertragszone, ohne Gülldüngung

In der Niedrigertragszone (lehmiger Tonboden, Ackerzahl 52) wurde auf der Referenzvariante N 1 ein Ertrag von 51 dt ha⁻¹ (90 % von HE) erreicht. Der N-Entzug betrug 53 kg ha⁻¹ (68 % von HE).

Mineral-N-Gaben steigerten den Kornertrag bis 117 dt ha⁻¹ in der Variante N 6 (110 % von HE). Somit wurden auf der als Niedrigertragszone eingestuften Versuchsfläche zum Teil höhere Erträge erzielt als auf der Hohertragszone. Allerdings waren die RP-Gehalte und N-Entzüge in der Niedrigertragszone meist deutlich niedriger als in der Hohertragszone (vgl. Tab. 59, Tab. 58). Die Sensorvariante N 12 führte bei einer N-Zufuhr von 175 kg ha⁻¹ zum Höchstertrag.

Nur auf der Nullparzelle und der mit 30 kg ha⁻¹ gedüngten Variante N 2 wurden negative N-Salden festgestellt. Die N-Salden waren aber insgesamt auf relativ geringem Niveau (max. 57 kg ha⁻¹ in Variante N 11).

Tab. 59: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. N Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Niedrigertragszone, Herbst = 0 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 13) bzw. auf N 13 (N 14 bis N 20), WW_2015_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gülldüngung									
N 1	0	0	0	0	51,1 a	8,9 a	52,9 a	-52,9 a	
N 2	0	30	30	0	84,8 b	8,5 a	87,8 ab	-27,8 ab	58,1 a
N 3	0	30	60	0	90,3 bc	8,2 a	84,3 ab	5,6 abc	34,8 a
N 4	0	30	30	40	94,6 bcd	8,7 a	94,1 ab	5,8 abc	41,1 a
N 5	0	30	60	40	101,6 de	9,0 ab	102,9 ab	27,0 bc	38,4 a
N 6	0	30	90	40	116,9 f	10,4 c	138,4 b	21,5 bc	53,4 a
N 7	0	60	30	0	90,2 bc	8,2 a	84,4 ab	5,5 abc	34,9 a
N 8	0	60	60	0	98,5 cd	8,8 a	99,0 ab	20,9 bc	38,4 a
N 9	0	60	30	40	101,1 de	8,9 ab	100,9 ab	29,0 bc	36,8 a
N 10	0	60	60	40	109,5 ef	9,9 c	123,2 b	36,7 bc	43,9 a
N 11	0	60	90	40	113,6 f	10,4 c	133,3 b	56,6 c	42,2 a
N 12 ¹	0	50	50	75	115,5 f	9,8 bc	129,7 b	44,2 c	45,4 a
Versuch mit Gülldüngung									
N 13	70	0	0	0	87,1 a	8,7 a	115,3 a	-45,3 a	(89,1)
N 14	70	0	30	0	95,6 b	9,3 ab	135,5 ab	-35,5 ab	67,2 a
N 15	70	0	60	0	104,8 c	10,0 bc	159,1 bc	-29,1 abc	73,0 a
N 16	70	0	30	40	108,6 cd	10,3 cd	169,8 c	-29,8 abc	77,8 a
N 17	70	0	60	40	111,6 cd	10,6 cd	179,3 cd	-9,3 cd	64,0 a
N 18	70	0	90	40	116,4 d	11,2 de	197,8 de	2,1 d	63,4 a
N 19 ¹	70	0	35	60	109,8 cd	10,5 cd	174,7 cd	-12,2 bcd	66,0 a
N 20 ²	70	90	60	50	111,5 cd	12,1 e	204,5 e	65,4 e	44,5 a

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Niedrigertragszone, mit Gülledüngung

Auch in der Niedrigertragszone zeigte die im Frühjahr ausgebrachte Gülle eine sehr hohe Ertragswirkung. Die nur mit Gülle gedüngte Variante N 13 erzielte 87 dt ha⁻¹ Kornertrag bei einem N-Entzug von 115 kg ha⁻¹. Im Vergleich zur Nullvariante entspricht dies einer N-Verwertung von 89 %.

Die Variante „Landwirt“ (N 20) war die höchstgedüngte Variante des Versuchs (270 kg ha⁻¹ N-Zufuhr mit Gülle-N und Mineral-N); neben Gülle wurde wiederum Mineral-N zu VB in Höhe von 90 kg ha⁻¹ gegeben. Der Vergleich mit der Variante N 19 zeigt wiederum, dass dies für die Ertragsbildung nicht notwendig war und auf den N-Saldo stark erhöhte (höchster N-Saldo aller Varianten).

Die Sensorvariante (N 19) erreichte mit einer N-Zufuhr von 165 kg ha⁻¹ den gleichen Ertrag wie Variante N 20, allerdings mit deutlich geringeren RP-Gehalten. Der berechnete N-Saldo der Variante N 19 war leicht negativ; gegenüber der Variante N 20 (Landwirt) war der N-Saldo um 78 kg ha⁻¹ vermindert.

Insgesamt zeigten die Versuche Schlag WW_2015_02 eindrucksvoll das Potenzial des Sensorsystems zur pflanzenbedarfsgerechten und umweltverträglichen N-Düngung. Gegenüber der praxisüblichen Variante (Landwirt) konnten die N-Gaben und die N-Salden zum Teil drastisch reduziert werden, ohne Ertragseinbußen hinnehmen zu müssen.

Es zeigte sich zudem eindrucksvoll in den Gülleversuchen, dass die weitverbreitete Praxis, zusätzlich zur Gülle-Frühjahrgabe zum Teil sehr hohe Mineral-N-Gaben (im Versuch 90 kg ha⁻¹) zu Vegetationsbeginn bei Winterweizen auszubringen, die N-Überschüsse deutlich erhöht, die N-Effizienz mindert und sich selten positiv auf den Ertrag auswirkt.

3.3.1.3. Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2016**Schlag WW_2016_01**

Der Winterweizenschlag WW_2016_1 erhielt im Herbst 2015 keine Düngung. Zu Vegetationsbeginn wurden im Gülleveruch einheitlich 108 kg ha⁻¹ Gülle-N appliziert.

Für die geprüften Düngesysteme (DSN, BEFU, Sensor) wurde ein Zielertrag von 100 dt ha⁻¹ im Hohertragsbereich und 90 dt ha⁻¹ im Niedrigertragsbereich mit 12 % Proteingehalt angenommen.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Hohertragszone, ohne Gülledüngung

Auf der ungedüngten Variante wurde ein Ertrag von 71 dt ha⁻¹ bei einem N-Entzug von 85 kg ha⁻¹ ermittelt (Tab. 60). Der Vergleich der Düngesysteme (Varianten N 12 bis N 14) zeigt, dass alle drei Systeme (DSN, BEFU und Sensor) zum gleichen Ertrag führten (keine signifikanten Unterschiede).

Während sich die Sensorvariante und die DSN-Variante hinsichtlich der Mineral-N-Gaben (Menge und Verteilung) nur marginal unterschieden, wurde in der BEFU-Variante (N 14) weniger Mineral-N zu EC 32 appliziert, ohne negative Ertragseffekte (aber geringeren RP-Gehalten). Die Düngung nach BEFU führte daher zu signifikant geringeren N-Salden (12 kg ha⁻¹) als die Düngung nach DSN (39 kg ha⁻¹) bzw. Sensor (37 kg ha⁻¹).

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Hohertragszone, mit Gülledüngung

Die Gülledüngung im Frühjahr führte zu positiven Ertrageffekten (Tab. 60). In der Variante N 15 (nur Gülle) wurden über 90 dt ha⁻¹ Ertrag und N-Entzüge von 120 kg ha⁻¹ erzielt (N-Verwertung von 32 %). Allerdings führte in diesem Versuch die Kombination organischer und mineralischer Düngung zu keiner Ertragssteigerung gegenüber alleiniger Mineral-N-Anwendung.

Bei der Düngung nach Sensor (N 22) wurde keine Mineral-N-Düngung zu Vegetationsbeginn zusätzlich zur Gülledüngung vorgenommen, während in allen anderen geprüften Düngesystemen (Landwirt, DSN, BEFU) Mineral-N-Gaben zu Vegetationsbeginn erfolgten. Die vier Düngevarianten brachten den gleichen Kornertrag und RP-Gehalt (keine signifikanten Unterschiede). Der Vergleich der verschiedenen N-Varianten (N 16 – N 25) zeigt, dass es nicht notwendig war, zusätzlich zur Gülle im Frühjahr noch Mineraldünger bei Winterweizen auszubringen.

Tab. 60: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo, N-Effizienz von Winterweizen. N Steigerungsversuch, Hohenthann, 2016, Hohertragszone, Herbst = 0 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, ³ = Düngung nach DSN, ⁴ = Düngung nach BEFU, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 15) bzw. N 15 (N 16 bis N 25), WW_2016_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gülledüngung									
N 1	0	0	0	0	71,0 a	7,8 a	84,7 a	-84,7 a	
N 2	0	30	30	0	87,6 b	8,6 ab	114,7 b	-54,7 b	50,0 ab
N 3	0	30	60	0	95,3 bcde	9,2 bcd	132,7 bcde	-42,7 bc	53,3 b
N 4	0	30	30	40	91,9 bcd	8,9 bc	123,6 bc	-23,6 cde	38,9 ab
N 5	0	30	60	40	97,4 cdefg	9,3 bcde	137,8 cdefg	-7,8 efg	40,8 ab
N 6	0	30	90	40	99,9 defg	9,8 def	148,4 defgh	11,5 gh	39,8 ab
N 7	0	60	30	0	89,9 bc	9,0 bcd	122,8 bc	-32,8 cd	42,4 ab
N 8	0	60	60	0	96,6 cdef	9,3 bcde	136,8 cdef	-16,8 def	43,4 ab
N 9	0	60	30	40	93,8 bcd	9,1 bcd	129,6 bcd	0,3 fgh	34,6 a
N 10	0	60	60	40	102,5 efgh	10,2 ef	159,1 ghi	0,8 fgh	46,5 ab
N 11	0	60	90	40	110,0 h	10,4 f	173,4 i	16,5 hi	46,7 ab
N 12 ¹	0	70	70	65	105,3 gh	10,5 f	168,3 hi	36,6 ij	40,8 ab
N 13 ³	0	75	60	60	103,9 fgh	9,9 def	155,4 fghi	39,5 j	36,3 ab
N 14 ⁴	0	75	30	60	103,6 efgh	9,7 cdef	152,7 efghi	12,2 gh	41,3 ab
Versuch mit Gülledüngung									
N 15	108	0	0	0	91,9 a	8,6 a	119,7 a	-11,7 a	(32,4)
N 16	108	0	30	0	101,1 b	9,5 b	145,3 b	-7,3 a	85,5 d
N 17	108	0	60	0	103,5 bc	10,0 bc	156,4 bc	11,5 b	61,1 c
N 18	108	0	30	40	101,7 b	10,1 bcd	155,8 bc	22,1 b	51,6 bc
N 19	108	0	60	40	108,5 cd	10,3 cd	169,0 cde	38,9 c	49,3 abc
N 20	108	0	90	40	109,0 cd	10,8 d	177,6 e	60,4 d	44,5 abc
N 21	108	30	60	40	109,1 d	10,5 cd	173,9 de	64,0 de	41,6 ab
N 22 ¹	108	0	70	60	106,3 bcd	10,0 bc	161,8 cd	76,2 ef	32,3 a
N 23 ²	108	40	40	30	104,2 bcd	10,1 bcd	159,7 c	58,2 d	36,3 ab
N 24 ³	108	45	35	60	104,6 bcd	10,5 cd	166,3 cde	81,6 f	33,3 ab
N 25 ⁴	108	30	40	50	107,3 cd	10,3 cd	168,1 cde	59,8 d	40,3 ab

Die Varianten Landwirt und BEFU führten zu geringeren N-Salden ($< 60 \text{ kg ha}^{-1}$) als die Varianten Sensor (76 kg ha^{-1}) und DSN (82 kg ha^{-1}). Positiv ist zu vermerken, dass alle Düngesysteme (Sensor, DSN, BEFU) die Mineral-N-Gaben bei Gülleanwendung deutlich reduziert haben. Auch der Landwirt hat nach Gülleapplikation sehr gezielt Mineral-N eingesetzt.

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Niedrigertragszone, ohne Gülledüngung

In der Niedrigertragszone (lehmig-toniger Boden, Ackerzahl < 50) wurde auf Variante N 1 ein geringer Ertrag von 50 dt ha^{-1} erreicht (72 % des Ertrages von HE); der N-Entzug betrug 57 kg ha^{-1} (68 % von HE).

Tab. 61: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo, N-Effizienz von Winterweizen. N Steigerungsversuch, Hohenthann, 2016, Niedrigertragszone, Herbst = 0 kg ha^{-1} , ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, ³ = Düngung nach DSN, ⁴ = Düngung nach BEFU, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 15) bzw. N 15 (N 16 bis N 25), WW_2016_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]				Kornertrag [dt ha^{-1}]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha^{-1}]	N-Saldo [kg ha^{-1}]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gülledüngung									
N 1	0	0	0	0	50,9 a	7,4 a	57,4 a	-57,4 a	
N 2	0	30	30	0	70,7 b	7,5 a	80,7 b	-20,7 b	38,8 a
N 3	0	30	60	0	81,5 bcde	8,0 bc	99,4 bcd	-9,4 bc	46,7 ab
N 4	0	30	30	40	78,0 bcd	8,1 bc	96,4 bc	3,5 cd	39,0 a
N 5	0	30	60	40	86,8 cdef	8,3 cd	109,5 cde	20,4 de	40,1 a
N 6	0	30	90	40	96,9 efg	9,1 ef	133,5 fg	26,5 def	47,5 ab
N 7	0	60	30	0	76,8 bc	7,8 ab	91,3 bc	-1,3 bc	37,6 a
N 8	0	60	60	0	106,5 g	8,1 bc	131,5 fg	-11,5 bc	61,7 b
N 9	0	60	30	40	86,1 cde	8,1 bc	106,3 cde	23,6 de	37,6 a
N 10	0	60	60	40	93,3 defg	8,7 de	122,5 efg	37,5 efg	40,6 a
N 11	0	60	90	40	101,5 fg	9,2 f	142,1 g	47,8 fgh	44,5 ab
N 12 ¹	0	65	80	60	96,9 efg	9,6 f	140,6 fg	64,3 h	40,5 a
N 13 ³	0	50	60	60	90,5 cdef	8,7 de	120,0 def	49,9 gh	36,8 a
N 14 ⁴	0	60	60	70	95,2 efg	9,3 f	133,9 fg	56,0 gh	40,2 a
Versuch mit Gülledüngung									
N 15	108	0	0	0	68,6 a	7,7 a	80,3 a	27,7 a	(21,1)
N 16	108	0	30	0	80,8 b	8,0 a	98,7 b	39,2 ab	61,5 bc
N 17	108	0	60	0	91,5 cd	8,6 b	120,1 c	47,8 bc	66,3 c
N 18	108	0	30	40	89,6 c	8,8 bc	120,1 cd	57,8 cd	56,9 bc
N 19	108	0	60	40	95,7 cde	9,2 cde	134,2 e	73,7 ef	53,9 abc
N 20	108	0	90	40	102,6 ef	9,7 ef	150,3 gh	87,6 g	53,8 abc
N 21	108	30	60	40	93,0 cd	9,4 de	131,8 cde	106,2 h	39,6 a
N 22 ¹	108	0	70	50	107,2 f	9,9 f	161,3 g	66,7 de	67,4 c
N 23 ²	108	40	40	30	96,1 cde	9,0 bcd	130,8 cde	87,1 fg	45,9 ab
N 24 ³	108	20	35	60	94,3 cd	9,4 cde	133,6 de	89,3 g	46,3 ab
N 25 ⁴	108	0	60	60	97,8 de	9,4 cde	138,6 ef	89,3 g	48,6 ab

Die Proteingehalte aller Varianten waren in diesem Versuch sehr gering (unter 10 %); die niedrigsten RP-Gehalte wurden in den nicht oder nur gering mit Mineral-N gedüngten Varianten festgestellt (Tab. 61). Bereits mit 120 kg ha^{-1} Mineral-N (N 8) wurde der Höchstertrag 106 dt ha^{-1} erzielt. Der Vergleich der Düngesysteme zeigt, dass die Sensordüngung und die Düngung nach BEFU nahezu zum gleichen Ertrag führten (97 bzw. 95 dt ha^{-1}); die DSN-Variante lag etwas niedriger (90 dt ha^{-1}); allerdings waren die Unterschiede nicht signifikant. In der Sensorvariante wurde mehr Mineral-N (205 kg ha^{-1}) eingesetzt, als bei der Düngung nach DSN (170 kg ha^{-1}) und BEFU (190 kg ha^{-1}). Die N-Salden unterschieden sich nicht signifikant; der niedrigste Wert wurde für das DSN-System berechnet (50 kg ha^{-1}).

N-Steigerungsversuch Winterweizen, Niedrigertragszone, mit Gülledüngung

Eine Güllegabe im Frühjahr zu Vegetationsbeginn (N 15) erhöhte den Ertrag gegenüber der ungedüngten Variante (N 1) auf 69 dt ha^{-1} und den N-Entzug auf 80 kg ha^{-1} ; das entspricht einer N-Verwertung von 21 % (bezogen auf den Gesamt-N der Gülle).

Der Höchstertrag des Versuches (107 dt ha^{-1}) wurde in der Sensorvariante (N 22) erzielt. Hierbei wurde auf die Start-N-Gabe verzichtet. Die Mineral-N-Zufuhr dieser Variante betrug 120 kg ha^{-1} ; somit wurden 85 kg ha^{-1} Mineral-N gegenüber der Sensorvariante ohne Gülleeinsatz (N 12) eingespart und dabei sogar ein höherer Ertrag erzielt als bei alleiniger Mineral-N-Düngung.

Die Mineral-N-Zufuhren der anderen Düngesystemen waren ebenfalls auf einem sehr moderaten Niveau (110 bis 120 kg ha^{-1}), allerdings unterschied sich die Verteilung der Gaben. In der Variante Landwirt und der Variante DSN fanden Mineral-N-Gaben zu Vegetationsbeginn statt. Ein Vergleich der Varianten N 19 und N21 zeigt, dass bei Gülledüngung im Frühjahr wegen der hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte der Gülle keine mineralische Ergänzungsdüngung notwendig ist. Die Sensorvariante N 22 hatte den signifikant niedrigsten N-Saldo (67 kg ha^{-1}) der geprüften Systeme (89 kg ha^{-1} nach DSN und nach BEFU).

Insgesamt ist zu resümieren, dass das Sensorsystem seine Leistungsfähigkeit eindrucksvoll zeigte, insbesondere in den Gülleversuchen, u.a. weil auf mineralische Start-N-Gaben konsequent verzichtet wurde, sodass das System zu den späteren Terminen (EC 32, EC 39) auf die jeweilige Bestandesentwicklung und N-Aufnahme des Pflanzenbestandes reagieren konnte. Die N-Gabe zu EC 39 war häufig noch zu hoch; dies dürfte in der Verwendung von Applikationsalgorithmen für Betriebe ohne organische Düngung begründet liegen. Durch entsprechende Anpassung Algorithmen lässt sich das beheben.

Auch die anderen beiden anderen im Versuch geprüften Systeme DSN und BEFU schnitten gut ab.

Auch der Landwirt erzielte in diesem Versuch ein sehr gutes Ergebnis. Möglicherweise setzte hier (im dritten Versuchsjahr) bereits ein Beratungseffekt ein. Die enge Zusammenarbeit der Landwirte und Wissenschaftler bei der Durchführung, Auswertung und Interpretation der Versuche, veranlasste einige Landwirte, ihre Düngestrategie zu überdenken. So wurde im dritten Untersuchungsjahr auf Herbst-Güllegaben zu Weizen verzichtet (dies war im ersten Jahr noch weit verbreitet); bei der Bemessung der Mineral-N-Gaben wurden die Güllegaben besser berücksichtigt.

3.3.1.4. Vergleich der Düngesysteme

Bei der Fruchtart Winterweizen wurde auf drei verschieden bewirtschafteten Flächen Versuche zum Vergleich der Düngesysteme Sensor, DSN und BEFU angelegt (Tab. 62). Die Fläche WW_2016_2 wurde durch einen Biogasbetrieb, die Fläche WW_2016_3 durch einen Mastschweinebetrieb und die Fläche

WW_2016_4 durch einen Marktfruchtbetrieb ohne Gülleaufnahme bewirtschaftet. Die Düngesysteme nach DSN und BEFU wurden teilflächenspezifisch angewendet.

N-Vergleich Düngesysteme Winterweizen, Hohertragszonen

Für die Fläche WW_2016_2 wurde der Zielertrag 100 dt ha⁻¹ in der Hohertragszone mit einem Zielproteingehalt von 12 % angenommen. Die Fläche WW_2016_3 hatte als Zielertrag in der Hohertragszone 95 dt ha⁻¹ mit 12 % RP-Gehalt. Auf der Fläche WW_2016_4 betrug der Zielertrag 95 dt ha⁻¹ im Hohertrag des Schlages mit mindestens 13 % Protein.

Im Hohertragsbereich des **Versuchs WW_2016_2** wurde bereits in der ungedüngten Referenzvariante (N 1) mit 101 dt ha⁻¹ der Zielertrag erreicht. Dies unterstreicht das enorme N-Nachlieferungsvermögen dieses Standortes nach langjährig intensiver Gülledüngung.

Die Anwendung des Düngesystems DSN (N 2) führte zu einer Erhöhung des Ertrages auf 115 dt ha⁻¹ (statistisch gesichert). Die Erträge nach Sensor (109 dt ha⁻¹) und BEFU (113 dt ha⁻¹) lagen auf gleichem Niveau (kein signifikanter Unterschied innerhalb der Düngesysteme).

Der Proteingehalt konnte in Variante N 3 (Sensor) auf 10,4 % gesteigert werden (7,9 % RP-Gehalt auf der Nullparzelle). Aufgrund der hohen N-Nachlieferung aus dem Boden und der relativ hohen N-Aufnahme der Nullparzelle ergeben sich Mineral-N-Verwertungsraten von knapp 20%.

Der N-Saldo der Sensorvariante N 3 übertraf die N-Salden der anderen Düngesysteme signifikant. In der Sensorvariante wurden nach Verzicht auf die erste N-Gabe (aufgrund der Gülleapplikation) relativ hohe N-Gaben zu EC 32 und EC 39 appliziert, die nur unzureichend in Ertrag umgesetzt wurden.

