

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngesystem für Weizen“

Endbericht

Zum DBU Projekt

Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngesystem für Weizen

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Förderbereich: Förderinitiative Verminderung von Stickstoffemissionen

Förderthema: Landwirtschaftliche Produktionsverfahren

Projektlaufzeit: 04.12.2012 – 03.12.2015 verlängert bis 31.03.2016

Projektleiter: Prof. Dr. Henning Kage (CAU)

Projektbearbeiter: Dr. agr. Arne M. Ratjen (CAU)


Versuchsbetreuung / Datensammlung: Dr. agr. Eric Reinsdorf (LWK NI)

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngesystem für Weizen“

INHALTSVERZEICHNIS

PROJEKTKENNBLETT	3
1. ZIELSETZUNG DES VORHABENS	10
2. WEITERENTWICKLUNG VON MODELLMODULEN	12
2.1 Simulation der spezifischen Blattfläche unter Einfluss von Trockenstress und N-Mangel	12
2.2 Einfluss von Trockenstress auf die Stoffverteilung	12
2.3 Einfluss von N-Mangel auf die Lichtnutzungseffizienz (LUE)	17
2.4 Einfluss von N-Mangel auf die Stoffverteilung	20
2.5 Simulation von N-Freisetzung aus der organischen Bodensubstanz	21
2.6 Schätzung der standortspezifischen mittleren, effektiven N-Freisetzung (Min^{eff})	24
2.7 Benutzerschnittstelle auf der ISIP Internet-Plattform	30
2.7.1 Eingabe der notwendigen Inputgrößen	30
3. EVALUIERUNG DES DÜNGEMODELLS	33
3.1 Funktionsweise des N-Modells	33
3.2 Düngesystemvergleich	35
3.3 Fazit Modell-Validation	42
4. PROBLEME	42
4.1 Wetterstationen	42
4.2 Benutzereingaben	44
4.3 Einflussgrößen welche nicht vom Modell berücksichtigt werden	44
5. ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	45
6. FAZIT ZUM PROJEKT	48
LITERATUR	50

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngungsberatungssystems für Weizen“

06/02			
Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	29226	Referat	Fördersumme 338.370
Antragstitel		Förderinitiative Verminderung von Stickstoffemissionen: Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngungsberatungssystems für Winterweizen	
Stichworte		Stickstoff, Düngung, Winterweizen, Grundwasserschutz	
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
36 Monate	04.12.2012	03.12.2015	1
Zwischenberichte			
Bewilligungsempfänger	Christian-Albrechts-Universität Kiel	Tel	0431 880 3472
	Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung	Fax	0431 880 1396
	Hermann-Rodewald-Str. 9	Projektleitung	
	24118 Kiel	Prof. Dr. Henning Kage	
		Bearbeiter	
		Dr. Arne M. Ratjen	
Kooperationspartner	Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover, Dr. Baumgärtel ISIP e.V., Bad Kreuznach, Dr. Röhrig, Dr. Sander		
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens			
<p>Der stark gestiegene Weizenpreis bei gleichzeitig moderatem N-Preis hat den ökonomischen Druck hin zu höheren N-Gaben erhöht. Diesem Trend kann nur durch eine genauere, bedarfsgerechte N-Düngeplanung begegnet werden. Eine bedarfsgerechte N-Düngung ist jedoch nur möglich, wenn sowohl der N-Entzug des Bestandes als auch die effektive N-Nachlieferung aus dem Boden zum Zeitpunkt der Düngung hinreichend genau</p>			

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngesystems für Weizen“

eingeschätzt werden können. Eine exakte Bemessung dieser Größen ist indes nicht möglich, da die Witterung zum Zeitpunkt der letzten N-Gabe noch nicht vollständig bekannt ist. Allerdings erfolgt die Abschlussdüngung von Backweizen üblicherweise erst zum Ährenschieben. Obwohl die Witterungsinformation noch unvollständig ist, ist zu diesem Zeitpunkt schon ein großer Teil Witterung in der Vegetationsperiode bekannt. Wenn es gelingt, diese Information richtig zu deuten, würde dies eine an den jahresspezifischen Bedarf angepasste N-Düngung ermöglichen. Auf der Grundlage historischer N-Steigerungsversuche der LWK Niedersachsen und einem dynamischen Simulationsmodell für die Prozesse Phänologie, Ertragsbildung, Wasserhaushalt, N-Mineralisation wurde ein Ansatz für eine orts- und jahresspezifische Düngeempfehlung am Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung entwickelt. Hierbei wird bewusst auf regional verfügbares empirisches Wissen aus N-Steigerungsversuchen zurückgegriffen. Die Ableitung des Düngebedarfs erfolgt durch einen speziellen Bilanzansatz, in dem die Teilgrößen N-Entzug des Bestandes und effektive N-Nachlieferung des Bodens sowie Preis-Kosten-Relation eingehen. Das Simulationsmodell (*HumeWheat*) dient zur jahresspezifischen Anpassung wichtiger Teilgrößen. Hierbei wird der Einfluss der Jahreswitterung mit Hilfe verfügbarer Wetterdaten berücksichtigt und mittels Szenarienrechnungen bewertet. Das Konzept ist auf der Beratungsplattform ISIP (www.ISIP.de) implementiert und soll deutschlandweite Anwendung finden. Hierzu muss jedoch eine regionalisierte Parametrisierung erfolgen und geeignetes Referenzwetter bereitgestellt werden. Des Weiteren ist eine Verbesserung der einzelnen Teilkomponenten geplant.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Um das N-Nachlieferungsverhalten der verschiedenen Ackerböden besser einschätzen zu können, sollen umfangreiche Versuchsdaten der beteiligten Landesdienststellen ausgewertet werden. Zur Auswertung wurden bereits geeignete Verfahren entwickelt, welche durch eine breitere Datenbasis jedoch noch verfeinert werden sollen. Im Mittelpunkt steht hierbei die N-Menge, welche sich zum Zeitpunkt der Ernte in der Weizenpflanze befindet und nicht durch die N-Düngung oder den Frühjahrs- N_{\min} erklärt werden kann. Diese effektive N-Nachlieferung des Bodens kann aus N-Responsekurven abgeleitet werden, die den Bereich des N-Dünungsoptimums mit umfassen. Es soll geprüft werden, in wieweit sich die bekannten Einflussgrößen Bodengüte, Vorfrucht und Ertragsniveau als Schätzer für die effektive N-Nachlieferung eignen. Zusätzlich soll der Einfluss des Klimas auf die standortspezifische N-Nachlieferung ermittelt werden.

Um die regionale, jahresspezifische Witterung mittels Simulationsrechnung bewerten zu können, soll zudem geeignetes, regionsspezifisches Referenzwetter erstellt werden. Hierzu sollen langjährige DWD-Wetterdaten als Grundlage dienen.

Die Abbildungsgüte der simulierten N-Mineralisation in *HumeWheat* ist z.Zt. noch unzureichend. Daher soll ein Verfahren entwickelt werden, welches es ermöglicht, aus den empirisch ermittelten Endwerten der effektiven N-Mineralisation tägliche Änderungsraten in Abhängigkeit von Boden- und Witterungsparametern abzuleiten.

In Zusammenarbeit mit der LWK-Niedersachsen und der Internetplattform ISIP.eV soll zudem die Benutzerfreundlichkeit verbessert werden, um die Akzeptanz in der Praxis zu verbessern.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Die Modellempfehlungen sollen mit Referenzdüngungen verglichen und evaluiert werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt · An der Bornau 2 · 49090 Osnabrück · Tel
0541/9633-0 · Fax 0541/9633-190 · <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Das Modell kann auf der Internetplattform www.isip.de begutachtet werden.

Ablauf

Das Projekt verlief überwiegend wie geplant, sodass die Projektziele erreicht werden konnten. Da die Datensammlung bei der LWK- Niedersachsen jedoch etwas verzögert anlief, konnten einige Neuerungen erst verspätet implementiert werden.

Modellverbesserungen

Durch die deutschlandweite Datensammlung der LWK Niedersachsen konnte die standortspezifische Schätzung der N-Nachlieferung wesentlich verbessert werden. Gegenüber der Annahme, dass die N-Nachlieferung vorwiegend vorfruchtbasiert ist (siehe Düngeverordnung), konnte der mittlere Fehler (RMSE) um ca. **11 kgN/ha** verringert werden, indem weitere Standortparameter (Klima, Bodengüte, N_{\min}) in die Schätzung aufgenommen wurden. Durch das Verfahren der Kreuzvalidation zeigte sich, dass das Schätzverfahren auch für unbekannte Standorte gilt. Das Pflanzen-Boden Modell *HumeWheat*, wurde im Bereich Trockenstress-Adaption und N limitiertes Wachstum weiter entwickelt. Hierzu wurden auch mehrere Publikationen in angesehenen wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Internetplattform ISIP e.V. www.isip.de

Wissenschaftliche Publikationen

Ratjen, A.M., Kage, H., (2016, accepted). Modelling N and dry matter partitioning between leaf and stem of wheat under varying N supply. *Journal of Agronomy and Crop Science*

Ratjen, A.M., Kage, H., (2015, accepted). A simple drought-sensitive model for leaf:stem partitioning of wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*

Ratjen, A. M., Heumann, S., Kage, H., Böttcher, J. (2015, submitted). Soil N supply at economic optimum N rate. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*

Ratjen, A.M., Kage, H., (2015). Nitrogen-limited light use efficiency in wheat crop simulators: comparing three model approaches. *J. Agric. Sci. (Cambridge University Press- first view)*, 1–12. doi:10.1017/S0021859615001082

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngungsberatungssystems für Weizen“

Ratjen, A.M., Kage, H., (2015). Forecasting yield via reference- and scenario calculations. Comput. Electron. Agric. 114, 212 – 220.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.020>

Heumann, S., Ratjen, A. M., Kage, H., Böttcher, J. (2014). Estimating net N mineralization under unfertilized winter wheat using simulations with NET N and a balance approach. Nutr. Cycl. Agroecosystems 1–14. doi:10.1007/s10705-014-9616-y

Ratjen A.M., Kage H. (2013). Is mutual shading a decisive factor for differences in overall canopy specific leaf area of winter wheat crops? Field Crops Research 149:338–346

Wissenstransfer

Ratjen, A.M. (25.Nov 2015) Können Düngungsmodelle bei der exakten Bemessung der Düngungshöhe helfen? Seminar der Arbeitsgemeinschaft für integrierte Pflanzenproduktion Südhannover e.V.

Ratjen, A.M. (23.-24. Nov. 2015). „Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen,“ - im Rahmen der Veranstaltung „Flugroboter für Precision Farming“ (Universität Rostock)

Ratjen, A.M. (2015, Abstract in print).: FIELD DATA BASED DERIVATION OF PROCESS DESCRIPTIONS IN CROP GROWTH MODELS. IS THERE STILL ROOM FOR IMPROVEMENT?. International Crop Modelling Symposium 15-17 March 2016, Berlin (Vortrag, Tagungsband)

Ratjen, A.M. (19-20 Nov 2015) DFG Think-Tank Rundgespräch: Presentations and Summary_Round Table Discussion "Sustainable Intensification of Agricultural Production" Bonn.

Ratjen, A.M. (18. November 2014). Nährstoff nach Rezept - Stickstoffmodell für Winterweizen. DLG – Workshop – SMART FARMING, Bernburg

Ratjen, A.M. (06.02.2014) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen Kolloquium zur Bodenkunde der Uni Hannover (Vortrag)

Ratjen, A.M. (05.11.2014) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen: Standort und Jahresspezifisch. Verband der Landwirtschaftskammern AK Düngung (Vortrag)

Ratjen, A. M., Kage, H. (2013): Is mutual shading a decisive factor for differences in overall canopy specific leaf area of winter wheat crops? ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings, 03-06.11.2013 in Tampa ,Florida, USA. (Poster)

Ratjen, A.M. (23-25.10.2013) Think-Tank Rundgespräch zum Grundsatzpapier „Erhöhung der Flächenproduktivität bei gleichzeitigem Schutz natürlicher Ressourcen sowie dem Erhalt von Ökosystemdienstleistungen – Zukunftsoptionen der deutschen Agrarökosystemforschung“.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngesystems für Weizen“

Reinsdorf, E., Baumgärtel, G. (2015) Stickstoff-Düngung nach Maß. Land und Forst Nr. 21, S. 22.

Reinsdorf E. Ratjen, A.M. (2015) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen. 24. Thüringer Düngungs- und Pflanzenschutztagung, S. 25-34

Reinsdorf, E., Baumgärtel, G., (2014) N-Spätgabe mit Aufschlag versehen. Land und Forst Nr. 20, S. 19.

Reinsdorf, E., Baumgärtel, G., (2014) N-Düngung im Winterweizen steuern. Land und Forst Nr. 18, S. 24

Vorträge:

Reinsdorf, E. (29.01.2016) Der Weg zum optimalen Düngesystem – ein Überblick über 10 Jahre Stickstoffdüngungsversuche im Winterweizen. 13. Pflanzenbau-Fachtagung. Sehnde-Rethmar.

Reinsdorf, E. (26.01.2016) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen – Möglichkeiten und Grenzen. Vortragstagung Pflanzenbau aktuell. Bernburg-Strenzfeld.

Reinsdorf, E. (21.01.2016) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen – Möglichkeiten und Grenzen. Precision Farming für Fortgeschrittene. Braunschweig.

Reinsdorf, E. (19.11.2015) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen. 24. Thüringer Düngungs- und Pflanzenschutztagung. Erfurt.

Reinsdorf, E. (04.11.2015) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen – Möglichkeiten und Grenzen. Pflanzenschutz- und Pflanzenbautagung des Dienstleistungszentrum ländl. Raum R-N-H. Bad Kreuznach.

Reinsdorf, E. (27.10.2015) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen – Möglichkeiten und Grenzen. Tagung des Landesarbeitskreis Düngung NRW. Castrop-Rauxel.

Reinsdorf, E. (18.06.2015) Modellgestützte N-Düngung im Winterweizen – ISIP Düngeempfehlungsmodell. Großer LWK Feldtag 2015. Borwede/Twistringen.

Reinsdorf, E. (04.03.2015) Aktuelle Hinweise zum N-Bedarfsmodell Winterweizen. Team Pflanze Sitzung der LWK NI. Kreenen.

Reinsdorf, E. (12.01.2015) Mathematik und Praxis - Ansätze und Erfahrungen mit der modellgestützten Stickstoffdüngempfehlung zu Winterweizen. DLG Ausschusssitzung Pflanzenernährung. Berlin.

Reinsdorf, E. (17.11.2014) Modellgestützte Stickstoffdüngempfehlung zu Winterweizen – Ergebnisse aus Niedersachsen. Tagung des Landesarbeitskreis Düngung

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngungsberatungssystems für Weizen“

Niedersachsen / Sachsen-Anhalt. Verden.

Reinsdorf, E. (05.11.2014) Modellgestützte N-Düngung in Winterweizen – Ergebnisse 2014. Verband der Landwirtschaftskammern Arbeitskreis Düngung. Hannover.

Reinsdorf, E. (29.04.2014) Mit Prognosemodell N-Düngung in Winterweizen steuern – Nutzungsmöglichkeiten für die Beratung 2014 – Aktuelle Modellempfehlung zur Spätgabe. Team Pflanze Sitzung der LWK NI. Hannover.

Reinsdorf, E. (01.04.2014) Mit Prognosemodell N-Düngung in Winterweizen steuern – Nutzungsmöglichkeiten für die Beratung 2014. Team Pflanze Sitzung der LWK NI. Hannover.

Reinsdorf, E. (19.02.2014) Mit Prognosemodell Effizienz der N-Düngung zu Winterweizen steigern. Fachbeiratssitzung ISIP. Kassel.

Reinsdorf, E. (14.02.2014) Mit Prognosemodell Effizienz der N-Düngung zu Winterweizen steigern. 11. Pflanzenbau-Fachtagung. Sehnde-Rethmar.

Reinsdorf, E. (20.12.2013) Mit Prognosemodell Effizienz der N-Düngung zu Winterweizen steigern. Jahrestagung 2013 der LWK NI. Goslar.

Reinsdorf, E. (04.11.2013) Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngungsberatungssystems für Winterweizen. Sitzung des Arbeitskreises Düngung und Nährstoffhaushalt. Hannover.

