

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

Entwicklung von Verfahren der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winterraps (*Brassica napus* L.) auf Grundlage reflexionsoptischer Messungen

Andreas Bernhard Spicker

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. R. Hüchelhoven

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. K.-J. Hülsbergen
2. Univ.-Prof. Dr. U. Schmidhalter

Die Dissertation wurde am 30.05.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 13.09.2016 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Glossar	XXII
Abkürzungen	XXIV
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens	4
2.1 Grundlagen der Pflanzenreflexion.....	4
2.2 Einfluss der Pflanzen auf die Reflexionsmessungen.....	6
2.3 Einfluss des Bodens auf die Reflexionsmessungen.....	10
2.4 Vegetationsindices	11
2.5 Agronomische Grundlagen Winterraps	16
2.6 Agronomische Grundlagen Wintergerste	22
2.7 Einflüsse auf die Ertragsvariabilität landwirtschaftlicher Flächen.....	28
2.8 N-Düngeverfahren und Empfehlungen zur N-Düngung	30
2.8.1 Sensorgestützte, teilflächenspezifische Düngeverfahren	30
2.8.2 Sensorgestützte N-Düngesysteme verschiedener Hersteller	33
2.8.3 N-Düngeralkulationen	35
2.9 Arbeitshypothesen	42
3 Material und Methoden	43
3.1 Standortbeschreibung	43
3.2 Versuchsanlagen und Versuchsdurchführung	49
3.2.1 N-Steigerungsversuche Roggenstein.....	49
3.2.2 N-Steigerungsversuche Dürnast	54
3.2.3 Sortenversuche Winterraps und Wintergerste	57
3.2.4 Streifenversuche	59
3.2.5 Weitere Versuche	67
3.3 Pflanzenschutz und Nährstoffversorgung.....	69
3.4 Beprobung, Probennahme, Messverfahren (Analysen).....	69

3.4.1	Biomassebeprobung bei Raps	69
3.4.2	Biomassebeprobung bei Gerste.....	70
3.4.3	Analyse der Pflanzenproben	72
3.4.4	Analyse der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in den Streifenversuchen.....	72
3.5	Pflanzenreflexion	73
3.5.1	Funktion und Aufbau des Spektrometers.....	73
3.5.2	Datenaufbereitung und Auswertungsverfahren	74
3.5.3	Durchführung der Reflexionsmessungen.....	75
3.6	Berechnungsformeln	76
3.7	Statistische Auswertung.....	78
4	Ergebnisse	80
4.1	Ergebnisse – Winterraps	80
4.1.1	Wirkung gestaffelter N-Gaben zu Winterraps	80
4.1.1.1	<i>Kornertrag</i>	<i>80</i>
4.1.1.2	<i>N-Entzug über das Korn</i>	<i>81</i>
4.1.1.3	<i>N-Saldo.....</i>	<i>82</i>
4.1.1.4	<i>N-Effizienz.....</i>	<i>83</i>
4.1.1.5	<i>Qualitätsparameter Öl- und Proteingehalt.....</i>	<i>83</i>
4.1.1.6	<i>Einfluss der Terminierung der N-Düngung</i>	<i>86</i>
4.1.2	TM-Aufwuchs und N-Aufnahme von Winterraps	89
4.1.2.1	<i>Entwicklung der oberirdischen Biomasse.....</i>	<i>89</i>
4.1.2.2	<i>Entwicklung der N-Aufnahme</i>	<i>93</i>
4.1.3	Entwicklung der Messwerte der Vegetationsindices in der Vegetation	97
4.1.4	Abbildung der N-Aufnahme und der Biomasse durch Vegetationsindices .	101
4.1.4.1	<i>Eignung von Vegetationsindices zur Abbildung der N-Aufnahme.....</i>	<i>101</i>
4.1.4.2	<i>Eignung von Vegetationsindices zur Abbildung der Biomasse.....</i>	<i>105</i>
4.1.5	Auswertung der Sortenversuche in Winterraps	107
4.1.5.1	<i>Auswertung des Sortenversuchs im Zeitraum 2007 bis 2009</i>	<i>107</i>
4.1.5.2	<i>Auswertung der Sortenversuche der Jahre 2012 und 2013</i>	<i>111</i>
4.1.6	Bestimmung der N-Aufnahme von Winterraps	114

4.1.6.1	<i>Abschätzen der N-Aufnahme über die Pflanzenreflexion</i>	114
4.1.6.2	<i>Abschätzung der N-Aufnahme über die Schnittmethode</i>	114
4.1.7	Entwicklung eines Düngesystems für Winterraps.....	118
4.1.7.1	<i>Einfluss der N-Düngermenge auf den Kornertrag von Winterraps</i>	118
4.1.7.2	<i>Bestimmung der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr</i>	119
4.1.7.3	<i>Anpassung der Düngefunktion an verschiedene Ertragsniveaus</i>	126
4.1.7.4	<i>N-Verteilung in Abhängigkeit der Winterwitterung</i>	127
4.1.8	Streifenversuch Winterraps	129
4.2	Ergebnisse – Wintergerste	132
4.2.1	Wirkung gestaffelter N-Gaben zu zwei- und mehrzeiliger Wintergerste.....	132
4.2.1.1	<i>Kornertrag und Proteingehalt</i>	133
4.2.1.2	<i>N-Entzug über das Korn</i>	136
4.2.1.3	<i>N-Saldo</i>	138
4.2.1.4	<i>N-Effizienz</i>	140
4.2.2	Analyse der N-Aufnahme und der TM-Bildung bei Wintergerste	142
4.2.2.1	<i>Verlauf der N-Aufnahme</i>	142
4.2.2.2	<i>Standorteinfluss auf die N-Aufnahme von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste</i>	145
4.2.2.3	<i>Effekt der N-Düngung auf die N-Aufnahme zur Ernte</i>	146
4.2.2.4	<i>Verlauf des TM-Aufwuchses</i>	146
4.2.2.5	<i>Standorteinfluss auf den TM-Aufwuchs von zwei- und mehrzeiliger Gerste</i>	149
4.2.2.6	<i>Einfluss einer gestaffelten N-Düngung auf die Biomasse</i>	149
4.2.3	Verlauf der Messwerte der Vegetationsindices in der Vegetation	150
4.2.4	Abbildung der N-Aufnahme und der Biomasse durch Vegetationsindices..	155
4.2.4.1	<i>Abbildung der N-Aufnahme mit Vegetationsindices in Einzeljahren</i>	155
4.2.4.2	<i>Abbildung der N-Aufnahme mit Vegetationsindices im Zeitraum 2002 bis 2014</i>	156
4.2.4.3	<i>Abbildung der N-Aufnahme mit Vegetationsindices im Zeitraum 2009 bis 2014</i>	160
4.2.4.4	<i>Abbildung der Biomasse mit Vegetationsindices im Zeitraum 2009 bis 2014</i>	162
4.2.5	Auswertung des Sortenversuchs Wintergerste	164

4.2.5.1	<i>TM-Aufwuchs in Abhängigkeit der Sortenwahl</i>	166
4.2.5.2	<i>N-Aufnahme in Abhängigkeit der Sortenwahl</i>	168
4.2.5.3	<i>Abhängigkeit der Vegetationsindices von der Sortenwahl</i>	169
4.2.6	Schnittmethode zum Abschätzen der N-Aufnahme von Wintergerste	174
4.2.7	Entwicklung eines Düngesystems für Wintergerste	177
4.2.7.1	<i>Messalgorithmen</i>	177
4.2.7.2	<i>Sensorgestützte Schätzung der N-Aufnahme im Gerstenbestand</i>	183
4.2.7.3	<i>Entwicklung der standortabhängigen, optimalen N-Aufnahmekurven</i>	184
4.2.7.4	<i>Entwicklung des Faktors DIMA</i>	188
4.2.7.5	<i>Berechnungsschema zur Kalkulation der benötigten N-Düngermenge</i>	189
4.2.8	Streifenversuch Wintergerste	190
5	Diskussion	193
5.1	Düngesystem Winterraps	193
5.1.1	Vegetationsindices für Winterraps.....	193
5.1.2	Düngesystem Winterraps – Berechnung der N-Düngermenge im Frühjahr	198
5.1.3	Düngesystem Winterraps – N-Verteilung.....	200
5.1.4	Streifenversuch Winterraps.....	204
5.1.5	Einordnung des Düngesystems für Winterraps.....	206
5.2	Düngesystem Wintergerste	208
5.2.1	Vegetationsindices für Wintergerste.....	209
5.2.2	Herleitung des Düngesystems für zwei- und mehrzeilige Wintergerste.....	213
5.2.3	Algorithmen zur Schätzung der N-Aufnahme von Wintergerste.....	221
5.2.4	Streifenversuch Wintergerste	222
5.2.5	Einordnung des Düngesystems für Wintergerste.....	224
5.3	Ausblick	226
6	Zusammenfassung	227
7	Summary	231
8	Literaturverzeichnis	235
9	Anhang	260

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Reflexionssignatur im Bereich des sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenspektrums in Mais in Abhängigkeit unterschiedlicher Chlorophyll und N-Konzentrationen.....	6
Abb. 2: Anlageschema der Streifenversuche Winterraps (links) und Wintergerste (rechts) mit der nutzbaren Feldkapazität im Hintergrund, Versuchsjahr 2013.....	62
Abb. 3: Spektrometer der Firma tec5 mit dem Referenzkanal (a), dem Messkanal (b) und dem Pocket PC (c).....	74
Abb. 4: Regression zwischen dem Kornertrag und dem N-Entzug über das Korn.	82
Abb. 5: Regression zwischen dem Proteingehalt und Ölgehalt im Rapskorn.	86
Abb. 6: Entwicklung des TM-Aufwuchses von Raps während der Vegetation für die N-Stufen N 1, N 3, N 15.....	90
Abb. 7: Entwicklung des TM-Aufwuchses von Raps während der Vegetation auf dem HE- und NE-Standort, Mittelwert über neun ausgewertete N-Stufen.....	91
Abb. 8: Entwicklung der N-Aufnahme von Raps während der Vegetation für die N-Stufen N 1, N 3, N 15.	94
Abb. 9: Entwicklung der N-Aufnahme von Raps während der Vegetation auf dem HE- und NE-Standort, Mittelwert aller N-Stufen.	95
Abb. 10: Entwicklung der N-Aufnahme und des TM-Aufwuchses von Raps sowie Verlauf der Messwerte verschiedener Vegetationsindices in Abhängigkeit der N-Stufen N 1, N 3 und N 14 während der Vegetation im Mittel des HE- und NE-Standortes.	99
Abb. 11: Entwicklung der N-Aufnahme und des TM-Aufwuchses von Raps sowie Verlauf der Messwerte verschiedener Vegetationsindices in Abhängigkeit der N-Stufen N 1, N 3 und N 14 während der Vegetation im Mittel des HE- und NE-Standortes.	101
Abb. 12: lineare und quadratische Regressionsfunktion zwischen der N-Aufnahme und den Messwerten der Vegetationsindices NDVI (oben) und VX 2 (unten) im Herbst (links) und zu BBCH 50 (rechts).	103
Abb. 13: Regressionsgleichungen zwischen dem TM-Aufwuchs im Herbst (links) und BBCH 30 (rechts) und den Messwerten der Vegetationsindices NDVI (oben) und VX 2 (unten).....	106

Abb. 14: Regressionsgleichungen zwischen gemessener und über die Regressionsgleichung geschätzter N-Aufnahme für die Termine Herbst (links) und BBCH 50 (rechts).	116
Abb. 15: Regressionsgleichungen zwischen gemessener und der nach der Methode der LK-SH geschätzten N-Aufnahme für die Termine Herbst (links) und BBCH 50 (rechts).	117
Abb. 16: Regressionen zwischen der gesamten N-Düngermenge (links) sowie der N-Düngermenge Frühjahr (rechts) und dem Kornertrag.....	119
Abb. 17: Lineare Regression zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr.....	121
Abb. 18: Lineare Regression zwischen der N-Aufnahme zu VB und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr.....	122
Abb. 19: Lineare Regression zwischen der N-Aufnahme zu BBCH 30 und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr.....	123
Abb. 20: Verlauf der Produktionsfunktion ohne (alt) und mit (neu) akzeptiertem Ertragsrückgang von 1% in Abhängigkeit der N-Düngung und des Kornertrags.	124
Abb. 21: Regression zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr.....	125
Abb. 22: Düngekurven für die optimale N-Düngermenge von Winterraps im Frühjahr in Abhängigkeit der N-Aufnahme im Herbst für verschiedene Ertragsniveaus.	127
Abb. 23: Mittlerer N-Saldo der Düngeverfahren DSN, Mapping und Online + Mapping für unterschiedliche Ertragsniveaus.....	131
Abb. 24: Verlauf der N-Aufnahme in der Vegetation von zweizeiliger Wintergerste der N-Stufen N 1, N 5 und N 11 im Mittel von zwei Standorten.	144
Abb. 25: Verlauf der N-Aufnahme in der Vegetation von mehrzeiliger Wintergerste der N-Stufen N 1, N 5 und N 11 im Mittel von zwei Standorten.	144
Abb. 26: TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste der N-Stufen N 1, N 5 und N 11 im Mittel von zwei Standorten im Verlauf der Vegetation.....	148
Abb. 27: TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste der N-Stufen N 1, N 5 und N 11 im Mittel von zwei Standorten im Verlauf der Vegetation.....	148
Abb. 28: Entwicklung von N-Aufnahme und TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste und Verlauf der Messwerte der Vegetationsindices VX 1, VX 2, VX 3, NDVI, IRR und IRG während der Vegetation für die N-Stufen N 1, N 5 und N 14 im Mittel beider Standorte.	152

Abb. 29: Verlauf der Messwerte der Vegetationsindices IR 1, SAVI, NDI 2 und SR 2 während der Vegetation in zweizeiliger Wintergerste für die N-Stufen N 1, N 5 und N 14 im Mittel beider Standorte.	154
Abb. 30: Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme von zweizeiliger Gerste und den Messwerten der Indices NDVI, VX 2 und IRG zu BBCH 32 (links) und BBCH 49 (rechts).	158
Abb. 31: Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme [kg ha^{-1}] von mehrzeilige Gerste und den Messwerten der Indices NDVI, VX 2 und IRG zu BBCH 32 (links) und BBCH 49 (rechts).	160
Abb. 32: Regressionen zwischen dem Frischmasseaufwuchs und der N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste für BBCH 32 und BBCH 49.	174
Abb. 33: Regressionsanalysen zwischen gemessener und geschätzter N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste zu BBCH 30 und BBCH 49.	176
Abb. 34: Regression zwischen dem Vegetationsindex VX 2 und der N-Aufnahme von zweizeiliger (links) und mehrzeiliger (rechts) Wintergerste zu verschiedenen Terminen.	178
Abb. 35: Regression von Parametern der linearen Regressionsgleichungen zwischen VX 2 und N-Aufnahme zur durchschnittlichen N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste.	181
Abb. 36: Regression von Parametern der linearen Regressionsgleichungen zwischen VX 1 und N-Aufnahme zur durchschnittlichen N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste.	182
Abb. 37: Regression von Parametern der linearen Regressionsgleichungen zwischen IRG und N-Aufnahme zur durchschnittlichen N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste.	183
Abb. 38: N-Aufnahmekurven für zweizeilige (oben) und mehrzeilige (unten) Wintergerste für verschiedene Ertragsniveaus.	188
Abb. 39: Schema zur Berechnung der benötigten N-Düngermenge in Wintergerste (verändert nach MAIDL, 2011 ^A , MAIDL 2011 ^B).	189
Abb. 40: Mittlerer N-Saldo der Düngeverfahren DSN, Mapping und Online + Mapping für unterschiedliche Ertragsniveaus.	192

- Abb. A 1:** Entwicklung von N-Aufnahme und TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste und Verlauf der Messwerte der Vegetationsindices VX 1, VX 2, VX 3, NDVI, IRR und IRG während der Vegetation für die N-Stufen N 1, N 5 und N 14 im Mittel beider Standorte. 264
- Abb. A 2:** Verlauf der Messwerte der Vegetationsindices IR 1, SAVI, NDI 2 und SR 2 während der Vegetation in mehrzeiliger Wintergerste für die N-Stufen N 1, N 5 und N 14 im Mittel beider Standorte. 265