Tab. 62: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. Vergleich Düngesysteme, Hohenthann, 2016, Hohertragszone, ¹ = Düngung nach DSN, ² = Düngung nach Sensor, ³ = Düngung nach BEFU, Herbst-Düngung: WW_2016_2 = 0 kg ha⁻¹, WW_2016_3 = 0 kg ha⁻¹, WW_2016_4 = 0 kg ha⁻¹

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
WW_2016_2 (Biogasbetrieb, Zielertrag: 100 dt ha ⁻¹)									
N 1	0	0	0	0	101,0 a	7,9 a	120,9 a	-120,9 a	
N 2 ¹ (DSN)	100	40	20	60	115,0 b	9,3 b	162,5 b	57,4 b	18,9 a
N 3 ² (Sensor)	100	0	90	80	109,0 ab	10,4 c	172,4 b	97,5 c	19,0 a
N 4 ³ (BEFU)	100	20	60	60	113,0 b	10,0 c	171,9 b	68,0 b	21,2 a
WW_2016_3 (Schweinemastbetrieb, Zielertrag: 95 dt ha ⁻¹)									
N 5	0	0	0	0	79,3 a	9,5 a	114,1 a	-114,1 a	
N 6 ¹ (DSN)	81	80	45	60	145,1 c	11,2 b	246,2 c	19,7 c	49,6 a
N 7 ² (Sensor)	81	0	68	40	138,9 bc	10,9 b	230,5 bc	-40,8 b	61,3 b
N 8 ³ (BEFU)	81	70	40	40	133,6 b	11,2 b	226,8 b	4,1 c	48,8 a
WW_2016_4 (Marktfruchtbetrieb, Zielertrag: 95 dt ha ⁻¹)									
N 9	0	0	0	0	65,0 a	8,0 a	78,5 a	-78,5 a	
N 10 ¹ (DSN)	0	80	70	70	92,3 b	10,3 c	144,8 c	75,1 c	30,1 a
N 11 ² (Sensor)	0	40	87	90	89,8 b	10,6 c	143,8 c	73,6 c	29,9 a
N 12 ³ (BEFU)	0	55	50	50	92,5 b	9,1 b	128,1 b	26,8 b	31,9 a

Im **Versuch WW_2016_3** wurden nach Gülleapplikation vom Sensorsystem nur geringe N-Gaben (insgesamt 108 kg ha^{-1} Mineral-N) berechnet; auf eine Startgabe wurde gänzlich verzichtet. Bereits diese N-Zufuhr genügte, um das Ertragspotenzial weitgehend auszuschöpfen (keine sign. Unterschiede zu den beiden anderen Düngesystemen). Nach dem System DSN wurden unter gleichen Bedingungen 185 kg ha^{-1} Mineral-N ausgebracht, nach BEFU 150 kg ha^{-1} . Folglich war der N-Saldo der Sensorvariante am niedrigsten (die Nullvariante ausgenommen) und die N-Effizienz am höchsten.

Im **Versuch WW_2016_4** ohne Gülleanwendung wurden die Mineral-N-Gaben nach BEFU am geringsten bemessen (155 kg ha^{-1}) im Vergleich zu 220 kg ha^{-1} (DSN) bzw. 217 kg ha^{-1} (Sensor). Die Erträge der gedüngten Varianten unterschieden sich nicht signifikant. Es gab aber größere Qualitätsunterschiede; der geringste RP-Gehalt trat in der BEFU-Variante auf. Die N-Salden nach Sensor und DSN waren auf gleichem Niveau (ca. 75 kg ha^{-1}), während nach BEFU ein N-Saldo von 27 kg ha^{-1} ermittelt wurde.

N-Vergleich Düngesysteme Winterweizen, Niedrigertragszonen

Die Ergebnisse der nach dem gleichen Prinzip in den Niedrigertragszonen durchgeführten Versuche zum Vergleich der Düngesysteme sind im Anhang (Tab. A 3.1) dargestellt.

3.3.2. Stickstoffdüngerversuche bei Wintergerste

Auch zu Wintergerste wurden sehr umfangreiche Düngungsversuche in allen drei Untersuchungsjahren (2014, 2015, 2016) nach dem gleichen Prinzip wie bei Winterweizen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Jahre 2014 und 2015 wurden bereits in den Zwischenberichten beschrieben; sie sind zudem Gegenstand der Promotionsschrift von J. Prücklmaier. Die Versuchsergebnisse zu Wintergerste 2014 und 2015 werden daher nur im Anhang als Tabellen dargestellt. Ausführlich werden die Ergebnisse des Jahres 2016 zum Vergleich der Düngesysteme beschrieben.

3.3.2.1. Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2014

Die Untersuchungsergebnisse des Jahres 2014 zu Wintergerste sind in den Anhangtabellen A 3.2 und A 3.3 (Versuch WG_2014_1) sowie A 3.4 und A 3.5 (Versuch WG_2014_2) dargestellt.

3.3.2.2. Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2015

Die Untersuchungsergebnisse des Jahres 2015 zu Wintergerste sind in den Anhangtabellen A 3.6 und A 3.7 (Versuch WG_2015_1) sowie A 3.8 und A 3.9 (Versuch WG_2015_2) dargestellt.

3.3.2.3. Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2016

Der Wintergerstenschlag WG_2016_1 wurde einheitlich mit 63 kg ha⁻¹ Gülle-N im Herbst des Vorjahres gedüngt. Zu Vegetationsbeginn wurden im Versuch mit Gölledüngung zusätzlich 77 kg ha⁻¹ appliziert. Als Zielerträge wurden in der Hohertragszone 95 dt ha⁻¹ und in der Niedrigertragszone 80 dt ha⁻¹ unter Berücksichtigung der Bodenschätzungskarte festgelegt.

N-Steigerungsversuch Wintergerste, Hohertragszone, ohne Gölledüngung

In der Hohertragszone (lehmiger Boden, Ackerzahl > 65) wurden in der im Frühjahr ungedüngten Referenzvariante (N 1) 62,8 dt ha⁻¹ geerntet (Tab. 63).

Der Höchstertrag des Versuches wurde in mehreren Varianten, z.B. der Variante N 7, mit 98 dt ha⁻¹ erreicht (Tab. 64); dies entspricht etwa dem zuvor festgelegten Zielertrag. Auch die Sensorvariante N 12 führte zum Höchstertrag bei einer Mineral-N-Zufuhr von 125 kg ha⁻¹. Hieraus ergab sich ein N-Saldo von 53 kg ha⁻¹. Die Varianten N 13 (DSN) und N 14 (BEFU) brachten tendenziell niedrigere Erträge bei höheren N-Zufuhren von 155 kg ha⁻¹. Daraus resultierten signifikant höhere N-Salden von 71 kg ha⁻¹ (DSN) und 66 kg ha⁻¹ (BEFU).

N-Steigerungsversuch Wintergerste, Hohertragszone, mit Gölledüngung

Der Ertrag der Referenzvariante (N 15) mit Gölledüngung im Frühjahr war etwas niedriger als der Ertrag in der Nullvariante. Dies weist darauf hin, dass die Böden des Versuchsstandortes kleinräumig variieren, sodass zwischen den Versuchsflächen (Versuche ohne und mit Gülle) Bodenunterschiede bestehen, die zu einem unterschiedlichen Ertragspotenzial führen. Aufgrund dieser relativ geringen Erträge und N-Entzüge ergab sich eine (theoretisch) negative N-Verwertung des zugeführten Gülle-N (Tab. 63).

Tab. 63: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2016, Hohertragszone, Herbst = 63 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, ³ = Düngung nach DSN, ⁴ = Düngung nach BEFU, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 15) bzw. N 15 (N 16 bis N 25), WG_2016_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gölledüngung im Frühjahr									
N 1	0	0	0	0	62,8 a	10,7 ab	93,1 a	-30,1 a	
N 2	0	40	30	0	91,3 b	10,8 ab	135,7 b	-2,7 b	60,9 b
N 3	0	40	90	0	93,8 bcdef	11,6 ab	149,9 bcd	43,0 cd	43,6 ab
N 4	0	40	30	40	92,4 bcd	10,7 ab	137,3 b	35,6 c	40,2 ab
N 5	0	40	60	40	93,3 bcde	11,5 ab	147,5 bcd	55,4 cde	38,8 a
N 6	0	40	90	40	91,7 bc	11,3 ab	143,4 bcd	89,5 fg	29,6 a
N 7	0	80	90	0	98,3 f	12,1 b	164,3 cd	68,6 ef	41,8 ab
N 8	0	80	30	40	96,3 cdef	10,6 ab	140,8 bc	72,1 ef	31,7 a
N 9	0	80	60	40	96,7 def	11,7 ab	156,4 bcd	86,5 fg	35,1 a
N 10	0	80	90	40	97,5 ef	12,4 b	166,9 d	106,0 g	35,1 a
N 11	0	80	30	70	97,2 ef	11,4 ab	152,5 bcd	90,4 fg	32,9 a
N 12 ¹	0	75	0	50	98,0 f	10,0 a	135,3 b	52,6 cde	33,7 a
N 13 ³	0	60	35	60	96,1 cdef	11,1 ab	147,0 bcd	70,9 ef	34,7 a
N 14 ⁴	0	65	40	50	95,9 bcdef	11,5 ab	152,2 bcd	65,7 def	38,1 a
Versuch mit Gölledüngung im Frühjahr									
N 15	77	0	0	0	60,5 a	9,6 a	80,4 a	59,5 a	(-16,5)
N 16	77	0	90	0	82,6 b	10,8 a	123,4 bc	106,5 bcd	47,7 a
N 17	77	0	30	40	84,0 bc	10,3 a	119,1 b	90,8 b	55,2 a
N 18	77	0	60	40	90,4 bcd	10,8 a	134,8 bc	105,1 bcd	54,4 a
N 19	77	0	90	40	91,9 cd	10,9 a	138,0 bc	131,9 de	44,3 a
N 20	77	0	30	70	87,2 bc	11,0 a	132,9 bc	107,0 bcd	52,2 a
N 21	77	30	60	40	97,2 d	10,9 a	145,9 c	124,0 cde	50,3 a
N 22 ¹	77	0	25	60	87,5 bc	10,2 a	123,2 bc	101,7 bc	50,3 a
N 23 ²	77	45	55	40	92,0 cd	10,3 a	132,7 bc	147,2 e	37,3 a
N 24 ³	77	40	20	60	89,5 bcd	9,9 a	122,7 bc	137,2 e	35,2 a
N 25 ⁴	77	35	60	30	90,5 bcd	11,2 a	139,9 bc	125,0 cde	47,6 a

Aufgrund der geringen Gülle-N-Wirkung ergaben sich in allen Varianten (außer der Referenzvariante N 15) verhältnismäßig hohe N-Salden bis 147 kg ha⁻¹ in der Variante „Landwirt“ (N 23). Ursachen für die hohen N-Überschüsse waren die relativ hohen Mineral-N-Gaben (140 kg ha⁻¹) zusätzlich zur Gülle-N-Zufuhr von insgesamt von 140 kg ha⁻¹. Auf die Start-N-Gabe von 45 kg ha⁻¹ hätte sicher verzichtet werden können, wie die Sensorvariante (N 22) zeigt, die mit 85 kg ha⁻¹ Mineral-N (ohne Startgabe) ein vergleichbares Ertragsniveau erreichte (kein sign. Unterschied). Auch in den Varianten DSN (N 24) und BEFU (N 25) wurden Start-N-Gaben verabreicht.

Die Düngung nach Sensor verminderte den N-Saldo gegenüber der praxisüblichen Düngung (N 23) signifikant um 45 kg ha^{-1} , gegenüber der DSN-Variante (N 24) um 35 kg ha^{-1} .

N-Steigerungsversuch Wintergerste, Niedrigertragszone, ohne Gülledüngung

In der Niedrigertragszone (Tab. 65) war der Ertrag der Nullvariante N 1 mit 49 dt ha^{-1} deutlich niedriger als der Ertrag der Variante N 1 in der Hohertragszone (78 % von HE). Es wurden jedoch etwas höhere Maximalerträge bei Mineraldüngung erreicht (Höchstertag von 104 dt ha^{-1} in N 10) im Vergleich zu 98 dt ha^{-1} in N 12) in der Hohertragszone. Somit wurde in den meisten Düngungsvarianten auch eine wesentlich höhere N-Effizienz in der NE-Zone erreicht als in der HE-Zone (vgl. Tab. 64, Tab. 65).

In der Sensorvariante N 12 wurden nur insgesamt 105 kg ha^{-1} Mineral-N appliziert, dabei wurde entsprechend der Bestandesentwicklung auf eine Gabe zu EC 32 verzichtet. Der Kornertrag lag mit 96 dt ha^{-1} signifikant unter dem der Variante N 10, jedoch war auch der N-Saldo mit 34 kg ha^{-1} etwa 60 kg ha^{-1} niedriger als in der Variante N 10. In der Sensorvariante wurde zudem die höchste N-Effizienz des Versuches mit 67 % erreicht.

In der Variante DSN (N 13) wurden in drei Gaben insgesamt 145 kg ha^{-1} Mineral-N ausgebracht. Der Ertrag war auf gleichem Niveau wie in der Sensorvariante, der N-Saldo jedoch um 23 kg ha^{-1} signifikant höher. Auch in der BEFU-Variante (N 14) wurden 145 kg ha^{-1} Mineral-N appliziert, allerdings in anderer Verteilung (höhere Gaben zu Vegetationsbeginn, geringere Gaben zu EC 39). Der Ertrag war gegenüber den Varianten N 12 und N 13 etwas reduziert (nicht signifikant), der RP-Gehalt etwas erhöht. Der N-Saldo betrug 60 kg ha^{-1} .

N-Steigerungsversuch Wintergerste, Niedrigertragszone, mit Gülledüngung

Die Gülledüngung im Frühjahr zeigte eine relativ hohe Ertragswirkung (Tab. 64). So erreichte die nur mit Gülle gedüngte Variante (N 15) einen Kornertrag von 72 dt ha^{-1} , das entspricht einem Ertragszuwachs gegenüber der ungedüngten Variante (N 1) von über 20 dt ha^{-1} . Bei alleiniger Gülledüngung wurde eine N-Effizienz von 20 % ermittelt (bezogen auf den Gesamt-Stickstoff der Gülle).

Der Höchstertrag von über 100 dt ha^{-1} wurde in mehreren Varianten erzielt, u.a. in den Düngungssystemen nach Landwirt, DSN und BEFU (N 23 bis N 24). Die Sensorvariante lag mit 92 dt ha^{-1} etwas unter dem Höchstertrag, zeichnete sich aber durch den geringsten N-Saldo 51 kg ha^{-1} und die signifikant höchste N-Effizienz aus.

In der Sensorvariante wurden nur 50 kg ha^{-1} Mineral-N zu EC 39 ausgebracht. Auf die Mineral-N-Gabe zu Vegetationsbeginn wurde verzichtet, da eine Frühjahrs-Güllegabe stattfand. Zu EC 32 wurde nach dem Sensorsystem (anhand der mit dem Sensor indirekt erfassten N-Aufnahme des Pflanzenbestands sowie unter Verwendung des N-Düngealgorithmus) keine Mineral-N-Düngung vorgenommen. In der Variante N 22 (Landwirt) wurden hingegen 140 kg ha^{-1} , in der Variante DSN 130 kg ha^{-1} sowie in der Variante BEFU 145 kg ha^{-1} Mineral-N ausgebracht. In den Düngungsvarianten N 22 bis N 24 erreichten die N-Salden deutlich über 100 kg ha^{-1} .

Unter den Versuchsbedingungen erwies sich die Sensordüngung als besonders umwelt- und grundwasserschonende Bewirtschaftungsvariante, allerdings wurde das Ertragspotenzial nicht ganz ausgeschöpft.

Tab. 64: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2016, Niedrigertragszone, Herbst = 63 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, ³ = Düngung nach DSN, ⁴ = Düngung nach BEFU, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 15) bzw. N 15 (N 16 bis N 25), WG_2016_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Güllendüngung im Frühjahr									
N 1	0	0	0	0	49,2 a	10,0 ab	67,5 a	-4,5 a	
N 2	0	40	30	0	78,3 b	8,8 a	95,1 b	37,9 b	39,4 a
N 3	0	40	90	0	96,8 cde	11,7 cd	155,1 de	37,9 b	67,4 cd
N 4	0	40	30	40	94,2 c	10,0 ab	129,0 c	44,1 bc	55,8 bc
N 5	0	40	60	40	98,8 cde	11,9 cd	161,7 defg	41,3 bc	67,3 cd
N 6	0	40	90	40	100,2 cde	12,2 cd	168,1 efg	64,9 de	59,1 bcd
N 7	0	80	90	0	102,3 de	11,4 cd	160,1 def	72,9 de	54,5 b
N 8	0	80	30	40	97,3 cde	11,5 cd	154,2 de	58,8 cd	57,8 bc
N 9	0	80	60	40	102,7 de	11,7 cd	165,6 efg	77,4 ef	54,5 b
N 10	0	80	90	40	104,1 e	12,5 d	179,5 g	93,5 f	53,3 b
N 11	0	80	30	70	102,3 de	12,5 d	175,8 fg	67,2 de	60,1 bcd
N 12 ¹	0	65	0	45	95,8 cd	11,1 bc	145,6 cd	33,7 b	67,4 d
N 13 ³	0	50	35	60	98,4 cde	11,1 bc	151,0 de	57,0 cd	57,5 bc
N 14 ⁴	0	65	50	30	92,1 c	11,8 cd	148,4 cde	59,6 cde	55,8 bc
Versuch mit Güllendüngung im Frühjahr									
N 15	77	0	0	0	71,8 a	8,4 a	83,3 a	56,7 ab	(20,5) *
N 16	77	0	90	0	96,9 c	10,3 bc	137,8 b	92,2 de	60,4 ab
N 17	77	0	30	40	96,1 bc	10,9 bcd	144,5 bc	65,5 bc	87,4 c
N 18	77	0	60	40	101,9 de	12,1 e	169,9 d	70,1 bc	86,5 c
N 19	77	0	90	40	102,9 de	11,7 de	165,1 d	104,9 ef	62,8 ab
N 20	77	0	30	70	99,1 cd	11,5 cde	156,9 bcd	83,1 cd	73,5 bc
N 21	77	30	60	40	104,1 e	11,1 bcde	159,3 cd	110,7 efg	58,4 ab
N 22 ¹	77	0	0	50	92,0 b	11,4 cde	144,9 bc	51,3 a	123,1 d
N 23 ²	77	45	55	40	104,2 e	11,3 cde	162,8 cd	117,2 fgh	56,7 ab
N 24 ³	77	50	20	60	105,3 e	10,0 b	144,8 bc	125,2 gh	47,3 a
N 25 ⁴	77	45	60	40	103,2 de	10,8 bcd	153,1 bcd	131,9 h	48,1 a

3.3.3. Stickstoffdüngerversuche bei Mais

3.3.3.1. Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2015

Die Untersuchungsergebnisse des Versuches Mais_2015_1 sind in den Anhangtabellen A. 3.10 und A. 3.11 dargestellt.

Versuch Mais_2015_2

N-Steigerungsversuch Körnermais, Hohertragszone, ohne Gülledüngung

Im Körnermaisversuch (Tab. 65) wurden unter den Anbau- und Witterungsbedingungen des Jahres 2015 bereits auf der Nullvariante N 1 (die allerdings im Herbst 108 kg ha⁻¹ Gülle-N erhielt) über 110 dt ha⁻¹ Kornertrag erzielt. Die geprüften Mineral-N-Varianten führten gegenüber der Variante N 1 zu keinen signifikanten Ertragssteigerungen. Im Versuch wurden Mineral-N-Gaben von 70 bis 220 kg ha⁻¹ in unterschiedlicher Verteilung geprüft. Die N-Salden der gedüngten Varianten betragen 16 kg ha⁻¹ (N 2) bis 146 kg ha⁻¹ (N 8). Die zum Teil hohen N-Überschüsse sind auf die geringen Ertragswirkungen und die geringe N-Effizienz der N-Düngung unter den spezifischen Wachstumsbedingungen des Jahres 2015 zurückzuführen.

Tab. 65: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Körnermais. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Hohertragszone, Herbst = 108 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 11) bzw. N 11 (N 12 bis N 16), Mais_2015_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC15	EC34					
Versuch ohne Gülledüngung im Frühjahr									
N 1	0	0	0	0	111,5 a	9,6 a	146,4 a	-38,4 a	
N 2	0	70	0	0	113,1 a	10,4 abc	161,9 ab	16,0 b	22,1 ab
N 3	0	120	0	0	125,0 a	10,8 bcd	187,5 bc	40,4 bc	34,2 b
N 4	0	170	0	0	122,8 a	11,2 cd	189,8 c	88,1 d	25,4 ab
N 5	0	70	50	0	112,8 a	11,0 bcd	171,8 abc	56,1 c	21,1 ab
N 6	0	120	50	0	118,9 a	11,0 bcd	179,5 bc	98,4 de	19,4 ab
N 7	0	70	100	0	116,1 a	10,9 bcd	174,7 bc	103,2 de	16,6 ab
N 8	0	120	100	0	114,4 a	11,5 d	181,4 bc	146,5 f	15,9 ab
N 9	0	70	0	50	125,3 a	10,3 ab	179,0 bc	48,9 c	27,1 ab
N 10	0	70	0	100	111,1 a	10,6 bcd	163,0 ab	114,9 e	9,7 a
Versuch mit Gülledüngung im Frühjahr									
N 11	168	0	0	0	115,4 a	10,0 a	159,1 ab	116,8 a	(7,6)
N 12	168	0	50	0	120,7 ab	10,2 a	169,9 bc	156,0 b	21,4 bc
N 13	168	0	100	0	121,5 abc	10,3 a	173,1 bc	202,8 cd	13,9 b
N 14	168	0	0	50	106,4 bc	9,8 a	144,7 a	181,2 c	-28,7 a
N 15	168	0	0	100	116,0 bc	10,0 a	160,8 ab	215,1 d	1,6 ab
N 16 ¹	168	60	0	0	134,7 c	10,3 a	192,6 c	143,3 b	55,8 c

N-Steigerungsversuch Körnermais, Hohertragszone, mit Gülledüngung

Die Frühjahrsdüngung mit Gülle zeigte fast keine Ertragseffekte. So brachte die Güllevariante N 11, die im Frühjahr 168 kg ha⁻¹ Gülle-N erhielt, einen Maisertrag von 115 dt ha⁻¹ gegenüber 111 dt ha⁻¹ der Nullvariante N 1. Die theoretische Gülle-N-Verwertung lag daher unter 10 %.

Der Höchstertrag wurde in der Variante Landwirt (N 16) mit einer Mineral-N-Gabe von 60 kg ha⁻¹ zu Vegetationsbeginn erzielt. In dieser Variante betrug der N-Saldo 143 kg ha⁻¹. Spätere N-Gaben zu EC 15 und EC 34 (N 12 bis N 15) hatten tendenziell geringere Ertragswirkungen und führten daher zu höheren N-Salden als die vom Landwirt vorgenommene frühe N-Gabe (N 16).

N-Steigerungsversuch Körnermais, Niedrigertragszone, ohne Gülledüngung

In der Niedrigertragszone wurden in der ungedüngten Variante N 1 mit einem Ertrag von 71 dt ha⁻¹ ca. 65 % des Ertrages der Variante N 1 der Hohertragszone erreicht. Auch in den gedüngten Varianten waren die Erträge der NE-Zone niedriger als in der HE-Zone (vgl. Tab. 65 und Tab. 66).