Kage, H. (14.02.2013) Stickstoffbilanzen im Ackerbau, Vortrag auf dem Ackerbautag der LWK-Schleswig-Holstein

Kage, H. (24.5.2015): Novellierung DüVO Auswirkungen auf Ackerbaubetriebe, Vortrag vor dem Beratungsring landwirtschaftlicher Betriebe e. V.

Kage, H. (11.1.2016): Auswirkungen der neuen Düngeverordnung auf Raps- und Weizenanbau. Vortrag vor dem Ausschuss für Pflanzenernährung der DLG. DLG-Wintertagung München

Fazit

Evaluierung /Validation

In Niedersachsen ist das Modell bereits das sechste Jahr im Test. Die Erfahrungen sind positiv, da der Einfluss der Witterung für die meisten Standorte richtig eingeschätzt wurde. Bereits im Mai 2011 wurde ein durch die Frühjahrestrockenheit induzierter niedriger N-Bedarf detektiert. Entgegen der Meinung vieler Berater wurde vom Modell erkannt, dass die Auswirkungen der Frühjahrestrockenheit 2015, wegen der niedrigen Temperaturen, an vielen Standorten Norddeutschlands weniger ertragslimitierend wirkte. Auch das

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Hohertragsjahr 2014 und das überdurchschnittliche Erntejahr 2012 wurden auf den meisten Standorten bereits Ende Mai richtig eingeschätzt. Aber auch die eher durchschnittlichen Jahre 2010 und 2013 wurden vom Modell bereits zum typischen Zeitpunkt der letzten Düngung als solche erkannt.

Durch die Weiterentwicklung von *HumeWheat*, sowie durch die verbesserte standortspezifische Schätzung der effektiven N-Nachlieferung aus der organischen Bodensubstanz wurde die Güte der Düngempfehlungen weiter verbessert. Es konnte gezeigt werden, dass die überregionale Planungshilfe eine Verbesserung gegenüber den regionalisierten Düngplanungssystemen der Officialberatung darstellen kann. Die LWK Niedersachsen konnte anhand der Feldversuchsergebnisse bestätigen, dass im Mittel über die 7 Bundesländer eine **Einsparung von etwa 8 kg N/ha** gegenüber der Officialberatung erreicht werden kann, **ohne** dass für den Landwirt **monetäre Einbußen** entstehen.

Die Düngempfehlungen der Officialberatung sind im Vergleich zur derzeitigen Düngpraxis jedoch als vergleichsweise moderat einzustufen (Avenhaus and Blumöhr, 2011, vgl. auch Abbildung 1). Sollte sich die Entscheidungshilfe unter ISIP als Beratungs- und Planungshilfe weiter etablieren, ist **in der Praxis mit weitaus größeren Einsparungen** zu rechnen.

Probleme / Ausblick

Der Mehrwert von modell-gestützten Entscheidungshilfen wird durch die Bewertung der Jahreswitterung erreicht. Dieser Nutzen wird derzeit vor allem durch die Qualität der Witterungsdaten begrenzt. Um den Nutzen zu erhöhen, sollten weitere Einflussfaktoren berücksichtigt und Konzepte für teilflächenspezifische Anwendbarkeit entwickelt werden.

1. Zielsetzung des Vorhabens

Eine Maßzahl für die potenziellen Stickstoffeinträge in Grundwasser, Oberflächengewässer und die Luft ist der aus einer Stickstoffgesamtbilanz ermittelte Stickstoffüberschuss (Abbildung 1). Der stark gestiegene Weizenpreis bei gleichzeitig moderatem N-Preis hat den ökonomischen Druck hin zu höheren N-Gaben erhöht. Diesem Trend kann nur durch eine genauere, bedarfsgerechte N-Düngeplanung begegnet werden. Eine bedarfsgerechte N-Düngung ist jedoch nur möglich, wenn sowohl der N-Entzug des Bestandes als auch die effektive N-Nachlieferung aus dem Boden zum Zeitpunkt der Düngung hinreichend genau eingeschätzt werden können.

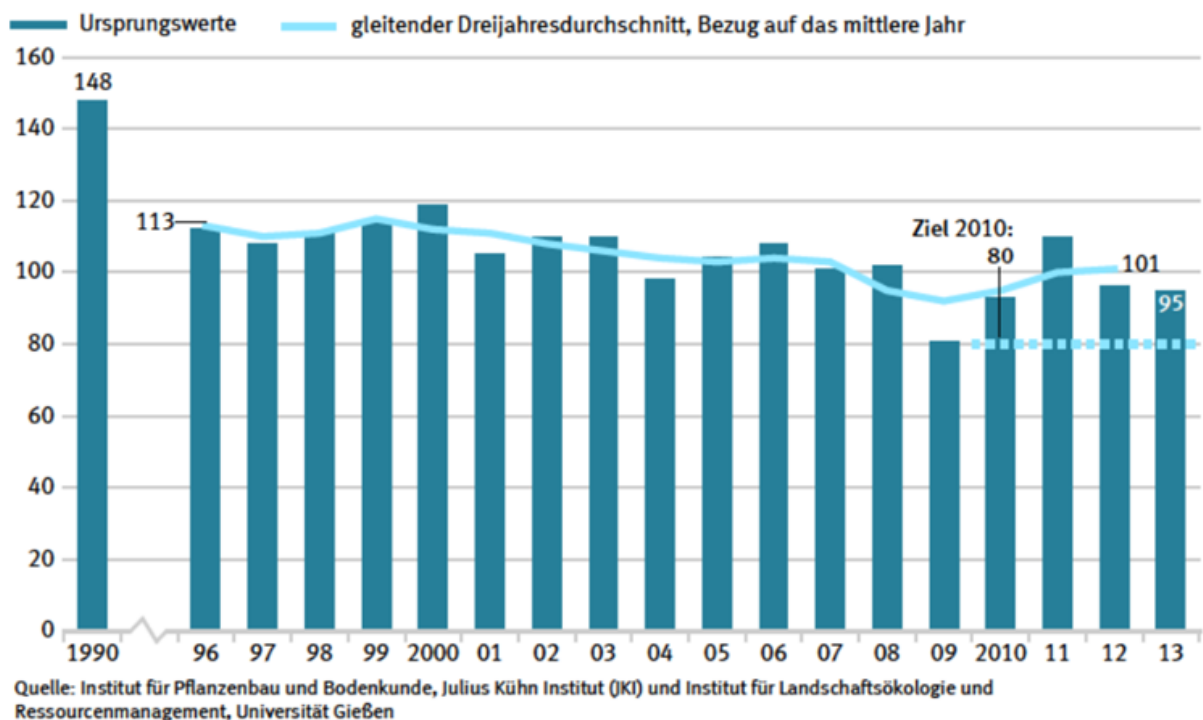


Abbildung 1: Stickstoffüberschüsse [kg/ha] der Gesamtbilanz landwirtschaftlich genutzter Fläche in Deutschland

Eine exakte Bemessung dieser Größen ist indes nicht möglich, da die Witterung zum Zeitpunkt der letzten N-Gabe noch nicht vollständig bekannt ist. Allerdings erfolgt die Abschlussdüngung von Backweizen üblicherweise erst zum Ährenschieben. Obwohl die Witterungsinformation noch unvollständig ist, ist zu diesem Zeitpunkt schon ein großer Teil der Vegetationsperiode bekannt. Wenn es gelingt diese Information

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngesystem für Weizen“

richtig zu deuten, würde dies eine an den jahresspezifischen Bedarf angepasste N-Düngung ermöglichen. Auf der Grundlage historischer N-Steigerungsversuche der LWK Niedersachsen und einem dynamischen Simulationsmodell für die Prozesse Phänologie, Ertragsbildung, Wasserhaushalt, N-Mineralisation wurde ein Ansatz für eine orts- und jahresspezifische Düngeempfehlung am Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung entwickelt (Ratjen 2012). Hierbei wird bewusst auf regional verfügbares empirisches Wissen aus überregionalen Feldversuchen zurückgegriffen. Die Ableitung des Düngebedarfs erfolgt durch einen speziellen Bilanzansatz, in dem die Teilgrößen N-Entzug des Bestandes und effektive N-Nachlieferung des Bodens (Differenz zw. N-Entzug des Pflanzenbestandes und dem N-Angebot), sowie Preis-Kosten-Relation eingehen. Das Simulationsmodell (*HumeWheat*) dient zur jahresspezifischen Anpassung des erwarteten N-Entzugs und der mittleren effektiven N-Nachlieferung aus dem Boden. Hierbei wird der Einfluss der Jahreswitterung mit Hilfe verfügbarer Wetterdaten berücksichtigt und mittels Szenarienrechnungen bewertet. Das Konzept ist auf der Beratungsplattform ISIP (www.ISIP.de) implementiert und soll deutschlandweite Anwendung finden. Hierzu erfolgte eine rationalisierte Parametrisierung. Außerdem wurde geeignetes, lokales Referenzwetter bereitgestellt. Einzelne Teilkomponenten des Modells wurden verbessert.

Das Projekt sollte die oben formulierten Ziele durch folgende Arbeitsschritte erreichen:

- a. Die Weiterentwicklung von Modellmodulen zur Ertragsbildung von Winterweizen hin zu einer validen Prognose von Ertragspotentialen unter besonderer Berücksichtigung von Trockenstress und Stickstoff limitiertem Wachstum,
- b. Verbesserte Abschätzung der mittleren effektiven N-Nachlieferung in Abhängigkeit von Vorfrucht, Bodenparametern und Ertragsniveau und Klima,
- c. Verbesserte dynamische Simulation von N-Freisetzungprozessen,
- d. Verbesserte Benutzerschnittstelle auf der ISIP Internet-Plattform.

2. Weiterentwicklung von Modellmodulen

Eine ausreichend präzise relative Ertragsprognose und damit der Abweichung des N-Bedarfs des Pflanzenbestandes vom Mittelwert stellt neben der Abschätzung der N-Nachlieferung eine zentrale Komponente des Stickstoffdüngungsberatungssystems dar. Während der Projektlaufzeit wurden daher weitere Verbesserungen an einzelnen Modulen des Simulationsmodells *HumeWheat* erarbeitet.

2.1 Simulation der spezifischen Blattfläche unter Einfluss von Trockenstress und N-Mangel

Die spezifische Blattfläche (SLA) ist das Verhältnis von Blattfläche und Blattmasse. In vielen Pflanzensimulatoren (so auch *HumeWheat*), spielt sie eine Schlüsselrolle bei der Berechnung des Blattzuwachses aus dem Zuwachs an Blattmasse. Diese Größe wird in Pflanzensimulatoren häufig als Funktion der Phänologie aufgefasst, obwohl bekannt ist, dass die SLA durch Trockenstress und N-Mangel stark erniedrigt ist. Es konnte gezeigt werden, dass der Lichtgradient innerhalb des Bestandes einen entscheidenden Einfluss auf die SLA ausübt. Hieraus ergibt sich eine Interaktion zwischen Blattflächen-Index (LAI) und SLA. Wenn dieser Zusammenhang berücksichtigt wird, lassen sich auch erniedrigte SLA-Werte unter Stress erklären. Die Ergebnisse wurden im Journal *Field Crops Research* veröffentlicht (**Ratjen and Kage, 2013**) und im Weizenmodell implementiert.

2.2 Einfluss von Trockenstress auf die Stoffverteilung

Die im folgenden dargestellten Ergebnisse wurden in 2015 beim *Journal of Agronomy and Crop Science* eingereicht und zur Publikation akzeptiert. Mit einer Veröffentlichung ist im Februar 2016 zu rechnen.

Die Blattfläche bestimmt den Anteil der Strahlung, welcher vom Bestand aufgenommen wird. Für Pflanzensimulatoren ist der Blattflächenindex (Blattfläche pro Bodenfläche) eine entscheidende Größe für die Berechnung von Biomasse- und Ertragsbildung, sowie Evapotranspiration und Wasserhaushalt (Campbell and

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Norman, 1998). Um Trockenstress und Wasserhaushalt besser abbilden zu können, muss jedoch berücksichtigt werden, dass Weizen die Blattflächenentwicklung an die Umweltbedingungen anpasst (Brouwer, 1983; Poorter et al., 2012). Diese Anpassung an Trockenstress erfolgt im Wesentlichen über drei Wirkungspfade: (1) Eine Reduktion der Licht-Nutzungs-Effizienz und Trockenmasseproduktion durch einen erhöhten stomatären Widerstand (Jackson et al., 1981), (2) ein verändertes Sproß:Wurzel Verhältnis (Asseng et al. 1998) und (3) ein verändertes Blatt:Stängel Verhältnis (Kumakov et al., 2001). Der letztere Wirkungspfad wird in den gängigen Simulatoren bisher jedoch nur unzureichend berücksichtigt. Dabei wird der Blattflächenindex maßgeblich durch die Assimilatverteilung zwischen den Pflanzenorganen bestimmt (Ratjen and Kage, 2013).

Um diese Wissenslücke zu schließen und um das Weizenmodell *HUMEWheat* zu verbessern, wurde der Einfluss von Trockenstress auf die Blatt:Stängel Verteilung von Weichweizen (Sorten 'Dekan' and 'Batis') untersucht. Die Versuchsdaten beinhalteten Zeitreihenernten von Pflanzenorganen (Blatt, Stängel), sowie Wassergehaltsmessungen. Die Versuche wurden auf dem Versuchsgut Hochschulen in der Rollhausanlage in den Jahren 2009/10 und 2013/14 durchgeführt. Ziel war es, eine einfache, trockenstresssensitive Beschreibung der Stoffverteilung zu finden, welche leicht empirisch parametrisiert werden kann.

Zunächst soll die Datengrundlage illustriert werden. In Abbildung 2 ist der Verlauf des Bodenwasserpotentials dargestellt.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

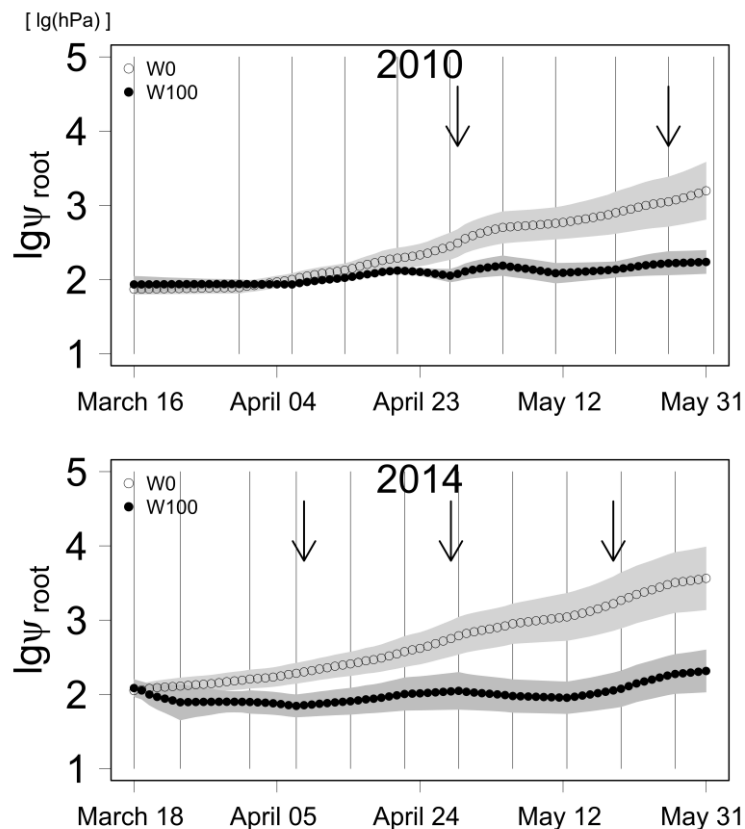


Abbildung 2: Berechnetes Bodenwasserpotential (ψ_{root}) in 2010 (oben) und 2014 (unten). „W0“ kennzeichnet die unbewässerte Variante, „W100“ kennzeichnet die voll-bewässerte Variante. Der graue Bereich zeigt die Standardabweichung der Wiederholungen. Die Probenametermine sind durch die senkrechten Pfeile gekennzeichnet.