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aufteilung der nach der <i>réglette acote colza</i> berechneten N-Düngermengen im Frühjahr in Abhängigkeit der Pflanzenentwicklung von unterschiedlichen Entwicklungsstadien.....	38
Tab. 2: Übersicht und Einschätzung der Düngesysteme der verschiedenen Länder.....	41
Tab. 3: Übersicht über die in den Jahren 2012 bis 2014 an den Standorten Roggenstein und Dürnast durchgeführten Versuche.....	43
Tab. 4: Bodenphysikalische und bodenchemische Kennwerte der Versuchsschläge in Roggenstein.....	44
Tab. 5: Bodenphysikalische und bodenchemische Kennwerte der Versuchsschläge in Dürnast.....	45
Tab. 6: Höhenlage, durchschnittlicher Jahresniederschlag und mittlere Lufttemperatur der Versuchsstationen Roggenstein und Dürnast.....	45
Tab. 7: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 sowie das langjährige Temperaturmittel (1981 bis 2010) an der Versuchsstation Roggenstein.....	47
Tab. 8: Monatliche Niederschlagsmengen [mm] im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 sowie das langjährige Niederschlagsmittel (1981 bis 2010) an der Versuchsstation Roggenstein.....	47
Tab. 9: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 sowie das langjährige Temperaturmittel (1981 bis 2010) an der Versuchsstation Dürnast.....	48
Tab. 10: Monatliche Niederschlagsmengen [mm] im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 sowie das langjährige Niederschlagsmittel (1981 bis 2010) an der Versuchsstation Dürnast.....	48
Tab. 11: Termine für die Aussaat und Ernte der N-Steigerungsversuche HE und NE Winterraps in Roggenstein, 2012 bis 2014.....	49
Tab. 12: Bewertung der Sorteneigenschaften für die Rapsorte Xenon (BSA, 2013).....	50
Tab. 13: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha ⁻¹] des N-Steigerungsversuchs HE und NE Winterraps in Roggenstein, in den Jahren 2013 und 2014.....	51
Tab. 14: Termine für die Aussaat und Ernte des N-Steigerungsversuchs HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste in Roggenstein, 2012 bis 2014.....	52

Tab. 15: Bewertung der Sorteneigenschaften für die mehrzeilige Sorte Meridian und die zweizeilige Sorte Sandra.....	53
Tab. 16: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des N-Steigerungsversuchs HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste in Roggenstein, in den Jahren 2013 und 2014.....	54
Tab. 17: Termine für die Aussaat und Ernte von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste der N-Steigerungsversuche in Dürnast, 2012 bis 2014.....	55
Tab. 18: Bewertung der Sorteneigenschaften für die mehrzeilige Sorte Highlight und die zweizeilige Sorte Duet.	56
Tab. 19: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des N-Steigerungsversuchs HE und NE mehrzeilige Wintergerste in Dürnast sowie des N-Steigerungsversuchs zweizeilige Wintergerste in Dürnast, dargestellt am Beispiel des Jahres 2013.	56
Tab. 20: Bewertung der Sorteneigenschaften für verschiedene Rapsorten im Sortenversuch Raps am Beispiel des Versuchsjahres 2013.....	58
Tab. 21: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des Sortenversuchs Raps.....	58
Tab. 22: Bewertung der Sorteneigenschaften von zwei- und mehrzeiligen Sortentypen im Sortenversuch Wintergerste, Jahr 2010 bis 2013.....	59
Tab. 23: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des Sortenversuchs Wintergerste.	59
Tab. 24: Aussaat- und Erntetermine in den Streifenversuchen Wintergerste und Raps im Jahr 2013.....	60
Tab. 25: Bewertung der Sorteneigenschaften der Rapsorte Avatar im Streifenversuch.	60
Tab. 26: Erwartete Kornerträge [dt ha^{-1}] im Bereich des niedrigen, mittleren und hohen Ertragsniveaus in den Streifenversuchen Raps und Gerste, 2013.....	61
Tab. 27: N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des Streifenversuchs Winterraps mit den Düngesystemen DSN, Mapping und Online + Mapping, aufgetragen nach Düngetermin und Ertragsniveau, 2013.	63
Tab. 28: N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des Streifenversuchs Gerste mit den Düngesystemen DSN, Mapping und Online + Mapping, aufgetragen nach Düngetermin und Ertragsniveau, 2013.	65
Tab. 29: Übersicht über die ausgewerteten Versuche des Standortes Roggenstein.....	68
Tab. 30: Übersicht über die ausgewerteten Versuche des Standortes Dürnast.....	68

Tab. 31: Datum der Biomasseschnitte des N-Steigerungsversuchs HE und NE Winterraps sowie des Sortenversuchs von Winterraps zu verschiedenen Terminen in Roggenstein, 2012 bis 2014.	69
Tab. 32: Datum der Biomasseschnitte des N-Steigerungsversuchs HE und NE Roggenstein zu verschiedenen Terminen von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste, 2012 bis 2014.	70
Tab. 33: Datum der Biomasseschnitte des N-Steigerungsversuchs HE und NE von mehrzeiliger und des N-Steigerungsversuchs für zweizeilige Wintergerste in Dürnast, 2012 bis 2013 sowie des Sortenversuchs Wintergerste in Dürnast 2012 zu verschiedenen Terminen.....	71
Tab. 34: Detaillierte Auflistung der technischen Eigenschaften des in den Versuchen verwendeten Spektrometers tec5.	74
Tab. 35: Gleichungen und Quellen der in den Versuchen verwendeten Vegetationsindices..	75
Tab. 36: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den Kornertrag, den N-Entzug Korn, den N-Saldo und die N-Effizienz mit den Faktoren N-Stufe und Jahr.	80
Tab. 37: Mittelwerte für den Kornertrag, den N-Entzug Korn, den N-Saldo und die N-Effizienz.....	81
Tab. 38: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Faktoren N-Stufe und Jahr für Ölgehalt und Proteingehalt.	83
Tab. 39: Mittelwerte für den Öl- und Proteingehalt im Rapskorn.....	84
Tab. 40: Bestimmtheitsmaße sowie Y-Achsenabschnitt (b-Wert) und Steigung (a-Wert) der Regressionsgleichungen zwischen der N-Düngermenge und dem Öl- bzw. Proteingehalt im Korn, dargestellt nach Einzeljahren und Standorten.	85
Tab. 41: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Faktoren N-Stufe und Jahr für den Kornertrag, den Öl- und Proteingehalt, den N-Entzug Korn, den N-Saldo sowie die N-Effizienz.	87
Tab. 42: Mittlerer Kornertrag, Proteingehalt und Ölgehalt in Abhängigkeit der N-Verteilung.	87
Tab. 43: Mittlerer N-Entzug Korn, N-Saldo und mittlere N-Effizienz in Abhängigkeit der N-Verteilung.	88
Tab. 44: Mittelwerte über alle N-Stufen auf dem HE- und NE-Standort für den Kornertrag, den N-Entzug Korn, den Öl- und Proteingehalt, den N-Saldo und die N-Effizienz.	89

Tab. 45: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs von Raps mit den Hauptfaktoren N-Stufe und Jahr für verschiedene Termine.	89
Tab. 46: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs von Raps mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort zu verschiedenen Terminen.....	91
Tab. 47: Mittlerer TM-Aufwuchs in Raps zu BBCH 85 im HE- und NE-Bereich.....	92
Tab. 48: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die N-Aufnahme von Raps mit den Hauptfaktoren N-Stufe und Jahr zu verschiedenen Terminen.	93
Tab. 49: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable N-Aufnahme mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort zu verschiedenen Terminen.	94
Tab. 50: Mittlere N-Aufnahme von Raps zu BBCH 85 im HE- und NE-Bereich.....	96
Tab. 51: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme von Winterraps zu den Terminen Herbst und VB mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Standort und Jahr.....	96
Tab. 52: Mittelwerte für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme von Raps im Herbst und zu VB in den N-Stufen N 1, N 3 und N 15, dargestellt nach Einzeljahren, gemittelt über den HE- und NE-Standort.	97
Tab. 53: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen N-Aufnahme in Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen.	103
Tab. 54: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen N-Aufnahme in Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen.	104
Tab. 55: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen N-Aufnahme in Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen.	105
Tab. 56: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen dem TM-Aufwuchs in Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen.	106
Tab. 57: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme mit den unabhängigen Faktoren Sorte, N-Stufe und Jahr für verschiedene Entwicklungsstadien.	107

Tab. 58: Mittelwerte für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme von Rapsorten zu unterschiedlichen Terminen, Mittelwert über alle N-Stufen.	108
Tab. 59: SSQ-Werte und Signifikanzen der Kovarianzanalyse für die verschiedenen untersuchten Vegetationsindices mit der Kovariaten N-Aufnahme und den unabhängigen Faktoren Sorte sowie Jahr zu unterschiedlichen Terminen.....	110
Tab. 60: TM-Aufwuchs und N-Aufnahme von Rapsorten zu den Terminen Herbst und BBCH 50, Mittelwert über alle N-Stufen.	111
Tab. 61: TM-Aufwuchs und N-Aufnahme von Rapsorten zu den Terminen Herbst und BBCH 30, Mittelwert über alle N-Stufen.	112
Tab. 62: SSQ-Werte und Signifikanzen der Kovarianzanalyse für die verschiedenen untersuchten Vegetationsindices mit der Kovariaten N-Aufnahme und dem unabhängigen Faktor Sorte zu unterschiedlichen Terminen.	113
Tab. 63: SSQ-Werte und Signifikanzen der Kovarianzanalyse für die verschiedenen untersuchten Vegetationsindices mit der Kovariaten N-Aufnahme und dem unabhängigen Faktor Sorte zu unterschiedlichen Terminen.	113
Tab. 64: Bestimmtheitsmaße sowie Gleichung der linearen Regressionsgeraden aus der Regression zwischen dem FM-Aufwuchs je m ² und der N-Aufnahme pro ha zu verschiedenen Terminen.	115
Tab. 65: Bestimmtheitsmaße sowie Steigung (a-Wert) und Y-Achsenabschnitt (b-Wert) der linearen Regressionsgleichung ($f(x) = a \cdot x + b$) zwischen gemessener und über die Regressionsgleichungen geschätzter N-Aufnahme für verschiedene Termine.	116
Tab. 66: Mittlere Abweichung [kg ha ⁻¹ N] der über die Schätzgleichungen bzw. nach dem Verfahren der LK-SH geschätzten N-Aufnahme von der gemessenen N-Aufnahme zu verschiedenen Terminen.	116
Tab. 67: Bestimmtheitsmaße sowie Steigung (a-Wert) und Y-Achsenabschnitt (b-Wert) der linearen Regressionsgleichung ($f(x) = a \cdot x + b$) zwischen gemessener und der nach der LK-SH geschätzten N-Aufnahme für verschiedene Termine.....	118
Tab. 68: Bestimmtheitsmaße und quadratische Regressionsgleichungen zwischen der N-Düngermenge zu VB, BBCH 30 und BBCH 50 und dem Kornertrag.	119
Tab. 69: Durchschnittliche N-Verwertung im Frühjahr und das mittlere Ertragsniveau der HE- und NE-Zonen.....	126
Tab. 70: Mittlere Kornerträge [dt ha ⁻¹] von Jahren mit schwachen (2007 & 2014) und starken Auswinterungsschäden (2009 & 2012), ausgewählte N-Stufen.	128

Tab. 71: Mittelwerte für die applizierte N-Düngermenge, den Kornertrag, den Öl- und Proteingehalt und die NKfL unterschiedlicher Düngeverfahren.	129
Tab. 72: Mittlerer Kornertrag [dt ha ⁻¹] in den Düngeverfahren DSN, Mapping sowie Online + Mapping, aufgetragen nach Ertragsniveau unterschiedlicher Düngeverfahren.	129
Tab. 73: Mittelwerte für den N-Entzug über die applizierte N-Düngermenge, den Kornertrag, den Öl- und Proteingehalt und die NKfL.....	130
Tab. 74: F-Werte und Signifikanzen des Kruskal-Wallis-Tests für die abhängigen Variablen Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug Korn, N-Saldo und N-Effizienz mit den unabhängigen Faktoren N-Stufe, Sortentyp und Standort.	132
Tab. 75: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die unabhängigen Variablen Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug Korn, N-Saldo und N-Effizienz mit den unabhängigen Faktoren N-Stufe und Jahr, nach Sortentyp und Standort getrennt.....	133
Tab. 76: Mittlerer Kornertrag [dt ha ⁻¹] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort.	134
Tab. 77: Mittlerer Proteingehalt [%] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort.....	136
Tab. 78: Mittlerer N-Entzug Korn [kg ha ⁻¹] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort.....	137
Tab. 79: Mittlerer N-Saldo [kg ha ⁻¹] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort.....	139
Tab. 80: Mittlere N-Effizienz [kg kg ⁻¹] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort.	140
Tab. 81: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Sortentyp und Termin sowie den abhängigen Variablen N-Aufnahme, TM-Aufwuchs.	142
Tab. 82: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort für die N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien.	142
Tab. 83: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort für die N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien.	143

Tab. 84: Verlauf der N-Aufnahme [kg ha ⁻¹] von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste während der Vegetation auf dem HE- und NE-Standort, Mittelwerte über alle N-Stufen.	145
Tab. 85: Durchschnittliche N-Aufnahmewerte [kg ha ⁻¹] von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste auf dem HE- und NE-Standort für ausgewählte N-Stufen zu BBCH 92.	146
Tab. 86: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort für den TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien.....	147
Tab. 87: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort für den TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien.....	147
Tab. 88: TM-Aufwuchs [dt ha ⁻¹] von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste während der Vegetation auf dem HE- und NE-Standort, Mittelwerte über alle N-Stufen.....	149
Tab. 89: Durchschnittlicher TM-Aufwuchs [dt ha ⁻¹] von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste auf dem HE- und NE-Standort für ausgewählte N-Stufen zu BBCH 65.	150
Tab. 90: Bestimmtheitsmaße aus der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen.....	157
Tab. 91: Bestimmtheitsmaße aus der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen....	159
Tab. 92: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen.....	161
Tab. 93: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen....	162
Tab. 94: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen dem TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen....	163
Tab. 95: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen dem TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen....	164

Tab. 96: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable N-Aufnahme zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Faktoren Jahr, Sortentyp und N-Stufe.	165
Tab. 97: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable TM-Aufwuchs zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Faktoren Jahr, Sortentyp und N-Stufe.	165
Tab. 98: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Hauptfaktoren Jahr, Sorte und N-Stufe.	166
Tab. 99: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Hauptfaktoren Jahr, Sorte und N-Stufe.	166
Tab. 100: Mittlerer TM-Aufwuchs [dt ha^{-1}] von zweizeiliger Wintergerste im Verlauf der Vegetation für verschiedene Sorten.	167
Tab. 101: Mittlerer TM-Aufwuchs [dt ha^{-1}] von mehrzeiliger Wintergerste im Verlauf der Vegetation für verschiedene Sorten.	167
Tab. 102: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Hauptfaktoren Jahr, Sorte und N-Stufe.	168
Tab. 103: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Hauptfaktoren Jahr, Sorte und N-Stufe.	168
Tab. 104: Mittlere N-Aufnahme [kg ha^{-1}] von zweizeiliger Wintergerste im Verlauf der Vegetation für verschiedene Sorten.	169
Tab. 105: Mittlere N-Aufnahme [kg ha^{-1}] von mehrzeiliger Wintergerste im Verlauf der Vegetation für verschiedene Sorten.	169
Tab. 106: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für verschiedene Vegetationsindices als abhängige Variablen mit den Faktoren Termin, Sortentyp und N-Stufe.	170
Tab. 107: SSQ-Werte der Kovarianzanalyse für den VX 1, VX 2, VX 3, NDVI, IRR und IRG bei der mehrzeiligen Wintergerste mit den Faktoren Sorte und Jahr sowie der Kovariaten N-Aufnahme, aufgeteilt nach BBCH-Stadien.	172