Tab. 66: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Körnermais. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Niedrigertragszone, Herbst = 108 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 11) bzw. N 11 (N 12 bis N 16), Mais_2015_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC15	EC34					
Versuch ohne Gülledüngung im Frühjahr									
N 1	0	0	0	0	71,5 a	7,5 a	75,0 a	32,9 a	
N 2	0	70	0	0	81,5 ab	8,5 ab	96,6 ab	81,3 b	30,9 ab
N 3	0	120	0	0	71,3 a	11,1 c	107,9 abc	120,0 bcd	27,4 ab
N 4	0	170	0	0	67,1 a	11,2 c	101,3 abc	176,6 e	15,5 a
N 5	0	70	50	0	92,0 ab	10,2 bc	130,8 bcd	97,1 b	46,5 b
N 6	0	120	50	0	87,8 ab	11,3 c	134,2 cd	143,7 cde	34,8 ab
N 7	0	70	100	0	92,3 ab	10,2 bc	126,6 bcd	151,3 de	30,3 ab
N 8	0	120	100	0	102,8 b	10,8 c	154,0 d	173,9 e	35,9 ab
N 9	0	70	0	50	79,4 ab	11,0 c	119,0 bcd	108,9 bc	36,6 ab
N 10	0	70	0	100	91,4 ab	10,3 bc	130,7 bcd	147,2 de	32,7 ab
Versuch mit Gülledüngung im Frühjahr									
N 11	168	0	0	0	107,4 a	9,0 a	134,1 a	141,8 a	(35,2)
N 12	168	0	50	0	109,7 a	9,2 a	140,0 a	185,9 ab	11,7 a
N 13	168	0	100	0	108,3 a	9,3 a	141,4 a	234,5 c	7,2 a
N 14	168	0	0	50	112,4 a	8,9 a	138,5 a	187,4 ab	8,8 a
N 15	168	0	0	100	116,5 a	9,3 a	151,1 a	224,8 bc	16,9 a
N 16 ¹	168	60	0	0	103,3 a	9,3 a	135,6 a	200,3 bc	2,4 a

Der Maximalertrag von 103 dt ha⁻¹ wurde in der Variante N 8 mit den höchsten Mineral-N-Gaben (220 kg ha⁻¹) erzielt; jedoch war dies mit sehr hohen N-Salden von 174 kg ha⁻¹ verbunden. Mineral-N-Gaben ausschließlich zu Vegetationsbeginn (N2 bis N 4) hatten nur geringe Ertragseffekte bei einer geringen N-Effizienz.

N-Steigerungsversuch Körnermais, Niedrigertragszone, mit Gülledüngung

Die Gülledüngung im Frühjahr (N 11) führte zu deutlich höheren Erträgen (107 dt ha⁻¹) als in Variante N 1. Daher wurde auch eine relativ hohe Gülle-N-Verwertung von 35 % berechnet. Zusätzliche Mineral-N-Gaben zeigten keinen positiven Ertragseffekt, die N-Verwertung war außerordentlich gering. Daher traten sehr hohe N-Salden bis deutlich über 200 kg ha⁻¹ auf.

3.3.3.2. Versuchsergebnisse des Untersuchungsjahres 2016

Auf dem Schlag Mais_2016_1 wurden durch den Landwirt vor Aussaat einer Zwischenfrucht im Jahr 2015 72 kg ha⁻¹ Gülle-N appliziert. Im Frühjahr 2016 wurden im Versuch mit Gülledüngung weitere 144 kg ha⁻¹ als Gülle-N gegeben. Die weiteren Düngegaben erfolgten mineralisch (Tab. 67). Nach Bodenschätzungskarte wurden für die Düngesysteme Zielerträge von 115 dt ha⁻¹ in der Hohertragszone und 100 dt ha⁻¹ in der Niedrigertragszone angenommen.

N-Steigerungsversuch Körnermais, Hohertragszone, ohne Gülledüngung

Im Versuch zeigten sich deutliche ertragssteigernde Effekte der Mineral-N-Düngung. Gegenüber der ungedüngten Variante N 1 (103 dt ha⁻¹) stieg der Ertrag auf maximal 167 dt ha⁻¹ (+ 63 %) in der Variante DSN (N 12). In der Variante N 12 erfolgte eine hohe Mineral-N-Gabe (160 kg ha⁻¹) zu Vegetationsbeginn. Die DSN-Variante zeichnete sich durch sehr niedrige N-Salden und eine hohe N-Effizienz aus.

In der Sensorvariante wurde der Mineral-N in drei Gaben appliziert (insgesamt 180 kg ha⁻¹), wobei der Ertrag etwas niedriger war (157 dt ha⁻¹) als in der Variante N 12 (nicht signifikant). Der N-Saldo (49 kg ha⁻¹) war signifikant höher als in der Variante N 12.

Die BEFU-Variante (N 13) erreichte einen signifikant niedrigeren Ertrag als die DSN-Variante, obwohl die gleiche N-Menge (160 kg ha⁻¹) ausgebracht wurde, allerdings bei einer Aufteilung in zwei N-Gaben.

N-Steigerungsversuch Körnermais, Hohertragszone, mit Gülledüngung

In der Variante mit alleiniger Gülledüngung wurde ein Ertrag von 134 dt ha⁻¹ realisiert. Die Verwertung des Gülle-N betrug ca. 30 %. Mit einer späten N-Gabe (EC 34) von 50 kg ha⁻¹ Mineral-N (N 17) wurde das Ertragspotenzial ausgeschöpft. Höhere N-Gaben bewirkten keine weiteren Ertragssteigerungen. In der Sensorvariante wurde N-Gaben von 25 kg ha⁻¹ zu EC 15 und 50 kg ha⁻¹ zu EC 34 appliziert.

Das Sensorsystem reduzierte die Mineral-N-Gaben bei Gülledüngung (N 20) gegenüber der alleinigen Mineral-N-Düngung (N 11) um 105 kg ha⁻¹. Mit dieser Düngestrategie wurden in beiden Varianten (N 11 und N 20) nahezu die gleichen Erträge realisiert, jedoch war der N-Saldo mit 93 kg ha⁻¹ bei kombinierter Gülle- und Mineral-N-Düngung deutlich höher als bei ausschließlicher Mineraldüngeranwendung. Ein wesentlicher Grund besteht darin, dass ein erheblicher Teil des Gülle-N in organischer Bindung vorliegt und daher zunächst im Boden-N-Pool (organische Bodensubstanz) gespeichert wird.

Tab. 67: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Körnermais. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2016, Hohertragszone, Herbst = 72 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, ³ = Düngung nach DSN, ⁴ = Düngung nach BEFU, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 14) bzw. N 14 (N 15 bis N 23), Mais_2016_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N VB	Mineraldünger-N VB EC15 EC34							
Versuch ohne Gülledüngung im Frühjahr									
N 1	0	0	0	0	102,6 a	7,2 a	101,9 a	-29,9 a	
N 2	0	70	0	0	121,4 b	7,8 ab	131,4 b	10,5 b	42,1 ab
N 3	0	120	0	0	144,2 cd	8,3 bc	165,5 cd	26,4 bc	53,0 abc
N 4	0	170	0	0	152,8 d	9,0 cd	189,4 de	52,5 d	51,4 abc
N 5	0	70	50	0	133,4 bc	7,9 ab	146,2 bc	45,7 cd	36,9 a
N 6	0	120	50	0	147,2 d	9,0 de	185,5 de	56,4 d	49,1 abc
N 7	0	70	100	0	155,1 de	8,9 cd	191,6 e	50,3 cd	52,7 abc
N 8	0	120	100	0	156,4 de	9,5 de	205,4 ef	86,5 e	47,0 ab
N 9	0	70	0	50	151,6 d	8,8 cd	183,9 de	8,0 b	68,3 cd
N 10	0	70	0	100	156,4 de	9,4 de	204,4 ef	37,5 cd	60,3 bcd
N 11 ¹	0	50	40	90	156,6 de	9,4 de	202,9 ef	49,0 cd	56,1 abc
N 12 ³	0	160	0	0	166,8 e	9,8 e	225,9 f	6,0 b	77,5 d
N 13 ⁴	0	95	65	0	150,2 d	8,8 cd	184,0 de	47,9 cd	51,3 abc
Versuch mit Gülledüngung im Frühjahr									
N 14	144	0	0	0	134,1 a	7,8 a	144,1 a	71,8 a	(29,3)
N 15	144	0	50	0	138,0 ab	8,2 abc	156,3 ab	109,6 bcd	24,4 a
N 16	144	0	100	0	147,1 bcd	8,6 bcd	174,4 abcd	141,5 d	30,3 a
N 17	144	0	0	50	160,6 d	9,0 cd	200,5 d	65,4 a	112,8 b
N 18	144	0	0	100	156,9 cd	9,2 d	200,6 d	115,3 cd	56,4 ab
N 19	144	0	70	0	148,8 bcd	8,5 abcd	174,9 bcd	111,0 cd	44,0 ab
N 20 ¹	144	0	25	50	156,0 cd	9,1 d	197,6 d	93,3 abc	71,4 ab
N 21 ²	144	30	0	60	152,3 bcd	9,0 cd	190,9 cd	115,0 cd	52,0 ab
N 22 ³	144	105	0	0	152,5 bcd	9,1 d	191,8 cd	129,1 d	45,4 ab
N 23 ⁴	144	20	0	0	144,3 abc	8,0 ab	160,9, abc	75,0 ab	84,1 ab

Der Landwirt (Variante N 21) entschied sich für eine frühe und eine späte N-Gabe von insgesamt 90 kg ha⁻¹. Die Erträge waren tendenziell niedriger, die N-Salden etwas höher als in der Sensorvariante (nicht signifikant). In der DSN-Variante (N 22) wurde die gesamte N-Gabe zu Vegetationsbeginn appliziert (analog zur Variante N 12), allerdings war die Mineral-N-Zufuhr im Versuch mit Gülledüngung reduziert um 55 kg ha⁻¹, verglichen mit der Variante N 12. Die Düngung nach DSN führte zu signifikant höheren N-Salden als die Sensorvariante. Die BEFU-Variante (N 14) zeichnete sich durch extrem geringe Mineral-N-Gaben (20 kg ha⁻¹ zu Vegetationsbeginn) aus. Im BEFU-Düngungssystem führen hohe Gülle-N-Gaben im Frühjahr zu einer drastischen Reduzierung der Mineral-N-Düngung, weil von einer hohen Pflanzenverfügbarkeit des Gülle-N ausgegangen wird.

3.3.4. Schlepper-Sensormessungen auf Praxis- und Versuchsflächen

Im Jahr 2015 wurden auf Praxisschlägen mit den Fruchtarten Wintergerste und Winterweizen Sensorfahrten mit dem neuentwickelten Schlepper-Sensor-System (vgl. Abb. 26, Abschnitt 3.2.7.) durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen werden in aufbereiteter Form (QGis 2014) als thematische Schlagkarten dargestellt (Abb. 27 bis Abb. 32). Die mit dem Sensorsystem und N-Düngealgorithmus ermittelten N-Düngermengen sind dabei in den drei Farben rot (keine N-Gabe), gelb (mittlere N-Gabe) und grün (hohe N-Gabe) gekennzeichnet. Die Düngung der Schläge führten die Landwirte ohne Kenntnis der Ergebnisse der Sensormessungen durch. Diese Düngung ist als „Düngung Landwirt“ angegeben.

3.3.4.1. Gesamtschlaganalyse Wintergerste

Zu Vegetationsbeginn wurden vom Landwirt $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ Gülle (= 84 kg ha^{-1} Gülle-N) und 65 kg ha^{-1} Mineral-N in Form von Ammoniumsulfatsalpeter ausgebracht (Abb. 27). Der Landwirt düngte zu EC 32 60 kg ha^{-1} Mineral-N als Langzeitdünger Alzon und verzichtete danach auf weitere N-Gaben.

Vor der Alzon-Ausbringung zu EC 32 sowie zu EC 39 und EC 65 wurden Sensorfahrten durchgeführt.

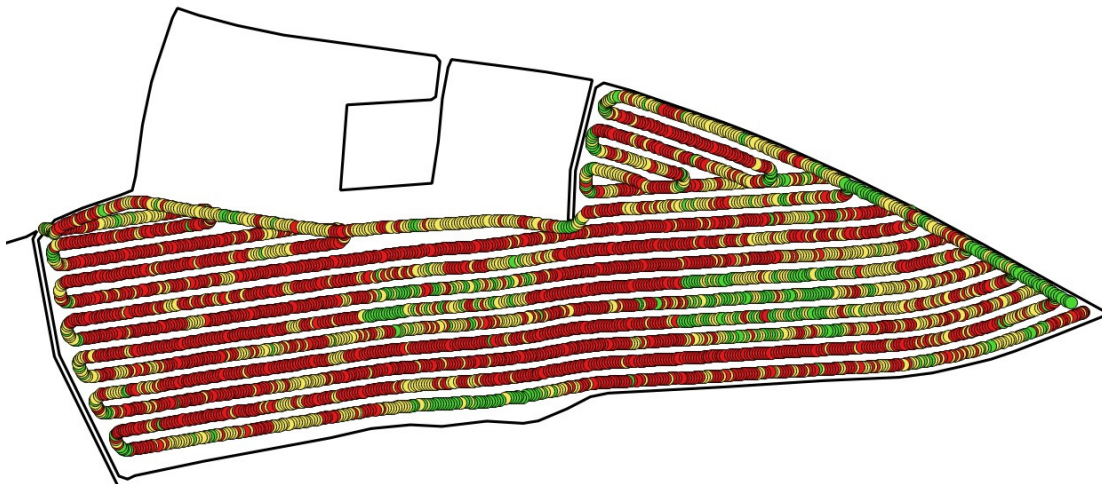


Abb. 27: Düngempfehlung zu EC 32 nach Schlepper-Sensorfahrt und N-Düngealgorithmus auf einem Praxisschlag mit Wintergerste, 2015

Erläuterungen zu Abb. 27	
Düngung Landwirt	N-Bedarf nach Sensormessung zu EC 32
VB: Gülle-N: 84 kg ha^{-1}	roter Bereich: Keine Düngung notwendig
VB: Mineral-N: 65 kg ha^{-1} (ASS)	gelber Bereich: N-Gabe von $20 - 40 \text{ kg ha}^{-1}$
EC 32: Mineral-N: 60 kg ha^{-1} (Alzon)	grüner Bereich: N-Gabe von $50 - 70 \text{ kg ha}^{-1}$

Nach den Ergebnissen der Sensormessungen und der Anwendung des TUM-Düngealgorithmus wäre zu EC 32 im rot gekennzeichneten Bereich keine N-Düngung, im gelben Bereich eine N-Gabe von 20 bis 40 kg ha⁻¹ und im grünen Bereich von 50 bis 70 kg ha⁻¹ notwendig gewesen (Abb. 27). Demnach hätte zu EC 32 der größte Teil des Feldes nicht gedüngt werden müssen. Es wurden nur wenige Teilflächen mit einem N-Düngebedarf über 50 kg ha⁻¹ (grün) identifiziert, und zwar am östlichen und südlichen Schlagrand sowie im Bereich des in den Schlag integrierten N-Düngeversuchs.

Durch eine Sensormessung zu EC 39 wurde eine Düngeempfehlung als Schlussgabe erstellt (Abb. 28). Demnach war der rote Bereich des Schlages bereits bis zu 50 kg ha⁻¹ N überversorgt. Die gelben Bereiche hätten nur noch gering mit Mineral-N (20 – 40 kg ha⁻¹), die grünen Bereiche mit 50 bis 70 kg ha⁻¹ gedüngt werden sollen. Aufgrund der geringen Flächenanteile dieser Bereiche (nur am Schlagrand und im Versuchsbereich) wäre auch nach Sensor keine N-Düngung zu EC 39 notwendig gewesen.

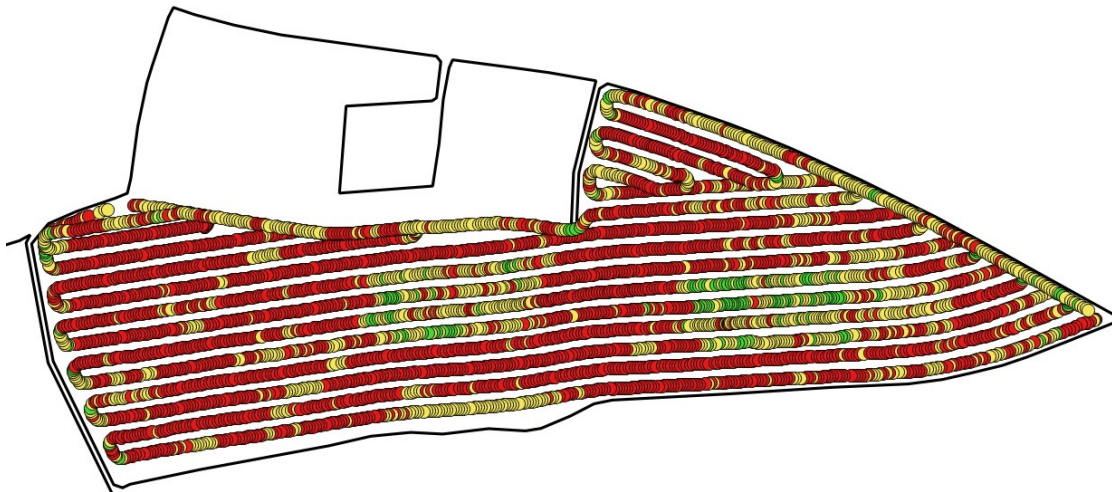


Abb. 28: Düngeempfehlung zu EC 39 nach Schlepper-Sensorfahrt und N-Düngealgorithmus auf einem Praxisschlag mit Wintergerste, 2015

Erläuterungen zu Abb. 28	
Düngung Landwirt	N-Bedarf nach Sensormessung zu EC 39
VB: Gülle-N: 84 kg ha ⁻¹	roter Bereich: überversorgt um bis zu 50 kg ha ⁻¹
VB: Mineral-N: 65 kg ha ⁻¹ (ASS)	gelber Bereich: N-Gabe von 20 - 40 kg ha ⁻¹
EC 32: Mineral-N: 60 kg ha ⁻¹ (Alzon)	grüner Bereich: N-Gabe von 50 - 70 kg ha ⁻¹
EC 39: keine N-Gabe	

Die mit dem Sensorsystem ermittelte N-Versorgung des Pflanzenbestandes zu EC 65 (Abb. 29) zeigt, dass nahezu der gesamte Schlag mit bis zu 100 kg ha⁻¹ mit Stickstoff überversorgt war.

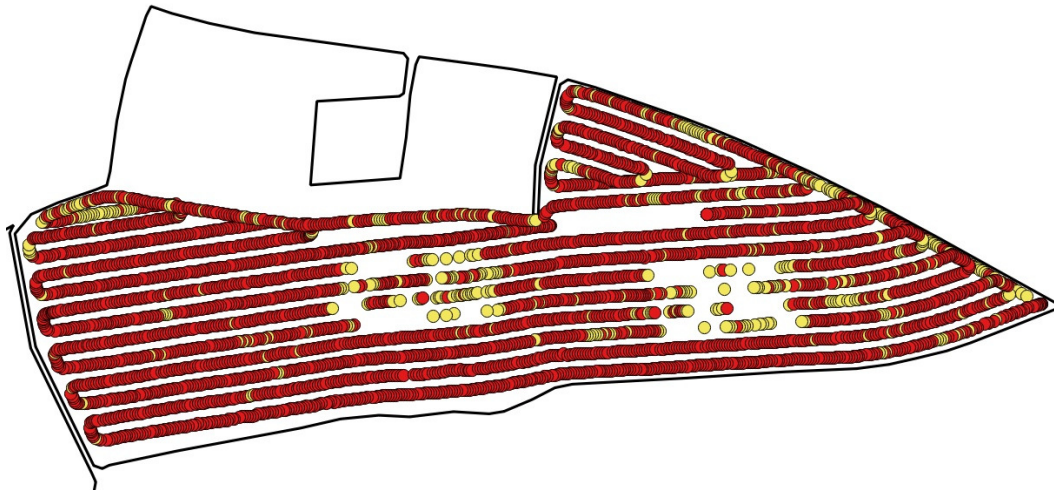


Abb. 29: N-Versorgung zu EC 65 auf einem Praxisschlag mit Wintergerste, 2015

Erläuterungen zu Abb. 29	
Düngung Landwirt	N-Versorgung nach Sensormessung zu EC 65
VB: Gülle-N: 84 kg ha ⁻¹	roter Bereich: überversorgt: > 100 kg ha ⁻¹
VB: Mineral-N: 65 kg ha ⁻¹ (ASS)	gelber Bereich: überversorgt: 10 - 50 kg ha ⁻¹
EC 32: Mineral-N: 60 kg ha ⁻¹ (Alzon)	
EC 39: keine N-Gabe	

Nach den Ernteergebnissen des Landwirtes betrug der Wintergerstenertrag im Schlagmittel 94 dt ha⁻¹ bei einem Rohproteingehalt von 12 %. Insgesamt wurden vom Landwirt 209 kg ha⁻¹ Dünger-N ausgebracht. Bei einem Korn-N-Entzug von 157 kg ha⁻¹ entspricht das einem N-Saldo von 52 kg ha⁻¹.

Aus den Ergebnissen der Sensormessungen zu Wintergerste ist zu schlussfolgern, dass auf dem untersuchten Schlag unter den Bedingungen des Jahres 2015 ohne Ertragseinbußen Mineraldünger-N einzusparen war. Bei Anwendung des TUM-Düngesystems und Umsetzung der Düngeempfehlungen wäre eine ausgeglichene N-Bilanz (N-Saldo = 0 kg ha⁻¹) erreichbar gewesen. Darüber hinaus zeigen die Sensormessungen, dass die zu EC 39 festgestellte N-Überversorgung von 50 kg ha⁻¹ im Vegetationsverlauf sogar weiter anstieg (auf 100 kg ha⁻¹ zu EC 65), obwohl keine zusätzliche N-Düngung stattfand. Dies ist durch die hohe N-Nachlieferung des Bodens (hohes N-Mineralisationspotenzial nach langjähriger Gülledüngung) sowie die Wirkung des Langzeitdüngers zu erklären.

3.3.4.2. Gesamtschlaganalyse Winterweizen

Auf dem Winterweizenschlag wurden im Jahr 2015 zu Vegetationsbeginn $19 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ Schweinegülle (= 95 kg ha^{-1} Gülle-N bei einem N-Gehalt von 5 kg m^{-3}) und 40 kg ha^{-1} Mineral-N in Form von Ammoniumsulfatsalpeter appliziert. Zu EC 32 wurde die erste Sensormessung des Gesamtschlages durchgeführt und die Düngeempfehlung erstellt. Das Feld wies allgemein einen N-Düngebedarf auf. Die gelben Bereiche sollten nach TUM-Algorithmus mit 30 bis 40 kg ha^{-1} Mineral-N, die grünen Bereiche mit 60 bis 80 kg ha^{-1} Mineral-N gedüngt werden. Der Landwirt düngte (ohne Kenntnis der Ergebnisse der Sensorfahrt) schlageinheitlich 35 kg ha^{-1} zu EC 32 (Abb. 30).