Die Berechnung erfolgte auf der Grundlage der gemessenen Bodenwassergehalte und der errechneten Wurzelverteilung im Zeitverlauf, sowie der texturbezogenen Retentionskurven. In Abbildung 3 ist die allometrische Stoffverteilung zwischen Blatt und Stängel für beide Varianten (über beide Jahre und Sorten) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen klar, dass die Verteilung durch Trockenstress beeinflusst wird. Falls Simulatoren diesen Einfluss nicht berücksichtigen, führt dies zwangsläufig zu einer Überschätzung der Blattmasse und ggf. zu einer überhöhten Ertragschätzung. Dieser Befund passt auch zu früheren Ergebnissen von Jamieson et al. (1998), welche feststellten, dass die gängigen Weizensimulatoren den Einfluss von Trockenstress auf die Blattflächenentwicklung unterschätzen, während der Einfluss von Trockenstress auf die Stoffproduktion überschätzt wird.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngesystems für Weizen“

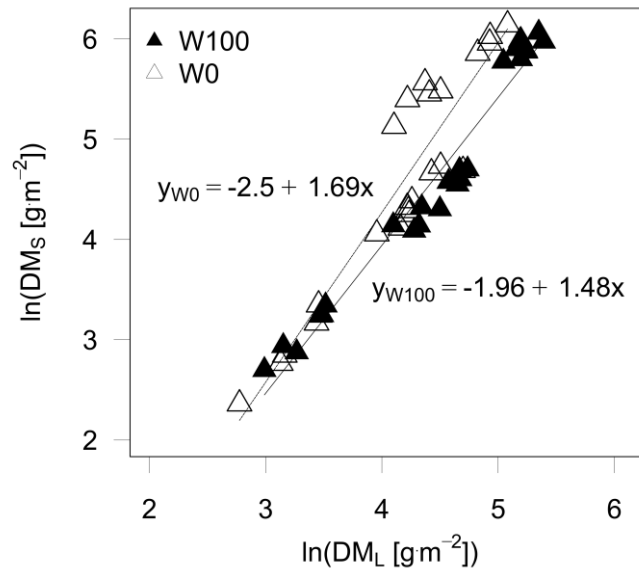


Abbildung 3: Allometrische Stoffverteilung zwischen Blatt und Stängel für die Beiden Varianten (W0=unbewässert, W100=vollbewässert). Statistische Maßzahlen: W100 (schwarz): $r^2 = 0.96$, $n = 26$; W0 (weiß): $r^2 = 0.87$, $n = 23$.

Modellansatz

In Eq. 1 ist die Funktion zur Berechnung des täglichen Stängelzuwachses ($\frac{dDM_S}{dt}$)

als Funktion des täglichen Sprosswachstums ($\frac{dDM}{dt}$) dargestellt:

$$\frac{dDM_S}{dt}(t) = \frac{dDM}{dt}(t) \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + e^h \cdot g \cdot DM_L(t)^{g-1}} \right] \cdot cf(t), \quad \text{Eq. 1}$$

wobei

$$cf(t) = \max(1, 1 + [\lg \psi_{\text{root}}(t) - pF_{\text{crit}}] \cdot pF_{\text{inc}}). \quad \text{Eq. 2}$$

Die Parameter „g“ und „h“ sind aus der allometrischen Verteilung (y_{W100} , Abbildung 5) der bewässerten Varianten abgeleitet: Der Verteilungsparameter „g“ ist identisch

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

mit dem Steigungsparameter der allometrischen Verteilung (vgl. Abbildung 5),
wohingegen „h“ identisch mit dem Achsenschnittpunkt der Regression ist.

Der Korrekturfaktor (c_f) sorgt für eine Verschiebung der Stoffverteilung in Richtung Stängelwachstum, sobald das (wurzelgewichtete, absolute) Bodenwasserpotential im Wurzelraum den Schwellenwert (pF_{crit}) übersteigt. Die Erhöhung des Stängelanteils ist proportional zur Differenz aus Bodenwasserpotential und Schwellenwert ($pF_{crit} - \lg\psi_{root}$). Diese Beziehung wird durch den Steigungsparameter pF_{inc} skaliert. Wenn das absolute Bodenwasserpotential im Wurzelraum den Grenzwert (pF_{crit}) überschreitet, führt dies in der Folge zu einer reduzierten Blattflächenentwicklung (Eq. 1, Eq. 2). Dies führt wiederum zu einer reduzierten Strahlungsaufnahme am Folgetag. Durch die Rückkopplung zwischen Strahlungsaufnahme und Blattflächenentwicklung ist die Auswirkung der trockenstress-sensitiven Blatt:Stängel Partitionierung auf die Blattflächenentwicklung bei früh einsetzendem Trockenstress besonders groß. Um die Bedeutung der Korrekturparameter (pF_{inc} , pF_{crit}) auf die Blattflächenentwicklung zu verdeutlichen, ist in Abbildung 4 eine Beispielrechnung dargestellt.

Table 1: Schätzwerte für die Korrekturparameter der allometrischen Stoffverteilung (pF_{crit} und pF_{inc}). Die Regression wurde an der unbewässerten Varianten durchgeführt (n=46). Die Signifikanz der Parameterschätzung (Wahrscheinlichkeit dass der wahre Schätzwert Null ist) ist in der Spalte Pr(> |t|) dargestellt.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
	$\lg(hPa); \lg(hPa)^{-1}$	$\lg(hPa); \lg(hPa)^{-1}$		
pF_{crit}	1.92	0.051	37.32	$< 2e-16^{(***)}$
pF_{inc}	0.26	0.024	10.77	$< 2e-16^{(***)}$

Residual standard error: 11.93 on 96 degrees of freedom

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Das Beispiel geht davon aus, dass im Wurzelraum ein konstantes Bodenwasserpotential herrscht, welche den Anteil der Assimilate, die in den Stängel verlagert werden um 30% erhöht. Durch Rückkopplungsprozesse zwischen Strahlungsaufnahme und Trockenmasseproduktion führt dies zum Ende des Blattwachstums zu einer Halbierung der Blattflächenentwicklung gegenüber einem Bestand ohne Trockenstress.

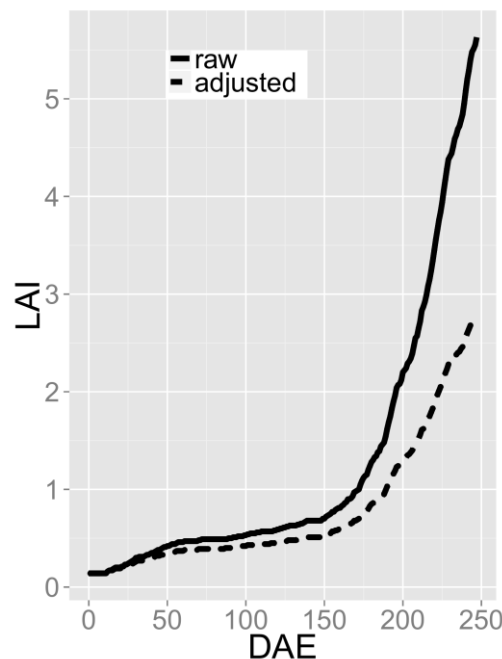


Abbildung 4: Simulierte Blattflächenentwicklung eines Weizenbestandes unter Trockenstress (siehe Text) mit (adjusted) und ohne (raw) Berücksichtigung des Einflusses von Trockenstresseinflusses auf die Blatt:Stängel Partitionierung.

2.3 Einfluss von N-Mangel auf die Lichtnutzungseffizienz (LUE)

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden im **Cambridge Journal of Agricultural Science** veröffentlicht (RATJEN and KAGE, 2015).

Die Lichtnutzungseffizienz (LUE) ist als produzierte Trockenmasse je aufgenommener Lichteinheit definiert. N-Mangel kann die effektive LUE stark reduzieren. Wenn das Wachstum unter N-Mangel simuliert werden soll sind drei Fragen von entscheidender

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Bedeutung: 1. Wie verteilt sich der Stickstoff zwischen den Pflanzenorganen im Bestand? 2. Wie wird diese Verteilung von N-Mangel beeinflusst? 3. Wie wird die Stoffproduktion durch N-Mangel beeinflusst?

Aus der Verteilung von Biomasse und Stickstoff ergibt sich die N-Konzentration der Organe. Um den Einfluss von N-Mangel auf die LUE zu quantifizieren, müssen jedoch geeignete Indikatoren für den N-Versorgungszustand der Pflanze gefunden werden. Ein möglicher Indikator ist der N Nutrition Index (NNI, nach Justes et al., 1994). Dieser Indikator wurde für die vegetative Entwicklungsphase entwickelt und basiert auf der Sprosstrockenmasse und der N-Konzentration im Spross. Es wird jedoch nicht zwischen einzelnen Pflanzenorganen unterschieden. Dies ist besonders während der Kornfüllungsphase problematisch, da Translokationsprozesse für eine Verlagerung von Blattstickstoff in die reproduktiven Pflanzenorgane sorgen. Die N-Konzentration des Sprosses gibt zu diesem Zeitpunkt also keinen Hinweis auf den N-Versorgungszustand des Blattapparates. Aus diesem Grund wurde für das Weizenmodell *HumeWheat* ein Indikator entwickelt, welcher auf dem spezifischen Blattstickstoff (SLN, g/m^2) basiert und somit eine Gültigkeit über die gesamten Entwicklungsphasen des Weizens hat. Der optimale SLN hängt jedoch von Bestandesarchitektur ab und ändert sich daher im Zeitverlauf (Rawson et al., 1987). Deshalb wurde der optimale SLN als Funktion des green area index (GAI = Verhältnis von grüner Pflanzenoberfläche und Bodenfläche) abgeleitet. Das Verhältnis aus aktueller SLN und optimaler SLN kann als Indikator für den N-Versorgungszustand des Blattapparates dienen.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

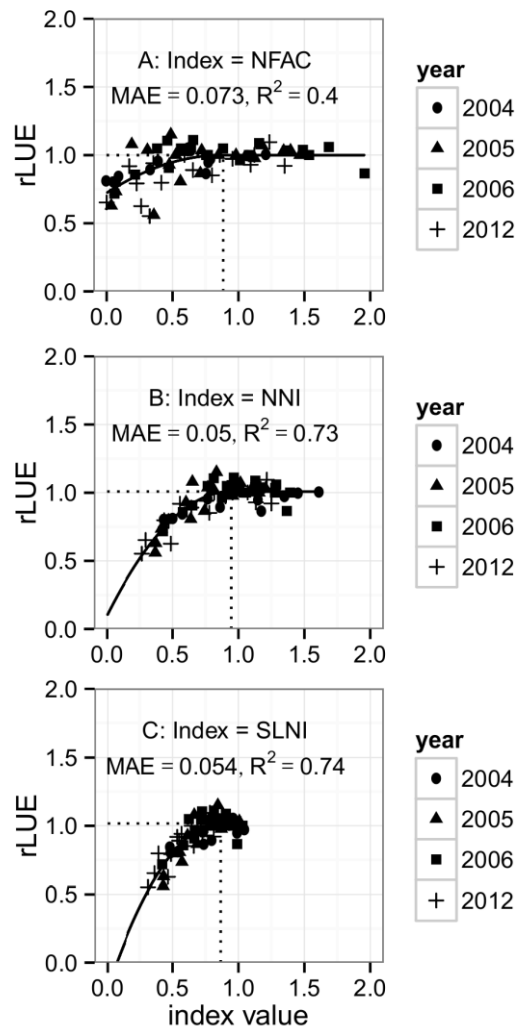


Abbildung 5: Relative Licht-Nutzungseffizienz (rLUE) in Abhängigkeit von verschiedenen Pflanzenindikatoren für den N-Versorgungszustand.

Die Abbildungsgüte dieses neuen Indikators (SLNI) wurde mit zwei etablierten Indikatoren auf der Basis experimenteller Daten verglichen (Abbildung 5). Häufig erfolgt die Parametrisierung von funktionalen Zusammenhängen innerhalb der Simulatoren, wobei nur die Zielgrößen gemessen und die erklärenden (unabhängigen) Größen simuliert werden. Durch Unsicherheiten des Modells kann die Parametrisierung verzerrt werden. Um dies zu vermeiden, wurde eine innovative Methode entwickelt, welche es erlaubt die relevanten Pflanzenparameter (N-Konzentration, SLN, GAI, LUE) direkt aus den Versuchsdaten abzuleiten. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass die gefundenen Zusammenhänge für andere Simulatoren nutzbar sind.

2.4 Einfluss von N-Mangel auf die Stoffverteilung

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden im Herbst 2015 beim *Journal of Agronomy and Crop Science* eingereicht und zur Publikation akzeptiert. Mit einer Veröffentlichung ist im Frühjahr 2016 zu rechnen.

Die Biomasse- und Stickstoffverteilung zwischen Stängel und Blatt wird nicht nur durch Trockenstress (siehe 2.2) beeinflusst, sondern ebenso von Stickstoffmangel. Der N-Versorgungszustand kann durch den *N Nutrition Index* (NNI; Justes et al., 1994) beschrieben werden. Bisher wurde der Einfluss des NNI auf die Stoffverteilung jedoch nur unzureichend untersucht, bzw. es fehlten empirische fundierte Modellansätze, welche diesen Einfluss dynamisch beschreiben können.

Um eine robuste empirische Beschreibung der Stoffverteilung bis zur Blüte zu entwickeln, wurden Versuchsdaten aus N-Steigerungsversuchen (0-320 kg N ha⁻¹) aus drei aufeinander folgenden Jahren (2003/4 bis 2005/6) analysiert. Bei den Versuchen handelte es sich um Zeitreihenernten mit 5 modernen Brotweizensorten, welche auf dem Versuchsgut Hohenschulen durchgeführt wurden. Zunächst wurde das Modell zur Berechnung der allometrischen Stoffverteilung (siehe 2.2) angepasst, um den Einfluss des NNI berücksichtigen zu können. Zunächst wurden die Verteilungskoeffizienten an den gut mit Stickstoff versorgten Varianten (NNI \geq 1) untersucht. Eine Korrekturfunktion wurde eingeführt, um die Verteilung unter variierendem NNI beschreiben zu können. Es zeigte sich, dass sich das relative Stängelwachstum linear erhöht, wenn der NNI unter einen Grenzwert von 1.37 (dimensionslos) fällt. Die Steigung dieses relativen Anstiegs war 0.6 (pro NNI-Einheit). Grenzwert und Steigung waren hoch signifikant.

Außerdem wurde der Einfluss von N-Mangel auf die N-Verteilung zwischen den Pflanzenorganen untersucht. Hierzu wurden die N-Konzentrationen der Organe gegen deren Trockenmasse aufgetragen und sogenannte "N-Verdünnungsfunktionen" geschätzt. Für die Parametrisierung dieser Funktionen wurden nur gut versorgte Bestände (NNI \geq 1) analysiert. Anhand der Verdünnungsfunktionen wurde die theoretische N-Menge des Sprosses, welche bei

guter N-Versorgung zu erwarten wäre, als Funktion der Trockenmasse errechnet. Das N-Defizit wurde anschließend als Differenz zwischen gemessener und erwarteter N-Menge definiert. Es zeigte sich, dass 63% des N-Defizits auf den Stängel (inkl. Ährenanlage) verteilt wird und entsprechend nur 37% auf die Blattfraktion. Durch Unsicherheiten des Modells kann die Parametrisierung verzerrt werden. Um dies zu vermeiden, wurde eine innovative Methode entwickelt, welche es erlaubt, die relevanten erklärenden Parameter (analog zu 2.2) direkt aus den Versuchsdaten abzuleiten. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass die gefundenen Zusammenhänge für andere Simulatoren nutzbar sind.

2.5 Simulation von N-Freisetzung aus der organischen Bodensubstanz

Basierend auf einem Datensatz, welcher in dem DBU-Projekt „Neue internetgestützte Wege zur Optimierung der Stickstoffdüngung“ erhoben wurde, ist ein verbessertes Modell zur Simulation der N-Freisetzung aus der organischen Bodensubstanz entwickelt worden. Der Datensatz umfasst acht norddeutsche Standorte und wurde in den Jahren 2006-2009 erhoben. Die N-Aufnahme des Sprosses wurde aus Strahlungstransmissionsmessungen (LAI 2000, LiCor), sowie aus Erntedaten geschätzt. Die mineralischen N-Gehalte des Bodens wurden nach N_{\min} -Methode (Schrage and Scharpf, 1988) ermittelt. Die Bodenwassergehalte wurden mit *HUMEWheat* (Ratjen and Kage, 2015) simuliert, wobei die gemessenen Wassergehalte aus den N_{\min} -Probenahmen zur Überprüfung der Simulationswerte dienten. Die Datengrundlage diente zunächst zur Evaluierung des Mineralisations-Modells „NetMin“, welches im Institut für Bodenkunde Hannover im Rahmen eines DBU geförderten Projekts entwickelt wurde und in ähnlicher Form bis 2014 im dynamischen Modell unter ISIP implementiert war. Die Ergebnisse wurden in der Zeitschrift *Nutrient Cycling in Agroecosystems* veröffentlicht (Heumann et al., 2014).