Tab. 108: SSQ-Werte der Kovarianzanalyse für den IR 1 , NDI 2, SR 1 und SR 2 bei der mehrzeiligen Wintergerste mit den Faktoren Sorte und Jahr sowie der Kovariaten N-Aufnahme, aufgeteilt nach BBCH-Stadien.	173
Tab. 109: Bestimmtheitsmaße sowie lineare Schätzgleichungen aus der Regressionsanalyse zwischen dem Frischmasseaufwuchs und der N-Aufnahme von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste.....	175
Tab. 110: Bestimmtheitsmaße der Regression zwischen gemessener und geschätzter N-Aufnahme von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste sowie die durchschnittliche Abweichung und Standardabweichung der geschätzten N-Aufnahme von der gemessenen N-Aufnahme.....	176
Tab. 111: Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichungen zwischen den Messwerten von VX 1, VX 2 und IRG und der N-Aufnahme zu unterschiedlichen Terminen für zwei- und mehrzeilige Wintergerste.....	178
Tab. 112: Bestimmtheitsmaße, Steigung (a-Wert) und Y-Achsenabschnitt (b-Wert) der Regressionsgleichungen zwischen den Messwerten von VX 1, VX 2 und IRG und der N-Aufnahme zu unterschiedlichen Terminen für zwei- und mehrzeilige Wintergerste.	179
Tab. 113: Bestimmtheitsmaße und quadratische Regressionsgleichung zwischen der terminspezifischen N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste und dem Kornertrag.	185
Tab. 114: Terminspezifische originale (NA orig.) und relative (NA rel.) N-Aufnahmewerte sowie angepasste N-Aufnahmen (NA neu) für zwei- und mehrzeilige Wintergerste bei einer Ertragsersparung von 80 dt ha ⁻¹	186
Tab. 115: Durchschnittlicher N-Gehalt im Stroh und mittleres Korn-Strohverhältnis von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste auf HE- und NE-Standorten.....	187
Tab. 116: Mittelwerte für die applizierte N-Düngermenge, Kornertrag, Proteingehalt sowie die NKfL unterschiedlicher Düngeverfahren.	190
Tab. 117: Mittelwerte für den N-Entzug über das Korn, den N-Saldo sowie die N-Effizienz unterschiedlicher Düngeverfahren.....	191
Tab. A 1: Schema zur Berechnung der N-Düngermengen für Winterraps nach dem Düngerberatungssystem Stickstoff (DSN) der LfL.....	260
Tab. A 2: Schema zur Berechnung der N-Düngermengen für mehrzeilige Wintergerste nach dem Düngerberatungssystem Stickstoff (DSN) der LfL.	261

Tab. A 3: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Faktoren N-Stufe, Jahr und Standort für die Variablen Kornertrag, N-Entzug Korn, Öl- und Proteingehalt, N-Saldo und die N-Effizienz.....	261
Tab. A 4: Minimale (min.) und maximale (max.) Bestimmtheitsmaße der für die Einzeljahre und Termine gerechneten quadratischen Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme von Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices.....	262
Tab. A 5: Minimale (min.) und maximale (max.) Bestimmtheitsmaße der für die Einzeljahre und Termine gerechneten quadratischen Regressionsgleichungen zwischen dem TM-Aufwuchs von Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices.	262
Tab. A 6: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme mit den unabhängigen Faktoren für die Entwicklungsstadien Herbst und BBCH 50.....	263
Tab. A 7: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme mit den unabhängigen Faktoren für die Entwicklungsstadien Herbst und BBCH 30.....	263
Tab. A 8: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Düngeverfahren und Ertragsniveau für die Variablen N-Düngermenge, Kornertrag, Öl- und Proteingehalt und die NKfL.....	263
Tab. A 9: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Düngeverfahren und Ertragsniveau für die Variablen N-Entzug Korn, N-Saldo sowie die N-Effizienz.....	263
Tab. A 10: Minimale (min.) und maximale (max.) Bestimmtheitsmaße der für die Einzeljahre und Termine gerechneten quadratischen Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices.	265
Tab. A 11: Minimale (min.) und maximale (max.) Bestimmtheitsmaße der für die Einzeljahre und Termine gerechneten quadratischen Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices.	266
Tab. A 12: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängigen Variablen N-Aufnahme und TM-Aufwuchs mit den Faktoren Termin, Sortentyp und N-Stufe.....	266
Tab. A 13: SSQ-Werte der Kovarianzanalyse für den VX 1, VX 2, VX 3, NDVI, IRR und IRG bei der zweizeiligen Wintergerste mit den Faktoren Sorte und Jahr sowie der Kovariaten N-Aufnahme, aufgeteilt nach BBCH-Stadien.....	267

Tab. A 14: SSQ-Werte der Kovarianzanalyse für den IR 1 , NDI 2, SR 1 und SR 2 bei der zweizeiligen Wintergerste mit den Faktoren Sorte und Jahr sowie der Kovariaten N-Aufnahme, aufgeteilt nach BBCH-Stadien.	268
Tab. A 15: Bestimmtheitsmaße sowie Parameter der linearen Regressionsgleichung zwischen den Messwerten des VX 2 und der N-Aufnahme, nach Jahr und Termin, zwei- und mehrzeilige Wintergerste.....	269
Tab. A 16: Bestimmtheitsmaße sowie Parameter der linearen Regressionsgleichung zwischen den Messwerten des VX 1 und der N-Aufnahme, nach Jahr und Termin, zwei- und mehrzeilige Wintergerste.....	270
Tab. A 17: Bestimmtheitsmaße sowie Parameter der linearen Regressionsgleichung zwischen den Messwerten des IRG und der N-Aufnahme, nach Jahr und Termin, zwei- und mehrzeilige Wintergerste.....	271
Tab. A 18: Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichung zwischen der terminspezifischen N-Aufnahme und dem Kornertrag von zweizeiliger Wintergerste, dargestellt nach Einzeljahren an den Standorten Dürnast und Roggenstein.	272
Tab. A 19: Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichung zwischen der terminspezifischen N-Aufnahme und dem Kornertrag von mehrzeiliger Wintergerste, dargestellt nach Einzeljahren.	273
Tab. A 20: Bestimmtheitsmaße und quadratische Regressionsgleichung zwischen der terminspezifischen N-Aufnahme mehrzeiliger Wintergerste und dem Kornertrag.....	274
Tab. A 21: Tage zwischen den einzelnen Entwicklungsstadien für zwei- und mehrzeilige Wintergerste, gemittelt über die Standorte Dürnast und Roggenstein.	274
Tab. A 22: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Düngeverfahren und Ertragsniveau für die Variablen N-Düngermenge, Kornertrag, Proteingehalt und NKfL.	274
Tab. A 23: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Düngeverfahren und Ertragsniveau für die Variablen N-Düngermenge, Kornertrag, Proteingehalt und NKfL.	275

Glossar

BBCH-Code: Über den BBCH-Code werden die Entwicklungsstadien von Pflanzen einheitlich beschrieben. Voneinander deutlich abgrenzbare, längere Entwicklungsstadien der Pflanzen (Makrostadien) sind in zehn Abschnitte, aufsteigend von 0 bis 9, unterteilt. Um die Pflanzenentwicklung innerhalb der Makrostadien genauer beschreiben zu können, werden für jede Kulturart spezifische Mikrostadien, ebenfalls in einem Intervall von 0 bis 9, angegeben (WITZENBERGER et al., 1989, WEBER & BLEIHOLDER, 1990, HACK et al., 1992).

Düngesystem: Das Düngesystem besteht aus mehreren Teilen: Einem Algorithmus, mit dem über einen geeigneten Vegetationsindex die N-Aufnahme im Pflanzenbestand geschätzt wird, sowie einem Düngealgorithmus, über den die optimale, ertrags- und qualitätsorientierte N-Düngermenge sowie die optimale N-Verteilung in Abhängigkeit des Ernährungszustandes der Pflanzen kalkuliert wird.

Düngesystem Online + Mapping: Dieses Düngesystem kombiniert die Erfassung des Ernährungszustandes während der Überfahrt durch einen Sensor mit dem Ertragspotential des Teilschlags. Über den aktuellen Ernährungszustand (Online) sowie die Ertragserwartung (Mapping) wird eine an den Standort und die Pflanzenentwicklung angepasste N-Düngung erreicht.

Hochertragsstandort (HE-Standort): Als Hochertragsstandort werden Flächen mit hohem Ertragspotential bezeichnet, die aufgrund ihrer Bodeneigenschaften (z.B. Textur) Stickstoff und Wasser über einen längeren Zeitraum speichern und den Pflanzen während des Wachstums zur Verfügung stellen können. Auf diesen Standorten sind bei ausreichend Nährstoffversorgung hohe und stabile Erträge bei guter Qualität zu erzielen.

Niedrigertragsstandort (NE-Standort): Mit Niedrigertragsstandort werden Flächen mit geringem Ertragspotential bezeichnet, die aufgrund der Bodentextur (z.B. sandige Böden) und dem damit verbundenen geringen Wasser- und Nährstoffspeichervermögen keine hohen Erträge und Produktqualitäten ermöglichen.

N-Effizienz: Mit der N-Effizienz wird ausgedrückt, wie effizient der N-Dünger von den Pflanzen in Ertrag umgesetzt wird. Hierzu wird der Kornertrag (kg) je kg Mineraldünger-N kalkuliert.

N-Entzug Korn: Der N-Entzug über das Korn beschreibt die Menge N, die im Ernteprodukt gespeichert sowie vom Feld abgefahren wird. Der N-Entzug wird durch Multiplikation des Kornertrags mit dem N-Gehalt berechnet.

N-Saldo: Der N-Saldo ist die Differenz zwischen dem zugeführten organischen und mineralischen N-Dünger und dem über das Ernteprodukt entzogenen Stickstoff (N-Entzug Korn). Positive N-Salden kennzeichnen das N-Verlustpotential, negative N-Salden die Minderung des Boden-N-Vorrats.

N-Verwertung: Diese Größe gibt das Verhältnis zwischen N-Entzug und der Summe des applizierten N-Düngers in Prozent an.

Vegetationsindex (Index): Ein Vegetationsindex besteht aus bestimmten aus dem Reflexionsspektrum von Pflanzen selektierten Wellenlängen, die über ein mathematisches Rechenverfahren zueinander in Beziehung gesetzt werden. Durch Kombination unterschiedlicher Wellenlängen und Rechenverfahren entsteht so eine Vielzahl unterschiedlicher Vegetationsindices. Diese dienen zur Abbildung agronomischer Größen wie der N-Aufnahme, dem TM-Aufwuchs und dem N-Gehalt.

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung	Abkürzung	Bezeichnung
Abb.	Abbildung	mz	mehrzeilig
Abb. A	Abbildung im Anhang	N	Stickstoff
BBCH	Codierung der Entwicklungsstadien von Pflanzen	N 1 etc.	N-Stufe 1 etc.
BFI	Blattflächenindex	N ₂ O	Lachgas (Distickstoffoxid)
°C	Grad Celsius	NDI 2	Normalised Difference Index 2
cm	Zentimeter	NDVI	Normalised Difference Vegetation Index
C _t	Gesamt-Kohlenstoff im Boden	NE	Niedrigertrag
d	Tag	nFK	nutzbare Feldkapazität
DSN	Düngeberatungssystem Stickstoff	NIR	Nahinfrarot
dt	Dezitonne	NIRS	Nahinfrarot Spektroskopie
DWD	Deutscher Wetterdienst	NKfL	N-Kostenfreie Leistung
€	Euro	nm	Nanometer
et al.	et alii (Latein: und andere)	N _{min}	mineralischer Stickstoff im Boden
FM	Frischmasse	NO ₃ ⁻	Nitrat
g	Gramm	N _t	Gesamt-Stickstoff im Boden
GV	Großvieheinheit	P	Phosphor
H	Hybridsorte (Raps)	R	Reflexion
ha	Hektar	R ²	Bestimmtheitsmaß
HE	Hochertrag	REIP	Red Edge Inflection Point
HZ	Halbzwergsorte (Raps)	SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
IR	Infrarot	SR 1 etc.	Simple Ratio 1 etc.
IRG	Infrared Green Index	Tab.	Tabelle
IRR	Infrared Red Index	Tab. A	Tabelle im Anhang
K	Kalium	TKG	Tausend Korn Gewicht
kg	Kilogramm	TM	Trockenmasse
λ	Wellenlänge	TS	Trockensubstanz
L	Linien sorte (Raps)	VB	Vegetationsbeginn
LK-SH	Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein	VX 1 etc.	Vegetationsindex 1 etc.
m	Meter	zz	zweizeilig
m ²	Quadratmeter		
mm	Millimeter		

1 Einleitung

Stickstoff (N) ist in vielen Anbausystemen der wichtigste ertragslimitierende Nährstoff. Durch den verstärkten N-Einsatz, vor allem als Mineral-N, konnten die Erträge der Kulturpflanzen wesentlich gesteigert werden. Die bessere N-Versorgung ist neben dem Züchtungsfortschritt und dem Pflanzenschutz für die deutlichen Ertragszuwächse der letzten Jahrzehnte verantwortlich (ERISMAN ET AL., 2008, FAO, 2015). Allerdings sank mit zunehmendem N-Einsatz die N-Effizienz deutlich (TILMAN ET AL., 2002) und es kam zunehmend zu N-Überschussproblemen. In Deutschland und der EU treten hohe N-Salden bei intensiv gedüngten Kulturarten wie Winterweizen, Winterraps und im Gemüsebau, vor allem aber in viehstarken Regionen mit hohem Gülleanfall und kombinierter organisch-mineralischer Düngung auf (ISERMEYER & SCHLEEF, 1995, BEHRENS et al., 2001, SIELING & KAGE, 2006). Die Ursachen für hohe N-Überschüsse sind vielfältig. Hierzu zählen die zu geringe Beachtung zu erwartender Erträge und der Flächenheterogenität, was eine unrealistische Einschätzung des Ertragspotentials zur Folge hat. Sicherheitszuschläge zur Minderung von Ertragsrisiken sowie zu geringe Berücksichtigung der N-Mineralisation aus dem Boden-N-Pool und der Nährstoffverfügbarkeit organischer Dünger sind ebenfalls wichtige Faktoren.

Der überschüssige, nicht von Pflanzen aufgenommene Stickstoff unterliegt verschiedenen Umsetzungs- und Verlustprozessen im Boden. Ein Teil wird organisch im Boden gebunden, während ein anderer Teil gasförmig entweicht. Das kann direkt bei der Ausbringung als NH_4^+ bzw. NH_3 geschehen oder aber nach Nitrifikation und Denitrifikation als klimaschädliches Lachgas (N_2O). Ebenso gelangt Stickstoff als Nitrat (NO_3^-) in Oberflächen- und Grundwasser (ABBASI & ADAMS, 2000, GALLOWAY ET AL., 2003, DELIN & STENBERG, 2014).

Um eine optimale N-Versorgung und bei gleichzeitig hoher Nährstoffeffizienz zu erreichen sowie negative Auswirkungen auf die Umwelt zu vermeiden, wurden von den Bundesländern Beratungsempfehlungen zur N-Düngung, wie das Düngeberatungssystem Stickstoff (DSN) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) oder das System BEFU der Sächsischen Landesanstalt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) entwickelt. Diese Systeme berücksichtigen unter anderem den N_{\min} -Gehalt des Bodens, die Ertragserwartung der jeweiligen Kultur und die Düngung mit Wirtschaftsdüngern (WENDLAND et al., 2012, LfL, 2014, FÖRSTER, 2013, SCHLIEPHAKE et al., 2014). Neben der Beratung soll über die Düngeverordnung das Überangebot an Stickstoff reduziert und somit eine verbesserte N-Effizienz erreicht werden. Gemäß der DÜNGEVERORDNUNG (2006) darf der N-Saldo im Mittel von drei Jahren nicht mehr als 60 kg ha^{-1} betragen.

Trotz dieser Maßnahmen überschreitet immer noch die Hälfte der Trinkwasserbrunnen den von der Trinkwasserverordnung vorgegebenen Grenzwert von $50 \text{ mg l}^{-1} \text{ NO}_3^-$ (TRINKWASSERVERORDNUNG, 2001). In einigen Regionen werden sogar wieder steigende Nitratwerte gemeldet (KEPPNER et al., 2012), was auf unangepasste N-Düngergaben schließen lässt.