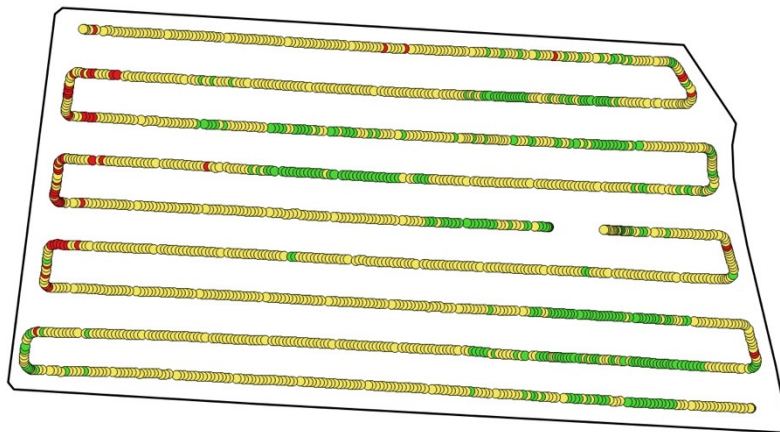


Abb. 30: Düngeempfehlung zu EC 32 nach Schlepper-Sensorfahrt und N-Düngealgorithmus auf einem Praxisschlag mit Winterweizen, 2015

Erläuterungen zu Abb. 30	
Düngung Landwirt	N-Bedarf nach Sensormessung zu EC 32
VB: Gülle-N: 95 kg ha^{-1}	roter Bereich: Keine Düngung notwendig
VB: Mineral-N: 40 kg ha^{-1} (ASS)	gelber Bereich: N-Gabe von $30 - 40 \text{ kg ha}^{-1}$
EC 32: Mineral-N: 35 kg ha^{-1}	grüner Bereich: N-Gabe von $60 - 80 \text{ kg ha}^{-1}$

Bei der zweiten Sensormessung des Gesamtschlages wurde eine Düngeempfehlung zu EC 39 als Schlussgabe erstellt. Auf den roten Bereichen sollte demnach kein Dünger mehr appliziert werden; dieser Bereich kann aufgrund des geringen Flächenanteils praktisch vernachlässigt werden. Auf den gelben Bereichen sollten $30 - 40 \text{ kg ha}^{-1}$ und auf den grünen Bereichen $60 - 80 \text{ kg ha}^{-1}$ Mineral-N ausgebracht werden. Der Landwirt düngte den Schlag einheitlich mit 50 kg ha^{-1} Mineral-N (letzte N-Gabe). Er hatte somit im Mittel des Schlages N-Gaben gewählt, die etwa dem Mittel der Düngeempfehlung nach Sensor entsprachen. Allerdings düngte er schlageinheitlich ohne Differenzierung nach Ertragszonen bzw. unterschiedlichem N-Bedarf des Pflanzenbestandes.

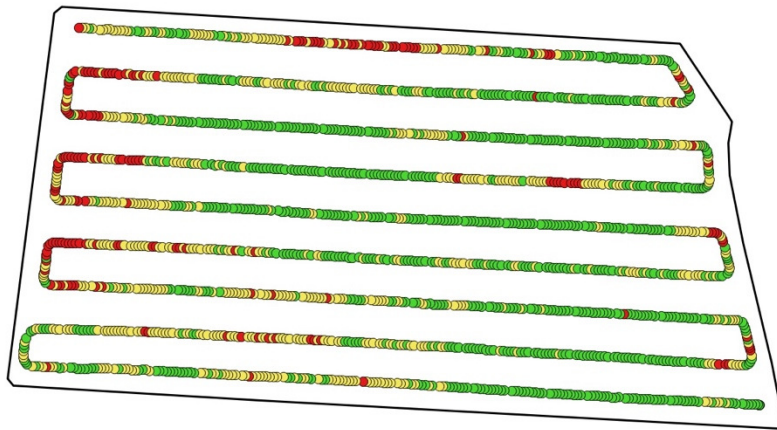


Abb. 31: Düngempfehlung zu EC 39 nach Schlepper-Sensorfahrt und N-Düngeralgorithmus auf einem Praxis Schlag mit Winterweizen, 2015

Erläuterungen zu Abb. 31	
Düngung Landwirt	N-Bedarf nach Sensormessung zu EC 39
VB: Gülle-N: 95 kg ha ⁻¹	roter Bereich: Keine Düngung notwendig
VB: Mineral-N: 40 kg ha ⁻¹ (ASS)	gelber Bereich: N-Gabe von 30 - 40 kg ha ⁻¹
EC 32: Mineral-N: 35 kg ha ⁻¹	grüner Bereich: N-Gabe von 60 - 80 kg ha ⁻¹
EC 39: Mineral-N: 50 kg ha ⁻¹	

Bei der dritten Sensormessung zu EC 65 war der Pflanzenbestand trotz vorausgegangener optimaler N-Düngung deutlich überversorgt (im Mittel des Schlages mit > 50 kg ha⁻¹ Stickstoff, Abb. 32). Die Überversorgung des Pflanzenbestandes ist auf die enorme N-Nachlieferung des Bodens auf diesem Standort mit langjähriger Güllendüngung zurückzuführen, auf die in dieser Vegetationsphase durch Mineraldüngung nicht mehr reagiert werden konnte.

Im Mittel des Schlages wurden 111 dt ha⁻¹ Weizen mit einem Proteingehalt von 10,7 % (C-Weizen) geerntet. Die Gesamt-N-Düngemenge des Landwirtes betrug 220 kg ha⁻¹ (Gülle-N + Mineral-N). Die Korn-N-Aufnahme erreichte 180 kg ha⁻¹. Somit ergab sich ein N-Saldo von 40 kg ha⁻¹.

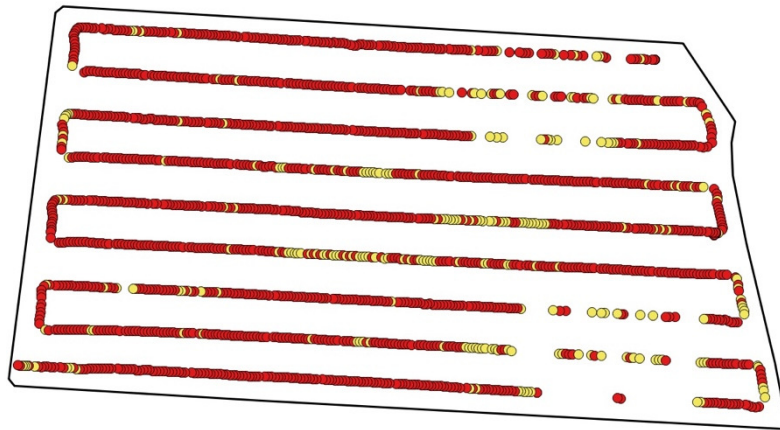


Abb. 32: Düngempfehlung zu EC 39 nach Schlepper-Sensorfahrt und N-Düngealgorithmus auf einem Praxisschlag mit Winterweizen, 2015

Erläuterungen zu Abb. 32	
Düngung Landwirt	N-Versorgung nach Sensormessung zu EC 65
VB: Gülle-N: 95 kg ha ⁻¹	roter Bereich: überversorgt: > 50 kg ha ⁻¹
VB: Mineral-N: 40 kg ha ⁻¹ (ASS)	gelber Bereich: überversorgt: 10 - 50 kg ha ⁻¹
EC 32: Mineral-N: 35 kg ha ⁻¹	
EC 39: Mineral-N: 50 kg ha ⁻¹	

Insgesamt zeigt das Beispiel des Winterweizenschlages (analog zum untersuchten Wintergerstenschlag) die besondere Problematik und die Herausforderungen bei der Bestandesführung bei hohen N-Mineralisationspotenzialen nach langjährig intensiver Gölledüngung. Wenn die Mineralisationsbedingungen so günstig sind wie im Frühjahr 2015, können so starke N-Mineralisationsschübe auftreten, dass eine drastische Reduzierung der Mineral-N-Düngung, ggf. sogar der vollständige Verzicht auf Mineral-N-Gaben notwendig sind. Die Landwirte brauchen, um diese Entscheidung treffen zu können, eine verlässliche Einschätzung der N-Aufnahme des Pflanzenbestandes im jeweiligen EC-Stadium, was durch den Einsatz des TUM-Sensorsystems möglich ist.

3.3.4.3. Düngevergleich Landwirt – sensorgestütztes Düngesystem Winterweizen

In den Jahren 2015 und 2016 fanden auf Praxisschlägen mit Winterweizen Untersuchungen zum Vergleich der „Düngung nach Landwirt“ (praxisübliche Düngung) mit dem sensorgestützten TUM-Düngesystem statt. Der Schlag wurde in zwei Teilschläge mit möglichst gleichen Bodeneigenschaften und Ertragspotenzialen geteilt. Ein Teilschlag wurde betriebsüblich gedüngt, der zweite Teilschlag nach den Düngeempfehlungen des sensorgestützten N-Düngesystem TUM gedüngt.

Untersuchungen im Jahr 2015

Alle Düngergaben wurden durch den Landwirt mit dem Dünger Piamon durchgeführt. Zu Vegetationsbeginn applizierte der Landwirt 40 kg ha^{-1} Mineral-N, auf dem Teilschlag mit Sensordüngung wurden einheitlich 60 kg ha^{-1} Mineral-N bei einer Ertragserwartung von 100 dt ha^{-1} gegeben (Abb. 33). Als Sortentyp wurde ein A-Weizen verwendet.

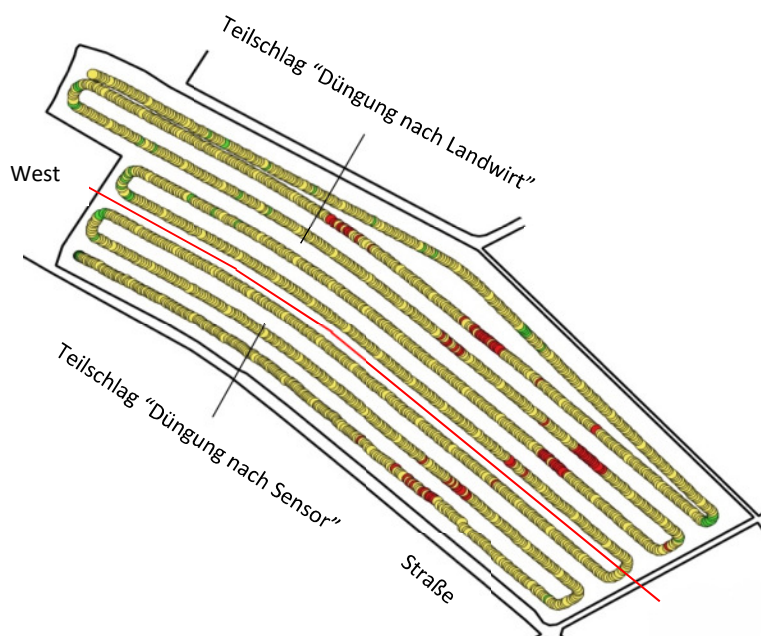


Abb. 33: Düngeempfehlung zu EC 32 nach Schlepper-Sensorfahrt und Vergleich der Düngesysteme auf einem Praxisschlag mit Winterweizen, 2015

Erläuterungen zu Abb. 33		
Düngung nach Landwirt	Düngung nach Sensor	N-Bedarf nach Sensormessung zu EC 32
VB: Mineral-N: 40 kg ha^{-1} EC 32: Mineral-N: 80 kg ha^{-1}	VB: Mineral-N: 60 kg ha^{-1} EC 32: Mineral-N: 1. Fahrgasse (Straße): 90 kg ha^{-1} 2. und 3. Fahrgasse westlich: 75 kg ha^{-1} 2. und 3. Fahrgasse östlich: 90 kg ha^{-1}	roter Bereich: N-Gabe von $30 - 50 \text{ kg ha}^{-1}$ gelber Bereich: N-Gabe von $80 - 90 \text{ kg ha}^{-1}$ grüner Bereich: N-Gabe von $90 - 120 \text{ kg ha}^{-1}$

Nach den Ergebnissen der Sensormessungen zu EC 32 wurde die N-Düngeempfehlung berechnet. Zu EC 32 waren im roten Bereich 30 – 50 kg ha⁻¹, im gelben Bereich 80 – 90 kg ha⁻¹ und im grünen Bereich 90 – 120 kg ha⁻¹ Mineral-N zu düngen. Die Ergebnisse der Sensormessungen wurde so umgesetzt, dass in der 1. Fahrgasse (südlich) 90 kg ha⁻¹, in der 2. und 3. Fahrgasse (westlich) 75 kg ha⁻¹ und in der 2. und 3. Fahrgasse (östlich) 90 kg ha⁻¹ Mineral-N appliziert wurden. Zur Vereinfachung der Düngerausbringung für den Landwirt wurden die Düngergaben nicht kleinräumig variierend, sondern für größere Schlagbereiche (je Fahrgasse bzw. für die östliche und westliche Seite) festgelegt (Abb. 33). Der Landwirt düngte einheitlich 80 kg ha⁻¹ Mineral-N.

Zum nächsten Düngetermin EC 39 wurde nach Sensormessung für den Gesamtschlag eine Düngeempfehlung als Schlussrate ermittelt. Der rote Bereich war optimal versorgt und benötigte bis zum Ende der Vegetation keine weitere Düngung. Im gelben Bereich war eine Düngung in Höhe von 20 bis 50 kg ha⁻¹, im grünen Bereich von 50 – 80 kg ha⁻¹ Mineral-N erforderlich (Abb. 34).

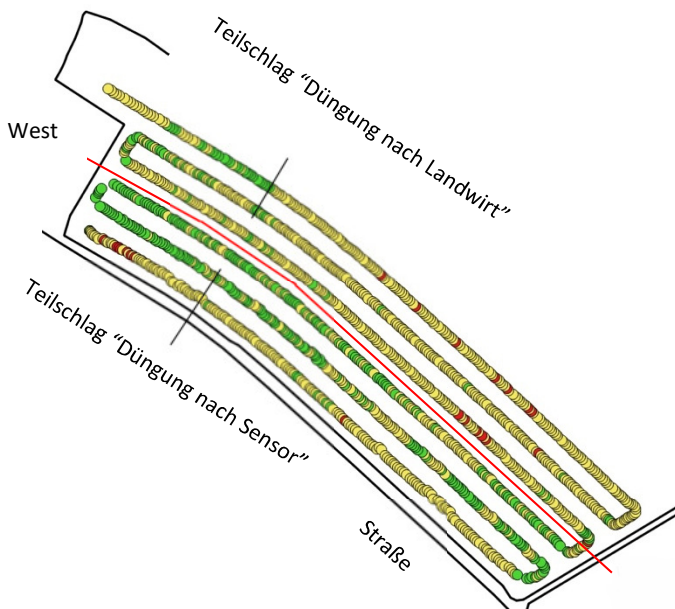


Abb. 34: Düngempfehlung zu EC 39 nach Schlepper-Sensorfahrt und Vergleich der Dünagesysteme auf einem Praxisschlag mit Winterweizen, 2015

Erläuterungen zu Abb. 34		
Düngung nach Landwirt	Düngung nach Sensor zu EC 39	N-Bedarf nach Sensormessung zu EC 39
VB: Mineral-N: 40 kg ha ⁻¹ EC 32: Mineral-N: 80 kg ha ⁻¹ EC 39: Mineral-N: 100 kg ha ⁻¹	EC 39: Mineral-N: 1. Fahrgasse (Straße): 0 kg ha ⁻¹ 2. und 3. Fahrgasse westlich: 60 kg ha ⁻¹ 2. und 3. Fahrgasse östlich: 40 kg ha ⁻¹	roter Bereich: keine N-Gabe gelber Bereich: N-Gabe von 20 - 50 kg ha ⁻¹ grüner Bereich: N-Gabe von 50 - 80 kg ha ⁻¹

Vom Landwirt wurden einheitlich 100 kg ha⁻¹ Mineral-N appliziert. Nach Sensor wurde in der 1. Fahrgasse kein Dünger, in der 2. und 3. Fahrgasse, westlich 60 kg ha⁻¹ und östlich 40 kg ha⁻¹ Mineral-N ausgebracht (Abb. 34).

Bei der Kontrollmessung zu EC 65 (nicht dargestellt) wurde auf dem Gesamtschlag eine leichte N-Übersorgung festgestellt. Diese Übersorgung ist auf die Nachlieferung aus dem Boden zurückzuführen. Sowohl im Bereich „Landwirt“ als auch im Bereich „Sensor“ betrug die höchste N-Übersorgung 38 kg ha⁻¹ Mineral-N.

Um die beiden unterschiedlich gedüngten Bereiche vergleichen zu können, wurde zwischen zwei Fahrgassen ein gleich langer Kerndrusch durchgeführt und separat gewogen, um den Ertrag der Teilflächen zu ermitteln. Auf den beiden untersuchten Teilflächen wurde ein nahezu identischer Kornertrag von 115 bzw. 114 dt ha⁻¹ bei gleichem Rohproteingehalt und N-Entzug erzielt (Tab. 68). Der N-Saldo der Sensorvariante lag aufgrund der geringeren N-Düngung 20 kg ha⁻¹ niedriger als in der Variante „Landwirt“. Auf beiden Teilflächen wurde mit 96 bzw. 109 % eine außergewöhnlich hohe N-Effizienz erreicht.

Tab. 68: Düngevergleich Landwirt - sensorgestütztes Düngesystem Winterweizen, 2015

Zone	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]	Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
Landwirt	219	114,9	12,5	212	7	96,8
Sensor	193	113,9	12,5	210	-17	108,8

Untersuchungen im Jahr 2016

Im Jahr 2016 wurde ebenfalls auf einem Praxisschlag ein Düngevergleich zwischen dem Schlepper-Sensorsystem und der betriebsüblichen, schlageinheitlichen Düngung durchgeführt. Als Sortentyp wurde ein E-Weizen verwendet. Es wurde ein Zielertrag von 100 dt ha⁻¹ bei einem Proteingehalt von mindestens 13 % angestrebt.

Die Düngegaben wurden analog zum Düngevergleich im Jahr 2015 durch den Landwirt appliziert, auf dem Teilschlag mit Sensordüngung unter der Verwendung von zuvor erstellten Düngekarten. Zu Vegetationsbeginn wurden auf dem Bereich „Düngung nach Landwirt“ 40 kg ha⁻¹, auf dem Bereich „Düngung nach Sensor“ 60 kg ha⁻¹ einheitlich ausgebracht. Zum nächsten Düngetermin (EC 32) wurden auf dem Versuchsbereich nach Landwirt einheitlich 80 kg ha⁻¹ ausgebracht.

Bereits zum Düngetermin in EC 32 wurde nach Spektralanalyse eine differenzierte N-Aufnahme des Weizenbestandes festgestellt und somit ein unterschiedlicher N-Düngebedarf abgeleitet (Abb. 35). Im Düngebereich nach Sensor wurden daher nach dem TUM-Weizen-Algorithmus für jede Fahrgasse (1 bis 6) und zusätzlich, falls ein differenzierter N-Düngebedarf bestand, der westliche Bereich und der östliche Bereich unterschiedlich gedüngt.

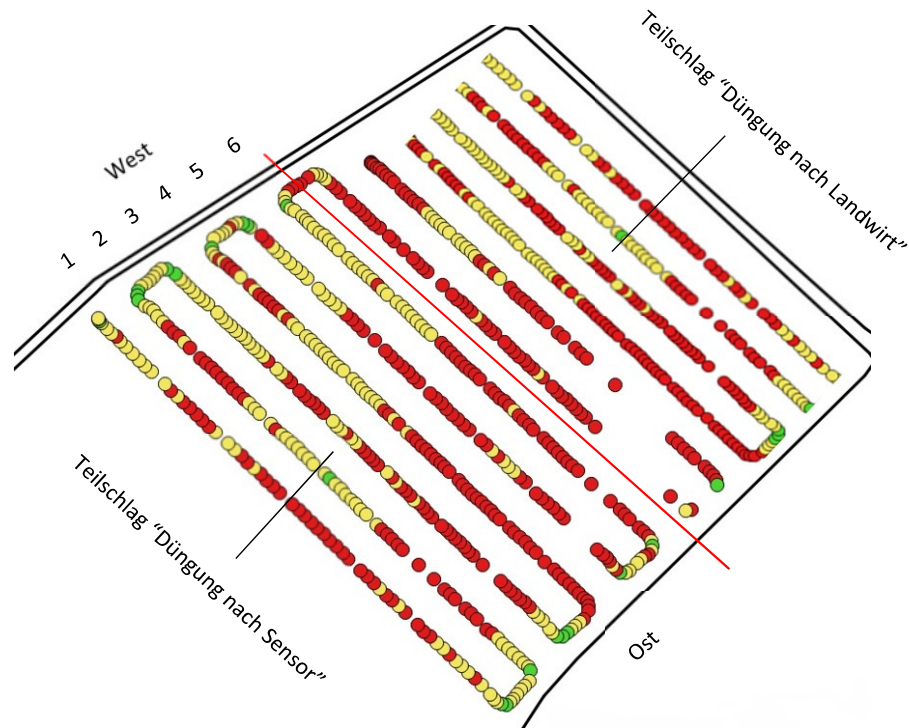


Abb. 35: Düngempfehlung zu EC 32 nach Schlepper-Sensorfahrt und Vergleich der Düngesysteme auf einem Praxischlag mit Winterweizen, 2016

Erläuterungen zu Abb. 35		
Düngung nach Landwirt	Düngung nach Sensor	N-Bedarf nach Sensormessung zu EC 32
VB: Mineral-N: 40 kg ha ⁻¹ EC 32: Mineral-N: 80 kg ha ⁻¹	VB: Mineral-N: 60 kg ha ⁻¹ EC 32: Mineral-N: 1. Fahrgasse: 60 kg ha ⁻¹ 2. und 3. Fahrgasse westlich: 70 kg ha ⁻¹ 2. und 3. Fahrgasse östlich: 50 kg ha ⁻¹ 4. und 5. Fahrgasse westlich: 65 kg ha ⁻¹ 4. und 5. Fahrgasse östlich: 45 kg ha ⁻¹ 6. Fahrgasse westlich: 75 kg ha ⁻¹ 6. Fahrgasse östlich: 50 kg ha ⁻¹	roter Bereich: N-Gabe von 30 - 50 kg ha ⁻¹ gelber Bereich: N-Gabe von 70 - 90 kg ha ⁻¹ grüner Bereich: N-Gabe von 90 - 120 kg ha ⁻¹

Als Schlussgabe zu EC 39 wurden im Düngbereich nach Landwirt einheitlich 80 kg ha⁻¹ Mineral-N gegeben. Nach Spektralanalyse durch Überfahrt mit dem Schlepper-Sensorsystem wurde unter Anwendung des Düngelgorithmus eine teilflächenspezifische Mineral-N-Düngung appliziert (Abb. 36).