Im zweiten Projektjahr wurde das Modell durch den Projektbearbeiter weiter verbessert. Bei dem neuen Ansatz wird die tägliche, relative N-Freisetzung aus der

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

organischen Bodensubstanz als Funktion der Temperatur und der simulierten Bodenfeuchte errechnet.

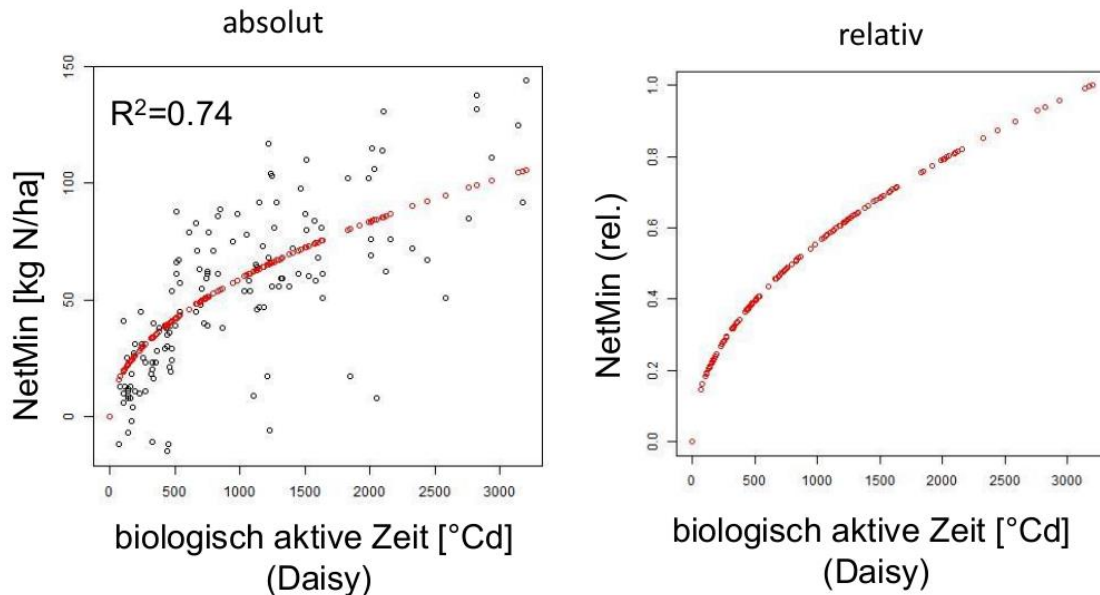


Abbildung 6: Links: Beobachtete absolute Netto-Mineralisation gegen die biologisch aktive Zeit errechnet nach Hansen et al. (1990). Rechts: Die hieraus abgeleitete relative N-Freisetzung als Arrhenius-Funktion.

Die in Abbildung 6 dargestellte Stickstoff Nettomineralisation (NetMin) ist identisch mit der von Heumann et al. (2014) veröffentlichten N-Freisetzung. Allerdings unterscheidet sich die Berechnung der „biologisch aktiven Zeit“ (Gewichtete Temperatursumme). Nach dem aktuell unter ISIP implementierten Ansatz wird die biologisch aktive Zeit aus der Temperatursumme, gewichtet durch die abiotischen Ratenkoeffizienten aus dem DAISY Modell (Hansen et al., 1990) errechnet. Es werden Ratenkoeffizienten für Temperatur und das Bodenwasserpotential im Oberboden berücksichtigt. Letztere ergeben sich aus den simulierten Wassergehalten und der Bodentextur. Abweichend vom ursprünglichen DAISY-Ansatz geht jedoch der Einfluss des Tongehalts nicht gesondert in die Berechnung der biologisch aktiven Zeit ein. Eine Arrhenius-Funktion wurde an die Daten von Heumann et al. (2014) angepasst, um die Beziehung zwischen Nettomineralisation und biologisch aktiver Zeit zu beschreiben (Abbildung 6 links). Dieser Zusammenhang wurde in eine relative Freisetzungsrates überführt (Abbildung 6 rechts). Im Vergleich zum ursprünglichen

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Modell konnte das Bestimmtheitsmaß deutlich erhöht werden (vgl. Abbildung 6 (links) mit Heumann et al., 2014). Zusätzlich wird die mittlere standort- und vorfruchtspezifische N-Nachlieferung (siehe 2.6) herangezogen um die absolute N-Freisetzungsrate zu berechnen.

Dynamische Simulation der effektiven N-Nachlieferung aus dem Boden

Die effektive N-Mineralisation (Min^{eff}) wurde als Differenz zwischen aufgenommenen Stickstoff zur Ernte (Korn-, Stroh- und Wurzelstickstoff) und N-Angebot (Frühjahres N_{min} plus zugeführten Stickstoff) definiert.

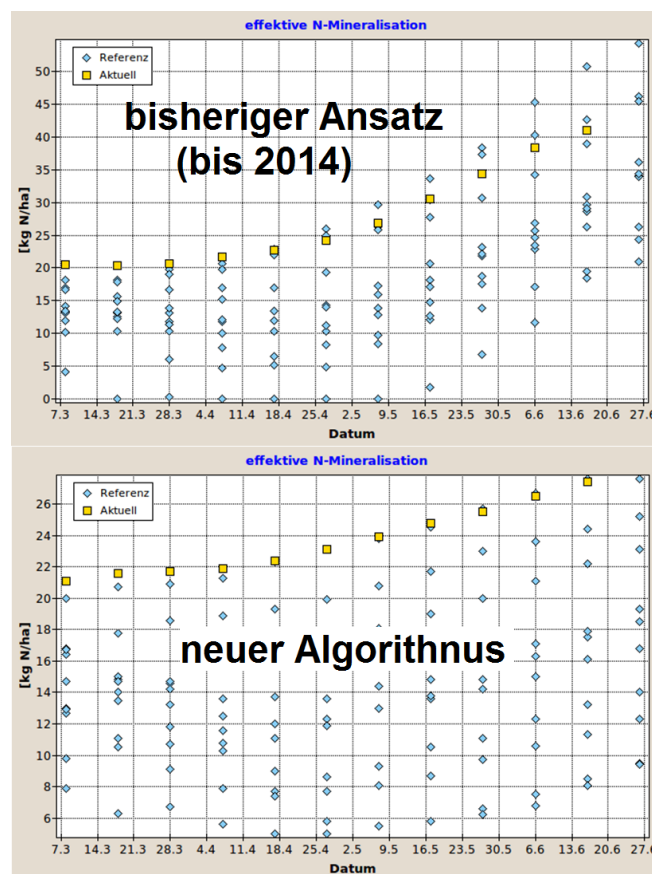


Abbildung 7: Darstellung der effektiven N-Freisetzung auf der Internetplattform ISIP. (Hohenschulen 2015, Vorfrucht: Zuckerrübe). Oben: Bisheriger Ansatz, welcher bis einschließlich 2014 implementiert war. Unten: Neuer Ansatz (siehe Text). Der Verlauf für das Jahr 2015 ist gelb, der Verlauf der Referenzjahre ist blau dargestellt.

In der dynamischen Simulation unter ISIP ergibt sich dieser Wert aus der kumulierten Netto-Mineralisation (Anfang März bis Milchreife) und dem im Herbst

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

aufgenommenen Stickstoff, abzüglich der Auswaschungsverluste seit Vegetationsbeginn sowie dem nicht pflanzenverfügbaren Residualstickstoff. In Abbildung 7 ist der Verlauf der simulierten effektiven N-Mineralisation von 2015 für den Standort Hohenschulen dargestellt (Vorfrucht Zuckerrübe). Durch den Vergleich der Beiden Diagramme wird der Unterschied zwischen dem neuen Ansatz und dem bisherigen Ansatz deutlich: Während sich der bis 2014 in ISIP implementierte Ansatz (oben) an der N-Nachlieferung unter ungedüngten Weizenbeständen orientierte, ist der neue Ansatz im Einklang mit den mittleren Min^{eff} -Werten aus dem statistischen Bilanzansatz (siehe 2.6).

Vergleich von neuem und ursprünglichem Ansatz am Beispiel Hohenschulen (Abbildung 7): Aufgrund der späten Frühjahreserwärmung im östlichen Hügelland ist Hohenschulen ein Standort mit einer eher schwachen N-Nachlieferung. Nach dem bisherigen Ansatz variierte die kumulative effektive N-Nachlieferung (blau) je nach Jahr zwischen 20 und 60 kg N/ha (Mittel \sim 30kg N/ha). Dieser Wertebereich ist jedoch nur unter ungedüngten Beständen realistisch. Nach dem neuen Ansatz liegt die effektive N-Nachlieferung zwischen 10 und 30 kg N/ha. Zum Vergleich: Die aktuelle Düngebedarfsermittlung nach Düngeverordnung geht für Weizen nach Zuckerrübe von einer mittleren effektiven N-Nachlieferung von 20 kg N/ha aus (Anonymus, 2004). Bei beiden Algorithmen wurde erkannt, dass in 2015 auf Grund der guten Herbstentwicklung eine, im Vergleich zum Mittel der Referenzjahre, erhöhte N-Aufnahme im Herbst stattfand. Da sich eine erhöhte N-Menge im Bestand befindet und der Bodenvorrat an mineralischem Stickstoff durch die N_{min} Untersuchung bekannt ist, wird in diesem Beispiel durch die Bilanzgröße Min^{eff} ein entsprechender Abschlag (in diesem Fall 9 kg N) auf das N-Angebot berücksichtigt.

2.6 Schätzung der standortspezifischen mittleren, effektiven N-Freisetzung (Min^{eff})

Die Düngeempfehlung auf der ISIP Internetplattform basiert zunächst auf einem statistischen Bilanzansatz zur Ermittlung des N-Düngebedarfs, wobei auch die effektive N-Freisetzung aus der organischen Bodensubstanz (Min^{eff}) berücksichtigt

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

wird. Die einzelnen Bilanzgrößen werden in einem zweiten Schritt dann vom Weizenmodell jahresspezifisch angepasst. Zur Schätzung der Bilanzgröße Min^{eff} wurden bis einschließlich 2014 die Vorfrucht und das Ertragsniveau berücksichtigt. Außerdem wurde zwischen Lössböden und sandig/ lehmigen Böden unterschieden. Dem alten Schätzalgorithmus lagen nur N-Steigerungsversuche aus Norddeutschland zugrunde (vgl. Abbildung 8, gr. Punkte). Aus dieser Datengrundlage konnte der klimatische Einfluss auf die N-Nachlieferung jedoch nicht charakterisiert werden, da die Variabilität der Klimaparameter hierfür zu gering war.

Die Berücksichtigung weiterer standortbezogener Einflussgrößen wurde auf Grundlage eines größeren Datensatzes untersucht. Die Datensammlung erfolgte durch die LWK-Niedersachsen und wurde im Herbst 2014 abgeschlossen. In Abbildung 8 sind die Versuchsstandorte dargestellt, welche für die Kalibration zur Verfügung standen.

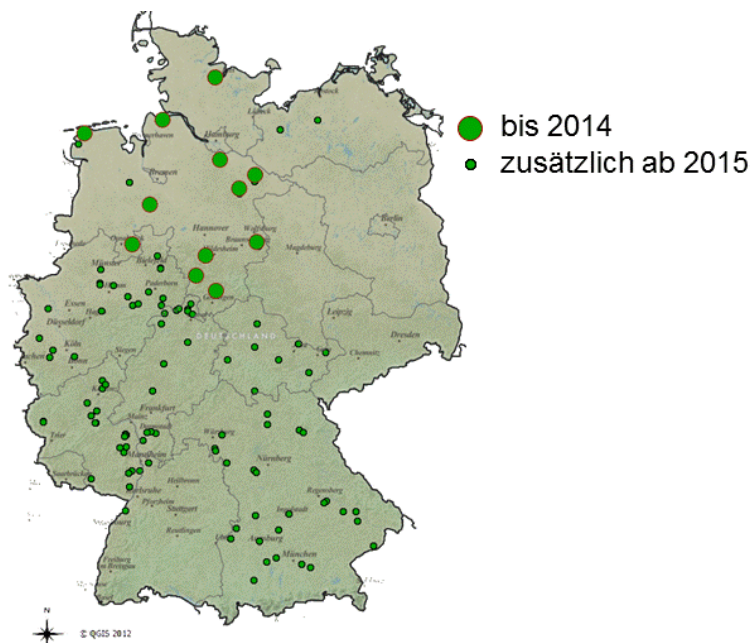


Abbildung 8: Versuchsstandorte die für die Kalibration der N-Nachlieferung genutzt wurden

Im Folgenden wird das Verfahren zur Ermittlung von Min^{eff} kurz skizziert:

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Die Bilanzgröße Min^{eff} ist als Differenz zwischen N-Entzug des Bestandes zur Ernte und N-Angebot (Frühjahrs- N_{min} plus zugeführte N-Menge) definiert. Es handelt sich um eine Residualgröße welche sich aus der Menge an Pflanzenstickstoff (zum Zeitpunkt der Ernte) die nicht aus dem N_{min} und nicht aus der N-Düngung stammt ergibt. Min^{eff} nimmt bei steigender N-Intensität ab, was zum einen in der sinkenden Reaktion des Bestandes (physiologisch begrenzte N-Aufnahme), zum anderen an der Immobilisation von Düngerstickstoff im Oberboden liegt. Wegen der Interaktion mit der Düngeintensität ist Min^{eff} für gedüngte Bedingungen nicht unmittelbar aus dem N-Entzug ungedüngter Weizenbestände ableitbar. Gewisse Anteile der Stickstoffdüngung werden von der Mikroflora des Bodens immobilisiert, so dass die bilanzierte Mineralisation von Bodenstickstoff mit Zunahme der N-Düngung abnimmt.

Daher wurde Min^{eff} anhand von N-Steigerungsversuchen jeweils am Punkt des ökonomisch optimalen N-Angebots abgeleitet. Dieser neue Berechnungsweg ist in Abbildung 9 dargestellt. Aus dem Kornstickstoff kann näherungsweise die Stickstoffaufnahme des gesamten Bestandes abgeschätzt werden, da sich zum Zeitpunkt der Ernte etwa 80% des aufgenommenen Gesamtstickstoffs im Korn befindet (Diekmann and Fischbeck, 2005a, 2005b). Der Anteil des Stickstoffs in der Wurzel kann mit etwa 10% angenommen werden (Andersson and Johansson, 2006).