Um diese N-Überschüsse weiter reduzieren zu können, ohne das erreichte hohe Ertrags- und Qualitätsniveau zu verlassen, sind neue Methoden der Pflanzenernährung notwendig. So wurden in den letzten Jahren sensorbasierte N-Düngeverfahren entwickelt, die auf der Messung der N-Aufnahme der Pflanzenbestände basieren. Einige Verfahren leiten den N-Düngebedarf ausschließlich über die aktuelle N-Aufnahme des Pflanzenbestandes ab (BOSCH, 2011, YARRA, 2014, AGRICON, 2014^A). Das von der TU München entwickelte Düngesystem berücksichtigt neben dem vom Sensor bestimmten aktuellen N-Status der Pflanzen zusätzlich die Flächenheterogenität in Form des Ertragspotentials der einzelnen Teilflächen (MAIDL, 2011^A, MAIDL 2011^B). Um die N-Aufnahme aus der Pflanzenreflexion schätzen zu können, sind Vegetationsindices nötig. Allerdings zeigen Untersuchungen, dass sich nicht jeder Index für jede Kulturart gleichermaßen eignet.

Diese sensorbasierten Düngesysteme wurden vor allem für die Fruchtart Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) entwickelt, für die wichtigen Kulturarten Winterraps (*Brassica napus* L.) und Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) sind entsprechende Systeme noch nicht verfügbar bzw. noch nicht ausgereift. Beide Ackerkulturen nehmen etwa ein Fünftel des Ackerlandes in Deutschland ein (STAT. BUNDESAMT, 2015). Somit ist in Deutschland Winterraps nach Weizen und Mais die dritt wichtigste Kulturart und Wintergerste nach Weizen die zweithäufigste Getreideart.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von N-Düngesystemen für die Kulturarten Wintergerste und Winterraps. Um eine sichere Datenbasis für die Ableitung dieser Systeme zu schaffen, wurden umfangreiche mehrjährige (2012 bis 2014) Feldversuche mit unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt.

Zur besseren Absicherung der Ergebnisse und zur Verminderung von Jahreseffekten wurden, ergänzend zu den eigenen Versuchsdaten, für die Auswertung und die Entwicklung der Düngesysteme Daten aus früheren Versuchen und Versuchsjahren verwendet. Der Versuchsaufbau sowie die Durchführung waren seit 2002 (Wintergerste) und 2005 (Winterraps) mit den eigenen vergleichbar.

Die N-Steigerungsversuche in Winterraps sowie zwei- und mehrzeiliger Wintergerste wurden an mehreren Versuchsstationen der TU München unter differenzierten Standortbedingungen angelegt. In diesen N-Steigerungsversuchen beider Kulturarten wurde die Auswirkung einer in Menge und Termin differenzierten N-Düngung auf die Ertragsbildung, die Qualitätsparameter der Ernteprodukte sowie die Verwertung des Mineraldünger-N untersucht. Außerdem dienten diese Versuche dazu, die Entwicklung des oberirdischen Biomasseaufwuchs und der N-Aufnahme des Pflanzenbestandes während der Wachstumsperiode detailliert zu untersuchen. Weiterhin wurden diese Versuche zur Erfassung der Pflanzenreflexion verwendet, über die verschiedene Vegetationsindices berechnet und auf ihre Präzision bei der Abbildung der N-Aufnahme getestet wurden.

Um Sorteneffekte auf die Vegetationsindices prüfen zu können, wurden sowohl in Winterraps als auch in Wintergerste Sortenversuche mit verschiedenen Sorten angelegt. Hierzu wurden neben der Reflexionsmessung auch die N-Aufnahme und der Trockenmasse-(TM)-Aufwuchs bestimmt.

Auf Basis der langjährigen Datensätze wurden unter Berücksichtigung der Kornerträge und der N-Aufnahmen Düngesysteme zur standortspezifischen N-Düngung entwickelt. In Anlehnung an das N-Düngesystem Weizen der TU München wurden für Winterraps und Wintergerste über geeignete mathematische Verfahren Mess- und Applikationsalgorithmen sowie ertragspotentialabhängige, optimale N-Aufnahmekurven zur Kalkulation des N-Düngebedarfs berechnet.

Diese sensorgestützten Düngesysteme beider Kulturen wurden in Streifenversuchen auf heterogenen Feldern hinsichtlich ihrer Wirkungen auf den N-Einsatz, die Ertragsbildung, die N-Salden und die N-Effizienz großflächig getestet. Dabei wurden als Vergleich eine schlageinheitlich gedüngte Variante sowie eine Variante, die nur nach den Ertragszonen gedüngt wurde (Mapping), gewählt.

2 Stand des Wissens

2.1 Grundlagen der Pflanzenreflexion

In der praktischen Landwirtschaft werden vor allem zur N-Düngung immer häufiger Pflanzensensoren eingesetzt. Daneben ist mit dieser Technologie auch eine variable Fungizid- und Wachstumsreglerapplikation möglich (SCOTFORD & MILLER, 2005). Diese Sensoren verwenden das vom Pflanzenbestand reflektierte Licht.

Das auf die Blätter auftreffende Sonnenlicht wird nur zu einem kleinen Teil reflektiert. Diese äußere Reflexion beträgt etwa 4,5% (MACCIONI et al., 2001). Sie wird laut GRANT (1987) vor allem durch die Blattbehaarung sowie die Rauigkeit und die Dicke der Wachsschicht beeinflusst. Beim Eindringen in das Blatt durchdringt das Licht zuerst die Kutikula, die Epidermis und zuletzt das Palisadenparenchym (BUSCHMANN, 2007). Mehr als 80% des auf das Blatt treffenden sichtbaren Lichts wird von den im Blatt enthaltenen Blattpigmenten absorbiert (BUSCHMANN, 2007), nur ein kleiner Teil des einfallenden Lichts verlässt das Blatt wieder (Transmission). Die in der Strahlung enthaltene Energie wird vor allem für die Bildung von ATP (Adenosintriphosphat) und NADP (Nicotinamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat) verwendet (BUSCHMANN, 2007). Ein kleinerer Teil geht als Wärmestrahlung und Chlorophyllfluoreszenz verloren (LICHTENTHALER & RINDERLE, 1988). Im Mesophyll des Blattes wird das Licht mehrmals gebrochen und reflektiert (innere Reflexion). TERASHIMA & SAEKI (1983) zufolge steigt die Ausnutzung des Lichts, je mehr reflektiert wird. GAUSMANN et al. (1974), GRANT (1987) sowie SLATON et al. (2001), führen die Lichtbrechung auf die Übergänge zwischen Zellwänden und luftgefüllten Interzellularräumen zurück. Die Abhängigkeit der Pflanzenreflexion von der Blattstruktur wurde von CROFT et al. (2014) am Beispiel von Nadel- und Laubblättern nachgewiesen. Die Blätter monokotyler und dikotyler Pflanzen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Blattstruktur. Während dikotyle Pflanzen wie Raps ein Palisadenparenchym und ein Schwammparenchym mit ausgeprägten Interzellularräumen besitzen, fehlt das Palisadenparenchym bei einkeimblättrigen Pflanzen vollständig; gleichzeitig sind das Schwammparenchym und damit die Interzellularräume weniger ausgeprägt, was sich negativ auf die Lichtbrechung auswirkt. Die strukturellen Unterschiede zwischen Monokotyledonen und Dikotyledonen führen dazu, dass die Rückstrahlung von Blättern dikotyler Pflanzen auf der Blattoberseite geringer ist als auf der Blattunterseite. Wird die Rückstrahlung bei einkeimblättrigen Pflanzen gemessen, so sind die Werte auf der Blattober- und Unterseite identisch (GAUSMANN & ALLEN, 1973, GRANT, 1987, VOGELMANN, 1993).

Blätter absorbieren Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 400 nm bis 700 nm. Für die Lichtabsorption im sichtbaren Bereich sind die im Blatt enthaltenen Karotinoide sowie das Chlorophyll a und b verantwortlich (BUSCHMANN et al., 2000). Die Karotinoide und Chlorophyll b absorbieren im blau-grünen (440 nm) Wellenlängenbereich Licht, während Chlorophyll a im roten Bereich (690 nm) sein Absorptionsmaximum besitzt. Deutlich weniger Licht wird von den Blattpigmenten im grünwelligen Bereich (520 nm) absorbiert, weshalb die Reflexion in diesem Bereich höhere Werte erreicht. Neben dem Chlorophyll beeinflussen zellwandgebundene Säuren, wie Ferulasäure, die Reflexion im blau-grünen Spektrum (LICHTENTHALER & SCHWEIGER, 1998). Auch wird den Autoren zufolge bei monokotylen Blättern mehr Licht im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Lichts reflektiert als bei dikotylen Blättern. Im nahinfraroten Wellenlängenbereich nimmt die Absorption durch das Chlorophyll ab 700 nm stark ab, während die Reflexion und die Transmission deutlich ansteigen.

Zwischen der N-Versorgung und dem Chlorophyllgehalt besteht ein enger Zusammenhang (YODER & PETTYGREW-CROSBY, 1995, HOULÈS, 2004, SCHLEMMER et al., 2013), was bedeutet, dass mit zunehmender N-Versorgung des Blattes die Chlorophyllkonzentration steigt. Je höher der Chlorophyllgehalt im Blatt ist, desto mehr Licht wird absorbiert. Damit reduziert sich die Transmission und die Reflexion im sichtbaren Bereich, wie GAMMELVIND et al. (1996) an Rapsblättern feststellten. Im nahinfraroten Spektrum allerdings nimmt die Reflexion mit steigender Chlorophyllkonzentration zu (Abb. 1). Herrscht dagegen eine N-Mangelsituation vor, so sinkt der Chlorophyllgehalt bei einem gleichzeitigen Anstieg der Reflexion im sichtbaren und einer verminderten Rückstrahlung im nahinfraroten Wellenlängenbereich (CARTER & KNAPP, 2001, HANSEN & SCHJOERRING, 2003, SCHLEMMER et al., 2013).

Die Chlorophyllkonzentration ist neben der N-Versorgung von mehreren Makro- und Mikronährstoffen abhängig. MASONI et al. (1996) fanden in ihrer Studie heraus, dass infolge des Mangels wichtiger Nährstoffe wie Eisen, Mangan, Schwefel und Magnesium die Blätter vergilben. Grund dafür ist der Rückgang photoaktiver Pigmente. Diese Ergebnisse werden von der Untersuchung von KALAJI et al. (2014) bestätigt, die einen deutlichen Rückgang der Pflanzenreflexion aufgrund des Fehlens von Mikro- und Makroelementen beschreiben.

KNIPLING (1970) zufolge reagieren Pflanzen außerdem mit einer Reduzierung des Chlorophylls in Abhängigkeit des Alters und des Schädlingsbefalls. Wie LU et al. (2002), CIGANDA et al. (2012) sowie ESCOBAR-GUTIÉRREZ & COMBE (2012) an den Blättern von Weizen und Mais herausfanden, sinkt ab der Blüte mit fortschreitender Seneszenz die Chlorophyllkonzentration in den Blättern deutlich ab, was sich im Rückgang der Pflanzenreflexion bemerk-

bar macht. Stressfaktoren, wie Viren und tierische Schaderreger, führen ebenfalls zu einem Verlust von Chlorophyll. Untersuchungen dazu führten RIEDELL & BLACKMER (1999) und GUO et al. (2005) durch. Der Verlust photoaktiver Pigmente durch eine Pilzinfektion führt zu einer Erhöhung der Reflexion im sichtbaren und einer Reduktion des reflektierten Lichts im nahinfraroten Wellenlängenbereich (BRAVO et al., 2003). Eine vergleichbare Auswirkung beschreiben MAHLEIN et al. (2013) an Zuckerrübenblättern.

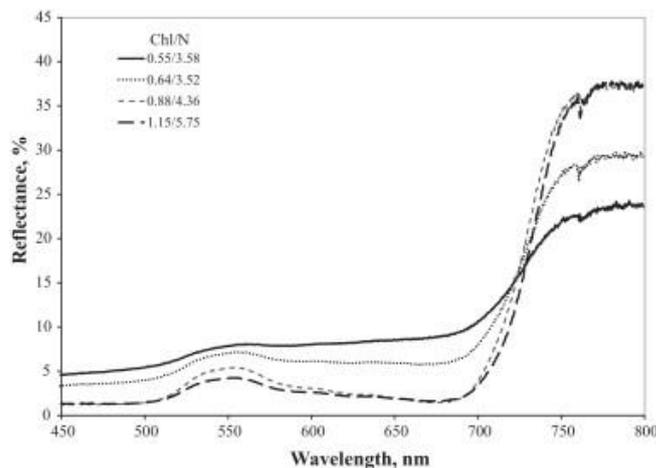


Abb. 1: Reflexionssignatur im Bereich des sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenspektrums in Mais in Abhängigkeit unterschiedlicher Chlorophyll und N-Konzentrationen (SCHLEMMER ET AL., 2013).

2.2 Einfluss der Pflanzen auf die Reflexionsmessungen

Die Blatthaltung der Pflanzen steht im Zusammenhang mit der Rückstrahlung des Bodens. BARET & GUYOT (1991) sowie ATZBERGER (2004) erkannten einen deutlich stärkeren Einfluss der Bodenreflexion auf die gesamte Reflexionssignatur eines Pflanzenbestandes, wenn die Blätter eine erektophile Haltung aufweisen. Planophile Blätter bedecken den Boden gleichmäßiger, was den Bodeneinfluss verringert.

Anders als beim Boden, der vor allem im rotwelligen Bereich die Reflexion beeinflusst, wirkt sich eine veränderte Blatthaltung auf die Reflexion im nahinfraroten Messbereich aus. JACKSON & PINTER (1986) stellten bei ihren Untersuchungen von zwei Weizensorten mit unterschiedlicher Blatthaltung fest, dass Bestände mit planophiler Blatthaltung bis zu 30% mehr Licht reflektierten als erektophile Sorten. Vergleichbare Ergebnisse an Wiesenrispe und Straußgras sowie Zuckerrohr schildern MADEIRA et al. (2001) und GALVÃO et al. (2005). JACKSON & PINTER (1986) begründen ihr Ergebnis mit einer stärkeren senkrecht gerichteten Reflexion der planophilen Blätter, während aufrecht stehende Blätter die direkt bzw. diffus

reflektierte Strahlung absorbieren, was die Lichtausnutzung erhöht und damit die Reflexion reduziert.

Sortenunterschiede bestehen aber nicht nur in der Blatthaltung, sondern auch in der Bodenbedeckung, Blattbreite und -größe sowie im Biomasseaufwuchs und der Blattmasse (HANSEN & SCHJOERRING, 2003, GALVÃO ET AL., 2005, NGUYEN & LEE, 2006). HANSEN & SCHJOERRING (2003), NGUYEN & LEE (2006) und LI et al. (2014^A) stellten deutliche Sortenunterschiede an Weizen- und Reissorten vor allem im nahinfraroten Spektrum fest. Die Reflexionssignaturen der einzelnen Sorten unterschieden sich den Autoren zufolge teilweise um mehr als 10%.

Zusätzlichen Einfluss auf die Reflexionsmessungen übt der Wind aus (LORD et al., 1985). Während in kurzen Luzernebeständen nur eine geringe Abweichung der Reflexion im roten und nahinfraroten Bereich gefunden wurde, zeigten Kulturen wie Weizen und Gerste Abweichungen je nach Stärke des Windeinflusses von bis zu 60% im rotwelligen und 35% im nahinfraroten Wellenlängenspektrum (LORD et al., 1985).

PINTER (1986) und MADEIRA et al. (2001) untersuchten die Auswirkungen von Tau bzw. Regen auf die Reflexion von Weizen- und Grasbeständen. Nach PINTER (1986) besteht ein enger Zusammenhang zwischen Blattfeuchte und Reflexion im Wellenlängenspektrum unterhalb 700 nm und im langwelligen Bereich über 1150 nm. Während eine Zunahme der Reflexion vor allem im roten Spektrum von bis zu 60% zu erkennen war, ging die Rückstrahlung der Pflanzen im langwelligen Bereich in Folge der Blattnässe um maximal 60% zurück. Der nahinfrarote Messbereich blieb vom Tau unbeeinflusst. Vergleichbare Ergebnisse für taufeuchte Blätter schildern MADEIRA et al. (2001) für Wiesenrispe und Straußgras. Den Autoren zufolge beeinflusste Regen die Verschiebung der Reflexionssignatur eines Pflanzenbestandes deutlich weniger (+ 16% sichtbares Licht, - 28% langwelliges Licht).