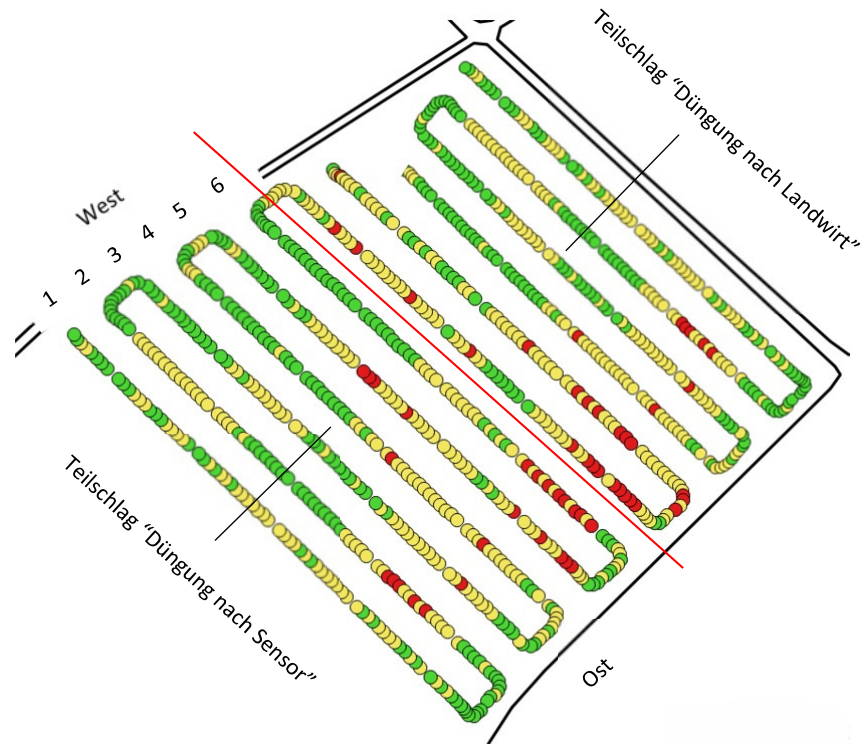


Abb. 36: Düngempfehlung zu EC 39 nach Schlepper-Sensorfahrt und Vergleich der Düngesysteme auf einem Praxisschlag mit Winterweizen, 2016

Erläuterungen zu Abb. 36		
Düngung nach Landwirt	Düngung nach Sensor zu EC 39	N-Bedarf nach Sensormessung zu EC 32
VB: Mineral-N: 40 kg ha ⁻¹ EC 32: Mineral-N: 80 kg ha ⁻¹ EC 39: Mineral-N: 80 kg ha ⁻¹	VB: Mineral-N: 60 kg ha ⁻¹ EC 32: Mineral-N: 1. Fahrgasse: 60 kg ha ⁻¹ 2. und 3. Fahrgasse westlich: 70 kg ha ⁻¹ 2. und 3. Fahrgasse östlich: 50 kg ha ⁻¹ 4. und 5. Fahrgasse westlich: 65 kg ha ⁻¹ 4. und 5. Fahrgasse östlich: 45 kg ha ⁻¹ 6. Fahrgasse westlich: 75 kg ha ⁻¹ 6. Fahrgasse östlich: 50 kg ha ⁻¹ EC 39: Mineral-N: 1. Fahrgasse: 90 kg ha ⁻¹ 2. und 3. Fahrgasse westlich: 80 kg ha ⁻¹ 2. und 3. Fahrgasse östlich: 70 kg ha ⁻¹ 4. und 5. Fahrgasse westlich: 90 kg ha ⁻¹ 4. und 5. Fahrgasse östlich: 80 kg ha ⁻¹ 6. Fahrgasse westlich: 100 kg ha ⁻¹ 6. Fahrgasse östlich: 60 kg ha ⁻¹	roter Bereich: N-Gabe von 30 - 50 kg ha ⁻¹ gelber Bereich: N-Gabe von 70 - 90 kg ha ⁻¹ grüner Bereich: N-Gabe von 90 - 120 kg ha ⁻¹

Auch im Jahr 2016 wurden im Vergleich beider Düngesysteme „Landwirt“ (schlageinheitlich) und TUM-Sensorsystem (teilflächenspezifisch) nahezu gleich hohe Erträge erzielt. Der Zielertrag von 100 dt ha⁻¹ wurde fast erreicht, ebenso der Ziel-Rohproteingehalt von 13 % (Tab. 69). Wie im Vorjahr, konnte auch im Jahr 2016 durch die Anwendung des Sensorsystems Mineral-N eingespart und der N-Saldo um über 20 kg ha⁻¹ vermindert werden. Die N-Effizienz war in beiden Varianten sehr hoch, allerdings in der Sensorvariante noch etwas höher als bei schlageinheitlicher Düngung.

Tab. 69: Düngevergleich Landwirt - sensorgestütztes Düngesystem Winterweizen, 2016

Zone	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]	Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
Landwirt	200	94,9	12,7	182	18	91,0
Sensor	184	95,8	13,0	188	-4	102,1

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Vergleich der sensorgestützten teilflächenspezifischen Düngung nach TUM-Algorithmus mit einer praxisüblichen schlageinheitlichen Düngung die Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit des Sensorsystems sehr überzeugend demonstriert hat. Durch die Anwendung des Sensorsystems war es möglich, mit geringerem Düngereinsatz gleiche Erträge zu erzielen und somit die N-Salden zu vermindern und die N-Effizienz zu erhöhen.

Beim Systemvergleich ist zu berücksichtigen, dass auch der Landwirt nahezu optimal (aber schlageinheitlich) unter Berücksichtigung einer realistischen Ertragserwartung und bei fortlaufender Beobachtung des Pflanzenbestandes gedüngt hat. Somit fand der Vergleich der Düngesysteme auf sehr hohem Ertrags- und N-Effizienzniveau statt.

Die Ableitung der N-Düngeempfehlung nach TUM-Algorithmus berücksichtigte sowohl die Bestandesentwicklung und N-Aufnahme zum jeweiligen EC-Stadium als auch das Ertragspotenzial des Schlages (abgeleitet aus Bodenschätzungskarten). Bei Vorliegen weitergehender Informationen zu Bodeneigenschaften und/oder Ertragspotenzialen (z.B. abgeleitet aus Sensormessungen und Satellitendaten, Messungen von Bodeneigenschaften etc.) wird es künftig möglich sein, noch genauere Ertragspotenzialkarten zu erstellen und damit auch die N-Düngeempfehlungen weiter zu präzisieren.

3.4. Diskussion von Teilprojekt 2

3.4.1. Methodischer Ansatz der Untersuchungen

3.4.1.1. *Feldexperimente mit unterschiedlichen N-Düngesystemen*

Die Feldexperimente mit unterschiedlichen N-Düngesystemen wurden auf landwirtschaftlichen Praxis-schlägen der Modellregion Hohenthann durchgeführt. Die zu bearbeitenden Forschungsfragen erfor-derten Ackerflächen mit langjährig hoher Gülledüngung und hohem N-Mineralisationspotenzial, die in den landwirtschaftlichen Versuchsstationen der TU München nicht verfügbar waren.

Auf den Ackerschlägen wurden randomisierte Exaktversuche mit vier Wiederholungen angelegt, um verschiedene Kombinationen von organischer Düngung (Gülle) und mineralischer Düngung hinsichtlich ihrer Wirkungen auf den Ertrag, die N-Aufnahme in der Biomasse, die N-Effizienz und die N-Salden zu analysieren. In diese Versuche wurden verschiedene Düngesysteme, darunter die sensorgestützte N-Düngung (Spicker 2016, Maidl 2011), das Düngesystem DSN (Wendland 2012) sowie das Düngesystem BEFU (Förster 2012) integriert.

Die Versuche wurden auf Teilflächen mit hohem und niedrigem Ertragspotenzial angelegt. Für die Ver-suchsdurchführung mussten entsprechende Praxis-schläge mit unterschiedlichem Ertragspotenzial (Hoch- und Niedrigertragszonen) ausgewählt werden. Zur Identifizierung unterschiedlicher Ertragszo-nen wurden Informationen der Bodenschätzung verwendet. Anhand der Versuchsergebnisse (Ab-schnitt 3.3.1 bis 3.3.3.) ist einzuschätzen, dass die Festlegung der Ertragszonen sehr gut gelungen ist, denn es zeigten sich deutliche Unterschiede im Ertrag und der N-Effizienz zwischen den HE- und NE-Zonen.

Die von den Landwirten bereitgestellten Flächen wurden in den Jahren vor Versuchsanlage betriebs-üblich bewirtschaftet, d.h. die Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung und Pflanzenschutz waren den jeweiligen Bedingungen angepasst. Somit bestanden zu Versuchsbeginn differenzierte Ausgangsbedingungen (z.B. N-Mineralisationspotenziale) auf den Untersuchungsflächen. Um die standort- und bewirtschaftungsspezifischen N-Mineralisationspotenziale zu erfassen, wurden in den Feldexperimen-ten stets ungedüngte Referenzvarianten, (N 1 „Nullparzellen“), angelegt.

Im Vergleich zu den in dieser Arbeit durchgeführten Exaktversuchen auf Praxis-schlägen gibt es weitere methodische Ansätze, um N-Düngesysteme und Stickstoffflüsse in landwirtschaftlichen Betrieben und Agrarökosystemen zu analysieren. Viele Untersuchungen von Stickstoffflüssen und -kreisläufen, wer-den auf der Grundlage von N-Bilanzierungsmodellen (Lin et al. 2016, Küstermann et al. 2013, Küster-mann et al. 2010) und N-Simulationsmodellen (Franko et al. 2007) durchgeführt, wobei die Ergebnisse maßgeblich von der Qualität der eingegebenen Daten (Witterung, Bodendaten, etc.) und der Lei-stungsfähigkeit der Modelle abhängt. Nach Draxler et al. (2013) und Asseng et al. (2014) stützen sich Bodenprozess- und Pflanzenwachstumsmodelle hinsichtlich der Parametrisierung und der Algorithmen auf typische Bodenbedingungen, Vegetationsverläufe und Witterungsbedingungen, wodurch ab-weichende Bedingungen nicht immer ausreichend im Modell abgebildet werden können. Beide An-sätze (Messung in Exaktversuchen sowie Bilanzierung/Modellierung) ergänzen sich in der Aussage.

In Ergänzung zu den Exaktversuchen in dieser Arbeit wurden von Förster (2017) komplexe betriebliche N-Bilanzierungsmodelle in den Untersuchungsbetrieben angewendet. Durch die Kombination beider methodischer Ansätze wird eine Analyse auf unterschiedlichen Skalenebenen von der N-Düngung auf dem Teilschlag über betriebliche N-Flüsse bis zum N-Saldo und dem Nitratgehalt des Sickerwassers möglich.

Zur Ermittlung des N-Düngebedarfs von Kulturpflanzen und zur Berechnung flächenbezogener N-Bilanzen dienen Düngungssysteme wie DSN und BEFU. Mit der Novellierung der Düngeverordnung (BMEL 2017) ist künftig die Ermittlung des N-Düngebedarfs vorgeschrieben. Düngesysteme wie BEFU gehen über die relativ einfachen Berechnungen der DüV hinaus und berücksichtigen zusätzlich zahlreiche Standort- und Bewirtschaftungsdaten als Einflussfaktoren. Eine weitere Besonderheit von BEFU (im Unterschied zum Düngesystem DSN) ist die Berücksichtigung der Bestandesentwicklung und der N-Versorgung bei der 2. und 3. N-Gabe von Winterweizen.

Die im Teilprojekt 2 durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen fallen in die Kategorie „On Farm Research“ (Leithold & Traphan 2006, Wagner et al. 2004); dies sind Forschungsarbeiten, bei denen landwirtschaftliche Betriebe und Produktionsverfahren mit unterschiedlichen Fragestellungen und methodischen Ansätzen analysiert werden. Pflanzenbauliche Versuche werden dabei zumeist sehr praxisnah und mit der verfügbaren Technik angelegt. Dabei wird oft ein einfaches Versuchsdesign gewählt (z.B. Streifenversuche ohne echte Wiederholungen), jedoch kaum Exaktversuche (Parzellenversuche mit Randomisation) angelegt. Auch praxisnahe Streifenversuche (z.B. in Agroforstsystemen) auf heterogenen Böden können statistisch differenziert ausgewertet werden, z.B. mit geostatistischen Methoden (Ochsenbauer et al. 2013). Die durchgeführten Versuche in dieser Arbeit stellen eine Kombination von „On Farm Research“-Ansätzen und Exaktversuchen auf Praxisschlägen dar.

3.4.2. Ergebnisse der Stickstoffdüngerversuche

3.4.2.1. Wirkungen organisch-mineralischer N-Düngung

Bei den Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste wurden in drei und bei Mais in zwei Versuchsjahren Stickstoffdüngerversuche durchgeführt. Umfang und Komplexität der Versuche nahmen vom ersten bis zum dritten Jahr zu, von 5 N-Stufen bei Weizen im ersten Jahr (2014) auf 25 N-Stufen im dritten Jahr (2016).

Aus den Ergebnissen der Versuche konnten jeweils die Düngevarianten ermittelt werden, die den optimalen Ertrag unter Berücksichtigung des N-Saldo und der N-Effizienz erreichten.

Die Analyse von Ertrag und Produktqualität (als messbare Größen) sowie N-Saldo und N-Effizienz (als Bilanzierungsgrößen) ist erforderlich, um die Wirkungen der N-Düngung auf den Praxisschlägen teilflächenspezifisch zu bewerten. Der N-Saldo dient als Indikator, der anzeigt, wieviel des gedüngten Stickstoffs potenziell verloren geht (N-Verlustpotenzial) bzw. wieviel Stickstoff vom Pflanzenbestand aus dem Boden-N-Pool aufgenommen wurde (bei negativem N-Saldo).

Der Parameter N-Effizienz zeigt, zu welchem Prozentsatz der applizierte Stickstoff im Erntegut (Korn) enthalten ist. Zahlreiche Untersuchungen befassen sich mit der Thematik der N-Effizienz, um z.B. die Wachstumsleistung und N-Verwertung von Pflanzen zu charakterisieren bzw. zu verbessern und somit den Ertrag oder den Proteingehalt steigern zu können (Kromdijk et al. 2016). Nach Lin (2017), Clark & Beegle (2014) Küstermann et al. (2010) und Tilman et al. (2002) muss vor allem die N-Effizienz betrachtet werden, um die Umwelteinflüsse einer Stickstoffdüngung bewerten und verbessern zu können.

Die Untersuchungsergebnisse von Weizen, Gerste und Mais zeigen, dass die Ertragseffekte der Mineral-N-Düngung stark von den Bodenbedingungen (standortspezifisches Ertragspotenzial, N-Mineralisationsleistung aus dem Bodenpool) abhängen. Bei geringer N-Freisetzung aus dem N-Pool konnten durch Mineral-N-Düngung die Erträge deutlicher gesteigert werden als bei hoher N-Nachlieferung.

In den meisten Versuchen mit gestaffelten N-Gaben sank die N-Effizienz mit steigender N-Düngermenge, allerdings gab es hiervon z.T. auch Abweichungen, weil neben der Gesamt-N-Zufuhr auch die Verteilung der N-Gaben deutlich Einfluss hatte und weitere (auch zufällige) Faktoren, wie die Bodenheterogenität, die N-Effizienz beeinflussten.

Zum Teil wurde eine geringe N-Effizienz der Gülledüngung und/oder der Mineral-N-Düngung ermittelt, die im Zusammenhang mit der hohen N-Mineralisationsleistung einzelner Teilschläge steht. Dies unterstreicht, dass die differenzierte N-Nachlieferung aus der organischen Düngung und dem Boden-N-Pool bei der Bemessung der Mineral-N-Gaben berücksichtigt werden sollte, um eine hohe N-Effizienz zu erreichen. Düngesysteme, die die Bestandesentwicklung und N-Aufnahme (und damit indirekt auch die N-Nachlieferung) berücksichtigen (Sensor, BEFU), bieten hierbei Vorteile gegenüber Systemen, die nur Bewirtschaftungsdaten, wie z.B. Vorfrucht und Wirtschaftsdüngerapplikation, einbeziehen.

In den „Nullvarianten“ wurden z.T. sehr hohe N-Entzüge von > 100 (bis max. 135) kg ha^{-1} erreicht, was vor allem auf die Stickstoffnachlieferung aus dem Boden zurückzuführen war. Allerdings sind auch die N-Einträge durch die N-Deposition nicht zu vernachlässigen. Im Untersuchungsgebiet wurden vom Projektpartner, dem Bayerischen Landesamt für Umwelt, N-Einträge von 25 kg ha^{-1} gemessen. Auf einzelnen Flächen könnten die N-Immissionen aufgrund des hohen Tierbesatzes und der dadurch bedingten hohen Ammoniakemissionen in der Region Hohenthann noch darüber liegen.

Durch die Versuchsanlage mit/ohne Gülledüngung in Kombination mit gestaffelten Mineral-N-Gaben konnte die Güllewirkung auf die Ertragsbildung und N-Effizienz bei Herbst- und Frühjahrsanwendung analysiert werden. Die N-Effizienz der N-Varianten wurde nach der Differenzmethode im Vergleich zur „Nullvariante“ berechnet. In den Exaktversuchen ergaben sich große Unterschiede in der N-Effizienz der applizierten Gülle von 5 bis 89 %. In den Versuchen wurde ausschließlich Schweinegülle geprüft. Schweinegülle zeichnet sich durch relativ hohe Gesamt-N- und Ammonium-N-Gehalte, eine relativ schnelle Wirkung, aber auch durch hohe N-Verlustgefährdung aus. Sorensen (2011) ermittelte deutliche Unterschiede zwischen den Güllearten (Rindergülle, Biogasgärreste, Schweinegülle) in der N-Effizienz und Auswaschungsgefährdung. Auch die Applikationstechnik und die Ausbringungsbedingungen haben erheblichen Einfluss auf die N-Wirkungen und die Ammoniakverluste.

In unseren Feldexperimenten wurden bei Gülledüngung zumeist deutlich höhere N-Salden als bei alleiniger Mineral-N-Düngung ermittelt. Besonders hohe N-Salden traten auf Flächen auf, die im Herbst und im Frühjahr eine Gülledüngung erhielten. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen belegen die geringere N-Effizienz einer Herbst-Gülledüngung im Vergleich zur Ausbringung im Frühjahr. Je nach standortspezifischem Nitrataustragspotenzial der Fläche, dem Witterungsverlauf im Winter sowie der N-Aufnahme des Pflanzenbestandes (Zwischenfrucht, Wintergetreide, Winterraps) kann ein Großteil des verlustgefährdeten Stickstoffs der Gülle ausgewaschen werden. So wurden in Untersuchungen von Sorensen (2011) 23 bis 35 % und nach Miseviciene (2009) 21 % der Gesamt-N-Menge der Gülle bei einer Applikation im Herbst ausgewaschen.

Aus den Versuchsergebnissen ist zu schlussfolgern, dass auf Herbst-Güllegaben zu Wintergetreide grundsätzlich verzichtet werden sollte. Die Güllegaben im Frühjahr sollten nur so hoch bemessen sein, dass der in der Gülle enthaltene Ammonium-N optimal durch die Pflanzenbestände verwertet werden kann und eine gezielte Bestandesführung/Düngung durch Mineral-N-Gaben unter Berücksichtigung des Ertragspotenzials und der Bestandesentwicklung erfolgen kann.

Die Bodenkarten zeigen eine große Heterogenität der Schläge im Untersuchungsgebiet. Die unterschiedlichen Bodeneigenschaften führten in den Versuchen zum Teil zu großen Ertragsdifferenzen zwischen Hoch- und Niedrigertragszonen sowie zu unterschiedlichen N-Entzügen. In den Hohertragszonen wurden erheblich niedrigere N-Salden (= N-Auswaschungspotenziale) als in den Niedrigertragszonen festgestellt. Durch eine teilflächenspezifische N-Düngung entsprechend dem jeweiligen Ertragspotenzial kann Dünger-N gespart werden, ohne dadurch auf Ertrag verzichten zu müssen.

3.4.2.2. Bewertung der angewendeten Düngesysteme Sensor, DSN und BEFU

In den Düngungsversuchen kamen vier N-Düngesysteme zur Anwendung:

- das System „Landwirt“ (betriebsübliche Düngung),
- das TUM-Düngesystem zur sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung (Spicker & Maidl 2014, Maidl 2011),
- das von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft entwickelte Düngesystem DSN (Wendland 2012) sowie
- das vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie entwickelte Düngesystem BEFU (Förster 2014).

Das DSN-System wurde gewählt, weil es im Untersuchungsgebiet weit verbreitet ist. Das BEFU-System wurde zu Vergleichszwecken in die Versuche einbezogen, weil es bei der Ableitung der Mineral-N-Gaben auch die Bestandesentwicklung und den N-Versorgungsstatus der Kulturpflanzen berücksichtigt. Somit konnte in den Versuchen bei sehr unterschiedlichen Bedingungen geprüft werden, wie eine Düngung nach Sensor im Vergleich zu praxisüblichen Düngungssystemen abschneidet.

In den Versuchen zeigte sich, dass die Düngesysteme aufgrund unterschiedlicher N-Düngeberechnungsmodelle deutlich abweichende N-Düngeempfehlungen ausgeben. Nicht nur die Wahl des Düngesystems (DSN, BEFU, Sensor) beeinflusste die applizierte N-Düngermenge, sondern maßgeblich auch die Vorgabe des Zielertrages. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass nicht nur das sensorgestützte TUM-Düngesystem, sondern auch DSN und BEFU teilflächenspezifisch zur Anwendung kamen, denn es wurden Versuche in Hoch- und Niedrigertragszonen angelegt und hierbei unterschiedliche Zielerträge angenommen.

Bei der praxisüblichen schlageinheitlichen Anwendung von DSN und BEFU wird diese Differenzierung nach Ertragszonen innerhalb der Schläge nicht vorgenommen, obwohl dies prinzipiell möglich und teils auch zielführend wäre. Beim System BEFU wäre eine teilschlagdifferenzierte Erfassung der N-Versorgung der Kulturpflanzenbestände aufgrund des hohen Aufwandes kaum realisierbar.

Das bedeutet, dass die Versuchsergebnisse (Erträge, Produktqualität, N-Salden, N-Effizienz) zwar die grundlegende Düngestrategie von DSN und BEFU sowie deren Wirkung auf die Ertragsbildung und N-Verwertung zeigen, aber nicht exakt die tatsächliche Praxisanwendung widerspiegeln. Bei der praxisüblichen schlageinheitlichen Anwendung der Düngesysteme DSN und BEFU findet keine Differenzierung nach Ertragszonen statt, so dass es abweichend von den Versuchsergebnissen in der Praxis zu einer stärkeren N-Über- oder Unterversorgung der Pflanzenbestände kommen kann.

Anwendung und Ergebnisse des Düngesystems DSN

DSN ist das im Bundesland Bayern von der Officialberatung empfohlene System zur Düngedarfsermittlung für verschiedene Fruchtarten. Im Untersuchungsgebiet Hohenthann wird DSN von allen beteiligten Untersuchungsbetrieben bereits über mehrere Jahre angewendet. Im Düngesystem DSN wird eine Soll-N-Menge für jede Fruchtart und jeden Düngetermin als Grundlage der Düngeempfehlung bestimmt und anschließend je nach Frühjahrs-N_{min}-Vorrat, Bewirtschaftung und Ertragserwartung mit Zu- bzw. Abschlägen korrigiert.

Bei der Berechnung der Düngermengen ist ein deutlicher Unterschied zwischen einer Bewirtschaftung mit organischer Düngung (Gülle) bzw. ohne Gülleeinsatz festgestellt worden. Bei einer Güllegabe zu Vegetationsbeginn wird die N-Zufuhr in Abhängigkeit vom Applikationstermin prozentual angerechnet. Bei der N-Zufuhr mit Gülle wird nicht der Gesamt-N, sondern der NH₄-N-Gehalt berücksichtigt. Die mineralische N-Düngermenge wird um diesen Wert reduziert. Zudem werden je nach Fruchtart bis zu 25 kg ha⁻¹ in Abhängigkeit vom GV-Besatz des Betriebes abgezogen, um die langjährige organische Düngung zu berücksichtigen.

Vom Düngesystem DSN wird die Ammonium-N-Menge einer Herbst-Gülleapplikation nur mit einem sehr geringen Prozentsatz von 10 % auf das Folgejahr angerechnet. Nach der novellierten Düngeverordnung ist eine Herbstgülleapplikation nur noch eingeschränkt zu wenigen Fruchtarten (Grünland, Wintergerste, Winterraps, Zwischenfrucht) zulässig, um die N-Düngeeffizienz zu erhöhen.