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngesystems für Weizen“

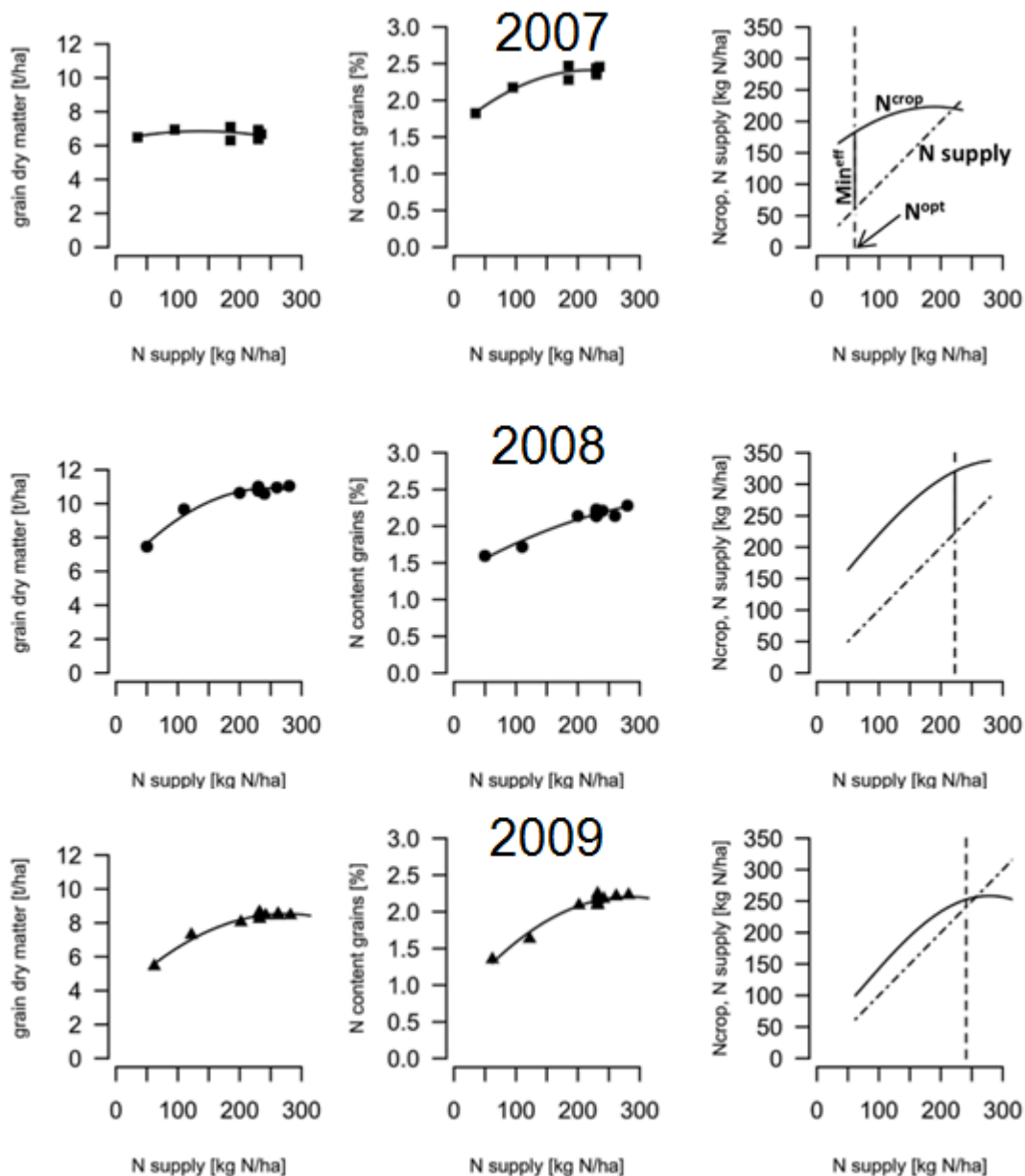


Abbildung 9: Schritte der Min^{eff} Berechnung aus den Versuchsdaten am Beispiel Poppenburg (2007-2009): 1. Kornerträge (links) und N-Konzentrationen (Mitte) werden gegen das N-Angebot aufgetragen. Jeder Datenpunkt repräsentiert den Mittelwert aus vier Wiederholungen. 2. Hieraus ergibt sich der N-Entzug (N^{crop}) des Bestandes (rechts). Die vertikale, gerade Linie zeigt das jahresspezifisch optimale N-Angebot (N^{opt}). Min^{eff} bei optimaler Düngung ergibt sich aus der Differenz zwischen N-Entzug und N-Angebot (durchgezogene vertikale Linie).

Die Innovation bei diesem Ansatz liegt darin, dass die Ziel-Intensität, bei welcher Min^{eff} bilanziert wird nicht statisch vorgegeben wird, sondern über einen definierten

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Ziel-Grenzertrag aus den Ertragsfunktionen abgeleitet wird (in diesem Fall ein Grenzertrag von 5). Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass der Einfluss der Witterung auf Min^{eff} bzw. der Einfluss des Klimas auf das standortspezifische mittlere Min^{eff} quantifiziert werden kann. Aus dem Beispiel in Abbildung 9 ist ersichtlich, warum die Bilanzierung bei einem einheitlichen N-Angebot nicht sinnvoll ist: Das Jahr 2007 war für den Standort Poppenburg ein Jahr mit starker N-Nachlieferung. Dies führte zu einer schwachen Ertragsreaktion auf das N-Angebot (flach verlaufende Ertragsfunktion). Hieraus resultierte ein sehr niedriger N^{opt} Wert (60 kgN/ha), und somit ein absolut niedriger Wert für die N-Immobilisierung. Die Erklärung für den hohen Min^{eff} -Wert lag zum einen in den sehr milden Herbst und Wintertemperaturen, welche eine hohe N-Aufnahme im Aussaatjahr ermöglichten. Zum anderen wurde die N-Freisetzung durch feucht-warme Bedingungen im Frühjahr und Sommer begünstigt.

In den Hohertragsjahren 2008 und 2009 lag das N^{opt} deutlich höher und Min^{eff} niedriger, wobei Min^{eff} in 2009 wegen des trockenen Sommers noch niedriger als in 2008 ausfiel. Hätte man Min^{eff} bei einem N-Angebot nach Vorgaben der Officialberatung (230 kg N/ha) bilanziert, wäre in 2007 eine N-Nachlieferung von ca. 0 kgN/ha bilanziert worden.

Der unter ISIP implementierte Ansatz berücksichtigt neben der Vorfrucht weitere Standortparameter. Für folgende Einflussgrößen konnte ein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden: Mittlere Temperatur im Mai, mittlerer Jahresniederschlag, mittlerer N-Entzug am Standort, Bodenzahl und N_{min} . Eine Veröffentlichung der Ergebnisse ist in Vorbereitung.

Um den Mehrwert des Schätzalgorithmus bewerten zu können, wurden die mittleren standortspezifischen Min^{eff} -Werte mit den entsprechenden Werten aus der aktuellen Düngeverordnung (BGBl. I 2007, 238 Anlage 2) verglichen. In Abbildung 10 ist die aus N-Steigerungsversuchen bilanzierte mittlere N-Nachlieferung unter Weizen dargestellt. Es wird deutlich, dass es keinen Zusammenhang zwischen der tatsächlichen mittleren N-Nachlieferung eines Standorts (observed) und der erwarteten N-Nachlieferung nach Düngeverordnung (DueV) gibt.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystem für Weizen“

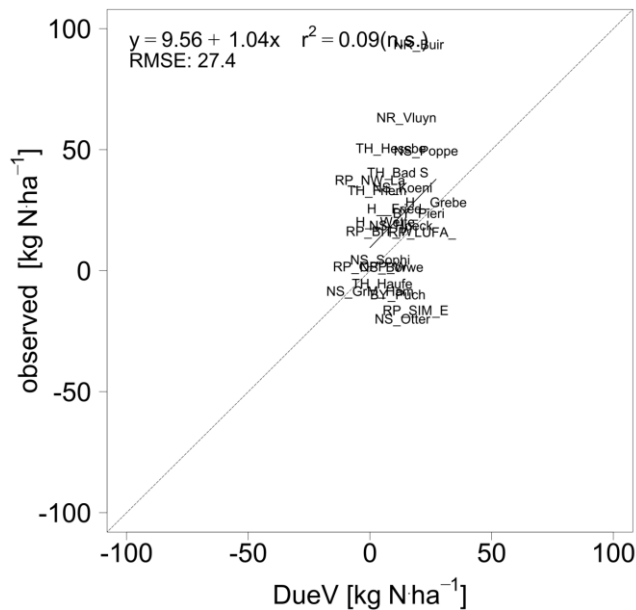


Abbildung 10: Bilanzierte N-Nachlieferung standortspezifisch (observed, Standorte mit mehr als 5 jährigen Versuchsergebnissen) gegen angenommene N-Nachlieferung nach Düngeverordnung (DueV). Nach Düngeverordnung (Tabelle 1; Pflanzennutzbare Stickstoff-Lieferung aus Ernteresten der Vorfrucht; BGBI 2007, 233) wird die N-Nachlieferung als Funktion der Vorfrucht geschätzt.

Basierend auf der vorfruchtspezifischen N-Nachlieferung (siehe DüV Tabelle 1) wurden weitere standortspezifische Einflussfaktoren zur Schätzung der mittleren N-Nachlieferung gesucht. Abbildung 11 zeigt die Abbildungsgüte des verbesserten Schätzalgorithmus.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngungsberatungssystems für Weizen“

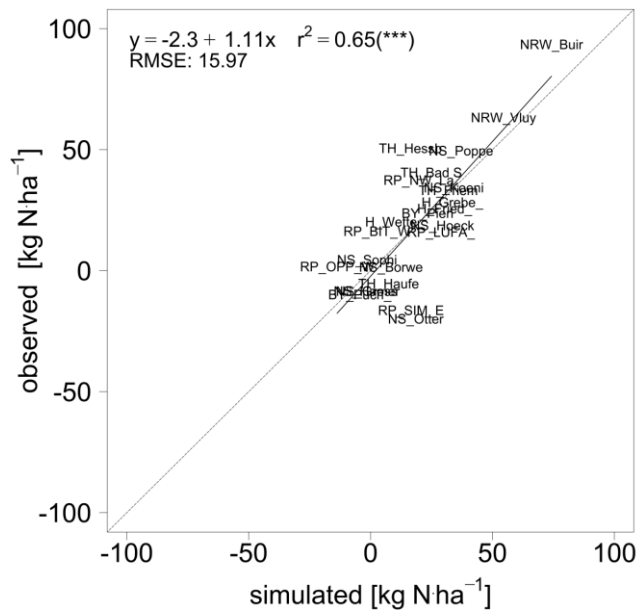


Abbildung 11: Abbildungsgüte des verbesserten Schätzalgorithmus zur Schätzung der standortspezifischen mittleren N-Nachlieferung.

2.7 Benutzerschnittstelle auf der ISIP Internet-Plattform

Im Rahmen des Projektes wurden einige wesentliche Verbesserungen an der Benutzerschnittstelle des Stickstoffdüngungsberatungssystems vorgenommen.

2.7.1 Eingabe der notwendigen Inputgrößen

Die Klimaparameter, welche für die Bilanzierung der N-Nachlieferung notwendig sind, müssen in der aktuellen Implementierung des Stickstoffberatungssystems nicht mehr vom Landwirt eingegeben werden, sondern werden direkt aus dem standorttypischen Referenzwetter abgeleitet. Weitere Eingabegrößen könnten zukünftig direkt aus der Schlagkartei des Landwirts entnommen werden, sodass der Benutzer weniger Daten manuell in das Internetformular eingeben muss.

Referenzwetter

Die Bewertung der Jahreswitterung durch das Weizenmodell erfolgt mittels Vergleichsrechnungen zwischen dem langjährigen Erwartungswert der zu

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngesberatungssystems für Weizen“

betrachteten Größe und dem jahresspezifischen Wert, der sich durch Berücksichtigung der bereits bekannten aktuellen Jahreswitterung ergibt. Sowohl für die Berechnung der Erwartungswerte als auch für die Extrapolation im aktuellen Jahr sind valide langjährige Wetterdatenreihen aus dem Klimaraum des betrachteten Standortes notwendig. Referenz- und Szenarienrechnung. Das sogenannte „Referenzwetter“ des Stickstoffdüngesberatungssystems wurde auf der Grundlage von DWD-Wetterdaten unter Berücksichtigung von Tageswerten und langjährigen Monat-Mittelwerten erstellt, sodass für Deutschland Referenzwetter mit einer Auflösung von 0.5 ° (Dezimalgrad) zur Verfügung steht. Eine Visualisierung des Referenzwetters und einiger Simulationsgrößen ist unter <http://www.pflanzenbau.uni-kiel.de/de/forschung/ertragsbildungssysteme/2013-ratjen-dbu> abrufbar.

Aktivität 2014:

Auf dem bisherigen Referenzwetter aufbauend, wurde ein verfeinertes Grid mit einer Auflösung von 0.05 ° (Dezimalgrad Länge/Breite) erstellt. Dieses wurde in der Saison 2014 erfolgreich implementiert und getestet.

Bodentexturen

Für die Simulationsrechnungen müssen genaue Angaben zu den Bodentexturen (nach KA; Sponagel and Grottenthaler, 2005) vom Benutzer angegeben werden. Für Niedersachsen ist eine Schnittstelle zum NIBIS® Kartenserver des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), wodurch diese Informationen direkt aus einer Bodendatenbank entnommen werden. Um für die anderen Bundesländer eine breite Anwendbarkeit zu ermöglichen wurde ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht aus einer groben Bodenart Unterscheidung (Sand-, Lehm-, Lössboden) und der (dem Nutzer bekannten) Bodenwertzahl plausible Texturen zu ermitteln. Die Zuordnung wird dadurch möglich, dass die Bodenzahl eng mit der nutzbaren Feldkapazität korreliert (Harrach, 2008). Die Neuerungen wurden in die Online-Präsenz eingepflegt und standen in der Düngesaison 2014 bereits zur Verfügung.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngesystems für Weizen“

Eingabemaske

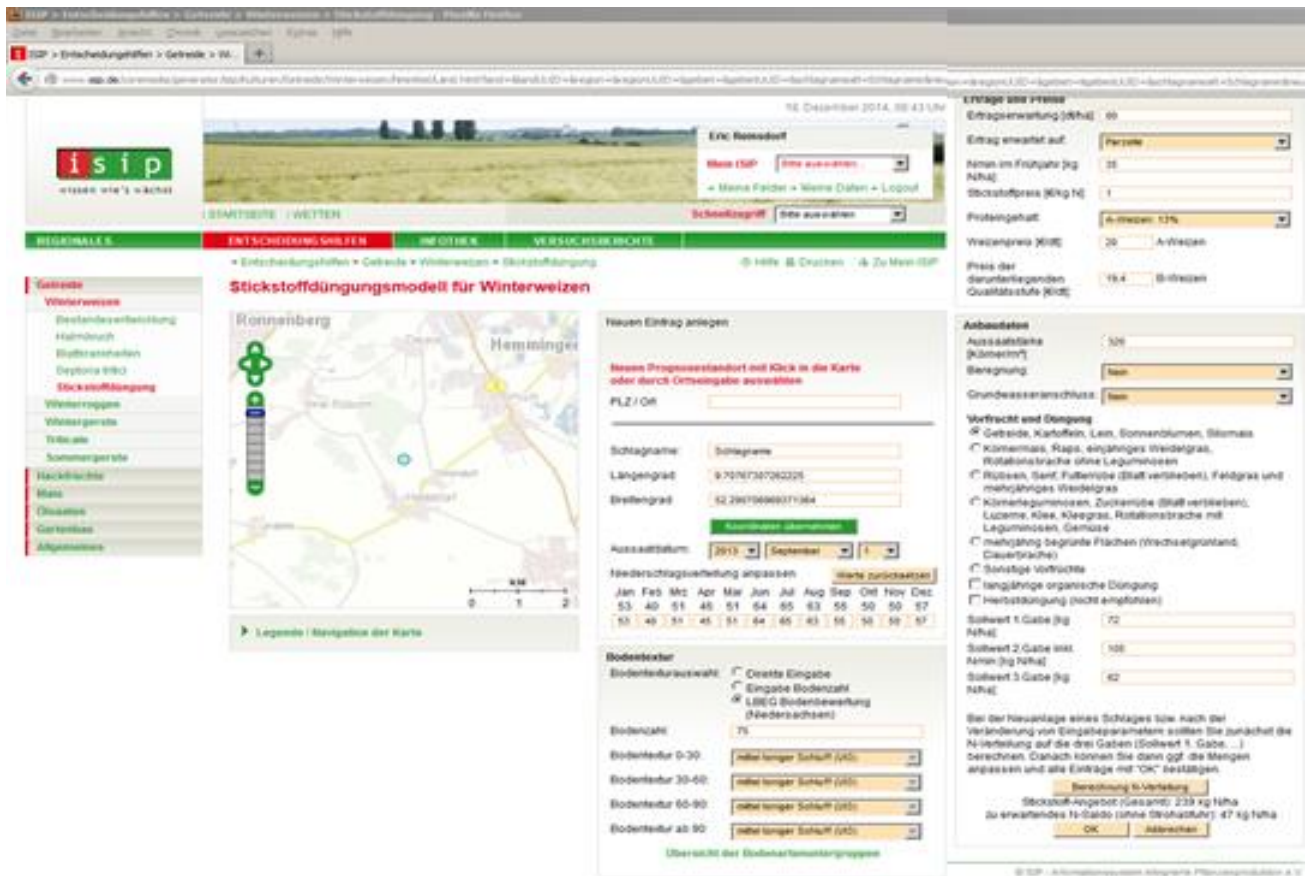


Abbildung 12: Eingabemaske des N-Modells

Abbildung 18 zeigt die Modell-Eingabemaske des Webbrowsers. Hier erfolgen die Benutzereingaben zu Standort und Anbaumanagement. Die Parameterabfrage ist selbsterklärend, wodurch die Anwendung intuitiv erfolgen kann. Verbesserungsmöglichkeiten ergeben sich jedoch insb. für Berater, die eine Vielzahl an Schlägen anzulegen haben. Die Modellanwendung und Schlagverwaltung ließe sich durch die Möglichkeit zum Anlegen einer Ordnerstruktur erheblich anwenderfreundlicher gestalten. Weitere Verbesserungen des Anwendungskomforts ließen sich durch die Möglichkeit zum Vervielfältigen bereits angelegter Schläge (z.B. vereinfachtes Anlegen von Teilschlägen) sowie die Einführung global (für alle Schläge gleichzeitig) änderbarer Eingabeparameter (N-Preis, Weizenpreise) realisieren.