Stark beeinflusst werden Reflexionsmessungen von der Zusammensetzung und dem Alter des Pflanzenbestandes. SCOTFORD & MILLER (2004^B) maßen die Pflanzenreflexion unterschiedlich dicht gesäter Weizenbestände mit verschiedenen Sorten über die gesamte Vegetationsperiode hindurch anhand des Vegetationsindex NDVI; dabei war die Reflexion dicht stehender Pflanzen deutlich höher als in den dünner gesäten Beständen. Ähnliche Untersuchungen führten YAO et al. (2014) und TIAN et al. (2014) an Weizen- bzw. Reisbeständen durch, wobei sie sowohl die Bodenbedeckung als auch die Pflanzenreflexion erfassten. Analog zu SCOTFORD & MILLER (2004^B) wiesen die Bestände mit geringeren Saatstärken über die gesamte Vegeta-

tion geringere Bodenbedeckungsgrade und damit ein anderes Reflexionsverhalten als solche mit hoher Saatstärke auf.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Saaddichten konnten bei TIAN et al. (2014) durch Düngungsmaßnahmen allerdings nicht vollständig ausgeglichen werden. Heterogene Bodenbedeckungsgrade bedingten laut TIAN et al. (2014) ein deutlich verändertes Reflexionsverhalten des Pflanzenbestandes. Während bei sehr geringen Bedeckungsgraden von 10% bis 15% die Pflanzenreflexion noch stark von der des Bodens beeinflusst wird, sind ab 20% die für Pflanzen typischen Reflexionskurven zu erkennen (LEAMER et al., 1978, TIAN et al., 2014). Im Gegensatz zu Beständen mit einer hohen Bodenbedeckung bewirkt ein verringerter Biomasseaufwuchs demnach infolge des höheren Bodeneinflusses eine vermehrte Reflexion im roten Wellenlängenbereich, während sich im nahinfraroten Wellenlängenspektrum die Reflexion reduziert (TIAN et al., 2014).

Im Verlauf der Vegetation verändern Pflanzenbestände ihre Struktur und damit das Reflexionsverhalten. In den vegetativen Stadien des Wachstums beeinflussen vor allem die Blätter die Reflexion. Mit dem Eintritt in das generative Wachstum nehmen auch Halme und Ähren an der Reflexion teil. HABOUDANE et al. (2004) und PIMSTEIN et al. (2009) verglichen die Reflexionssignaturen von Weizenbeständen vor und nach dem Ährenschieben miteinander. Die Autoren stellten fest, dass Pflanzen ab dem Ährenschieben im rotwelligen Wellenlängenbereich deutlich mehr Licht und im NIR-Spektrum dafür deutlich weniger Licht reflektieren als Pflanzenbestände, die sich im vegetativen Längenwachstum befinden. Einen weiteren Einfluss für die Änderung in der Rückstrahlung bei Gerste sieht MOHD NOOR (2003) unter anderem an den teilweise grünbraun gefärbten Grannen der Gerste. Ähnliches beschreiben MOGENSEN et al. (1996) sowie ZHANG & HE (2013) für Raps. In beiden Publikationen wird der Rückgang der Spektralmessungen auf eine Veränderung in der Pflanzenstruktur nach der Blüte sowie auf den eintretenden Blattverlust zurückgeführt. Gleichzeitig verändert sich im Lauf der Vegetation die Struktur der Rapsblätter und damit die Reflexion, wie STEFANOWSKA et al. (1999) publizierten.

Sowohl Raps als auch Gerste weisen bis zur Blüte einen deutlichen Biomassezuwachs auf (BEHRENS et al., 2006). Eine Möglichkeit, den Biomasseaufwuchs zu charakterisieren ist der Blattflächenindex (BFI), der das Verhältnis der Blattfläche zur Bodenoberfläche beschreibt. Dieser Index ist eng mit der Photosyntheseleistung von Pflanzenbeständen und dem Biomasseaufwuchs verbunden (ASRAR ET AL., 1985, SCOTFORD & MILLER (2004^A)). Die Blattfläche hängt von der Pflanzenhöhe und der Bestandesdichte ab. Je dichter und höher die Pflan-

zen im Verlauf der Vegetation werden, desto größer ist die Biomasse. Gleichzeitig nimmt mit steigender Biomasseproduktion die Blattbildung zu (SCOTFORD & MILLER, 2004^A). Demzufolge steigt der BFI im Vegetationsverlauf bis zur Blüte kontinuierlich. Mit dem Erreichen der Blüte ist bei allen Kulturen ein deutlicher Rückgang der Blattfläche und damit der Bodenbedeckung zu verzeichnen (JACKSON & PINTER, 1986, GAMMELVIND et al., 1996, THIAN et al. 2014). Grund dafür ist der Blattverlust durch senescente Blätter. Wie Messungen von MOHD NOOR (2003) in Winterweizen und Wintergerste ergaben, bildet die Reflexion die Biomasseentwicklung ab. GNYP et al. (2014^A) maßen die Reflexionsstrahlung eines Reisbestandes zu verschiedenen Entwicklungsstadien und konnten eine deutliche Zunahme der Reflexionsstrahlung von 20% zur Bestockung auf mehr als 40% zum Blütenschieben feststellen. Die Zunahmen waren vor allem im nahinfraroten Wellenlängenspektrum nachzuweisen. MOGENSEN et al. (1996) berichten, dass nach der Blüte die Messwerte zurückgingen, da die Messungen durch den steigenden Bodeneinfluss und die Gelbverfärbung der absterbenden Blätter negativ beeinflusst wurden.

Bei einem hohen Biomasseaufwuchs und damit einem hohen BFI war es nicht mehr möglich Unterschiede durch Reflexionsmessungen zu erkennen, wie die Ergebnisse von ASRAR et al. (1985) zeigen. Die Autoren führten Reflexionsmessungen zum Abschätzen des BFI durch und fanden einen engen Zusammenhang zwischen geschätztem und gemessenem BFI. Allerdings trat ab einem BFI von 6 ein Sättigungseffekt auf, was dazu führte, dass höhere BFI-Werte nicht mehr erfasst werden konnten. Ähnliche Auswirkungen eines hohen BFI auf die Reflexion eines Pflanzenbestandes beschreiben CARLSON & RIPLEY (1997), HANSEN & SCHOERRING (2003) sowie HOUBORG & BOEGH (2008). Bei diesen Autoren trat der Sättigungseffekt bei einem BFI zwischen 3 und 4 auf. DAUGHTRY et al. (2000) sowie CHATTARAJ et al. (2013) stellten unter anderem für den REIP, NDVI und SAVI ein ähnliches Sättigungsverhalten bei hohen Blattflächenindices fest. Zudem konnten HOUBORG & BOEGH (2008) nachweisen, dass sich bei gleichem BFI die Reflexion von Weizen, Gerste und Mais deutlich voneinander unterscheiden.

Variierende Pflanzengrößen sowie ein wechselnder Sonnenstand führen zur Beschattung einzelner Blätter oder gesamter Pflanzenteile. Wie GAUSMANN (1984), FITZGERALD et al. (2005) sowie JIA et al. (2013) beim Vergleich von Schattenblättern und Sonnenblättern herausfanden, ist die Reflexion im sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenspektrum von der Sonneneinstrahlung ausgesetzten Blättern höher als von beschatteten. Grund dafür ist die unterschiedliche Blattstruktur: Während Sonnenblätter ein eher dünnes Mesophyll besitzen, weisen Schat-

tenblätter deutlich größere und dickere Blätter mit einem höheren Chlorophyllgehalt auf. Damit steigt die Lichtausnutzung.

Weit wichtiger für den Schattenwurf bei Reflexionsmessungen sind jedoch der Sonnenstand und der Blickwinkel des Sensors zur Sonne und zum Pflanzenbestand (Zenit- und Azimutwinkel) (PINTER et al., 1985, RANSON et al., 1985, SHIBAYAMA & WIEGAND, 1985). Mit wechselndem Sonnenstand verändert sich die Beschattung im Pflanzenbestand und damit die Reflexion. Je tiefer die Sonne steht, desto größer ist der Schattenwurf. Gleichzeitig geht mit Zunahme des Zenitwinkels die Reflexion im roten und nahinfraroten Wellenlängenbereich zurück (PINTER et al., 1985, PINTER et al., 1990). PINTER et al. (1985) stellten für das nahinfrarote Spektrum eine deutliche Erhöhung der Reflexion von Sonnenaufgang bis zum Sonnenhöchststand in den Mittagsstunden fest.

In Zusammenhang mit dem Sonnenstand stehen die Saatrichtung und die Hangneigung. Beide Faktoren beeinflussen die Messungen, solange die Pflanzen klein sind und die Bodenbedeckung gering ist (RANSON et al., 1985, SHIBAYAMA & WIEGAND (1985), PINTER et al. (1987). In Beständen mit größeren Pflanzen und nahezu vollständiger Bodenbedeckung konnten SHIBAYAMA & WIEGAND (1985) sowie PINTER et al. (1987) keinerlei Auswirkung dieser Faktoren erkennen.

2.3 Einfluss des Bodens auf die Reflexionsmessungen

Bei Spektralmessungen in Pflanzenbeständen wird immer ein Mischsignal empfangen. Ein Teil der Wellenlängen wird vom unvollständig bedeckten Boden ausgesendet, der andere Teil entstammt der Rückstrahlung durch die Pflanzen (HUETE ET AL., 1985, YAO ET. AL., 2014). Die Reflexion des Bodens steigt mit zunehmender Wellenlänge des Lichts an und erreicht im nahinfraroten Bereich bis zu 40% (DAUGHTRY et al., 2000, WEIDONG et al., 2002). Damit liegt die Reflexion des Bodens über der des Pflanzenbestandes, wie ZHAO et al. (2012) in ihren Versuchen herausfanden. Die Böden unterscheiden sich allerdings in der Rückstrahlung. Beeinflusst wird die Rückstrahlung des Bodens von der Feuchtigkeit, dem Humusgehalt, der Bodenart und der Rauheit des Untergrundes.

Böden mit hohem Lehm- und Sandanteil weisen aufgrund der helleren Bodenfarbe eine deutlich geringere Lichtabsorption und damit eine höhere Reflexion auf als dunklere Böden (DAUGHTRY et al., 2000, WEIDONG et al., 2002, DARVISHZADEH et al., 2008). Bei dunklen Böden steigt die Reflexion im Bereich zwischen 700 nm und 1000 nm stark an (NAGLER et

al., 2000, CROFT et al., 2012), da dunkle Böden im sichtbaren, rotwelligen Spektrum mehr absorbieren als helle Böden (COLWELL, 1974, WEIDONG et al., 2002).

Weil sich die Bodenfarbe mit der Bodenfeuchte ändert, differenzieren die Reflexionsspektren mit unterschiedlicher Wassersättigung. Nach NAGLER et al. (2000), WEIDONG et al. (2002), DAUGHTRY et al. (2000) und DARVISHZADEH et al. (2008) führte ein steigender Bodenwassergehalt zu einer Abnahme der Reflexion. Ist allerdings ein kritischer Punkt (Wassersättigung) überschritten, erhöht sich die Reflexion wieder (WEIDONG et al., 2002).

Neben der Bodenfarbe spielt die Art der Bodenbearbeitung für die Reflexionssignatur des Bodens eine entscheidende Rolle, da durch die verschiedenen Verfahren unterschiedliche Mengen an Pflanzenresten auf der Bodenoberfläche verbleiben (DAUGHTRY et al., 2006, ZHAO et al., 2012). Verschiedene Autoren (NAGLER et al., 2000, DAUGHTRY et al., 2000) fanden bei ihren Untersuchungen zum Einfluss der Pflanzenreste auf die Reflexionssignatur heraus, dass sich nicht nur die Menge und die Feuchte der Pflanzenreste auf die Reflexion auswirken, sondern auch der Umstand, von welcher Pflanzenart die organische Substanz stammt. Ebenso beeinflussten die Feuchte der Pflanzenreste auf dem Feld die Reflexion.

Bewirtschaftung und Bodenart zusammen haben einen nachweisbaren Effekt auf die Rauheit des Bodens, welche sich deutlich auf die Reflexionssignatur auswirkt (CROFT et al., 2012). Die Autoren konnten nachweisen, dass sich die Oberflächenstruktur des Bodens im Verlauf der Vegetation in Abhängigkeit von der Bodenart und physikalischen Einwirkungen, wie Niederschläge und Frost, verändert.

2.4 Vegetationsindices

Wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben, beeinflussen verschiedene Faktoren die Reflexionseigenschaften von Pflanzenbeständen. Über die Rückstrahlung von Pflanzen können agronomische Parameter wie N-Gehalt und N-Aufnahme, Chlorophyllgehalt, Biomasse, Bodenbedeckung, Blattfläche und Blatthaltung sowie die Triebdichte unterschiedlicher Kulturen abgebildet werden.

Um die genannten Parameter mit hoher Genauigkeit erfassen zu können, werden Vegetationsindices berechnet. Dazu werden die Reflexionswerte von Wellenlängen (λ) aus dem grünen (G), roten (R) und nahinfraroten (NIR) Spektralbereich über geeignete mathematische Verfahren miteinander verknüpft. Im Folgenden wird auf einige in der Literatur publizierte Vegetationsindices eingegangen.

Der Red Edge Inflection Point (REIP) oder auch Hauptwendepunkt (HWP) ist die Stelle der maximalen Steigung der Pflanzenreflexion. Der Bereich umfasst das Wellenlängenspektrum zwischen 670 nm und 740 nm, in dem sich die Reflexionsrate von der geringen Reflexion im rotwelligen Bereich hin zu hohen Reflexionsraten im NIR-Bereich ändert (GUYOT & BARET, 1988, FILELLA & PEÑUELAS, 1994, DAUGHTRY et al., 2000) (Gleichung 1).

$$(1) \quad \text{REIP} = R_{700} + 40 \cdot \frac{0,5 \cdot (R_{670} + R_{780}) - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$$

In Abhängigkeit der Chlorophyllkonzentration verschiebt sich der REIP hin zu längeren Wellenlängen (DAWSON & CURRAN, 1998). GUYOT et al. (1992) sowie CLEVERS et al. (2001) konnten die Unabhängigkeit dieses Index von der Bodenbedeckung, der Bodenfeuchtigkeit und der Rauheit der Bodenoberfläche nachweisen. Allerdings beeinflusst die Bodenhelligkeit den REIP-Wert, was zu einer Verschiebung des REIP von bis zu 4 nm führt (GUYOT et al., 1992). Auf die Einflussfaktoren Blattfläche, Chlorophyllgehalt der Blätter und die Blattstellung reagiert der REIP. Damit unterstützen diese Aussagen von GUYOT et al. (1992) die Ergebnisse von BEHRENS et al. (2004), der beim Vergleich der REIP-Werte unterschiedlicher Rapssorten eine Verschiebung um bis zu 3 nm feststellte. Wie viele weitere Studien bestätigen, besteht ein enger, aber teilweise kurvenlinearer Zusammenhang zwischen der Chlorophyllkonzentration und dem REIP (GITELSON et al., 1996, LICHTENTHALER et al., 1996, BLACKBURN, 1998, CLEVERS et al., 2001, CLEVERS & GITELSON, 2013). Daneben kann nach HERRMANN et al. (2011) dieser Index sehr gut zur Abschätzung des Blattflächenindex verwendet werden. Die Autoren fanden einen engen linearen Zusammenhang zwischen dem REIP-Wert und dem BFI von Kartoffeln und Weizen trotz hoher Biomassebildung und Bodenbedeckung. CLEVERS et al. (2001) und DAUGHTRY et al. (2000) berichten dagegen von einem Sättigungseffekt bei einem höheren BFI. Weitere Studien untersuchten die Beziehung zwischen der N-Konzentration sowie der N-Aufnahme einerseits und dem REIP andererseits (BEHRENS et al., 2006, SCHMID, 2006, MUTANGA & SKIDMORE, 2007, ERDLE et al., 2011, SCHLEMMER et al., 2013). Dabei stellte sich heraus, dass über den REIP eine sehr präzise Schätzung vor allem der N-Aufnahme sowohl in Blatt- als auch Halmfrüchten möglich ist. ERDLE et al. (2011) und SCHLEMMER et al. (2013) führten höhere N-Aufnahmeraten und eine damit stärkere Biomasseproduktion allerdings zu einem Sättigungseffekt bei der Messung. Weiterhin ist es möglich, mit dem REIP den Biomasseaufwuchs vor allem von Getreide abzubilden, wie BEHRENS et al. (2006) und SCHMID (2006) nachwiesen. Ebenso korreliert die Lage des REIP zu späteren Entwicklungsstadien eng mit dem Kornertrag von Winterweizen

(ERDLE et al., 2013), wobei mit zunehmender Abreife der Rückgang des Chlorophylls die REIP-Werte beeinflusst.