Ein weiterer Aspekt, der maßgeblich die Leistungsfähigkeit und die Anpassung der Düngung nach DSN beeinflusst, ist die schlageinheitliche bzw. die teilflächenspezifische Anwendung. Die Düngedarfsermittlung des Düngesystems DSN wird in der Praxis fast immer einheitlich für einen Schlag vorgenommen. Dadurch können Hohertragszonen unter- und Niedrigertragszonen überversorgt werden (vgl. Weißbach & Griepentrog 1998). Eine DSN-Berechnung für Teilschläge wäre in der Praxis nur mit großem Aufwand anwendbar und nur bei deutlichen Ertragspotenzialunterschieden der Teilschläge sinnvoll; sie wurde von keinem Untersuchungsbetrieb als zukünftige Möglichkeit in Betracht gezogen.

Das DSN-System führte immer zu guten Erträgen, allerdings bewegten sich die N-Salden auf Standorten mit hoher organischer Düngung (Gülle) häufig in einem hohen Bereich.

Anwendung und Ergebnisse des Düngesystems BEFU

Das Düngesystem BEFU basiert auf einem frei zugänglichen EDV-Programm; es berechnet für Winterweizen und Wintergerste die N-Düngergabe zu Vegetationsbeginn und für Körnermais die N-Düngermenge sowohl zu Vegetationsbeginn als auch zu weiteren Düngergaben. In die Berechnung der Düngermenge fließen neben den auch in DSN verwendeten Informationen (Fruchtart, Ertrag, Vorbewirtschaftung, Viehhaltung, Gülledüngung) weitere Daten und Informationen (Zwischenfruchtanbau, Saattermin der Zwischenfrucht, Saattermin der Hauptfrucht, Niederschlag, usw.) ein.

Eine Besonderheit im Düngesystem BEFU ist die Ermittlung der N-Düngermenge in Wintergerste und Winterweizen. Die N-Düngermengen zu EC 32 und EC 39 werden nicht berechnet, sondern anhand einer Messung im Pflanzenbestand bestimmt. Die bestandesabhängige N-Düngeermittlung kann nach zwei verschiedenen Methoden (Nitratschnelltest und N-Tester) erfolgen.

In den Versuchen in Hohenthann wurde die Düngeermittlung zu EC 32 mittels Pflanzensaftanalyse mit Nitratteststäbchen (Merck 2014) durchgeführt. Anhand einer Farbskala und Tabellenwerten konnte

die empfohlene N-Applikationsmenge abgelesen werden. Die auf diesem Wege ermittelten Düngergaben entsprachen zumeist plausiblen Werten. Bei der Düngung nach BEFU und Nitrattest wurde eine teils sehr gute N-Effizienz bei mittleren bis relativ hohen Erträgen erzielt. Das Ertragspotenzial wurde nicht immer ausgeschöpft, aber dafür waren die N-Salden meist relativ niedrig.

Von Maidl & Kimmelman (2016) wurde in N-Steigerungsversuchen in der Versuchstation Roggenstein der TU München (Marktfruchtbetrieb, langjährig nur Mineraldüngung, kein Gülleinsatz) ebenfalls das Düngesystem BEFU in den Fruchtarten Wintergerste und Winterweizen verwendet. Die Bestimmung der Düngergaben zu EC 32 und EC 39 erfolgte mit dem N-Tester (Yara 2016a). In diesen Versuchen wurden nach BEFU und N-Tester die N-Düngermengen zum Teil deutlich unterschätzt und folglich geringe Erträge erzielt.

In den eigenen Untersuchungen war die N-Düngeempfehlung nach BEFU bei der Fruchtart Körnermais differenziert zu bewerten. In den Mais-Versuchen ohne Gülledüngung zu Vegetationsbeginn wurde nach BEFU eine ausreichende Mineraldüngermenge berechnet. Die Düngung wurde nach Empfehlung von BEFU zu Vegetationsbeginn und zu EC 15 durchgeführt. Nach BEFU wurden zwar keine Höchsterträge erzielt, allerdings befand sich die N-Düngeeffizienz mit > 55 % auf relativ hohem Niveau. Dagegen wurde bei Gülleanwendung nur eine Mineraldüngergabe von 20 kg ha⁻¹ zu EC 15 berechnet. Folglich waren die Erträge deutlich niedriger als in den optimal gedüngten Varianten. Nach Förster (2013) wird im Düngesystem BEFU eine anrechenbare N-Menge (abhängig von Produktionsrichtung) der Gülle berücksichtigt und darauf aufbauend die N-Mineraldüngermenge ermittelt.

Analog zum Düngesystem DSN ist die Leistungsfähigkeit des Düngesystems BEFU von den Einsatzbedingungen sowie der schlageinheitlichen bzw. teilflächenspezifischen Anwendung abhängig.

Sensorgestütztes Düngesystem in Winterweizen

Das Düngesystem nach TUM-Algorithmus in Winterweizen (Maidl 2011) wurde in den Versuchsjahren 2015 und 2016 angewendet. Durch den Düngealgorithmus, der den Zusammenhang zwischen dem Spektralwert REIP, ermittelt mit einem passiven Sensorsystem (HandySpec, Tec5), und der N-Aufnahme des Winterweizens für verschiedene EC-Stadien sowie das standortspezifische Ertragspotenzial und den Zielrohproteingehalt berücksichtigt, wird der N-Düngebedarf berechnet. Das System wurde ausschließlich auf Standorten ohne organische Düngung entwickelt und erprobt (Maidl 2017). Daher war es besonders wichtig zu untersuchen, inwieweit das bestehende System auf Standorten mit langjähriger organischer Düngung angewendet werden kann. Für die Anwendung in Gebieten mit intensiver Gülledüngung lagen bisher keine experimentellen Ergebnisse vor.

Die Bestimmung der N-Düngergaben zu Vegetationsbeginn erfolgte nicht durch Sensormessung, sondern in Abhängigkeit vom Zielertrag. Prinzipiell wäre aber eine erste N-Gabe nach N_{min}-Vorrat auch bei diesem System möglich. Für praktizierende Landwirte stellt der N_{min}-Vorrat einen wichtigen Faktor dar, um Wirkungen der Witterung sowie der Fruchtfolge und der organischen Düngung abzuschätzen. Nach Maidl (2015) wird mit dem Sensor-Düngesystem bei den späteren N-Düngergaben die N-Mineralisationsleistung des Bodens indirekt über den Pflanzenbestand erfasst.

Die Düngergaben zu EC 32 und EC 39 wurden anhand von Spektralmessungen abgeleitet. In den Sensorvarianten wurde zum Teil eine hohe N-Effizienz ermittelt, die deutlich höher lag als in den Versuchsbetrieben insgesamt (vgl. Ergebnisse in Teilprojekt 1). Mit dem Sensorsystem wurden entsprechend

der Bestandsentwicklung bei hoher N-Nachlieferung aus dem Boden oder aus der Gülle die N-Gaben zu EC 32 zum Teil deutlich reduziert.

Die Düngebedarfsermittlung nach Sensor führte im Vergleich zu den anderen Düngesystemen und Versuchsvarianten überwiegend zu hohen bis sehr hohen Erträgen bei einer relativ hohen N-Düngeeffizienz. Die Untersuchungen zeigten, dass durch den Sensor die aktuelle N-Versorgung des Pflanzenbestandes sehr gut abgebildet wird.

Sensorgestütztes Düngesystem in Wintergerste

In den Versuchsjahren 2015 und 2016 wurde bei der Düngung von Wintergerste der N-Düngealgorithmus von Spicker und Maidl (2014) sowie Spicker (2016) verwendet. Der Aufbau und die Algorithmen des Düngesystems sind analog zum Düngesystem von Winterweizen unter Verwendung eines passiven Sensors (HandySpec, Tec5). Auch dieses Düngesystem wurde ausschließlich nach Versuchsergebnissen auf Standorten ohne organische Düngung entwickelt. Die Anwendung des Systems erfolgte somit zum ersten Mal auf Flächen mit langjähriger Gülledüngung im Vergleich zu Flächen ohne organische Düngung zu Vegetationsbeginn.

Die N-Düngermenge zu Vegetationsbeginn erfolgte angelehnt an das Düngesystem in Winterweizen in Abhängigkeit vom zu erwartenden Zielertrag. Das Sensorsystem ermittelt über Spektralmessungen in der Vegetation die N-Nachlieferung aus dem Boden indirekt über den Pflanzenbestand. Eine Gülleausbringung zu Vegetationsbeginn wurde durch die applizierte Menge an $\text{NH}_4\text{-N}$ berücksichtigt und in der weiteren Düngebedarfsberechnung aufgrund der langjährigen Gülledüngung zu 100 % angerechnet.

Die N-Düngermengen zu den weiteren Düngeterminen EC 32 und E 39 wurden nach Sensormessung und Anwendung des sensorgestützten Düngesystems für Wintergerste berechnet. Im Versuchsjahr 2015 wurde in den Versuchen ohne Gülle-Düngung die zur Erreichung des Ertragspotenzials nötige Düngermenge genau bestimmt und die N-Düngermenge zu EC 39 deutlich reduziert. Im Versuchsbereich mit Gülledüngung wurde die N-Nachlieferung aus der Gülle anhand der Biomasseentwicklung erkannt und trotz ausbleibender Mineral-N-Gabe zu Vegetationsbeginn die N-Mineraldüngergabe zu EC 32 reduziert. In EC 39 konnte das Sensorsystem die weitere N-Nachlieferung aus dem Boden indirekt über die Pflanzenreflexion feststellen und die ausreichende N-Versorgung der Pflanzen bestimmt werden. Daher wurde zu EC 39 keine weitere N-Mineraldüngergabe durchgeführt. Die überhöhte Mineraldüngergabe in der Niedrigertragszone war auf einen zu hoch angesetzten Zielertrag zurückzuführen. Durch die Verwendung von Ertragspotenzialkarten kann die Ertragsleistung künftig noch besser abgeschätzt werden.

Im Untersuchungsjahr 2016 wurden ebenfalls sehr gute Ergebnisse bei der Anwendung des sensorgestützten Düngesystems in Wintergerste erzielt. In den Versuchen ohne Gülledüngung zu Vegetationsbeginn wurden mit dem Sensor hohe N-Aufnahmen des Pflanzenbestandes zum Düngetermin EC 32 festgestellt und somit keine Düngung vorgenommen. Erst zum Düngetermin EC 39 wurde eine Düngermenge appliziert. Im Versuchsbereich mit Gülledüngung wurde mit dem Sensor eine hohe N-Versorgung des Pflanzenbestandes ermittelt, die auf Gülledüngung und N-Mineralisation zurückzuführen war. Deswegen wurde die Düngung zu EC 32 deutlich reduziert bzw. ganz unterlassen.

Insgesamt ist somit festzustellen, dass das sensorgestützte N-Düngesystem in Wintergerste zu einer N-Effizienzsteigerung, insbesondere bei der Mineral-N-Applikation nach Gülledüngung, führte und somit als wirksame Maßnahme zum Trinkwasserschutz zu empfehlen ist.

3.4.2.3. Bewertung der spektralen Gesamtschlaganalyse in der Praxis

Das im Jahr 2014 konstruierte und getestete Schleppersensorsystem kam in den Versuchsjahren 2015 und 2016 auf landwirtschaftlichen Praxisflächen in der Region Hohenthann bei der Düngung von Wintergerste und Winterweizen erstmalig zum Einsatz und zeigte hierbei seine Praxistauglichkeit. Auf der Grundlage von vorhandenen Bodenschätzungskarten wurden Ertragszonen und Ertragspotenziale abgeleitet und mit Sensormessungen und den TUM-Düngealgorithmen teilflächenspezifische Düngeempfehlungen für die Fruchtarten Wintergerste und Winterweizen zu EC 32 und EC 39 berechnet.

Die Anwendung des Sensorsystems und der Algorithmen für Gerste und Weizen konnte eine optimierte Mineral-N-Applikation aufzeigen und veranschaulichen, wie mit dem neuentwickelten System Mineral-N gezielt und teilflächenspezifisch optimal eingesetzt werden kann. Besonders in den Niedrigertragszonen wurden aufgrund der geringeren Zielerträge deutlich Mineral-N-Gaben eingespart und dadurch die N-Salden verringert. Zugleich konnte das höhere Ertragspotenzial in den Hohertragszonen optimal ausgeschöpft werden.

Die gezielte ertragsorientierte Applikation von Mineral-N unter Berücksichtigung der Bestandesentwicklung und die damit verbundene N-Einsparung bzw. teilflächenbezogen optimierte Verteilung von N-Düngergaben ist ein entscheidender Vorteil der auf Algorithmen basierenden Sensorsysteme. Einen weiteren Vorteil stellt die Möglichkeit dar, die Boden-N-Nachlieferung indirekt (über die N-Aufnahme des Pflanzenbestandes) abzuschätzen und bei den folgenden Düngergaben zu berücksichtigen.

Bereits eine alleinige Sensormessung (auch mit Handgeräten) kann den Landwirten den differenzierten N-Düngebedarf eines Schlages aufzeigen. Auch drohnengestützte Sensorsysteme, die digitale Karten erstellen, finden bei Landwirten zunehmend Zuspruch und Berücksichtigung bei der Düngung.

Im Praxiseinsatz ist es künftig notwendig sein, die Sensormessungen des TUM-Schleppersystems mit der gleichzeitigen Mineral-N-Applikation zu verbinden. Dies konnte in den Untersuchungsjahren 2015 und 2016 noch nicht realisiert werden, da hierzu noch weitere Entwicklungsarbeiten zu leisten sind (siehe Ausblick auf weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Abschnitt 5.).

3.5. Anhang zu Abschnitt 3.

Tab. A. 3.1: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Winterweizen. Vergleich Düngesysteme, Hohenthann, 2016, Niedrigertragszone, ¹ = Düngung nach DSN, ² = Düngung nach Sensor, ³ = Düngung nach BEFU, Herbst-Düngung: WW_2016_2 = 0 kg ha⁻¹, WW_2016_3 = 0 kg ha⁻¹, WW_2016_4 = 0 kg ha⁻¹

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
WW_2016_2 (Biogasbetrieb, Zielertrag: 100 dt ha ⁻¹)									
N 1	0	0	0	0	68,4 a	7,9 a	79,1 a	-79,1 a	
N 2 ¹ (DSN)	100	45	20	60	106,6 b	9,4 b	151,9 b	73,0 c	32,3 A
N 3 ² (Sensor)	100	0	70	65	97,3 b	10,1 c	148,9 b	86,0 bc	29,7 A
N 4 ³ (BEFU)	100	25	70	50	103,7 b	9,2 b	145,0 b	99,9 c	26,9 A
WW_2016_3 (Schweinemastbetrieb, Zielertrag: 95 dt ha ⁻¹)									
N 5	0	0	0	0	72,7 a	8,6 a	94,5 a	-94,5 a	
N 6 ¹ (DSN)	81	75	45	50	140,7 c	10,6 c	225,7 c	25,2 c	52,2 B
N 7 ² (Sensor)	81	0	60	65	131,6 bc	11,1 d	221,5 c	-15,5 b	61,6 C
N 8 ³ (BEFU)	81	65	40	50	121,1 b	10,1 b	184,4 b	51,5 d	38,1 A
WW_2016_4 (Marktfruchtbetrieb, Zielertrag: 95 dt ha ⁻¹)									
N 9	0	0	0	0	55,2 a	8,3 a	69,6 a	-69,6 a	
N 10 ¹ (DSN)	0	80	60	60	85,0 b	10,0 c	128,8 c	71,1 d	29,5 a
N 11 ² (Sensor)	0	30	60	80	86,4 b	10,1 c	132,1 c	37,8 c	36,7 b
N 12 ³ (BEFU)	0	55	40	30	85,4 b	9,0 b	116,1 b	8,8 b	37,1 b

Tab. A. 3.2: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2014, Hohertragszone, Herbst = 175 kg ha⁻¹, WG_2014_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
N 1	100	55	0	0	105,5 a	9,5 a	138,3 a	191,7 a	
N 2	100	55	90	0	128,6 b	11,3 b	200,7 bc	219,3 b	69,3 a
N 3	100	55	30	40	128,2 b	11,5 bc	203,4 bc	196,6 a	93,0 b
N 4	100	55	60	40	126,7 b	11,7 bc	204,0 bc	226,0 b	65,7 a
N 5	100	55	90	40	129,0 b	12,1 c	215,3 c	244,7 c	59,2 a
N 6	100	55	30	70	123,5 b	11,4 b	193,0 b	237,0 bc	54,7 a

Tab. A. 3.3: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2014, Niedrigertragszone, Herbst = 175 kg ha⁻¹, WG_2014_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
N 1	100	55	0	0	112,8 a	10,7 a	166,6 a	163,4 a	
N 2	100	55	90	0	113,8 a	12,4 bc	194,4 bc	225,6 b	30,9 a
N 3	100	55	30	40	110,1 a	12,2 b	184,3 ab	215,7 b	25,3 a
N 4	100	55	60	40	118,2 a	12,6 bcd	204,2 c	225,8 b	37,6 a
N 5	100	55	90	40	114,2 a	13,3 d	209,5 c	250,5 c	33,0 a
N 6	100	55	30	70	116,1 a	13,1 cd	208,4 c	221,6 b	41,9 a

Tab. A. 3.4: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2014, Hohertragszone, Herbst = 75 kg ha⁻¹, WG_2014_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
N 1	90	60	0	0	137,3 a	10,3 a	195,9 a	29,1 a	
N 2	90	60	90	0	143,0 ab	11,6 a	228,4 a	86,6 bc	36,2 a
N 3	90	60	30	40	150,5 b	11,5 a	237,4 a	57,6 ab	59,4 b
N 4	90	60	60	40	145,8 ab	11,6 a	232,6 a	92,4 bc	36,8 a
N 5	90	60	90	40	147,7 ab	11,4 a	233,1 a	121,9 c	28,6 a
N 6	90	60	30	70	139,8 ab	11,7 a	226,1 a	98,9 bc	30,2 a

Tab. A. 3.5: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2014, Niedrigertragszone, Herbst = 75 kg ha⁻¹, WG_2014_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
N 1	90	60	0	0	111,9 a	9,7 a	150,4 a	74,5 a	
N 2	90	60	90	0	122,3 b	11,4 b	193,5 b	121,4 cd	47,8 a
N 3	90	60	30	40	122,9 b	11,8 b	200,1 bc	94,8 ab	70,9 a
N 4	90	60	60	40	130,7 b	12,2 bc	221,2 cd	103,7 bc	70,7 a
N 5	90	60	90	40	124,1 b	13,2 c	225,6 d	129,3 d	57,8 a
N 6	90	60	30	70	123,6 b	12,1 bc	207,0 bcd	117,9 bcd	56,6 a

Tab. A. 3.6: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Hohertragszone, Herbst = 97 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 13) bzw. N 13 (N 14 bis N 20), WG_2015_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Güllendüngung im Frühjahr									
N 1	0	0	0	0	70,6 a	6,4 a	62,4 a	34,8 a	
N 2	0	40	30	0	101,3 b	8,9 b	124,0 b	43,2 ab	87,9 a
N 3	0	40	90	0	113,3 b	11,2 de	174,6 cde	52,6 ab	86,3 a
N 4	0	40	30	40	103,7 b	10,3 c	147,6 bc	59,6 abc	77,4 a
N 5	0	40	60	40	111,5 b	10,9 cd	167,5 cd	69,7 bcde	75,0 a
N 6	0	40	90	40	103,7 b	12,5 g	178,1 def	89,1 cde	68,0 a
N 7	0	80	90	0	119,0 b	12,6 gh	205,7 f	61,5 abcd	84,3 a
N 8	0	80	30	40	114,2 b	11,9 efg	186,1 def	61,1 abc	82,4 a
N 9	0	80	60	40	112,5 b	12,1 fg	187,5 def	89,7 cde	69,5 a
N 10	0	80	90	40	111,4 b	13,4 h	204,7 ef	102,5 e	67,7 a
N 11	0	80	30	70	110,3 b	12,3 fg	186,0 def	91,2 cde	68,6 a
N 12 ¹	0	80	76	15	109,1 b	11,4 def	170,8 cd	97,7 de	65,5 a
Versuch mit Güllendüngung im Frühjahr									
N 13	76	0	0	0	99,0 a	9,2 a	124,9 a	47,8 a	(82,8)
N 14	76	0	90	0	104,3 ab	9,5 a	136,7 ab	126,1 d	13,0 a
N 15	76	0	30	40	112,7 ab	11,0 b	169,8 c	73,0 ab	63,9 b
N 16	76	0	60	40	120,7 b	11,4 bc	190,3 c	82,5 b	65,3 b
N 17	76	0	90	40	113,0 ab	11,2 bc	173,3 c	129,5 d	37,1 ab
N 18	76	0	30	70	110,4 ab	11,9 cd	180,4 c	92,4 bc	55,4 b
N 19 ¹	76	0	57	0	102,6 ab	11,5 bc	162,7 bc	67,1 ab	64,8 b
N 20 ²	76	65	60	0	105,0 ab	12,6 d	182,3 c	115,5 cd	45,8 b

Tab. A. 3.7: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Niedrigertragszone, Herbst = 97 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 13) bzw. N 13 (N 14 bis N 20), WG_2015_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gölledüngung im Frühjahr									
N 1	0	0	0	0	53,0 a	8,2 a	60,2 a	37,0 a	
N 2	0	40	30	0	84,3 b	10,1 b	117,0 b	50,2 ab	81,0 c
N 3	0	40	90	0	85,3 b	11,8 cde	137,8 bc	89,4 bcd	59,7 abc
N 4	0	40	30	40	92,0 b	11,4 c	145,2 bc	62,0 abc	77,2 bc
N 5	0	40	60	40	79,7 b	12,0 cdef	132,0 bc	105,2 de	51,2 ab
N 6	0	40	90	40	88,3 b	12,7 fgh	154,8 bc	112,4 de	55,6 abc
N 7	0	80	90	0	90,4 b	12,9 gh	161,3 c	105,9 de	59,4 abc
N 8	0	80	30	40	88,0 b	12,2 def	147,5 bc	99,7 cd	58,1 abc
N 9	0	80	60	40	88,9 b	12,4 efg	151,0 bc	126,2 de	50,4 a
N 10	0	80	90	40	89,3 b	13,4 h	164,5 c	142,7 e	49,6 a
N 11	0	80	30	70	95,4 b	12,2 defg	160,3 c	116,9 de	55,6 abc
N 12 ¹	0	65	54	20	89,5 b	11,5 cd	141,7 bc	94,5 cd	60,9 abc
Versuch mit Gölledüngung im Frühjahr									
N 13	76	0	0	0	68,0 ab	8,7 a	81,5 a	91,3 a	(28,1)
N 14	76	0	90	0	63,7 a	8,8 a	77,1 a	185,7 cd	-4,9 a
N 15	76	0	30	40	66,6 ab	10,1 b	92,1 ab	150,7 b	15,1 ab
N 16	76	0	60	40	71,4 ab	10,4 b	101,7 ab	171,1 bcd	20,1 abc
N 17	76	0	90	40	76,5 ab	10,6 b	110,5 b	192,3 d	22,2 abc
N 18	76	0	30	70	76,8 ab	11,2 b	118,2 bc	154,6 bc	36,6 bcd
N 19 ¹	76	0	100	15	78,3 ab	13,1 c	140,8 cd	139,3 b	61,2 d
N 20 ²	76	65	60	0	84,8 b	12,8 c	147,1 d	150,7 b	52,4 cd