Eine Liste mit möglichen Verbesserungsvorschlägen wurde an ISIP übermittelt.

3. Evaluierung des Düngemodells

3.1 Funktionsweise des N-Modells

Zunächst wird ein Sollwert aufgrund der Benutzereingaben errechnet. Schlüsselgrößen sind analog zur Düngeverordnung (DüV) der zu erwartende N-Entzug, der Vorrat an mineralischem Bodenstickstoff zu Vegetationsbeginn (N_{\min}) und die zu erwartende N-Nachlieferung aus der organischen Bodensubstanz. Im Gegensatz zur DüV werden bei der Schätzung der N-Nachlieferung neben der Vorfrucht noch weitere Standortparameter berücksichtigt. Um diese Einflüsse quantifizieren zu können, wurden bundesweit Versuchsdaten aus N-Steigerungsversuchen zusammengetragen und in Bezug zu Klima und Standortdaten gesetzt. Neben diesen pflanzenbaulichen Aspekten gibt es auch eine Preisadjustierung um das ökonomische Risiko für den Landwirt zu minimieren. Die Güte der Empfehlung ist stark von der Güte der Benutzereingaben abhängig. Die Ertragserwartung darf daher nicht losgelöst von der Verwertungsrichtung (C-, B-, A-, E-Weizen) betrachtet werden. Der aus Ertragserwartung und angestrebten Rohproteingehalt resultierende N-Entzug durch das Korn muss auch dem im Mittel der Jahre beobachteten N-Entzug der Fläche entsprechen. Zum Zeitpunkt der Qualitätsgabe (BBCH 39-51) ist schon ein großer Teil der Jahreswitterung bekannt. Um den Einfluss der Witterung auf den N-Entzug, die N-Nachlieferung des Bodens und die N-Auswaschung bewerten zu können, wird ein prozessorientiertes Simulationsmodell eingesetzt. Es werden die täglichen Änderungsraten von wichtigen Pflanzen- und Bodenparametern berechnet. Die Bewertung der Jahreswitterung erfolgt durch Gegenüberstellung von aktuellen Simulationsergebnissen (mit aktueller Witterung gerechnet) und Simulationsergebnissen aus Referenzläufen mit standorttypischer Witterung. Dieses Verfahren ist schematisch in Abbildung 13A für die Simulationsgröße „Sprossmasse“ dargestellt. Zunächst werden 10 Jahre mit standorttypischen Witterungsverläufen simuliert. Der Endwert aus dem Mittel dieser Verläufe bildet den Erwartungswert (Y_2). Nun wird die Berechnung mit der aktuellen Witterung nachvollzogen, welche jedoch noch unvollständig ist (blauer Bereich). Die

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

unvollständige Witterung wird nun mit dem Referenzwetter „aufgefüllt“, wodurch eine Schar von möglichen Simulationsverläufen entsteht (rote Linien).

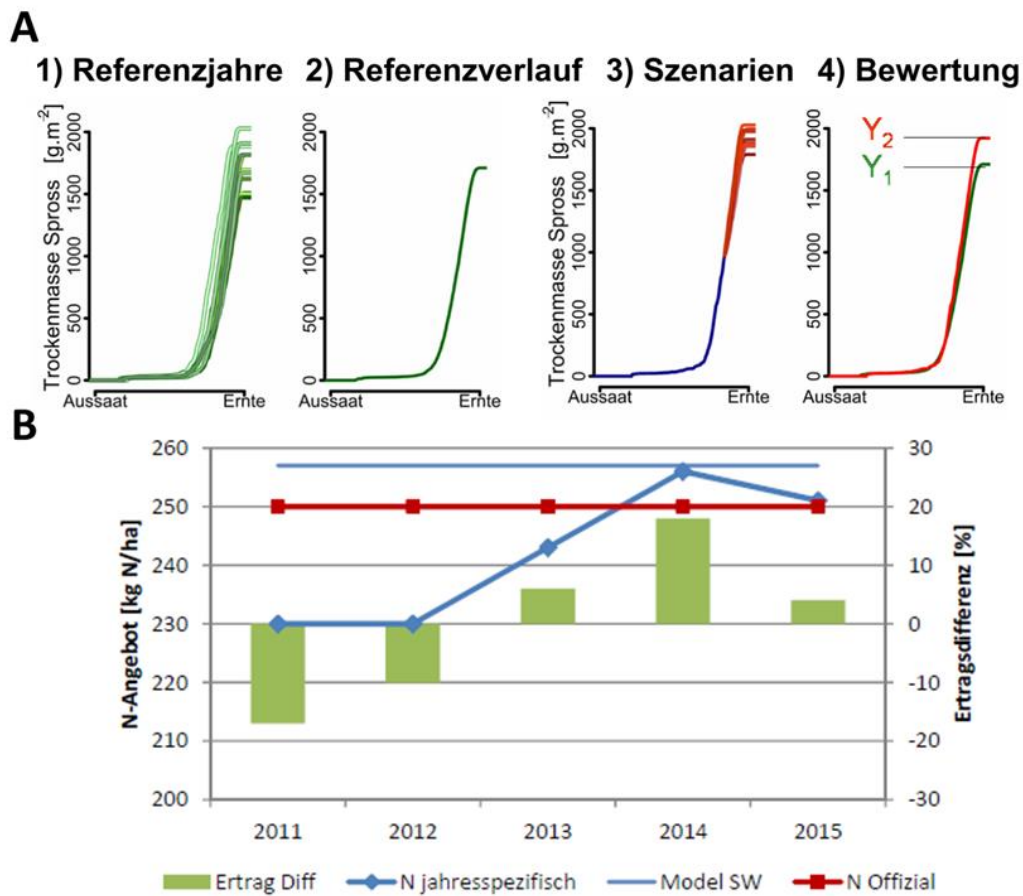


Abbildung 13: A: Bewertung der schon bekannten Jahreswitterung durch Szenario- und Referenzrechnung am Bsp. Trockenmassebildung (Standort Königslutter mit 100 dt/ha Ertragserwartung; AZ 83; Ut3). Zunächst werden 10 Jahre mit standorttypischen Witterungsverläufen simuliert (A1). Der mittlere Endwert dieser Referenzverläufe bildet den Erwartungswert (Y2; A2). Nun wird die Berechnung mit der aktuellen Witterung nachvollzogen, welche zum Zeitpunkt der Qualitätsgabe jedoch noch unvollständig ist (blauer Bereich; A3). Die noch unbekannte Witterungsinformation wird nun mit dem Referenzwetter ergänzt (A3 rote Linien). Hierdurch entstehen mögliche Szenarien deren mittlerer Endwert der aktuellen Prognose (Y1; A4) entspricht. Die Gegenüberstellung der beiden Endpunkte (Y2/Y1; A4) erlaubt eine qualitative Bewertung der aktuellen Witterung (siehe auch RATJEN & KAGE, 2015). Relativbewertungen werden für die Bilanzgrößen N-Entzug (Korn) und effektive N-Mineralisation durchgeführt um das N-Angebot jahresspezifisch anzupassen. B: Angepasstes N-Angebot für den Standort Königslutter.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Aus der Gegenüberstellung der beiden Endpunkte (Y2/Y1) entsteht eine qualitative Bewertung. Das Beispiel wurde für den Standort Königslutter in NI gerechnet. Das aktuelle Wetter endete am 31. Mai 2008, die Einschätzung des Modells zu diesem Zeitpunkt war eine um 15% erhöhte Biomasse zur Ernte. Parallel wurden auch relative Einschätzungen für die Größen N-Aufnahme, Kornertrag, N-Auswaschung und N-Mineralisation berechnet. Auf diese Weise lassen sich die aus den Benutzereingaben ermittelten Bilanzgrößen (N-Entzug, N-Nachlieferung, N-Auswaschung) jahresspezifisch anpassen. In Abbildung 13B sind die jahresspezifischen Anpassungen im Ergebnis für den Standort Königslutter (Vorfrucht Weizen) dargestellt.

3.2 Dünge-Systemvergleich

Das N-Modell wurde in 2014 und 2015 auf 38 Standorten getestet. Auf den meisten Standorten sollen die Versuche auch in den nächsten Jahren fortgeführt werden. Da die Ergebnisse aus dem Anbaujahr 2015 noch nicht vollständig vorliegen und es zu einigen technischen Schwierigkeiten gekommen ist (siehe Kapitel 4) werden im Folgenden die mehrjährigen Ergebnisse aus Niedersachsen vorgestellt. Auf der Grundlage von Ertragsfunktionen wurde das Modell jedoch auch für weitere Bundesländer getestet (siehe Seite 40).

Modellvalidierung 2014, 2015

Land	Standorte
Baden-Württemberg	4
Bayern	-
Brandenburg	1
Hessen	4
Mecklenburg-Vorpommern	1
Niedersachsen	7
NRW	7
Rheinland-Pfalz	3
Sachsen	4
Sachsen-Anhalt	1
Schleswig-Holstein	3
Thüringen	3

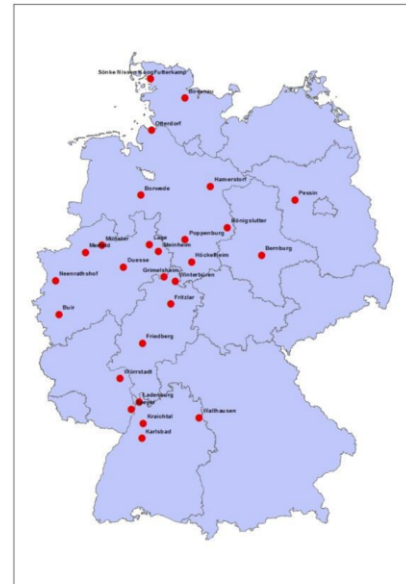


Abbildung 14: Versuchsstandorte der Landesdienststellen, auf denen das N-Modell getestet wird.

Dünge-Systemvergleich der Kammer Niedersachsen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Dünge-Systemvergleiche für die Standorte in Niedersachsen dargestellt. Die Auswertung erfolgte auf Grundlage der konkreten Parzellenerträge. Im Gegensatz zu der Auswertung anhand der N-Steigerungsversuche, bei denen nur das N-Angebot bewertet wird, geht hier auch die zeitliche Verteilung (1.-,2.-,3. Gabe) ein.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngesystems für Weizen“

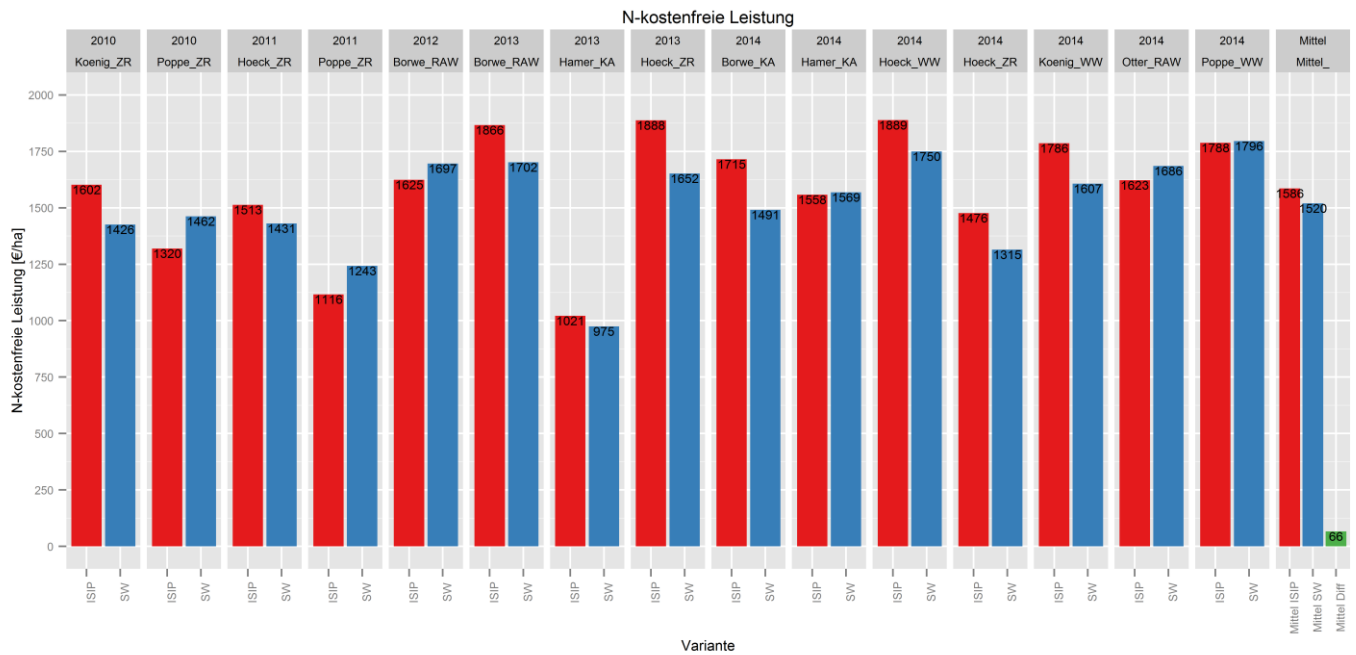


Abbildung 15: N-Kostenfreier Erlös der Modellvariante (ISIP ,rot) im Vergleich zur Empfehlung der LWK Niedersachsen (SW, blau). Annahmen: 10 €/ha je Überfahrt; 0.88 €/kg N; Weizenpreise: A 17,52; B 16,8; C 15,3 €/dt

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

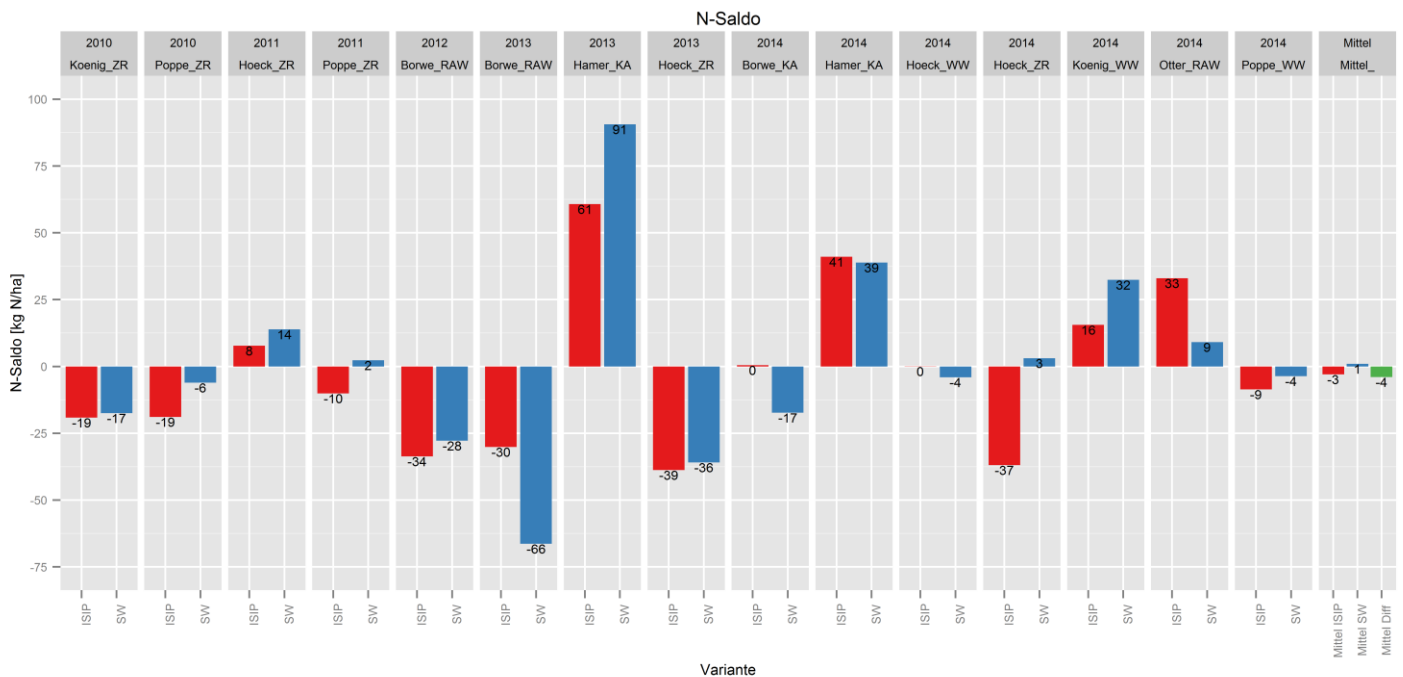


Abbildung 16: N-Saldo der Modellvariante (ISIP) im Vergleich zur Empfehlung der LWK Niedersachsen (SW). Die Differenz (Diff, grün) ergibt sich aus Modell minus Referenz.