Der Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) kombiniert Wellenlängen aus dem nah-infraroten und roten Wellenlängenbereich (ROUSE et al., 1974) (Gleichung 2).

$$(2) \quad \text{NDVI} = \frac{\lambda_{\text{NIR}} - \lambda_{\text{R}}}{\lambda_{\text{R}} + \lambda_{\text{R}}}$$

Über diesen Index kann die Blattfläche sehr gut abgebildet werden. Allerdings sinkt die Sensitivität des NDVI wegen des ausgeprägten Sättigungseffekts. Dieser tritt auf, wenn die Blattfläche Werte von drei überschreitet; dies gilt für verschiedene Getreidearten und Blattfrüchte (CARLSON & RIPLEY, 1997, HABOUDANE et al., 2004, SCOTFORD & MILLER, 2004^A, WU et al., 2007, HOUBORG & BOEGH, 2008, HERRMANN et al., 2011, VIÑA et al., 2011). SCOTFORD & MILLER (2004^B) sowie BEHRENS et al. (2006) zeigten, dass der NDVI-Wert die Kurve der Biomasseentwicklung in Winterweizen, Wintergerste und Winterraps über die Vegetation hinweg abbilden kann. APARICIO et al. (2002), MÜLLER et al. (2008) und VERHULST et al. (2011) stellten eine hohe Korrelation zwischen dem NDVI und dem Biomasseaufwuchs von Mais, Raps und Weizen fest. Allerdings wird die Unterscheidung verschiedener Biomasseaufwüchse mit zunehmender Pflanzenmasse wegen des auch hier auftretenden Sättigungseffekts erschwert. ERDLE et al. (2011) raten deswegen dazu, den NDVI vor allem in jungen Entwicklungsstadien zum Schätzen des Aufwuchses zu verwenden. SERRANO et al. (2000) und SCHLIEPHAKE (2011) konnten dagegen keine bzw. nur eine schwache Beziehung zwischen dem Biomasseaufwuchs von Weizen bzw. Raps und den NDVI-Werten finden. BEHRENS et al. (2004) zufolge reagiert der NDVI auf eine differenzierte N-Düngung. Vergleichbare Resultate veröffentlichten MOHD NOOR (2003), LI et al. (2008), SCHLEMMER et al. (2013) und LI et al. (2014^B), die eine enge, aber kurvenlineare Beziehung zwischen dem Index und der N-Aufnahme bzw. dem N-Gehalt fanden (R^2 bis 0,75). Weitere Größen wie die Bestandesdichte von Weizen (WOOD et al., 2003, SCOTFORD & MILLER, 2004^A) und der Chlorophyllgehalt (GITELSON et al., 2003) können über den NDVI abgebildet werden. Kritik an diesem Index äußerten LICHTENTHALER et al. (1996) wegen seiner geringen Sensitivität gegenüber der Änderung der Chlorophyllgehalts, was die Autoren mit der Verwendung der roten Wellenlänge ($\lambda = 680$ nm) begründen. Weiterhin führt der Bodeneinfluss in frühen Entwicklungsstadien zu etwas unterschiedlichen NDVI-Messwerten bei Mais (BAUSCH, 1993).

Der Index IRR (Infrared Red) kombiniert Wellenlängen aus dem nahinfraroten und dem roten Wellenlängenspektrum (PEARSON & MILLER, 1972) (Gleichung 3).

$$(3) \quad \text{IRR} = \frac{R_{780}}{R_{670}}$$

Dieser Vegetationsindex eignet sich sehr gut zur Abbildung des Blattflächenindex und des Biomasseaufwuchses, wie MORAN et al. (1989), SERRANO et al. (2000) und MÜLLER et al. (2008) für die Kulturen Winterweizen, Luzerne und Raps beschrieben. MISTELE & SCHMIDHALTER (2008) wiesen ebenfalls enge Beziehungen zum Biomasseaufwuchs von Mais nach, die aber mit dem Vegetationsverlauf abnahmen. Neben diesen Parametern lassen sich der N-Gehalt sowie die N-Aufnahme präzise bestimmen (MÜLLER et al., 2008, MISTELE & SCHMIDHALTER, 2008, TIAN et al., 2011). LI et al. (2014^A) und LI et al. (2014^B) stellten dagegen eher geringe Beziehungen zwischen IRR und dem N-Gehalt von Weizen bzw. Mais fest. Nach SCHÄCHTL (2004) und SCHMID (2006) ist zu Beginn der Schossphase (BBCH 30) die Messgenauigkeit bei Getreide noch geringer. Widersprüchliche Ergebnisse sind in Bezug auf die Messpräzision der Chlorophyllkonzentration vorhanden. Während BLACKBURN (1998) und SERRANO et al. (2000) eine Beziehung zwischen dem Index und der Chlorophyllkonzentration der Pflanzen feststellten, konnten SIMS & GAMON (2002) nicht bestätigen. PINTER et al. (1987) berichten insofern von einer Tagesgangabhängigkeit dieser Wellenlängenkombination, als um die Mittagsstunden geringere Messwerte als morgens und abends gemessen wurden. Gleichzeitig reagierte dieser Index gemäß den Untersuchungen von JACKSON & PINTER (1986) auf eine Änderung der Blatthaltung, was die Autoren auf die Reflexion im roten Wellenlängenbereich zurückführten.

TAKEBE et al. (1990) entwickelten den Vegetationsindex IRG (Infrared Green) als einen Quotienten aus einer Wellenlänge aus dem nahinfraroten und dem grünen Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (Gleichung 4).

$$(4) \quad \text{IRG} = \frac{R_{780}}{R_{550}}$$

Dieser Index eignet sich laut TAKEBE et al. (1990) aufgrund seiner engen Beziehung zu N-Gehalt und Chlorophyllgehalt in Reis sehr gut zum Messen dieser Parameter. Allerdings erwähnten die Autoren auch, dass er nur in den Mittagsstunden gute Messwerte liefert, während bei tiefstehender Sonne in den Morgen- und Abendstunden die Reflexionswerte stark

schwanken. In den Studien von SCHÄCHTL (2004) und SCHMID (2006) korrelierten der TM-Aufwuchs, der N-Gehalt und vor allem die N-Aufnahme von Weizen und Gerste erst ab dem Zweiknotenstadium eng mit dem IRG (R^2 bis 0,7). Bei den Blattfrüchten Kartoffeln und Mais konnte die N-Aufnahme ebenfalls sicher bestimmt werden. MISTELE & SCHMIDHALTER (2008) berichten zudem von einer genauen Abbildung der oberirdischen Biomasse und des N-Gehalts in Mais, wobei die Beziehung zwischen dem Index und der Biomasse im Vegetationsverlauf stark abnimmt.

Der Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) ist eine Weiterentwicklung des NDVI (BAUSCH, 1993). In diesen Index wurde von HUETE (1988) ein Faktor L integriert (Gleichung 5).

$$(5) \quad \text{SAVI} = (1 + L) \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{NIR}} - \lambda_{\text{R}}}{\lambda_{\text{NIR}} + \lambda_{\text{R}} + L} \right)$$

Über diesen Korrekturfaktor wird der Bodeneinfluss zu frühen Entwicklungsstadien der Kultur reduziert (BAUSCH, 1993). Damit ist dieser Index weniger anfällig für die Reflexion des Bodens, weshalb der SAVI Messgrößen wie den Bedeckungsgrad des Bodens sowie den Blattflächenindex auch bei geringer Bodenbedeckung sicher abbilden kann (RONDEAUX et al., 1996, LIU et al., 2007). Der SAVI ist eng korreliert mit dem Blattflächenindex, wobei auch hier ein Sättigungseffekt auftritt (HABOUDANE et al., 2004, WU et al., 2007). BEHRENS et al. (2004) zufolge reagiert dieser Index auf unterschiedliche N-Düngerversorgung von Winter-raps mit einem deutlichen Anstieg des Messwertes von 0,57 in den ungedüngten auf 0,65 in den gedüngten Parzellen. SCHMID (2006) fand in Weizen und Gerste einen engen, kurvenlinearen Zusammenhang zwischen SAVI und N-Aufnahme mit R^2 -Werten bis maximal 0,78. Der Biomasseaufwuchs und die N-Konzentration von Getreide sowie die N-Aufnahme in Mais und Kartoffeln korrelieren dagegen nur mäßig mit diesem Index (SCHMID, 2006, GNYP et al., 2014^B, YAO et al., 2014).

Neben der Kombinationen zwischen Wellenlängen aus dem sichtbaren und unsichtbaren Wellenlängenspektrum wurden Verbindungen aus nah beieinanderliegenden Wellenlängen des nahinfraroten Spektralbereichs gebildet. So beschrieb REUSCH (1997) die Indices IR 1 ($R_1 = 740 \text{ nm}$, $R_2 = 730 \text{ nm}$) und IR 2 ($R_1 = 740 \text{ nm}$, $R_2 = 720 \text{ nm}$), die nach folgender Gleichung 6 berechnet werden:

$$(6) \quad \text{IR 1 bzw. IR 2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Mit beiden Indices war es dem Autor möglich, die N-Aufnahme von Weizen und Gerste mit einer hohen Genauigkeit zu bestimmen. Vergleichbare Ergebnisse publizierten HANSEN & SCHJOERRING (2003) für die N-Aufnahme bei Weizen, indem sie die höchste Beziehung zur N-Aufnahme bei einer Kombination von nah beieinander liegenden Wellenlängen im NIR-Bereich fanden. ERDLE et al. (2011) und CLEVERS & GITELSON (2013) testeten ebenfalls Indices, die aus einer Kombination von Wellenlängen aus dem NIR-Wellenlängenspektrum bestehen. Agronomische Eigenschaften von Weizen wie die N-Aufnahme, der N-Gehalt und auch der Biomasseaufwuchs können mit diesen Indices präziser abgebildet werden als mit Indices, die Wellenlängen aus dem roten Reflexionsspektrum enthalten (ERDLE et al., 2011). MÜLLER et al. (2008) kombinierten Wellenlängen aus dem NIR-Wellenlängenspektrum zu Simple Ratios (SR) und NDIs, die auf dem Rechenschema des IR 1 und IR 2 bzw. NDVI beruhen. Mit Hilfe der SR und NDIs konnten der Biomasseaufwuchs, die grüne Blattfläche und die N-Aufnahme von Winterraps sehr genau abgebildet werden. STRENNER & MAIDL (2011) testeten die Simple Ratio und den NDI 2 in Sommerweizen und fanden eine enge, lineare Beziehung zur N-Aufnahme. TARPLEY et al. (2000) verwendeten Wellenlängen aus dem nahinfraroten Spektrum zwischen 700 nm und 1000 nm und konnten damit die N-Konzentration von Baumwolle sehr genau bestimmen.

2.5 Agronomische Grundlagen Winterraps

Laut DIEPENBROCK & GROSSE (1995) basiert die Ertragsleistung von Winterraps auf vier wichtigen Ertragsstrukturkomponenten – der Bestandesdichte (Pflanzen pro m²), der Schotenzahl pro Pflanze, der Kornzahl pro Schote und dem Tausendkorngewicht (TKG). Nach WANG et al. (2011) sind die Schotenzahl pro Pflanze und die Kornzahl pro Schote die Ertragskomponenten mit der größten Variabilität. Änderungen im Kornertrag sind deswegen vor allem auf diese Ertragskomponenten zurückzuführen.

Zum Erreichen stabiler Kornerträge liegt die optimale Bestandesdichte von Winterraps zwischen 40 und 60 Pflanzen pro m² bei einer gleichzeitig möglichst ausgeglichenen Pflanzenverteilung (SCHRÖDER & MAKOWSKI, 1996, DIEPENBROCK, 2000). Anders als bei Getreide kann über die N-Düngung kein Einfluss auf diesen Parameter genommen werden. Sehr dicht gesäte bzw. sehr üppig entwickelte Bestände neigen allerdings zur Auswinterung, was letztlich die Pflanzenverluste fördert (RATHKE et al., 2006).

Die vom Haupttrieb abgehenden schotentragenden Verzweigungen 1. Ordnung werden bereits vor dem Winter in den Blattachsen angelegt, weswegen eine kräftige Herbstentwicklung der Einzelpflanzen mit mindestens sechs bis acht Blättern wichtig ist (SCOTT et al., 1973, MENDHAM & SCOTT, 1975, SCHRÖDER & MAKOWSKI, 1996). Die Anzahl der Verzweigungen 1. Ordnung wird unter anderem auch durch die Bestandesdichte beeinflusst, indem in dicht stehenden Beständen die Verzweigungen bereits vor dem Winter reduziert werden.

Über eine N-Düngung von Raps kann sowohl die Anlage von Verzweigungen 2. Ordnung als auch die Schotenzahl pro Pflanze gefördert werden (ASARE & SCARISBRICK, 1995, BARLÓG & GRZEBISZ, 2004^A, MA et al, 2015). Überzogene N-Düngermengen dagegen reduzieren die Anzahl an Schoten sowie die Kornzahl pro Schote¹ (ISLAM & EVANS, 1994).

Nicht nur die N-Düngermenge sondern auch deren zeitliche und mengenmäßige Verteilung beeinflussen die Ertragsstruktur maßgeblich. Eine einmalige N-Gabe bzw. eine Betonung der ersten N-Gabe zu Vegetationsbeginn führte laut BEHRENS et al. (2001) zu einer verstärkten Ausbildung von Seitentrieben. Wurde ein Großteil der N-Menge dagegen zum Schossbeginn appliziert, so erhöhte sich das TKG und Kornzahl pro Schote¹. Sehr späte N-Düngergaben zur Blüte reduzierten in der Studie von BARLÓG & GRZEBISZ (2004^A) die Schotenzahlen.

In den Rapskörnern werden als Qualitätsparameter der Öl- und Proteingehalt gemessen. Beide Parameter sind negativ korreliert ($R^2 = 0,81$), wobei die Zunahme des Proteins um 1% den Ölgehalt um -0,97% reduziert (RATHKE et al., 2005). Die Ölgehalte der Rapskörner ungedüngter Rapspflanzen betragen 45% bis 48% (TAYLOR et al., 1991, HOCKING et al., 1997, RATHKE & SCHUSTER, 2001, BARLÓG & GRZEBISZ, 2004^A, KARAASLAN, 2008, RATHKE et al. 2005, CHEEMA et al., 2010, GRANT et al., 2011). Aufgrund der negativen Korrelation des Ölgehalts mit der N-Düngermenge geht der Ölgehalt mit steigender N-Düngermenge zurück, wie die Ergebnisse von RATHKE & SCHUSTER (2001), RATHKE et al. (2005) sowie GRANT et al. (2011) verdeutlichen. Durch eine N-Düngung von bis zu 240 kg ha⁻¹ reduzierte sich den Autoren zufolge der Ölgehalt in den Körnern um 4% (absolut) auf etwa 44%. Andere Studien fanden bei ähnlichen Düngermengen für gedüngte Rapspflanzen deutlich geringere Werte zwischen 37% und 42% (TAYLOR et al., 1991, ISLAM & EVANS, 1994).

Neben der N-Menge reagiert der Ölgehalt auf die zeitliche Verteilung des Stickstoffs. Wie BARLÓG & GRZEBISZ (2004^A) herausfanden, reduziert eine späte N-Gabe zur Blüte den Ölgehalt um bis zu 0,7% (absolut) im Vergleich zu einer Aufteilung der N-Düngermenge auf zwei Termine (VB und BBCH 30). Ein ähnliches Resultat publizierten CHEEMA et al. (2010).