Tab. A. 3.8: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Hohertragszone, Herbst = 33 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 14) bzw. N 14 (N 15 bis N 20), WG_2015_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gülledüngung									
N 1	0	0	0	0	43,0 a	6,2 a	36,9 a	-3,9 a	
N 2	0	40	30	0	77,7 b	8,6 b	92,4 b	10,5 ab	79,3 abc
N 3	0	40	90	0	92,9 cd	11,3 de	144,9 cde	18,0 bc	83,1 bc
N 4	0	40	30	40	91,2 cd	10,5 c	132,3 c	10,6 ab	86,7 c
N 5	0	40	60	40	88,6 c	11,6 ef	142,1 cd	30,8 cde	75,1 ab
N 6	0	40	90	40	93,1 cd	12,4 g	159,1 efg	43,8 efg	71,8 ab
N 7	0	80	90	0	96,6 cd	12,3 g	164,4 fg	38,5 defg	75,0 ab
N 8	0	80	30	40	94,8 cd	11,3 de	148,6 cdef	34,3 cdef	74,5 ab
N 9	0	80	60	40	100,3 d	11,5 e	159,9 efg	53,0 g	68,3 a
N 10	0	80	90	40	100,2 d	14,1 h	194,8 h	48,1 fg	75,2 ab
N 11	0	80	30	70	98,8 d	12,2 fg	167,0 g	45,9 efg	72,3 ab
N 12 ¹	0	70	60	0	93,9 cd	10,7 cd	138,7 cd	23,2 bcd	79,0 abc
N 13 ²	0	120	40	0	100,0 d	11,1 cde	153,4 defg	39,5 defg	72,8 ab
Versuch mit Gülledüngung									
N 14	110	0	0	0	57,4 a	6,4 a	50,9 a	92,0 a	(12,7)
N 15	110	0	90	0	57,2 a	6,1 a	45,7 a	184,2 f	-2,5 a
N 16	110	0	30	40	71,8 bc	8,3 b	82,5 b	130,4 c	45,1 c
N 17	110	0	60	40	66,6 b	8,1 b	74,9 b	168,0 e	23,9 b
N 18	110	0	90	40	70,3 bc	8,0 b	78,2 b	194,7 f	20,9 b
N 19	110	0	30	70	75,8 c	9,3 c	97,7 c	145,2 d	46,7 c
N 20 ¹	110	0	60	25	84,9 d	9,5 c	111,7 d	114,5 b	73,3 d

Tab. A. 3.9: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Wintergerste. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Niedrigertragszone, Herbst = 33 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Sensor, ² = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 14) bzw. N 14 (N 15 bis N 20), WG_2015_2

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC32	EC39					
Versuch ohne Gülledüngung									
N 1	0	0	0	0	27,0 a	7,0 a	26,7 a	6,2 a	
N 2	0	40	30	0	52,1 b	9,5 b	68,8 b	34,1 ab	60,0 a
N 3	0	40	90	0	62,0 b	12,0 cd	102,5 cd	60,4 bcd	58,2 a
N 4	0	40	30	40	56,2 b	11,4 c	87,3 bc	55,6 bc	55,0 a
N 5	0	40	60	40	54,3 b	11,4 c	85,9 bc	87,0 cde	42,2 a
N 6	0	40	90	40	52,4 b	13,4 fg	96,6 bcd	106,3 ef	41,0 a
N 7	0	80	90	0	63,4 b	13,2 efg	115,6 cd	87,3 cde	52,2 a
N 8	0	80	30	40	57,5 b	11,9 cd	94,3 bcd	88,6 de	45,0 a
N 9	0	80	60	40	69,7 b	12,9 ef	123,2 c	89,7 de	53,6 a
N 10	0	80	90	40	59,3 b	13,9 g	113,4 cd	129,5 f	41,2 a
N 11	0	80	30	70	57,2 b	12,4 de	97,9 bcd	115,0 ef	39,5 a
N 12 ¹	0	60	60	0	57,6 b	11,5 c	91,3 bc	61,5 bcd	54,6 a
N 13 ²	0	120	40	0	60,4 b	11,5 c	96,6 bcd	96,3 e	43,6 a
Versuch mit Gülledüngung									
N 14	110	0	0	0	42,0 a	7,8 a	45,1 a	97,8 a	(16,6)
N 15	110	0	90	0	49,7 a	7,7 a	52,9 ab	180,0 d	8,7 a
N 16	110	0	30	40	52,1 a	9,6 b	69,7 bc	143,2 c	35,1 ab
N 17	110	0	60	40	55,0 a	9,3 b	70,0 bc	172,9 d	24,9 a
N 18	110	0	90	40	54,1 a	9,5 b	70,9 bc	202,0 e	19,8 a
N 19	110	0	30	70	56,6 a	10,6 c	82,7 c	160,2 cd	37,6 ab
N 20 ¹	110	0	45	10	58,7 a	9,8 b	79,0 c	119,9 b	60,0 b

Tab. A. 3.10: Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Körnermais. N-Steigerungsversuch, Hohenthann, 2015, Hohertragszone, Herbst = 78 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz bezogen auf N 1 (N 2 bis N 11) bzw. N 11 (N 12 bis N 16), Mais_2015_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]	
	Gülle-N		Mineraldünger-N							
	VB	VB	EC15	EC34						
Versuch ohne Gülledüngung im Frühjahr										
N 1	0	0	0	0	92,0	a	7,3	a	-15,6	a
N 2	0	70	0	0	98,3	ab	8,7	b	118,3	a
N 3	0	120	0	0	119,7	bc	9,4	bc	155,1	b
N 4	0	170	0	0	125,2	c	9,8	c	169,2	b
N 5	0	70	50	0	119,2	bc	9,5	bc	156,4	b
N 6	0	120	50	0	115,4	bc	9,7	c	154,6	b
N 7	0	70	100	0	112,7	bc	9,8	c	151,5	b
N 8	0	120	100	0	115,5	bc	10,5	d	167,7	b
N 9	0	70	0	50	118,5	bc	9,3	bc	151,8	b
N 10	0	70	0	100	115,4	bc	9,2	bc	148,6	b
Versuch mit Gülledüngung im Frühjahr										
N 11	150	0	0	0	82,9	a	7,7	a	88,9	a
N 12	150	0	50	0	102,5	a	8,7	b	122,8	b
N 13	150	0	100	0	95,6	a	9,9	c	130,6	b
N 14	150	0	0	50	103,9	a	8,7	b	124,7	b
N 15	150	0	0	100	98,4	a	9,1	bc	122,3	b
N 16 ¹	150	90	0	0	99,9	a	9,0	bc	124,6	b

Tab. A. 3.11: Kornertag, Proteingehalt, N-Entzug, N-Saldo und N-Effizienz von Körnermais. N-Steigerungsver-such, Hohenthann, 2015, Niedrigertragszone, Herbst = 78 kg ha⁻¹, ¹ = Düngung nach Landwirt, N-Effizienz be-zogen auf N 1 (N 2 bis N 11) bzw. N 11 (N 12 bis N 16), Mais_2015_1

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Kornertag [dt ha ⁻¹]	Protein- gehalt [%]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [%]
	Gülle-N		Mineraldünger-N						
	VB	VB	EC15	EC34					
Versuch ohne Gülledüngung im Frühjahr									
N 1	0	0	0	0	48,6 a	8,2 a	54,7 a	23,3 a	
N 2	0	70	0	0	55,6 a	10,4 b	78,3 b	69,7 b	33,7 bc
N 3	0	120	0	0	58,5 a	12,5 cde	100,9 c	97,1 c	38,5 c
N 4	0	170	0	0	51,7 a	14,0 f	99,0 c	149,0 d	26,0 abc
N 5	0	70	50	0	56,2 a	11,2 bc	87,0 bc	111,0 c	26,9 abc
N 6	0	120	50	0	57,7 a	13,2 def	105,1 c	142,9 d	29,6 abc
N 7	0	70	100	0	56,6 a	13,3 def	101,6 c	146,4 d	27,6 abc
N 8	0	120	100	0	49,0 a	13,8 ef	92,9 bc	205,1 e	17,3 a
N 9	0	70	0	50	54,1 a	11,9 cd	89,1 bc	108,9 c	28,7 abc
N 10	0	70	0	100	50,3 a	13,2 def	91,2 bc	156,8 d	21,5 ab
Versuch mit Gülledüngung im Frühjahr									
N 11	150	0	0	0	52,4 a	8,7 a	63,2 a	164,8 a	(5,6)
N 12	150	0	50	0	52,8 a	11,2 bc	82,1 abc	195,9 b	37,8 a
N 13	150	0	100	0	59,5 a	12,0 c	98,9 c	229,1 d	35,7 a
N 14	150	0	0	50	55,5 a	9,7 ab	74,0 ab	204,0 bc	21,5 a
N 15	150	0	0	100	58,2 a	12,3 c	98,8 c	229,2 d	35,6 a
N 16 ¹	150	90	0	0	57,3 a	12,0 c	95,4 bc	222,6 cd	35,8 a

3.6. Literatur zu Abschnitt 3.

- Asseng S, Ewert F, Martre P, Rötter RP, Lobell DB, Cammarano D, Kumball B A, Ottman M J, Wall GW, White JW, Reynolds MP, Alderman PD, Prasad PVV, Aggarwal PK, Anothai J, Basso B, Biernath C, Challinor AJ, De Santis G, Doltra J, Fereres E, Garcia-Vila M, Gayler S, Hoogenboom G, Hunt LA et. al. (2015): Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change* 5, 143-147.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2017): Düngung nach guter fachlicher Praxis. Internet: https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ackerbau/_Texte/Duengepaket_Novelle.html#doc8917596bodyText1. Letzter Aufruf: 25.03.17.
- Clark K, Beegle D (2014): Nutrient Management to Improve Nitrogen Use Efficiency and Reduce Environmental Losses. *Agronomy Facts* 76, Pennsylvania State University.
- Draxler JC, Klammler G, Fank J (2013): Vergleich der Simulationsmodelle CANDY und STOTRASIM für die ungesättigte Zone. *Die Bodenkultur* 64.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2016): Klimadaten Deutscher Wetterdienst. Internetserver: <ftp://141.38.3.186/pub/CDC/> Letzter Zugriff: 05.01.17.
- Franko U, Puhlmann M, Kuka K, Böhme F, Merbach I (2007): Dynamics of water, carbon and nitrogen in an agricultural used Chernozem soil in Central Germany. In: Kersebaum KC, Hecker JM, Mitschel W, Wegehenkel M (Hrsg.): *Modelling water and nutrient dynamics in soil crop systems*, Dordrecht, 245-258.
- Förster F (2013): BEFU, Düngungsempfehlungs- und Bilanzierungssystem. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen. Internet: <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/1868.htm> Letzter Aufruf: 03.01.17.
- Forster F, Hülsbergen K-J (2017): Analyse des Nitratbelastungspotenzials und Nitrat-Minderungsstrategien (Teilprojekt 1). Forschungsbericht „Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement“. Technische Universität München.
- Hege U, Maidl F-X, Dennert J, Liebler J, Offenberger K (2002): Düngestrategien für Stickstoff zu Winterweizen: Ein Vergleich von Simulationsmodellen und Düngeberatungssystemen. *Pflanzenbauwissenschaften* 6, S. 25-35, 2002, ISSN 1431-8857, Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Kromdijk J, Glowacka K, Leonelli L, Gabilly ST, Iwai M, Niyogi KK, Long SP (2016): Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. *Science*, 354, 857-861.
- Küstermann B, Christen O, Hülsbergen K-J (2010): Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135, 70-80.
- Küstermann B, MUNCH JC, Hülsbergen K-J (2013): Effects of soil tillage and fertilization on resource efficiency and greenhouse gas emissions in a long-term field experiment in Southern Germany. *European Journal of Agronomy* 49, 61-73.
- Lin H-C (2017): Resource-use efficiency of different organic and conventional farming systems: methodical investigations based on field studies in germany. Dissertation. Technische Universität München.
- Leithold P, Traphan K (2006): On Farm Research – eine neuartige Versuchsmethodik für Precision Farming. *Journal of Plant Diseases and Protection*, ISSN 1861-4051, S. 157-164.
- Limbrunner B, Maidl F-X (2009): Vergleich verschiedener Systeme zur teilflächenspezifischen Stickstoff-Düngung. Tagungsband der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 21, S. 81-82.
- Lin H-C, Huber JA, Gerl G, Hülsbergen K-J (2016): Nitrogen balances and nitrogen-use efficiency of different organic and conventional farming systems. *Nutr Cycl Agroecosyst* 105, 1-23.

- Maidl F-X (2011): Verfahren zur Bestimmung des Düngerbedarfs, insbesondere des Stickstoff-Düngerbedarfs und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Patentnr. DE 102011050877.
- Maidl F-X (2012): Voraussetzungen für eine sensorgesteuerte teilflächenspezifische N-Düngung. In: Informationstechnologie für eine nachhaltige Landwirtschaft. Proceedings 32. GIL-Jahrestagung, S. 199-202.
- Maidl F-X, Spicker A, Kern A (2012): Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung – Untersuchungen an Weizen. Getreidemagazin 3/2012, 34-38.
- Maidl F-X, Spicker A, Hülsbergen K.-J (2014): Mit Sensoren die Bestände besser führen. In: Wendl G. (Hrsg.): Neue Techniken im Ackerbau. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, 63-74.
- Maidl F-X (2015): Entwicklung und Vergleich verschiedener Systeme zur teilflächenspezifischen Stickstoff-Düngung mit Schwerpunkt Winterroggen. Lehrstuhl für ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, Technische Universität München (unveröffentlicht).
- Maidl, FX, Kimmelmann S (2016): Etablierung von Düngesystemen in Getreide. Forschungsprojekt in Kooperation von Technischer Universität München und Borealis. Stand: 01.11.2016.
- Maidl F-X (2017): Entwicklung des Düngealgorithmus in Winterweizen. Persönliche Mitteilung.
- Merck (2014): Wasser- und Lebensmittelanalytik, MQuant-Nitratteststäbchen. Broschüre im Internet: <http://www.merckmillipore.com/DE/de/analytics-and-sample-preparation/wfa-catalog/UHCb.qB.FXQAAAFE2QZfmm2a,nav> Download: 03.01.17.
- Miseviciene S (2009): Seasonal nitrogen leaching from fields applied by slurry. Lithuanian Univ. of Agriculture, Kaunas (Lithuania), Water Management Inst. Research for Rural Development, ISSN: 1691-4031.
- Ochsenbauer M, Machl T, Maidl F-X, Schilcher M, Hülsbergen K-J (2013): Sensorgestützte Analyse der Ertragsvariabilität von Winterweizen in einem Agroforstsystem mit schnellwachsenden Gehölzen zur Bioenergieerzeugung. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 25, Parallelsektion Agroforst, S. 112-113.
- QGIS (2015): Geoinformationssystem. QGIS-Projekt, Internet: <http://www.qgis.org/de/site/> Letzter Zugriff: 31.12.16.
- Roßberg D, Michel V, Graf R, Neukampf R (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 59, 155-161.
- Sorensen P (2011): Leaching of nitrate and phosphorus after autumn and spring application of separated solid animal manures to winter wheat. Soil use and Management 28, 1-11.
- Spicker A, Maidl F-X (2014): Optimierung der Düngung von Wintergerste durch Einsatz von Pflanzensensoren. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 26, 72-73.
- Spicker A (2017): Entwicklung von Verfahren der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winterraps (*Brassica napus* L.) auf Grundlage reflexionsoptischer Messungen. Dissertation, Technische Universität München (unveröffentlicht).
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S (2002): Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature 418, 671-677.
- VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) (Hrsg.) (1991): Methode A 6.2.1.1 Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat-Lactat (CAL)-Auszug. In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

-
- VDLUFA (Hrsg.) (2002): Methoden A 6.1.4.1 Bestimmung von mineralischem Stickstoff (Nitrat und Ammonium) in Bodenprofilen (N_{\min} -Labormethode). In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., 3. Teillieferung VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (Hrsg.) (2004): Methode A 4.3.2 Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff. In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., 4. Teillieferung VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (Hrsg.) (2004): Methode 4.1.2 Bestimmung von Rohprotein mittels DUMAS-Verbrennungsmethode. In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Bd. III Die Untersuchung von Futtermitteln, 3. Aufl., 5. Erg., VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (Hrsg.) (2016): Methode A 5.1.1 Bestimmung des pH-Wertes. In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., 7. Teillieferung, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (Hrsg.) (2016): Methode A 4.1.3.2 Direkte Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung bei 550°C und Gasanalyse. In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., 7. Teillieferung, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Wagner P, Weigert G, Gandorfer M, Meyer-Aurich A (2004): On-Farm Research – Eine neue Herausforderung in der Versuchsanstellung. Bericht über den Workshop „On-Farm Research“ der DFG Forschergruppe IKB-Dürnast (Informationssysteme kleinräumige Bestandesführung), Weihenstephan, Freising.
- Weißbach M, Griepentrog H-W (1998): Site specific fertilization and harvest. International Agricultural Engineering Conference, pp. 957-962, Bangkok.
- Wendland M (2012): DSNonline, Düngeberatungssystem Stickstoff. DüngeSystem der Landesanstalt für Landwirtschaft Bayern. Internet: <http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/027131/> Letzter Aufruf: 03.01.17.

4. Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz

Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz und zur Verminderung des Nitrataustragspotenzials wurden auf der Basis der Projektergebnisse (Abschnitte 2.3 und 3.3) erarbeitet. Die empfohlenen Maßnahmen und Optimierungsstrategien beziehen sich auf die Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen der Untersuchungsregion; sie sind aber auch auf andere Agrarregionen Bayerns bzw. Deutschlands mit intensiver Tierhaltung übertragbar.

Die Bewertungsmatrix (Tab. 70 bis Tab. 76) wurde von den Projektpartnern TUM, LfL und LfU gemeinsam abgeleitet und abgestimmt. Sie zeigt die Expertenmeinung der am Projekt beteiligten Wissenschaftler unter Berücksichtigung der aktuellen Forschungsergebnisse des Projektes Hohenthann.

4.1. Tierhaltung und Tierfütterung

Optimierung der Fütterung

Die Analyse der Schweinehaltung (Futterregime, Futterbilanz, Bilanzierung des Stickstoffanfalls in der Gülle, Gülleanalysen) zeigt, dass in den Betrieben z.T. Stickstoffüberschüsse in der Fütterung vorliegen, die zu einem erhöhten Stickstoffanfall in der Gülle führen. Es besteht daher Optimierungsbedarf, um durch eine proteinangepasste Fütterung die Stickstoffausscheidungen der Nutztiere zu reduzieren und damit die betrieblichen und überbetrieblichen Stickstoffkreisläufe zu entlasten.

Eine verstärkte Fütterungsberatung ist sinnvoll und erforderlich, um die Gülle-N-Outputs aus den Ställen und damit das Gülle-N-Aufkommen in den Betrieben und der Region zu reduzieren.

Ausbau der Güllelagerkapazität

Für eine bedarfsgerechte Gülleausbringung ist in Betrieben ohne Grünlandanteil und -nutzung eine Güllelagerkapazität von mindestens 9 Monaten anzustreben. Entscheidend für die Berechnung des Lagerraumes sind die tatsächlichen Gülleanfallmengen und die Verwertungsmöglichkeiten im Sinne einer pflanzenbedarfsgerechten Düngung.

Begrenzung des Viehbesatzes bzw. der Menge organischer Dünger

Grundsätzlich ist es nicht sinnvoll, höhere Stickstoffmengen über die Gülle auszubringen, als die Pflanzenbestände im Mittel der Jahre entziehen. Der Stickstoffentzug der angebauten Kulturpflanzen betrug auf den Ackerflächen der untersuchten Betriebe im Mittel der Untersuchungsjahre zwischen 139 und 172 kg ha⁻¹. Gemessen an den realisierten Erträgen und N-Entzügen sollte die von der Düngeverordnung vorgegebene N-Obergrenze von 170 kg ha⁻¹ aus organischen Düngern nicht ausgeschöpft werden, um die Möglichkeit der Feinsteuerung durch den Einsatz von Mineral-N zu erhalten.

Es war kein Untersuchungsbetrieb zu finden, der bei hohem Gülle-N-Einsatz auf den Einsatz von Mineral-N verzichtet. Vielmehr wurde oft festgestellt, dass die Mineral-N-Gaben nicht ausreichend an die Güllegaben angepasst waren. Dies ist eine der wesentlichen Ursachen der Nitratprobleme in der Untersuchungsregion.

Ist bei einem Betrieb der genaue N-Anfall mit organischen Düngern nicht bekannt, so besteht die Gefahr des Überschreitens der N-Obergrenze von 170 kg ha⁻¹. Dies ist insbesondere in Betrieben mit hohem Tierbesatz der Fall. In Betrieben mit geringem Ertragsniveau und geringen N-Entzügen ist der Einsatz organischer Dünger zu reduzieren und deutlich niedriger als die Obergrenze anzusetzen, um hohe N-Salden und Nitratausträge zu vermeiden.

Tab. 70: Bewertungsmatrix. Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz.

Schwerpunkt: Tierhaltung und Fütterung. Erläuterungen: + gering, ++ mittel, +++ hoch, ++++ sehr hoch

Maßnahme	Umsetzbarkeit	Effizienz	Kosten
1. Tierhaltung und Fütterung			
1.1. Optimierung der Fütterung	+++	+++	++
1.2. Ausbau der Güllelagerkapazität	+++	+++	+++
1.3. Begrenzung des Tierbesatzes	+	++++	++++
1.4. Gülleabgabe	++++	++++	++

Die Bewertungsmatrix zum Themenschwerpunkt Tierhaltung und Fütterung (Tab. 70) zeigt vier Maßnahmen mit hoher bis sehr hoher Effizienz bezüglich der Minderung von N-Überschüssen und der Reduzierung von Nitratausträgen. Demnach wäre neben der Gülleabgabe in andere Betriebe eine Begrenzung des Tierbesatzes eine sehr wirksame Maßnahme, allerdings in der Region Hohenthann (nach den Erfahrungen im Projekt) derzeit kaum umsetzbar bzw. für einzelne Betriebe (mit sehr hohem Tierbesatz) mit z.T. extrem hohen Kosten verbunden.

Der Ausbau der Güllelagerkapazität ist in einigen Betrieben dringend notwendig, um Herbst-Gülle-Gaben zu vermeiden; dies wird auch aufgrund der novellierten Düngeverordnung mit längeren Nichtanwendungszeitspannen erforderlich.

4.2. Gülldüngung

Gülleanalysen

Für eine bedarfsgerechte Düngung ist die Kenntnis der Nährstoffgehalte in der Gülle zwingend notwendig. Die Untersuchungen der LfL haben gezeigt, dass die Stickstoffgehalte der Gülle in den Untersuchungsbetrieben oftmals wesentlich höher liegen als in den Tabellenwerten angenommen. Die Verwendung von Tabellenwerten mit mittleren Gülleenährstoffgehalten ist daher nicht zielführend. Neben der Kenntnis der Inhaltsstoffe ist es auch wichtig, den mengenmäßigen Gülleanfall zu kennen, um Rückschlüsse auf die mit der Gülle ausgebrachten Nährstoffmengen ziehen zu können.

Verlustarme Ausbringungstechnik

Eine bessere Gülleapplikationstechnik ermöglicht eine gezieltere Düngung der Pflanzenbestände mit Gülle, die Erhöhung der Stickstoffeffizienz sowie die Minderung umweltgefährdender Ammoniakverluste. Die Gülle-Applikationstechnik beeinflusst die NH₃-Verluste, damit aber auch die pflanzenverfügbaren und verlustgefährdeten Stickstoffmengen im Boden.