Sowohl bei der monetären Bewertung als auch bei den N-Bilanzüberhängen zeigte das Modell im Mittel über alle Varianten eine leichte Verbesserung gegenüber der Kammerempfehlung. Dies ist besonders beachtlich, da die Düngempfehlung der LWK anhand der langjährigen Versuchsergebnisse eben dieser Flächen entwickelt wurde.

Auswertung anhand von N-Steigerungsversuchen

Die Modellempfehlungen und Referenzvarianten wurden mittels Ertragsfunktionen für Kornertag und Rohprotein auf der Basis von N-Steigerungsversuchen der Landesdienststellen bewertet. Die N-Form wurde hierbei nicht berücksichtigt, es handelte sich jedoch ausschließlich um mineralische Dünger. Die Modellempfehlung ergab sich aus der oben beschriebenen Funktionsweise des Modells. Es wurden Modellempfehlungen unter 6 Weizenpreisannahmen gerechnet (siehe Tabelle 2). Die Ergebnisse sind als Mittelwerte über die Preisannahmen dargestellt. Um diese Einflüsse quantifizieren zu können, wurden bundesweit Versuchsdaten aus N-Steigerungsversuchen der Landesdienststellen (HE, NI, NW, RP, SH, ST, TH) in

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Koordination der LWK Niedersachsen zusammengetragen und ausgewertet. Bei der Vergleichsvariante handelt es sich um das an die jeweiligen Standorte anhand langjähriger Erfahrungen und unter Berücksichtigung aller Schlaginformationen aus dem Versuchswesen der Officialberatung angepasste optimale N-Angebot. Dies stellt also eine sehr „harte“ Referenz dar, weil verschiedene, regional angepasste Düngesysteme mit einem einheitlichen Düngemodell verglichen werden.

In den letzten 10 Jahren kam es zu starken Schwankungen bei den Weizenpreisen und im Hinblick auf die Proteinsensitivität der Backweizenpreise. Für die monetäre Bewertung wurden daher verschiedene Preisszenarien gerechnet, um eine robuste Bewertung durchführen zu können. Die Szenarien wurden sowohl für die Modell-Variante, als für die Referenz (Beraterempfehlung der Landesdienststellen) gerechnet.

Tabelle 1: Preisannahmen, welche für die monetäre Bewertung des Düngemodells gerechnet wurden

Preisszenario	Weizenpreis [€ dt ⁻¹]	Proteinsensitivität ¹ [%]
I	10	0
II	10	3
III	20	3
IV	30	3
V	20	10
VI	30	10

Stickstoffpreis: 1 € kg⁻¹ N

¹ Preisabschlag bei Nichterreichen des Zielproteingehaltes

Neben dem Weizenpreis wurde auch die Proteinsensitivität des Weizenpreises variiert. Beide Faktoren werden vom Modell berücksichtigt, um die Akzeptanz bei den

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngesystems für Weizen“

Nutzern zu erhöhen. Auf diese Weise kann bei niedriger Preis-Kostenrelation Stickstoff eingespart werden, ohne monetäre Einbußen befürchten zu müssen.

Tabelle 2: Modellvalidation anhand von quadratischen Ertragsfunktionen. Parameter: Ackerzahl (AZ), Kornertrag, mineralischer Bodenstickstoff im Frühjahr (N_{\min} ; 0-90cm), N-Bilanzüberhang ertragskorrigiert (N-Saldo) und N-Kosten freie Leistung (NKfL, siehe Preisannahmen Tabelle 1). Die Ergebnisse sind als Mittelwerte über die Aufwüchse (n) dargestellt, die Standardabweichung (sd) steht in Klammern.

Land	n	AZ	Ertrag [dt/ha]	N_{\min} [dt/ha]	Ø N-Düngung [kg/ha]		Ø N-Saldo ¹ [kg/ha]		Ø NKfL [€/ha]	
					Modell	Beratung	Modell	Beratung	Modell	Beratung
H	4	69 (16.01)	90	61 (13.95)	157 (15.29)	169 (13.95)	-2.9 (13.44)	6.1 (30.36)	1592.3 (210.71)	1591.2 (212.78)
NI	28	69 (17.14)	100	56 (27.64)	174 (23.41)	184 (32.09)	11.7 (32.33)	19.0 (39.04)	1755.6 (303.65)	1760.8 (286.22)
NRW	12	60 (21.62)	95	48 (28.43)	161 (20.35)	149 (31.22)	4.7 (28.51)	-4.7 (35.42)	1713.6 (191.60)	1720.9 (182.37)
RP	9	59 (26.17)	70	36 (25.69)	161 (15.86)	188 (22.31)	27.3 (19.22)	50.2 (26.53)	1323.6 (229.87)	1302.5 (253.88)
SH	5	54 (2.24)	100	48 (11.15)	192 (10.57)	185 (19.40)	20.7 (14.81)	17.2 (26.44)	1749.7 (258.48)	1703.6 (193.64)
ST	1	91	100	13	195	217	43.4	54.7	1698.9	1735.2
TH	13	63 (26.60)	90	59 (30.70)	168 (21.17)	183 (31.53)	1.1 (30.63)	10.9 (35.13)	1682.7 (284.59)	1688.5 (304.69)
Ø	72	66 (20.74)	92	52 (27.19)	170 (21.76)	178 (31.56)	10.8 (28.89)	17.1 (37.34)	1671.1 (292.03)	1670.0 (290.94)

¹: Um die Ergebnisse aus den Versuchen auf einen Praxisschlag zu übertragen, ging der Parzellenertrag bei der Berechnung der N-Salden nur zu 90% ein.

Als Referenz zur Bewertung der Modellempfehlungen wurde das N-Angebot der Officialberatung herangezogen. Hierbei handelt es sich nicht um die in der Düngeverordnung verankerte N-Bedarfsermittlung, sondern um regionalisierte

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Sollwerte mit an den jeweiligen Standort und an die jeweilige Situation angepassten Zu- und Abschlägen. Um die Ergebnisse aus den Versuchen auf einen Praxisschlag zu übertragen, ging der Parzellenertrag bei der Berechnung der N-Salden nur zu 90% ein.

Trotz dieser „harten“ Referenz konnte mit dem N-Angebot nach Modell in allen getesteten Bundesländern ein vergleichbarer monetärer Ertrag erzielt werden. Gleichzeitig kam es zu einer deutlichen Einsparung von Stickstoff (8 kg N/ha über alle Standorte), was sich auch zu entsprechend niedrigeren Bilanzüberhängen führte. Da das Beratungssystem preissensitiv ist, ist die Einsparung größer, wenn eine niedrige Preis-Kosten Relation vorliegt. Bei niedrigen Preis-Kosten Relationen (Preisannahme I, Tabelle 1) sind im Mittel Einsparungen von über 20 kg N/ha möglich, ohne dass für den Landwirt monetäre Einbußen entstehen (Abbildung 17).

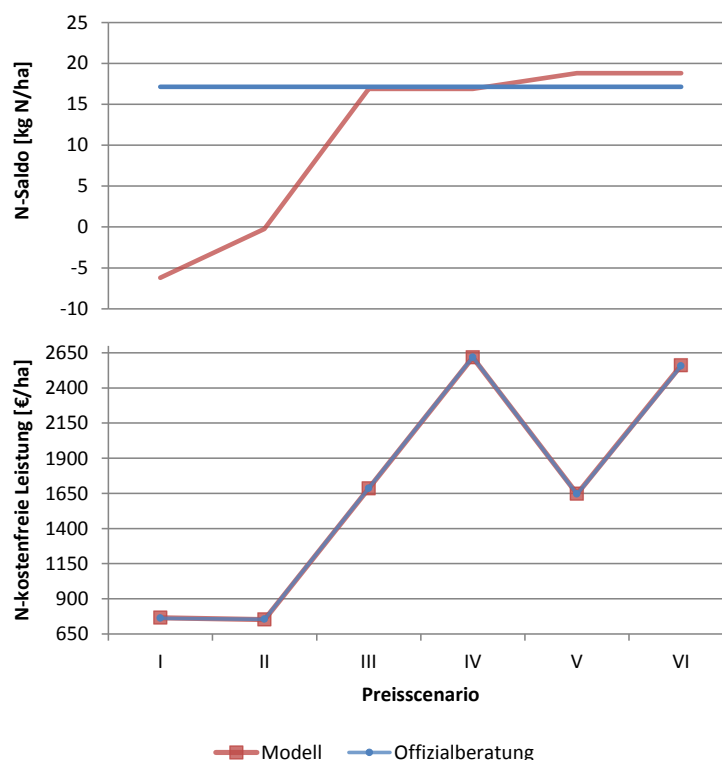


Abbildung 17: Vergleich von Offizialberatung (blau) und Modell (rot) in Abhängigkeit vom Preisszenario. Oben: N-Bilanzüberhang (Differenz zw. zugeführter und abgeführter Stickstoffmenge; ertragskorrigiert). Unten: N-kostenfreie Leistung.

3.3 Fazit Modell-Validation

Die Vorteile des Modells (jahresspezifische Zu-/Abschläge) gegenüber standortangepasster N-Sollwerte der Officialberatung treten überwiegend in Hoch- und Niedrigertragsjahren, sowie bei Betrachtung auf Einzelschlagebene deutlich zutage. Die standort- und jahreswitterungsangepasste N-Düngung nach Modellempfehlung bietet einerseits N-Einsparungspotenzial in Jahren mit unterdurchschnittlicher N-Aufnahmeleistung des Bestandes (z. B. 2011 mit Frühjahrstrockenheit) und trägt andererseits zur Ausschöpfung des Ertragspotenzials und zur Qualitätsabsicherung auch in Hohertrags-jahren wie 2014 bei (Abbildung 13B; siehe auch Abbildung 15, Abbildung 16).

Im Mittel über alle Standorte konnte eine N-Einsparung von über 8 kg N/ha erreicht werden. Dies geschah bei gleichzeitigem Erhalt der monetären Erträge. Letzteres ist besonders wichtig, um eine hohe Akzeptanz bei den Landwirten zu erreichen.

4. Probleme

4.1 Wetterstationen

Im Laufe des Projekts kam es immer wieder zu Problemen bezüglich der Qualität von Witterungsparametern einzelner Stationen. In Abbildung 18 (oben) sind exemplarisch die gemessenen Windgeschwindigkeiten der Station Hamerstorf dargestellt. Im Frühjahr fiel der Sensor komplett aus. Als Folge der unterschätzten Windgeschwindigkeit kam es zu einer Überschätzung der Bodenwassergehalte (Abbildung 18 untere Abbildung) und zu einer verzerrten Ertragserwartung (nicht dargestellt). Weitere Stationen mit fehlerhaften Windsensoren wurden in 2015 erkannt: Ladenburg (Baden-Württemberg), Otterstadt in (Rheinland-Pfalz), Hamerstorf (Niedersachsen), Banteln (NI), Rayen (NRW). Fehlerhafte Windgeschwindigkeiten haben fatale Auswirkungen auf die Ertragsprognose, da beispielsweise extreme Trockenheit welche in 2015 an vielen Standorten beobachtet

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngesystems für Weizen“

wurde, vom Modell entsprechend nicht erkannt werden kann. In der Folge kam es auf einigen Standorten zu einer überhöhten N-Düngung.

Die Qualität der Wetterdaten kann von Landwirten generell nur schwer eingeschätzt werden, da lokale Referenzwerte fehlen. Dies ist besonders bei interpolierten Witterungsdaten der Fall, da je nach Abstand zur fehlerhaften Station die Verzerrungen nur graduell in Erscheinung treten. ISIP nutzt die Möglichkeit der externen Plausibilitätsprüfung zum Aufdecken von fehlerhaften Messungen. Hierbei werden Messparameter benachbarter Wetterstationen verglichen (siehe DBU Projekt 18105/01). Durch dieses Verfahren kann jedoch nicht zwischen räumlicher Variabilität des Witterungsparameters und fehlerinduzierter Variabilität des Messsignals unterschieden werden. Daher können mit dieser Methode nur extreme Fehlmessungen identifiziert werden.

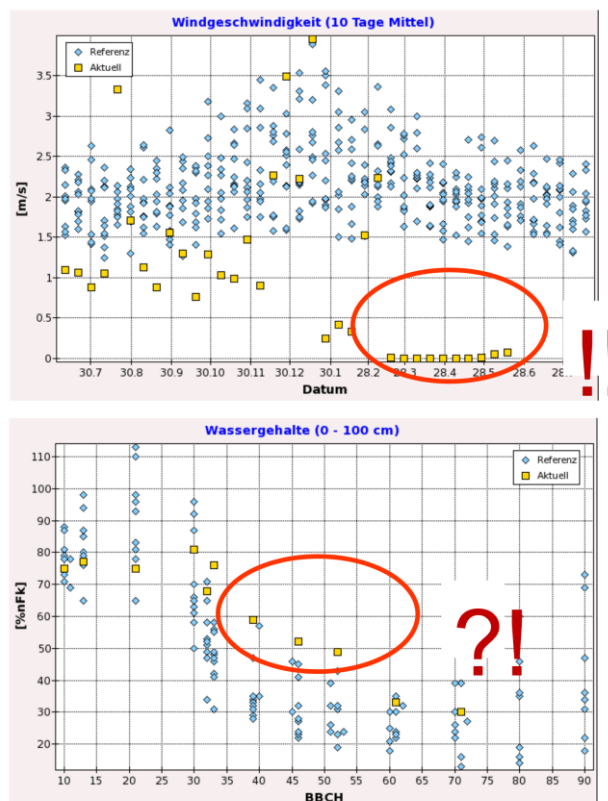


Abbildung 18: Ein beschädigter Windsensor führte 2015 dazu, dass die Frühjahrestrockenheit am Standort Hamerstorf vom Modell nicht erkannt wurde.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngesystems für Weizen“

Eine Lösung für diese Problematik wären Wetterstationen mit interner Plausibilitätsprüfung (Abgleich zwischen redundanten Sensoren innerhalb einer Station). Da eine Gütekontrolle vorliegt, können lokale Wetterdaten von privaten Betreibern in bestehende Messnetze eingebunden und für die flächenhafte Interpolation genutzt werden, ohne die Qualität des Datenbestandes zu gefährden.

4.2 Benutzereingaben

Die vorgestellte Planungshilfe setzt auf die Erfahrung des Landwirts bzw. Beraters. Die Güte der Empfehlung ist dadurch stark von der Qualität der Benutzereingaben, bzw. den Produktionszielen abhängig. In einigen Fällen konnte beobachtet werden, dass der N-Entzug des Bestandes vom Benutzer als unrealistisch hoch angenommen wurde. Um diesem Problem zu begegnen wurde in der Saison 2015 eine Deckelung der vom Modell errechneten Sollwerte eingeführt: Der sich aus Kornertrag und erwartetem Proteingehalt ergebende N-Entzug (Korn, Stroh, Wurzel) kann nun seit dem 260 kg N/ha nicht mehr übersteigen. Außerdem wird der resultierende Sollwert begrenzt, wenn ein N-Saldo von mehr als 30 kg N/ha (Parzelle) erwartet werden kann.

4.3 Einflussgrößen welche nicht vom Modell berücksichtigt werden

In Bezug auf Trockenstress konnte gezeigt werden, dass durch eine an die jeweilige Witterung angepasste Düngung Stickstoff eingespart werden kann, ohne die Erträge und Qualitäten zu gefährden. Allerdings gibt es weitere Einflüsse, welche den N-Bedarf des Weizenbestandes beeinflussen können, welche allerdings zurzeit noch nicht berücksichtigt werden. Hierzu gehören die biotischen Stressfaktoren (Schädlinge, Krankheiten und Verunkrautung), aber auch abiotische Faktoren wie Staunässe, Auswinterung und NH₃-Volatilisation. Einige dieser Einflüsse können sinnvoller Weise nur auf der Ebene der Teilfläche berücksichtigt werden. Allerdings bietet der prozessorientierte Ansatz das Potential für eine Erweiterung in Richtung einer teilflächenspezifischen Parametrisierung. Zur Realisierung sind jedoch weitere Forschungsaktivitäten und Entwicklungsarbeit notwendig.