Die Ergebnisse von TAYLOR et al. (1991) zeigen darüber hinaus, dass der Ölgehalt auch von einer unterschiedlichen Betonung der N-Düngermenge beeinflusst wird. Die Autoren beschreiben, dass sich die Ölgehalte bei einer einmaligen N-Gabe zu Vegetationsbeginn sowie einer gleichmäßigen Aufteilung der N-Düngermenge auf zwei Gaben nur geringfügig unterscheiden, während eine Betonung der zweiten N-Düngergabe zu Schossbeginn das im Korn enthaltene Öl absolut um knapp 2% reduzierte.

Der Proteingehalt im Korn korreliert positiv mit steigender N-Düngermenge. Körner ungedüngter Pflanzen weisen einen Eiweißgehalt von etwa 18% auf (ZHAO et al., 1993, RATHKE et al., 2005). Wie aus den Studien von ASARE & SCARISBRICK (1995), ZHAO et al. (1993) und RATHKE et al. (2005) hervorgeht, wurden mit N-Düngermengen zwischen 200 kg ha⁻¹ und 240 kg ha⁻¹ Eiweißgehalte von bis zu 21% erreicht. In der Untersuchung von GRANT et al. (2011) speicherte Raps bei gleicher N-Düngermenge mit 25% Proteingehalt im Korn deutlich mehr N. Statt dem Protein untersuchten ISLAM & EVANS (1994) und HOCKING et al. (1997) die N-Gehalte im Korn. Diese reagieren wie der Eiweißgehalt auf eine Steigerung der N-Düngermenge. Die Werte reichten den Studien zufolge von 2,8% in ungedüngten Varianten bis 3,4% bei gut versorgten Beständen. Deutlich höhere N-Gehalte im Korn erreichten die Rapspflanzen mit Werten zwischen 3,7% in der ungedüngten Variante und 4,2% in der 240 kg ha⁻¹ Variante bei OZER (2003).

Ein wichtiges Produktionsziel beim Anbau von Winterraps stellen möglichst hohe Kornerträge bei gleichzeitig effizientem N-Einsatz dar. Dabei sind die Kornerträge deutlichen witterungs- und standortbedingten Jahrgangsschwankungen sowie einem Sorteneinfluss unterworfen (OZER, 2003, RATHKE et al., 2005, BERRY et al., 2010, SCHULTE AUF´M ERLEY ET AL., 2011).

Nach BARLÓG & GRZEBISZ (2004^A) ist die Steigerung von Kornerträgen bei Raps abhängig von der N-Düngermenge und der Verteilung des Düngers. Diese Aussage bestätigen die Ergebnisse von BEHRENS et al. (2001) und CHEEMA et al. (2010). Den Autoren zufolge wurden deutlich höhere Kornerträge bei zweimaliger Düngung im Frühjahr gegenüber einmaligen Düngergaben zu Vegetationsbeginn erzielt. Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung der N-Düngerapplikation beschreiben WRIGHT et al. (1988) und BEHRENS et al. (2001), indem eine geringere N-Menge als Startgabe zu Vegetationsbeginn appliziert wird, während zu BBCH 30 eine kräftige Abschlussgabe folgt. Spätere Düngegaben zur Blüte reduzieren BARLÓG & GRZEBISZ (2004^A) zufolge die Ertragsleistung von Raps. Ertragssteigernd wirkt dagegen eine zusätzliche N-Düngung im Herbst, die zur Saat appliziert wird (SCHLIEPHAKE, 2011,

SCHULZ, 2011). Die Wirkung des N im Herbst auf den Kornertrag verringert sich mit zunehmender Höhe des Düngenniveaus im Frühjahr (SCHLIEPHAKE, 2011). SCHULZ (2011) zufolge ist allerdings die N-Effizienz von N-Düngergaben im Herbst verringert.

Im gemäßigten Klima erreichte bei WIESLER et al. (2001) ungedüngter Raps Kornerträge von ca. 20 dt ha⁻¹, während gut versorgte Bestände bei ZAJAC et al. (2011) auf ertragreichen Standorten Kornerträge bis über 60 dt ha⁻¹ erzielten. Verschiedenen Studien zufolge sind zum Erreichen des Höchstertrags N-Düngermengen zwischen 180 kg ha⁻¹ bis 240 kg ha⁻¹ nötig (SCHJOERRING et al., 1995, WIESLER et al., 2001, RATHKE et al., 2005, SIELING et al., 2006, SCHULTE AUF´M ERLEY et al., 2011, ULAS et al., 2013). N-Düngermengen über 250 kg ha⁻¹ führen zu einer Ertragsdepression, wie ISLAM & EVANS (1994) sowie JACKSON (2000) feststellten.

Der ertragssteigernde Effekt einer zusätzlichen N-Düngergabe nimmt mit zunehmender N-Düngermenge ab, wie aus den Publikationen von WIESLER et al. (2001), SCHULTE AUF´M ERLEY et al. (2011) und ULAS et al. (2013) hervorgeht. In diesen Arbeiten wurden bereits bei einer Düngermenge von 120 kg ha⁻¹ 85% des Ertrags erreicht, der bei der doppelten N-Menge gebildet wurde. Bei Untersuchungen von RATHKE et al. (2005) genügte eine N-Düngung von 160 kg ha⁻¹, um 95% des Kornertrags der 240 kg ha⁻¹ N Variante zu erreichen.

Die hohen N-Düngermengen, die benötigt werden, um die höchstmöglichen Kornerträge zu erzielen, führen in Kombination mit der vergleichsweise geringen N-Abfuhr über das Korn zu hohen N-Salden von bis zu 120 kg ha⁻¹ (BEHRENS et al., 2001). SIELING & KAGE (2006) steigerten die N-Salden durch eine Kombination organischer und mineralischer N-Dünger auf bis zu 247 kg ha⁻¹.

Im Zusammenhang mit den N-Salden steht die N-Effizienz von Raps, die sich mit steigenden N-Düngermengen stetig verschlechtert. Bei HOCKING et al. (1997) reduzierte sich die agronomische N-Effizienz von 43 kg Korn je kg Mineraldünger-N in gering gedüngten Varianten auf 8 kg kg⁻¹ in hoch gedüngten Varianten. Vergleichbare Aussagen trafen BARLÓG & GRZEBISZ (2004^B), die zusätzlich den Effekt der N-Verteilung auf die N-Effizienz untersuchten und herausfanden, dass sich verspätete N-Düngergaben negativ auf die Verwertung des Mineraldünger-N auswirkten. SCHULTE AUF´M ERLEY et al. (2011) sowie ULAS et al. (2015) untersuchten die N-Ausnutzungseffizienz, die sich aus dem Kornertrag dividiert durch die totale N-Aufnahme vor der Ernte berechnet. Beide Studien belegen ebenfalls einen deutlichen Rückgang der N-Ausnutzungseffizienz bei steigenden N-Düngermengen.

Um die N-Düngermengen anzupassen und hohe N-Salden zu vermeiden, werden von der Offizialberatung der einzelnen Bundesländer Düngeempfehlungen und Berechnungsverfahren zur N-Düngung zur Verfügung gestellt. In die Berechnungen gehen neben dem Kornertrag der Standort, der N_{\min} -Wert und Bewirtschaftungsdaten sowie regionale Beschränkungen ein. In Kapitel 2.8.3 sind diese länderspezifischen Verfahren näher erläutert.

ENGSTRÖM et al. (2014) nennen mehrere wichtige Faktoren, die Einfluss auf die Höhe der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr haben: das Ertragsniveau des Standortes, der im Frühjahr mineralisierbare N im Boden und die N-Aufnahme Herbst. Diese besitzt eine enge negative Beziehung zur optimalen N-Düngermenge im Frühjahr, wie in Studien von HENKE et al. (2009), SCHLIEPHAKE (2011) und ENGSTRÖM (2012) herausgefunden wurde. Dagegen ist eine Bestimmung der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr über die N-Aufnahme zu Vegetationsbeginn nicht möglich.

Bis zum Eintritt der Vegetationsruhe im Winter nimmt Raps je nach Jahr und Standort zwischen $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ und $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ auf (HENKE et al., 2009, SCHLIEPHAKE, 2011). In Einzeljahren und bei frühen Saatterminen können N-Aufnahmen von 200 kg ha^{-1} und mehr erreicht werden (DEJOUX et al., 1999, SCHLIEPHAKE, 2011). Unter Einwirkung starker Kälte verliert Raps über Winter Blätter. Die damit einhergehenden N-Verluste können bis zu 100 kg ha^{-1} betragen. Allerdings werden nach DEJOUX et al. (2000) etwa nur 40% des in den abgefrorenen Blättern enthaltenen N im Frühjahr von den Pflanzen wieder aufgenommen. Um diesen Wert kann die Frühjahrsdüngung korrigiert werden (DEJOUX et al., 2000). Nach Vegetationsbeginn nimmt die N-Aufnahme erst zögerlich zu, während mit Beginn des Längenwachstums deutlich höhere N-Aufnahmeraten zu verzeichnen sind. BARRACLOUGH (1989), SCHJOERRING et al. (1995) und BARLÓG & GRZEBISZ (2004^B) fanden in ihren Versuchen zwischen Schossbeginn und der Blüte N-Aufnahmeraten von $3,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ bis zu $4,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Nach der Blüte gegen BBCH 80 erreicht Raps die maximale N-Aufnahme. In der Literatur finden sich für diesen Zeitpunkt Werte zwischen 190 kg ha^{-1} und 360 kg ha^{-1} (BARRACLOUGH, 1989, SCHJOERRING et al., 1995, WIESLER et al., 2001). Bereits in der Blüte steigen die N-Verluste durch Blattalterung und Blattabwurf deutlich an. Sie erreichen bis zu 12% der N-Aufnahme bzw. zwischen 15 kg ha^{-1} bis 45 kg ha^{-1} (SCHJOERRING et al., 1995, MALAGOLI et al., 2005, GOMBERT et al., 2010, KESSEL et al., 2012).

Der N-Gehalt in der Biomasse beträgt anfangs bis zu 4,5%; im Vegetationsverlauf ist eine kontinuierliche Abnahme des N-Anteils in der Biomasse hin zu knapp 1,8% in den Pflanzen zu beobachten. Zugleich variieren die N-Gehalte mit der Höhe der N-Düngung deutlich

(COLNENNE et al., 1998, BARLÓG & GRZEBISZ, 2004^B, SELEIMANN et al., 2013). Vor Eintritt in die Schossphase sind etwa 75% des von der Pflanze aufgenommenen N in den Blättern gespeichert (SCHJOERRING et al., 1995). Mit Beginn des Streckungswachstums verlagern die Rapspflanzen N aus den Blättern in die Stängel und von dort in die generativen Organe. Etwa 70% bis 80% des N in den generativen Organen entstammen der Verlagerung von N aus den Blättern, dem Stängel und den Wurzeln (SCHJOERRING et al., 1995, GOMBERT et al., 2010, PAPANTONIOU et al., 2013).

Bis zu Beginn des Streckungswachstums bestehen Rapspflanzen vor allem aus Blättern, wie GOMBERT et al. (2010), und PAPANTONIOU et al. (2013) feststellten. Im weiteren Verlauf der Vegetation verringert sich der Blattanteil kontinuierlich zu Gunsten des Stängels und der Schoten. Die Blattfläche ist für Raps zur Ertragsbildung wichtig, wie HABEKOTTÉ (1997) beschreibt. Raps reagiert dem Autor zufolge bis zu einem BFI von 3 mit Ertragszuwachs. Darüber hinaus ist kein Effekt auf den Ertrag beobachtbar, obwohl auch BFI bis zu 6 beobachtet wurden (GABRIELLE et al., 1998^A, DEJOUX et al., 1999, JUSTES et al., 2000, AUBERTOT et al., 2004).

Durch eine N-Düngung wird die Biomasseproduktion angeregt (LELEU et al., 2000), was im Herbst letztlich eine Erhöhung der Blattfläche mit sich bringt, die eng mit der N-Aufnahme im Herbst korreliert (DEJOUX et al., 1999). Erreichen Bestände bereits einen hohen BFI im Herbst, so verlieren diese über den Winter mehr Blätter, während schwächere und ungedüngte Bestände kaum Blattverluste aufweisen (GABRIELLE et al., 1998^A, JUSTES et al., 2000). Darüber hinaus beeinflusst die Härte des Winters die Blattverluste, da in milden Wintern weniger Blätter abgeworfen werden als in harten Wintern, in denen ein Großteil bzw. die komplette Blattfläche verloren geht (DEJOUX et al., 1999, AUBERTOT et al., 2004, BEHRENS & DIEPENBROCK, 2006).

Wie BARRACLOUGH (1989) und COLNENNE et al. (2002) feststellten, erreichen ungedüngte Pflanzenbestände bis zum Vegetationsende bis zu 26 dt ha⁻¹ TM, während mit Stickstoff versorgte Bestände vor dem Winter bis zu 45 dt ha⁻¹ TM erreichen können. In dieser Größenordnung bewegen sich auch die Ergebnisse von SCHLIEPHAKE (2011). Der Zuwachs nach Vegetationsbeginn ist bis zum Eintritt in die Schossphase noch recht gering. Danach wird ein täglicher Zuwachs von 0,4 dt ha⁻¹ TM bis 1,9 dt ha⁻¹ TM erzielt (BARRACLOUGH, 1989, PAPANTONIOU et al., 2013). Nach der Blüte der Rapspflanzen ist die maximale Biomasseakkumulation erreicht. Je nach N-Versorgung und Jahr reichen die TM-Aufwüchse von 90 dt ha⁻¹ bis 210 dt ha⁻¹ (BARRACLOUGH, 1989, BARLÓG & GRZEBISZ, 2004^A, BEHRENS et al., 2006, PA-

PANTONIOU et al., 2013). Ab diesem Zeitpunkt ist ein Rückgang des oberirdischen Biomasseaufwuchses, vor allem durch Blattverluste, zu verzeichnen (BARLÓG & GRZEBISZ, 2004^A).

Neben der N-Menge hat auch die N-Verteilung einen signifikanten Einfluss auf die Biomasseproduktion. So bilden Bestände mit einer betonten Startgabe zu VB deutlich mehr Biomasse aus als solche mit geringerer oder verzögerter N-Düngung (WRIGHT et al., 1988, BEHRENS et al., 2001). Allerdings zeigen die Versuche auch, dass eine hohe Biomasseproduktion nicht gleichbedeutend mit hohen Kornerträgen ist (BEHRENS et al., 2001).

Neben der Biomasseproduktion verlängert Stickstoff die Blattlebensdauer, die wiederum einen Einfluss besitzt (WRIGHT et al., 1988, LELEU et al., 2000, CHEEMA et al., 2010).

2.6 Agronomische Grundlagen Wintergerste

Wie bei allen Getreidearten sind sowohl bei zweizeiliger als auch bei mehrzeiliger Wintergerste die Bestandesdichte, die Kornzahl pro Ähre und das TKG als Parameter für den Ertragsaufbau wichtig. Daraus ergibt sich die Kornzahl pro Quadratmeter, die laut PRYSTUPA et al. (2004) sowie SERRAGO et al. (2013) eng mit dem Kornertrag von zweizeiliger Wintergerste verbunden ist.