Je verlustarmer die Gülle ausgebracht wird, umso mehr Mineraldüngerstickstoff kann und muss eingespart werden, wenn eine erhöhte Nitratauswaschung vermieden werden soll. Durch geringere Mineralstickstoffzufuhren kann der betriebliche Stickstoffkreislauf entlastet werden.

Unterlassen der Gülledüngung im Herbst zu Getreide

Die Untersuchungen in Feldversuchen auf Praxisschlägen und anhand von Nährstoffbilanzen in der Untersuchungsregion belegen eindeutig die geringe Stickstoffeffizienz bei Herbst-Gülleapplikation. Güllegaben im Herbst hatten keine oder nur geringe Wirkung auf die N-Aufnahme im Korn und erhöhten daher direkt den N-Saldo. N-Salden von $< 100 \text{ kg ha}^{-1}$ waren bei einer Herbst-Gülleapplikation nicht zu erreichen. Güllegaben im Herbst führen somit insgesamt zu einer sehr niedrigen Stickstoffeffizienz und sollten daher unterlassen werden. Auch bei Wintergerste sollte in der Regel auf eine Herbstdüngung verzichtet werden. Diese Maßnahme setzt jedoch entsprechende Güllelagerkapazitäten und schlagkräftige Ausbringungstechnik im Frühjahr voraus.

Tab. 71: Bewertungsmatrix. Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz.

Schwerpunkt: Gülledüngung. Erläuterungen: 0 kein Effekt, + gering, ++ mittel, +++ hoch, ++++ sehr hoch

Maßnahme	Umsetzbarkeit	Effizienz	Kosten
2. Gülledüngung			
2.1. Gülleanalysen	++	+++	+
2.2. Verlustarme Ausbringtechnik	++++	+++	++
2.3. Keine Gülledüngung im Herbst zu Getreide	++++	++++	+
2.4. Keine zeitgleiche Applikation von Gülle und Mineral-N im Frühjahr	++++	++	0

Gülleapplikation im Frühjahr in Kombination mit Mineraldüngergaben

Eine zeitgleiche Applikation von Mineraldünger und Gülle (erfolgte auf nahezu allen Untersuchungsflächen im Jahr 2014) hat eine sehr geringe N-Effizienz zur Folge und ist negativ zu bewerten. Die Düngewirkung der Gülle muss abgewartet werden, um die Mineral-N-Düngung entsprechend anpassen zu können. Hierdurch können erhebliche N-Mengen eingespart werden. Auf diesem Grundsatz basiert die im Projekt geprüfte sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung.

4.3. Mineraldüngung

Sorgfältige Düngeplanung

Eine Düngeplanung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Nährstoffgehalte der Gülle, des tatsächlichen Viehbesatzes, der N_{\min} -Werte der Schläge und eines realistischen Ertragszieles hat nach den vorliegenden Projektergebnissen vielfach eine deutliche Reduktion der N-Düngermengen (ohne Ertrags- oder Qualitätseinbußen) zur Folge.

Ertragsangepasste Düngung

In den Untersuchungen konnte deutlich gezeigt werden, dass hohe Nitratausträge vor allem in den Niedrigertragszonen auftreten. Dies ist vor allem auf eine nicht angepasste Düngung zurückzuführen. In den Untersuchungsbetrieben wird oft für Ertragsziele gedüngt, die die Betriebe nicht oder nur selten erreichen. Insbesondere ist darauf zu achten, dass Schläge und Teilschläge mit geringerem Ertragspotenzial reduziert, unter Berücksichtigung realistischer Ertragserwartungen, gedüngt werden.

Anwendung von Düngesystemen

Die Anwendung von Düngesystemen (DSN, BEFU) wird dringend empfohlen. Aber: Für den Schlag müssen realistische Erträge angenommen und jeder Ertragsbereich sollte separat kalkuliert und gedüngt werden (Mapping-System). Bei der Düngebedarfsermittlung nach einem Düngesystem muss die geplante Gülleapplikation mit den tatsächlichen Nährstoffgehalten angegeben und die empfohlene Reduktion der mineralischen Düngegabe eingehalten werden. Als nachteilig bei den Düngesystemen wird vor allem die aufwendige Bodenprobenahme angesehen. Letztere ist auch ein Hemmschuh für die Durchführung einer Teilschlagdüngung auf Basis der bestehenden Systeme.

Sensorgestützte Düngung (von der TU München entwickeltes Düngesystem)

Die sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung kann zur Feinsteuerung der Mineral-N-Düngung genutzt werden, aber auch, um eine Überdüngung auf Standorten mit hohem Mineralisationspotenzial, insbesondere nach langjährig intensiver Gülledüngung zu verhindern. Hier hat das von der TUM entwickelte Verfahren der teilflächenspezifischen N-Düngung nach dem System „Online + Mapoverlay“ ein sehr hohes Potenzial zur Minderung umweltrelevanter Stickstoffverluste. Besonders viehhaltende Betriebe können durch den Einsatz der sensorgestützten N-Düngung die Güllewirkung besser abschätzen (anhand der Entwicklung der Pflanzenbestände) und gezielt Mineraldünger einsparen. Durch eine überbetriebliche Nutzung ist auch bei kleineren Betrieben ein Sensoreinsatz möglich.

Allerdings sind weitergehende Untersuchungen notwendig, um die N-Düngesysteme für die Fruchtart Mais weiterzuentwickeln und unter Praxisbedingungen umfassend zu testen. Auch die Berücksichtigung differenzierter Ertragspotenziale innerhalb von Produktionsschlägen sowie generell die Festlegung der Ertragsziele sollten Gegenstand der weiteren Forschung sein.

Tab. 72: Bewertungsmatrix. Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz.

Schwerpunkt: Mineraldüngung. Erläuterungen: 0 kein Effekt, + gering, ++ mittel, +++ hoch, ++++ sehr hoch

Maßnahme	Umsetzbarkeit	Effizienz	Kosten
3. Mineraldüngung			
3.1. Sorgfältige Düngeplanung	+++	++	+
3.2. Ertragsangepasste Düngung			
3.2.1. schlagspezifisch	+++	++	+
3.2.2. teilschlagspezifisch	++	+++	++
3.3. Anwendung von Düngesystemen	+++	++	++
3.4. Stickstoffsensoren			
3.4.1. Sensorgestützte N-Düngung (Düngesystem der TUM)	+	++++	+++
3.4.2. Sensorgestützte N-Düngung (übrige Düngesysteme)	+	++	+++
3.5. Keine Unterfußdüngung bei Mais	++++	+	0

Die sensorgestützte N-Düngung ermöglicht den Transfer von neuestem Knowhow in die Betriebe. Die Landwirte bekommen damit eine zielgenaue Düngeempfehlung nicht nur auf Schlag-, sondern auch auf Teilschlagebene zum jeweiligen Düngezeitpunkt. Es wird zudem empfohlen, Berater mit einem entsprechenden Sensor-Handgerät auszustatten (Präzisierung der Beratung, Absicherung der Beratungsempfehlungen). Zu beachten ist, dass sich die Sensorsysteme verschiedener Hersteller bzw. Entwickler sehr stark hinsichtlich der Düngealgorithmen unterscheiden. Beispielsweise berücksichtigt nur das TUM-System das teilflächenspezifische Ertragspotenzial eines Standorts.

4.4. N-Salden und N_{\min} -Vorräte der Böden

N-Saldo

Zur Beschränkung des Nitrataustrags und Einhaltung des Nitratgrenzwerts von 50 mg l⁻¹ Rohwasser ist rechnerisch eine Beschränkung des N-Saldos (nach TUM-Methodik, unter Berücksichtigung aller relevanten N-Zufuhren einschließlich der N-Deposition) auf ca. 50 kg ha⁻¹ bei ausschließlich mineralisch gedüngten Flächen und bis zu ca. 80 kg ha⁻¹ (je nach Höhe der gasförmigen N-Verluste) auf Flächen mit hohem Gülleeinsatz erforderlich. Es dürfen bei einer standortspezifischen Sickerwassermenge von 200 bis 300 mm a⁻¹ nicht mehr als 23 bis 34 kg ha⁻¹ Nitrat-N ausgewaschen werden, um die Nitratgehalte im Sickerwasser unter 50 mg l⁻¹ zu halten.

Das Erreichen dieser Ziele wird als durchaus möglich erachtet. Als kurzfristig zu realisierendes Mindestziel sollte eine Reduktion des N-Saldos im betrieblichen Mittel auf unter 100 kg ha⁻¹ sowie die Einhaltung des N-Saldos nach dem Nährstoffvergleich der Düngeverordnung in allen Betrieben umgesetzt werden. Als Kontrollinstrument wird die Hoftorbilanz (Stoffstrombilanz) empfohlen.

N_{min}-Vorräte und N_{min}-Proben im Herbst

Hohe N_{min}-Vorräte im Herbst nach Mais werden vor allem durch nicht angepasste Düngung sowie durch ein hohes Mineralisationspotenzial der Böden verursacht. Für Raps wurden diesbezüglich im Projekt nur relativ wenige Werte erfasst, es ist aber davon auszugehen, dass bei Winterraps die N_{min}-Vorräte ebenfalls durch die Düngung beeinflusst werden.

Tab. 73: Bewertungsmatrix. Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz. Schwerpunkt: N-Salden und N_{min}-Vorräte. Erläuterungen: 0 kein Effekt, + gering, ++ mittel, +++ hoch, ++++ sehr hoch

Maßnahme	Umsetzbarkeit	Effizienz	Kosten
4. N-Salden und N_{min}-Vorräte			
4.1. N-Salden			
4.1.1. N-Salden auf Schlagebene	++++	++++	++
4.1.2. N-Salden auf Betriebsebene (Hoftorbilanz)	++++	+++	+
4.2. N _{min} -Vorräte und N _{min} -Proben			
4.2.1. im Herbst	++	++	+++
4.2.2. im Frühjahr	+++	++	+++
4.2.3. nach der Ernte	++	0	+++

Eine Beschränkung der Herbst-N_{min}-Vorräte bzw. die Förderung niedriger N_{min}-Vorräte würde speziell bei den Kulturen Mais und Raps eine Reduzierung der Düngung erfordern.

Bei ausreichender Honorierung niedriger Werte kann mit N_{min}-Proben ein guter Effekt erzielt werden. Zu beachten ist jedoch, dass N_{min}-Vorräte starken Jahres- und Standorteinflüssen unterliegen, die berücksichtigt werden müssen. Es müsste ein entsprechendes Konzept zur N_{min}-Probenahme und Bewertung erarbeitet werden.

N_{min}-Proben und Untersuchungen im Frühjahr

Auf Flächen mit langjähriger Gülledüngung und hohen N-Mineralisationspotenzialen ist es grundsätzlich sinnvoll, im Frühjahr N_{min}-Proben zu ziehen, um gegebenenfalls auf ein hohes N-Angebot aus der Vorfrucht reagieren zu können. Da sich die Stickstoffvorräte aus der Vorfrucht oftmals in der Tiefe 60 – 90 cm befinden, ist eine Beprobung bis 90 cm zu empfehlen.

4.5. Fruchtfolgegestaltung

Fruchtfolge allgemein

Bei Weizen nach Vorfrucht Mais oder Raps besteht eine erhöhte Gefahr für Nitratausträge, was die oftmals hohen N_{\min} -Messwerte im Herbst zeigen. Eine Reduzierung des Maisanteils kann bei Standorten mit intensiver organischer Düngung daher eine Entlastung bringen. Die Einbeziehung der Wintergerste in die Fruchtfolge ist aufgrund des höheren Stickstoffaufnahmevermögens der Wintergerste im Herbst ebenfalls als günstig anzusehen. Voraussetzung ist aber eine angepasste Düngung der Wintergerste. Winterraps hat ein hohes Stickstoffverlustpotenzial, da dieser hohe Mengen Reststickstoff in den Ernte- und Wurzelrückständen hinterlässt, die je nach Witterungsbedingungen schnell mineralisiert werden können.

In Biogassystemen bzw. bei rinderhaltenden Betrieben bietet der Anbau von Klee gras bzw. Acker gras eine gute Möglichkeit zur Minderung der Nitratausträge. Silomais ist aufgrund seines höheren N-Entzuges günstiger zu beurteilen als Körnermais. Hohe Rest- N_{\min} -Vorräte sind nach Silomais aufgrund des fehlenden Strohs und seiner stickstoffkonservierenden Wirkung aber eher als kritisch anzusehen.

Tab. 74: Bewertungsmatrix. Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz. Schwerpunkt: Fruchtfolgegestaltung. Erläuterungen: 0 kein Effekt, + gering, ++ mittel, +++ hoch, ++++ sehr hoch

Maßnahme	Umsetzbarkeit	Effizienz	Kosten
5. Fruchtfolgegestaltung			
5.1. Fruchtarten			
5.1.1. Verringerung des Maisanteils	+	++	++++
5.1.2. Verringerung des Rapsanteils	+	+	++++
5.2. Zwischenfruchtanbau	++++	++	+

Zwischenfruchtanbau

Der Anbau von Zwischenfrüchten mindert die Nitratauswaschung, sofern der Pflanzenbestand gut entwickelt ist und eine relevante Trockenmassebildung und N-Aufnahme erreicht. Beim Anbau sollte eine ausreichende Bestandsentwicklung durch rechtzeitige und sorgfältige Saat gewährleistet werden. In Feldexperimenten mit unterschiedlichen Zwischenfruchtmischungen konnte das N-Aufnahmepotenzial unter den Standortbedingungen in Hohenthann gezeigt werden.

Der von den Zwischenfrüchten aufgenommene Stickstoff ist in der pflanzlichen Biomasse „konserviert“ und kann zu diesem Zeitpunkt nicht ausgewaschen werden. Eine besonders starke Verminderung von N-Überschüssen ist durch Zwischenfrüchte mit einem hohen N-Entzug zu erreichen, deren Biomasse geerntet wird, z.B. für den Einsatz in der Tierhaltung oder in Biogasanlagen.

Verbleibt die Biomasse der Zwischenfrüchte auf dem Feld, so findet bei absterbenden, nicht winterharten Zwischenfrüchten und/oder bei der Einarbeitung der Biomasse eine N-Mineralisation statt, die bei den folgenden N-Düngungsmaßnahmen berücksichtigt werden muss.

4.6. Beratung und Kontrolle

Beratung

Die Untersuchungen in Hohenthann haben gezeigt, dass eine fundierte einzelbetriebliche Beratung wesentlich zu einer deutlichen Minderung der N-Salden und der potenziellen Nitratausträge beitragen kann. So haben einige der am Projekt beteiligten Landwirte ihre Düngestrategie überdacht und z.T. deutlich geändert, z.B. durch den Verzicht auf Herbst-Gülle-Applikation, die Reduzierung der Mineral-N-Gaben unter Berücksichtigung des Gülleinsatzes, die verstärkte Gülleabgabe in Marktfruchtbetriebe sowie durch die Investition in moderne Gülleapplikationstechnik zur verlustarmen Gülleausbringung. Dadurch sanken in einigen Betrieben während des Untersuchungszeitraums die N-Salden deutlich, auch unter Berücksichtigung von Jahres- und Witterungseffekten.

Großer Beratungsbedarf wird in der Tierhaltung zur Optimierung der Futtermittelnationen gesehen (vgl. Abschnitt 4.1.); hier zeigten sich große N-Minderungspotenziale in den Betrieben (vgl. Abschnitt 2.3.1.).

Einen weiteren Beratungsschwerpunkt sollte die Düngberatung unter dem Aspekt des Trinkwasserschutzes einnehmen. Der Einsatz moderner Düngesysteme und die Anwendung der sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung erfordern eine entsprechende Schulung und Beratung.

Tab. 75: Bewertungsmatrix. Maßnahmen zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz.

Schwerpunkt: Beratung und Kontrolle. Erläuterungen: 0 kein Effekt, + gering, ++ mittel, +++ hoch, ++++ sehr hoch

Maßnahme	Umsetzbarkeit	Effizienz	Kosten
6. Beratung			
6.1. Intensive einzelbetriebliche Beratung	++	+++	++++
6.2. Fütterungsberatung	+++	++	++
6.3. Schulung der Landwirte	++	++	++
7. Kontrolle			
7.1. Einhaltung der Düngeverordnung	++	+++	+++
7.2. Einhaltung der Wirtschaftsdüngerverbringungsverordnung	++	+++	+++

Auch die konsequente Umsetzung und wirksame Kontrolle der novellierten Düngeverordnung kann dazu beitragen, die N-Überschuss- und Verlustprobleme zu lösen. Einige der in der DüV enthaltenen Regelungen (Beschränkungen bei der Herbst-Gülle-Anwendung, längere Nichtanwendungszeitspannen) können bei richtiger Umsetzung zu einer spürbaren Minderung der N-Salden und der Nitratausträge führen.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Aufgrund der umfangreichen Versuche und der betrieblichen Stickstoffbilanzierung wurden im Forschungsprojekt Hohenthann neue Erkenntnisse zur Stickstoffeffizienz und zur Nitrataustragsgefährdung bei hohem Gülleinsatz gewonnen. Die Nährstoffsituation in der Untersuchungsregion kann somit viel genauer eingeschätzt werden. Darauf aufbauend wurden betriebliche Maßnahmen zum Trinkwasserschutz abgeleitet, die tatsächlich eine Minderung der Nitratausträge bewirken und die von den Betrieben auch umsetzbar sind. In Abstimmung mit den Projektpartnern LfL und LfU wurde eine Bewertungsmatrix erarbeitet (Abschnitt 4.), in der die wichtigsten Maßnahmen zur Minderung von Nitratausträgen dargestellt und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit, Effizienz und Kosten bewertet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen in Hohenthann wurde ein neuentwickelter multispektraler Sensor erstmalig eingesetzt, um die Kulturpflanzenbestände auf heterogenen Schlägen und differenzierter Nährstoffnachlieferung optimal mit Stickstoff zu versorgen. Das System hat dabei seine Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt und das Interesse vieler Landwirte geweckt.

Im Projekt Hohenthann konnten aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit und Forschungskapazitäten bei weitem nicht alle Fragen zur Gülle- und Nitratproblematik geklärt werden; zudem ergaben sich bei der Projektbearbeitung auch einige neue Fragestellungen. Die begonnenen Forschungsarbeiten sollten daher in Folgeprojekten fortgesetzt werden. Einen Schwerpunkt sollten hierbei die Praxiserprobung und der Praxistransfer neuer Dünge- und N-Managementsysteme bilden. Folgende Forschungsschwerpunkte sollten bearbeitet werden:

- **Weiterentwicklung des sensorgestützten TUM-Düngesystems** bis zur Praxisreife, insbesondere der N-Düngealgorithmen für Mais. Erarbeitung spezifischer N-Düngealgorithmen für Trinkwasserschutzgebiete. Umfassende Erprobung des sensorgestützten Düngesystems in Praxisbetrieben unter differenzierten Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen.
- **Praxiserprobung eines neuentwickelten Web-basierten Nährstoff-Managementsystems** (Hülsgen et al. 2017). Das Managementsystem wird seit zwei Jahren entwickelt¹; es basiert in wesentlichen Teilen auf den im Modell REPRO verwendeten Methoden, verbindet diese aber mit einer Düngebedarfsermittlung und der Berechnung von Nährstoffbilanzen nach DüV. Zudem können teilflächenspezifische Daten ausgewertet werden (räumlich differenzierte N-Bilanzierung). Mit dem neuen System können Nährstoffkreisläufe und Nitratausträge entsprechend der in Teilprojekt 1 verwendeten Bilanzierungsmethode (vgl. Abschnitt 2.2.2. und 2.2.3.) untersucht werden. Unter Nutzung von Sensordaten können teilschlagspezifische Karten (Stickstoffentzug, Stickstoffsaldo, Nitrataustrag) erstellt werden. Landwirte und Berater können die Software eigenständig nutzen.
- **Flächendeckende, räumlich differenzierte Stickstoffbilanzierung** und Analyse der Nitrataustragspotenziale von Agrarregionen. Die Untersuchungen könnten in der Region Hohenthann oder einer anderen geeigneten Agrarregion stattfinden. Neben den betriebsbezogenen sind regionsbezogene Untersuchungen dringend erforderlich, um die Nitratproblematik zu lösen. Hierfür bieten

¹ Die Entwicklung des Managementsystems wird in zwei FuE-Projekten durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) gefördert.

neue Verfahren der Geoinformatik, Modellierung sowie die bessere Verfügbarkeit von Modelleingangsdaten (z.B. Sensor- und Satellitendaten) neue innovative Lösungsmöglichkeiten.

- **Analyse der überbetrieblichen Stoffströme** (Gülletransfer) und der Vernetzung der Betriebe. Die überbetrieblichen Nährstoffströme konnten im Projekt Hohenthann aufgrund der begrenzten Forschungskapazitäten nicht umfassend analysiert werden. Dies sollte daher Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein.
- **Analyse (Messung) der Denitrifikationsverluste** (N_2 , N_2O) der Böden in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und N-Mineralisationspotenzial (bei langjähriger Gülledüngung). Nach unseren Untersuchungen werden die Nitratausträge unter landwirtschaftlichen Nutzflächen mit N-Bilanzen und N-Umsatzmodellen derzeit deutlich überschätzt, weil die Denitrifikation auf dem Untersuchungsstandort viel höher ist, als bisher angenommen (vgl. Abschnitt 2.3.3.2.). Diese Frage hat eine hohe Praxisrelevanz, denn hiervon hängt u.a. ab, welche N-Salden nicht überschritten werden dürfen, um den Nitratgrenzwert einzuhalten.
- **Umstellung auf ökologischen Landbau.** Dieser Aspekt wurde bisher im Projekt nicht untersucht, ist aber relevant, zumal einige Landwirte in der Region (auch mit Schweinehaltung) eine Betriebsumstellung in Erwägung ziehen. Aus zahlreichen Untersuchungen ist bekannt, dass die Umstellung auf ökologischen Landbau aufgrund der begrenzten N-Zufuhren („Low-Input-Systeme“) eine sehr wirksame Maßnahme zum Trinkwasserschutz, zur Minderung von N-Salden und Nitratausträgen sein kann, allerdings kommt es auf die konkrete regionale und betriebliche Umsetzung an. In Regionen mit intensiver Schweinehaltung und dominierender konventioneller Landwirtschaft (wie in Hohenthann) ist die Umstellung auf ökologischen Landbau schwieriger zu realisieren, als z.B. in Grünland-Milchviehregionen.
- **Ökonomische Bewertung von Nitratminderungsmaßnahmen.** Bisher wurden in der Region Hohenthann vor allem pflanzenbauliche und agrarökologische Untersuchungen durchgeführt. Die vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen (siehe Bewertungsmatrix, Abschnitt 4.) müssen aber auch ökonomisch bewertet werden, um die Umsetzbarkeit zu sichern. In der Praxis sind nur Maßnahmen umsetzbar, die auch wirtschaftlich tragfähig sind. Wichtig wäre eine Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen des Einsatzes der modernen Sensorsysteme (ggf. unter Berücksichtigung von Trinkwasseraufbereitungskosten) sowie die Entwicklung eines Kooperationsmodells von Wasserwirtschaft und Landwirtschaft zur Förderung der Praxiseinführung dieser innovativen Dünge-systeme.