5. Öffentlichkeitsarbeit

Wissenschaftliche Publikationen

- Ratjen, A.M., Kage, H., (2016, accepted). Modelling N and dry matter partitioning between leaf and stem of wheat under varying N supply. *Journal of Agronomy and Crop Science*
- Ratjen, A.M., Kage, H., (2015, accepted). A simple drought-sensitive model for leaf:stem partitioning of wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*
- Ratjen, A. M., Heumann, S., Kage, H., Böttcher, J. (2015, submitted). Soil N supply at economic optimum N rate. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*
- Ratjen, A.M., Kage, H., (2015). Nitrogen-limited light use efficiency in wheat crop simulators: comparing three model approaches. *J. Agric. Sci. (Cambridge University Press- first view)*, 1–12. doi:10.1017/S0021859615001082
- Ratjen, A.M., Kage, H., (2015). Forecasting yield via reference- and scenario calculations. *Comput. Electron. Agric.* 114, 212 – 220.
doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.020
- Heumann, S., Ratjen, A. M., Kage, H., Böttcher, J. (2014). Estimating net N mineralization under unfertilized winter wheat using simulations with NET N and a balance approach. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 1–14. doi:10.1007/s10705-014-9616-y
- Ratjen A.M., Kage H. (2013). Is mutual shading a decisive factor for differences in overall canopy specific leaf area of winter wheat crops? *Field Crops Research* 149:338–346

Wissenstransfer

- Ratjen, A.M. (25.Nov 2015) Können Düngungsmodelle bei der exakten Bemessung der Düngungshöhe helfen? Seminar der Arbeitsgemeinschaft für integrierte Pflanzenproduktion Südhannover e.V.
- Ratjen, A.M. (23.-24. Nov. 2015). „Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen,,- im Rahmen der Veranstaltung „Flugroboter für Precision Farming“ (Universität Rostock)
- Ratjen, A.M. (2015, Abstract in print).: FIELD DATA BASED DERIVATION OF PROCESS DESCRIPTIONS IN CROP GROWTH MODELS. IS THERE STILL ROOM FOR IMPROVEMENT?. *International Crop Modelling Symposium 15-17 March 2016, Berlin (Vortrag, Tagungsband)*
- Ratjen, A.M. (19-20 Nov 2015) DFG Think-Tank Rundgespräch: Presentations and Summary_Round Table Discussion “Sustainable Intensification of Agricultural Production” Bonn.
- Ratjen, A.M. (18. November 2014). Nährstoff nach Rezept - Stickstoffmodell für Winterweizen. DLG – Workshop – SMART FARMING, Bernburg

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Ratjen, A.M. (06.02.2014) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen Kolloquium zur Bodenkunde der Uni Hannover (Vortrag)

Ratjen, A.M. (05.11.2014) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen: Standort und Jahresspezifisch. Verband der Landwirtschaftskammern AK Düngung (Vortrag)

Ratjen, A. M., Kage, H. (2013): Is mutual shading a decisive factor for differences in overall canopy specific leaf area of winter wheat crops? ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings, 03-06.11.2013 in Tampa ,Florida, USA. (Poster)

Ratjen, A.M. (23-25.10.2013) Think-Tank Rundgespräch zum Grundsatzpapier „Erhöhung der Flächenproduktivität bei gleichzeitigem Schutz natürlicher Ressourcen sowie dem Erhalt von Ökosystemdienstleistungen – Zukunftsoptionen der deutschen Agrarökosystemforschung“.

Reinsdorf, E., Baumgärtel, G. (2015) Stickstoff-Düngung nach Maß. Land und Forst Nr. 21, S. 22.

Reinsdorf E. Ratjen, A.M. (2015) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen. 24. Thüringer Düngungs- und Pflanzenschutztagung, S. 25-34

Reinsdorf, E., Baumgärtel, G., (2014) N-Spätgabe mit Aufschlag versehen. Land und Forst Nr. 20, S. 19.

Reinsdorf, E., Baumgärtel, G., (2014) N-Düngung im Winterweizen steuern. Land und Forst Nr. 18, S. 24

Vorträge:

Reinsdorf, E. (29.01.2016) Der Weg zum optimalen Dünge-System – ein Überblick über 10 Jahre Stickstoffdüngungsversuche im Winterweizen. 13. Pflanzenbau-Fachtagung. Sehnde-Rethmar.

Reinsdorf, E. (26.01.2016) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen – Möglichkeiten und Grenzen. Vortragstagung Pflanzenbau aktuell. Bernburg-Strenzfeld.

Reinsdorf, E. (21.01.2016) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen – Möglichkeiten und Grenzen. Precision Farming für Fortgeschrittene. Braunschweig.

Reinsdorf, E. (19.11.2015) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen. 24. Thüringer Düngungs- und Pflanzenschutztagung. Erfurt.

Reinsdorf, E. (04.11.2015) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen – Möglichkeiten und Grenzen. Pflanzenschutz- und Pflanzenbautagung des Dienstleistungszentrum ländl. Raum R-N-H. Bad Kreuznach.

Reinsdorf, E. (27.10.2015) Modellgestützte N-Düngung von Winterweizen – Möglichkeiten und Grenzen. Tagung des Landesarbeitskreis Düngung NRW. Castrop-Rauxel.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngungsberatungssystems für Weizen“

- Reinsdorf, E. (18.06.2015) Modellgestützte N-Düngung im Winterweizen – ISIP Düngempfehlungsmodell. Großer LWK Felddag 2015. Borwede/Twistingen.
- Reinsdorf, E. (04.03.2015) Aktuelle Hinweise zum N-Bedarfsmodell Winterweizen. Team Pflanze Sitzung der LWK NI. Kreepen.
- Reinsdorf, E. (12.01.2015) Mathematik und Praxis - Ansätze und Erfahrungen mit der modellgestützten Stickstoffdüngempfehlung zu Winterweizen. DLG Ausschusssitzung Pflanzenernährung. Berlin.
- Reinsdorf, E. (17.11.2014) Modellgestützte Stickstoffdüngempfehlung zu Winterweizen – Ergebnisse aus Niedersachsen. Tagung des Landesarbeitskreis Düngung Niedersachsen / Sachsen-Anhalt. Verden.
- Reinsdorf, E. (05.11.2014) Modellgestützte N-Düngung in Winterweizen – Ergebnisse 2014. Verband der Landwirtschaftskammern Arbeitskreis Düngung. Hannover.
- Reinsdorf, E. (29.04.2014) Mit Prognosemodell N-Düngung in Winterweizen steuern – Nutzungsmöglichkeiten für die Beratung 2014 – Aktuelle Modellempfehlung zur Spätgabe. Team Pflanze Sitzung der LWK NI. Hannover.
- Reinsdorf, E. (01.04.2014) Mit Prognosemodell N-Düngung in Winterweizen steuern – Nutzungsmöglichkeiten für die Beratung 2014. Team Pflanze Sitzung der LWK NI. Hannover.
- Reinsdorf, E. (19.02.2014) Mit Prognosemodell Effizienz der N-Düngung zu Winterweizen steigern. Fachbeiratssitzung ISIP. Kassel.
- Reinsdorf, E. (14.02.2014) Mit Prognosemodell Effizienz der N-Düngung zu Winterweizen steigern. 11. Pflanzenbau-Fachtagung. Sehnde-Rethmar.
- Reinsdorf, E. (20.12.2013) Mit Prognosemodell Effizienz der N-Düngung zu Winterweizen steigern. Jahrestagung 2013 der LWK NI. Goslar.
- Reinsdorf, E. (04.11.2013) Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngungsberatungssystems für Winterweizen. Sitzung des Arbeitskreises Düngungsberatung und Nährstoffhaushalt. Hannover.
- Kage, H. (14.02.2013) Stickstoffbilanzen im Ackerbau, Vortrag auf dem Ackerbautag der LWK-Schleswig-Holstein
- Kage, H. (24.5.2015): Novellierung DüVO Auswirkungen auf Ackerbaubetriebe, Vortrag vor dem Beratungsring landwirtschaftlicher Betriebe e. V.
- Kage, H. (11.1.2016): Auswirkungen der neuen Düngeverordnung auf Raps- und Weizenanbau. Vortrag vor dem Ausschuss für Pflanzenernährung der DLG. DLG-Wintertagung München

6. Fazit zum Projekt

Ablauf

Das erste Projektjahr verlief überwiegend wie geplant, sodass die Projektziele erreicht werden konnten. Da die Datensammlung bei der LWK- Niedersachsen jedoch etwas verzögert anliefe, konnten einige Neuerungen erst verspätet implementiert werden.

Modellverbesserungen

Durch die deutschlandweite Datensammlung der LWK Niedersachsen konnte die standortspezifische Schätzung der N-Nachlieferung wesentlich verbessert werden. Gegenüber der Annahme, dass die N-Nachlieferung vorwiegend vorfruchtbasiert ist (siehe Düngeverordnung), konnte der mittlere Fehler (RMSE) um ca. **11 kgN/ha** verringert werden (vgl. Abbildung 10, Abbildung 11), indem weitere Standortparameter in die Schätzung aufgenommen wurden. Durch das Verfahren der Kreuzvalidierung zeigte sich, dass das Schätzverfahren auch für unbekannte Standorte gilt. Das Pflanzen-Boden Modell *HumeWheat*, wurde im Bereich Trockenstress-Adaption und N limitiertes Wachstum weiter entwickelt. Hierzu wurden auch mehrere Publikationen in angesehenen wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht.

Evaluierung / Validation

Das Modell ist bereits das sechste Jahr im Test. Die Erfahrungen sind positiv, da der Einfluss der Witterung für die meisten Standorte richtig eingeschätzt wurde. Bereits im Mai 2011 wurde ein durch die Frühjahrestrockenheit induzierter niedriger N-Bedarf detektiert. Entgegen der Meinung vieler Berater wurde vom Modell erkannt, dass die Auswirkungen der Frühjahrtrockenheit 2015, wegen der niedrigen Temperaturen, an vielen Standorten Norddeutschlands weniger ertragslimitierend wirkte. Auch das Hohertragsjahr 2014 und das überdurchschnittliche Erntejahr 2012 wurden auf den meisten Standorten bereits Ende Mai richtig eingeschätzt. Aber auch die eher durchschnittlichen Jahre 2010 und 2013 wurden vom Modell als solche erkannt.

Durch die Weiterentwicklung von *HumeWheat*, sowie durch die verbesserte standortspezifische Schätzung der effektiven N-Nachlieferung aus der organischen Bodensubstanz wurde die Güte der Düngempfehlungen weiter verbessert. Es konnte gezeigt werden, dass die überregionale Planungshilfe eine Verbesserung gegenüber den regionalisierten Düngemanagementsystemen der Officialberatung darstellen kann. Die LWK Niedersachsen konnte anhand der Feldversuchsergebnisse bestätigen, dass im Mittel über die 7 Bundesländer eine Einsparung von etwa 8 kg N/ha gegenüber der Officialberatung erreicht werden kann, ohne dass für den Landwirt monetäre Einbußen entstehen.

Die Düngempfehlungen der Officialberatung sind im Vergleich zur derzeitigen Düngepaxis jedoch als vergleichsweise moderat einzustufen (Avenhaus and Blumöhr, 2011, vgl. auch Abbildung 1). Sollte sich die Entscheidungshilfe unter ISIP als Beratungs- und Planungshilfe weiter etablieren, **ist in der Praxis mit weitaus größeren Einsparungen** zu rechnen.

Probleme / Ausblick

Die Bewertung der Jahreswitterung wird derzeit vor allem durch die Qualität der Witterungsdaten begrenzt. Um den Nutzen zu erhöhen sollten weitere

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

Einflussfaktoren berücksichtigt und Konzepte für teilflächenspezifische Anwendbarkeit entwickelt werden.

Öffentlichkeitsarbeit

Das Planungstool wurde durch zahlreiche Vorträge und Diskussionen mit Wissenschaftlern, Landwirten und Beratern bekannt gemacht. Außerdem entstanden zahlreiche Publikationen im wissenschaftlichen Bereich, sowie im Bereich Wissenstransfer.

Literatur

- Andersson, A., Johansson, E., 2006. Nitrogen Partitioning in Entire Plants of Different Spring Wheat Cultivars. *J. Agron. Crop Sci.* 192, 121–131. doi:10.1111/j.1439-037X.2006.00193.x
- Anonymus, 2004. Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngerverordnung - DüV) (No. Drucksache 500/04). Bundesrat, Berlin.
- Avenhaus, W., Blumöhr, T., 2011. Testerhebung zum Einsatz von Düngemitteln in der Landwirtschaft. *Stat. Bundesamt Wirtsch. Stat.* 22011 Wwvdestatistde 122.
- Brouwer, R., 1983. Functional equilibrium: sense or nonsense? *Neth J Agric Sci* 31, 335–348.
- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998. *Environmental Biophysics*. Springer-Verlag, New York Berlin Heidelberg.
- Diekmann, F., Fischbeck, G., 2005a. Differences in Wheat Cultivar Response to N Supply. I: Differences in Grain Yield Formation. *J. Agron. Crop Sci.* 191, 351–361.
- Diekmann, F., Fischbeck, G., 2005b. Differences in Wheat Cultivar Response to Nitrogen Supply. II: Differences in N-Metabolism-Related Traits. *J. Agron. Crop Sci.* 191, 362–376.
- Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen, Svendsen, H., 1990. DAISY - Soil plant atmosphere system model. Kopenhagen.
- Heumann, S., Ratjen, A., Kage, H., Böttcher, J., 2014. Estimating net N mineralization under unfertilized winter wheat using simulations with NET N and a balance approach. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 1–14. doi:10.1007/s10705-014-9616-y
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter Junior, P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17, 1133–1138.

Endbericht: „Bundesweite Etablierung eines modellbasierten
Stickstoffdüngerberatungssystems für Weizen“

- Jamieson, P.D., Porter, J.R., Goudriaan, J., Ritchie, J.T., van Keulen, H., Stol, W., 1998. A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crops Res.* 55, 23–44. doi:10.1016/S0378-4290(97)00060-9
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Machet, J.M., Thelier-Huche, L., 1994. Determination of critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann Bot* 74, 397–407.
- Kumakov, V.A., Evdokimova, O.A., Buyanova, M.A., 2001. Dry matter partitioning between plant organs in wheat cultivars differing in productivity and drought resistance. *Russ. J. Plant Physiol.* 48, 359–363. doi:10.1023/A:1016670501685
- Poorter, H., Niklas, K.J., Reich, P.B., Oleksyn, J., Poot, P., Mommer, L., 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytol.* 193, 30–50. doi:10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x
- RATJEN, A.M., KAGE, H., 2015. Nitrogen-limited light use efficiency in wheat crop simulators: comparing three model approaches. *J. Agric. Sci. FirstView*, 1–12. doi:10.1017/S0021859615001082
- Ratjen, A.M., Kage, H., 2015. Forecasting yield via reference- and scenario calculations. *Comput. Electron. Agric.* 114, 212 – 220. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.020
- Ratjen, A.M., Kage, H., 2013. Is mutual shading a decisive factor for differences in overall canopy specific leaf area of winter wheat crops? *Field Crops Res.* 149, 338–346. doi:10.1016/j.fcr.2013.05.015
- Rawson, H., Gardner, P., Long, M., 1987. Sources of Variation in Specific Leaf Area in Wheat Grown at High Temperature. *Funct. Plant Biol.* 14, 287–298.
- Schrage, R., Scharpf, H.C., 1988. Abschätzung des Nmin-Gehaltes gemüsebaulich genutzter Böden auf der Grundlage von Boden-, Witterungs- und Bewirtschaftungsdaten. *VDLUFA Kongressband 1988 II*, 1263–1271.
- Sponagel, H., Grottenthaler, W., 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5th ed. ed. Schweizerbart, Stuttgart.
- Harrach, T., 2008. Fragen und Anregungen zur Bewertung bester Böden (Höchstleistungsstandorte). Presented at the Vortrags- und Exkursionstagung zur Bodenschätzung AG Bodenschätzung und Bodenbewertung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Thür. Landesfinanzdirektion, Thür. Landesanstalt für Umwelt und Geologie., Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Weimar.