Verschiedene Studien fanden bei zweizeiligen Genotypen deutlich dichtere Pflanzenbestände als bei mehrzeiligen Sorten (LE GOUIS et al., 1999, GARCÍA DEL MORAL et al., 2003). Die Autoren zählten je nach N-Düngung bis zu 897 Ähren je m² (zweizeilige Gerste) bzw. bis zu 650 Ähren je m² (mehrzeilige Wintergerste). GARCÍA DEL MORAL et al. (2003) fanden als Ursache für die dichteren Bestände zweizeiliger Wintergerste die deutlich größere Bestockungsrate von 0,11 Trieben pro Tag, während es in mehrzeiligen Beständen nur 0,07 Triebe täglich waren. Mit Erreichen des Schossbeginns ist die maximale Triebdichte erreicht. Ab diesem Zeitpunkt reduziert Gerste die Seitentriebe, bis eine feste Bestandesdichte feststeht, die um die Blüte erreicht wird (GARCÍA DEL MORAL & GARCÍA DEL MORAL, 1995, ALZUETA et al., 2012). Je dichter die Pflanzenbestände allerdings sind, desto größer ist die Triebreduktion, wie BAETHGEN et al. (1995) an zweizeiliger Sommergerste sowie GARCÍA DEL MORAL & GARCÍA DEL MORAL (1995) und ALZUETA et al. (2012) an zwei- und mehrzeiligen Wintergerstensorten feststellten. Als Hauptursache für den Rückgang von Trieben ist die Konkurrenz um Nährstoffe, Licht und Wasser anzunehmen (GARCÍA DEL MORAL & GARCÍA DEL MORAL, 1995, DE SAN CELEDONIO et al., 2014). Dabei gehen in dichten Beständen bis zu 67% der angelegten Triebe verloren, wie ELLEN (1993) berichtet. Die Bestockung sowohl von Sommer-

als auch von Wintergerstenpflanzen wird durch ein hohes N-Angebot gefördert, während ein N-Mangel die Bildung weiterer Triebe bremst (ELLEN, 1993, DELOGU et al., 1998, PRYSTUPA et al. 2003, PETERSON & ECKERSTEN, 2007, MORELL et al., 2011). Darüber hinaus bewirkt eine verzögerte N-Düngergabe nach Schossbeginn eine Erhaltung der Bestockungstriebe, wie PETERSON & ECKERSTEN (2007) in Sommergerste feststellten. Die Bestände waren nach einer einmaligen N-Düngergabe zu Vegetationsbeginn dünner als nach einer Aufteilung der N-Düngermenge auf zwei Applikationstermine. FISCHBECK et al. (1997) sowie MAIDL et al. (1998) untersuchten die Wirkung der N-Verteilung auf die Bestandesdichte von Winterweizen und schildern vergleichbare Ergebnisse.

Je dichter die Pflanzenbestände bei Getreide sind, desto weniger Körner je Ähre bilden sie aus. Diese negative Beziehung beschrieben BAETHGEN et al. (1995) in Sommergerste sowie FISCHBECK et al. (1997) und MAIDL et al. (1998) in Winterweizen. Allerdings fördert eine N-Düngergabe zu Schossbeginn die Kornbildung, was die kompensatorische Beziehung dieser Parameter zueinander verdeutlicht (BAETHGEN et al., 1995, MAIDL et al., 1998). In der Kornzahl je Ähre unterscheiden sich die zwei- und mehrzeilige Sortentypen deutlich voneinander. LE GOUIS (1992), LE GOUIS et al. (1999), GARCÍA DEL MORAL et al. (2003) sowie MORELL et al. (2011) fanden bei zweizeiliger Wintergerste zwischen 14,9 bis 24,7 Körner je Ähre, während mehrzeilige Sorten in diesen Studien deutlich mehr Körner je Ähre ausbildeten (25,8 bis 47,1 Körner je Ähre).

Das TKG beider Sortentypen unterscheidet sich deutlich. Während zweizeilige Sorten ein TKG von bis zu 44 g erreichen, wurden in mehrzeiligen maximal 39 g gemessen (DELOGU et al., 1998, LE GOUIS et al., 1999, GARCÍA DEL MORAL et al., 2003). Dieser Parameter wird bei beiden Sortentypen jedoch stark negativ von der Kornzahl je Quadratmeter beeinflusst, wie LE GOUIS et al. (1992) und auch PRYSTUPA et al. (2004) herausfanden. Damit decken sich diese Studien mit den Beobachtungen von DELOGU et al. (1998) und auch von MORELL et al. (2011), bei denen das TKG mit steigenden N-Düngerraten abnahm. PETERSON & ECKERSTEN (2007) begründen den Rückgang des TKG damit, dass bei guter N-Versorgung weniger Seitentriebe reduziert werden, die dann Ähren ausbilden, was letztlich zu kleineren Körnern führt. Positiv auf das TKG wirken sich laut MARINACCIO et al. (2015) späte N-Düngergaben nach dem Zweiknotenstadium aus, da durch die N-Zufuhr die Blattlebensdauer erhöht und somit die Kornfüllungsphase verlängert wird.

In den Untersuchungen von ELLEN (1993) bildete Wintergerste von der Aussaat im Herbst bis zu Schossbeginn im Frühjahr täglich durchschnittlich $4,5 \text{ kg ha}^{-1}$ Trockenmasse, so dass zu

BBCH 30 $7,7 \text{ dt ha}^{-1}$ erreicht waren. Dem Autor zufolge ist dieser Wert jedoch stark jahrgangs- und standortabhängig. Ein deutlicher Biomassezuwachs erfolgt bei beiden Sortentypen erst mit dem Längenwachstum ab BBCH 32 (CARRECK & CHRISTIAN, 1993, ELLEN, 1993, MARSHALL & ELLIS, 1998, MORELL et al., 2011, ZHAO et al., 2014), wobei LE GOUIS et al. (1999) keine signifikanten Unterschiede im Biomasseaufwuchs zwischen zwei- und mehrzeiligen Sorten feststellten. In der Studie von LE GOUIS et al. (1999) bildeten zwei- und mehrzeilige Wintergerste zwischen BBCH 30 und BBCH 49 ohne N-Düngung täglich $1,0 \text{ dt ha}^{-1}$ TM, während mit N-Düngung bis zu $1,8 \text{ dt ha}^{-1}$ TM täglich gebildet wurden. Erst mit Erreichen der Blüte differenzierten die Gerstentypen deutlich.

ELLEN (1993) sowie weiteren Studien (DELOGU et al., 1998, MANDERSCHIED et al., 2009, MORELL et al., 2011) zufolge hält das Pflanzenwachstum bis zum Ende der Teigreife an. MORELL et al. (2011) stellten ab diesem Zeitpunkt einen geringen Zuwachs fest, während in anderen Veröffentlichungen ein deutlicher Rückgang der oberirdischen Biomasse beschrieben wurde (ELLEN, 1993, DELOGU et al., 1998, MANDERSCHIED et al., 2009). Bei LE GOUIS (1992), LE GOUIS et al. (1999), PRYSTUPA et al. (2004), MORELL et al. (2011), DORDAS, (2012) bildeten zweizeilige Gerstensorten im Intervall zwischen der Blüte und der Ernte der Pflanzen 10 dt ha^{-1} bis 66 dt ha^{-1} Trockenmasse und erreichten eine oberirdischer Trockenmasse von bis zu 163 dt ha^{-1} . Mehr Trockenmasse (max. 173 dt ha^{-1}) im selben Zeitraum bildete den Autoren zufolge mehrzeilige Wintergerste durch einen Zuwachs zwischen 26 dt ha^{-1} und 66 dt ha^{-1} .

Als Ursache dafür kann vor allem die schwerere Ähre der mehrzeiligen Wintergerste angesehen werden, da nach der Untersuchung von LE GOUIS (1992) die Stängel- und Blattmasse beider Sortentypen identisch waren. Mit Beginn des Ährenschiebens verändert sich bei beiden Sortentypen der Anteil der Pflanzenorgane am Gesamtgewicht. So nimmt der Stängel- und Blattanteil deutlich ab, während das Gewicht der Ähre zunimmt. Der Ährenanteil kann vor der Kornfüllungsphase je nach Sortentyp bis 13% betragen, zur Ernte nimmt das Gewicht der Ähren über 60% des Gewichts der Gesamtpflanze ein (CARRECK & CHRISTIAN, 1991, ELLEN, 1993, KOEFOED, 1993, MANDERSCHIED et al., 2009, DORDAS, 2012).

Eine verbesserte N-Versorgung führt zu einer höheren Seitentriebbildung und damit zu einem höheren Biomasseaufwuchs, was aus der Publikation von BAETHGEN et al. (1995) gefundenen positiven Korrelation zwischen der Triebdichte und dem TM-Aufwuchs abzuleiten ist. Während zu Schossbeginn die Unterschiede zwischen gedüngten und ungedüngten Parzellen recht gering sind, entwickeln gut mit N versorgte Bestände im Verlauf der Vegetation bis zur Ernte

deutlich mehr Biomasse als ungedüngte Pflanzen, so dass sich die Biomasse um 30% bis 50% erhöht. In Einzelfällen verursacht eine N-Düngung sogar eine Verdoppelung bis Vervierfachung des TM-Aufwuchses der ungedüngten Parzellen (GRANT et al., 1991^A, MARSHALL & ELLIS, 1998, MANDERSCHIED et al., 2009, DORDAS, 2012). Auf sehr hohe N-Dünger-mengen über 200 kg ha⁻¹ reagierten in der Studie von ZHAO et al. (2014) zwei und mehrzeilige Wintergerstensorten nur noch mit geringen TM-Zuwächsen.

Beim Anbau von Wintergerste besteht die Absicht, möglichst hohe Kornerträge bei gleichzeitig ressourcenschonendem Einsatz des Mineraldünger-N zu erzielen. Dabei üben sowohl die Sortenwahl als auch der Standort und die Jahreswitterung einen großen Einfluss auf das Ertragsbildungsvermögen von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste aus (GRANT et al., 1991^A, DELOGU et al., 1998, MARINACCIO et al., 2015).

Die Kornerträge bei zweizeiliger Wintergerste betragen ohne N-Düngung 35 dt ha⁻¹ bis 53 dt ha⁻¹ und bei mehrzeiliger 21 dt ha⁻¹ bis 57 dt ha⁻¹ (GRANT et al., 1991^A, CARRECK & CHRISTIAN, 1993, LE GOUIS et al., 1999, PRYSTUPA et al., 2004, MENGEL et al., 2006). Durch eine N-Düngung erhöhten sich bei MAIDL et al. (1998) die Kornerträge auf bis zu 95 dt ha⁻¹ (zweizeilig) bzw. 109 dt ha⁻¹ (mehrzeilig) im gemäßigten Klima. Um diese Höchsterträge erreichen zu können, sind je nach Standort und Sortentyp zwischen 110 kg ha⁻¹ und 200 kg ha⁻¹ Mineraldünger-N nötig (MAIDL et al., 1996, ANGÁS et al., 2006, HEUMANN et al., 2013). MAIDL et al. (1996) zeigten außerdem, dass zweizeilige Wintergerste 30 kg ha⁻¹ mehr N-Dünger benötigt, um das Ertragsniveau des mehrzeiligen Sortentyps zu erreichen.

Aufgrund des breiten N-Düngeroptimums von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste nimmt der ertragssteigernde Effekt mit zunehmender N-Düngermenge ab. Bei HEUMANN et al. (2013) reichten zum Erzielen von 98% des Maximalertrags 95% der maximalen N-Düngermenge aus. Mit 67% der maximalen N-Düngermenge bildete die Wintergerste immer noch 85% des Maximalertrags. Frühere Studien von GRANT et al. (1991^A), MAIDL et al. (1996) sowie LE GOUIS et al. (1999) schildern vergleichbare Beobachtungen.

Beim direkten Vergleich der Kornerträge einer zweizeiligen und einer mehrzeiligen Wintergerste stellten MAIDL et al. (1996), LE GOUIS et al. (1999), GARCÍA DEL MORAL et al. (2003) sowie MARINACCIO et al. (2015) eine deutliche Überlegenheit des mehrzeiligen Sortentyps fest. Er erreichte bis zu 11% höhere Kornerträge gemessen als der zweizeilige Sortentyp. Ursache für die Überlegenheit mehrzeiliger Sorten ist die geringere Anfälligkeit gegenüber Umwelteinflüssen, da diese Sortentypen aufgrund der größeren Ähren die Kornzahl je Ähre

und das TKG leichter verändern können als zweizeilige Sortentypen, die den Kornertrag vor allem über die Bestandesdichte generieren (LE GOUIS et al., 1999, GARCÍA DEL MORAL et al., 2003). Darüber hinaus ist es durch die größeren Ähren möglich, mehr Assimilate aus den vegetativen Pflanzenteilen in die Körner zu transportieren (LE GOUIS et al., 1992). DE SAN CELEDONIO et al. (2014) zufolge reagierte zweizeilige Wintergerste vor allem zwischen BBCH 37 und der Blüte mit deutlichen Ertragseinbußen auf Wassermangel, während eine Trockenheit in der Kornfüllungsphase die Ertragsfähigkeit geringfügig beeinträchtigte.

Um hohe Kornerträge bei effizientem N-Düngereinsatz zu erreichen, ist es bei Getreide besser, die N-Düngergaben optimal aufzuteilen, anstatt die gesamte N-Düngermenge auf einmal zu applizieren, wie FISCHBECK et al. (1997) und MAIDL et al. (1998) bei Weizen, BAETHGEN et al. (1995) sowie PETTERSON & ECKERSTEN (2007) bei Sommergerste und MAIDL et al. (1996) bei Wintergerste herausfanden. Bei FISCHBECK et al. (1993) reduzierten hohe N-Aufnahmen, bedingt durch ein hohes N-Angebot vor BBCH 32, bei Winterweizen den Kornertrag. Analog dazu führten hohe N-Düngergaben vor dem Einsetzen des Längenwachstums bei MAIDL et al. (1996) bei zwei- und mehrzeiligen Sortentypen zu schlechteren Kornerträgen. Demzufolge wird der Mineraldünger-N besser in Ertrag umgesetzt, wenn die erste Gabe vor Schossbeginn nicht zu hoch bemessen wird und zwei weitere N-Düngergaben zu BBCH 32 und BBCH 47 folgen. Bei der Verteilung des N-Düngers sind allerdings Sorteneigenschaften zu berücksichtigen. Zweizeilige Sorten bis BBCH 30 wiesen einen deutlich höheren Bedarf an Mineraldünger-N auf als mehrzeilige Sorten, bei denen eher geringe N-Startgaben bis 40 kg ha^{-1} zu höheren Kornerträgen führten (MAIDL et al., 1996).

Die Proteinkonzentration im Korn korreliert negativ mit dem Kornertrag. Je mehr Kornertrag bei gleicher N-Düngermenge gebildet wird, desto weniger Protein lagern die Gerstenpflanzen in die Körner ein (GRANT et al., 1991^B). Damit ist der Proteingehalt auch ein Indikator für die N-Versorgung der Pflanzen, wie PETTERSON & ECKERSTEN (2007) an zweizeiliger Braugerste und GRANT et al. (1991^B) an mehrzeiliger Wintergerste beschrieben. Daneben hoben die Autoren die Standortgüte als Einflussfaktor auf dieses Qualitätskriterium hervor. MAIDL et al. (1996) verglichen die Proteingehalte von zwei- und mehrzeiligen Sortentypen und fanden bei zweizeiligen Sorten etwas höhere Proteingehalte als bei mehrzeiligen Sorten, was die Ergebnisse von MARINACCIO et al. (2015) stützt, die bei maximaler N-Düngermenge einen N-Gehalt von 12,2% in zweizeiliger und von 12,0% in mehrzeiliger Wintergerste fanden. In der Studie von GRANT et al. (1991^B) erhöhten steigende N-Gaben den Proteingehalt von mehrzeiliger Wintergerste auf bis zu 15,4%. Neben der Menge beeinflusst allerdings auch die N-Ver-

teilung die Proteinkonzentration im Korn, indem spätere N-Applikationen zu BBCH 32 den Eiweißgehalt steigern (CARRECK & CHRISTIAN, 1991, PETTERSON & ECKERSTEN, 2007). Ähnliche Ergebnisse publizierten STICKSEL et al. (2000) bei Winterweizen.

Steigende N-Düngergaben führen sowohl bei zweizeiliger als auch bei mehrzeiliger Wintergerste zu einer schlechteren Verwertung des eingesetzten Mineraldünger-N (ANGÁS et al., 2006, GRANT et al., 1991^B, LE GOUIS et al., 1999, MONTEMURRO et al., 2006). Je nach Düngerverfahren und N-Düngermenge werden in der Literatur Werte für die agronomische Effizienz von mehrzeiliger Wintergerste zwischen $8,6 \text{ kg kg}^{-1}$ und $30,3 \text{ kg kg}^{-1}$ angegeben (DELOGU et al., 1998, MENGEL et al., 2006). Der Stickstoff wird nach MAIDL et al. (1996) bei beiden Sortentypen vor allem bei hohen Startgaben schlechter verwertet, während eine Verteilung des Mineraldünger-N auf eine Startgabe mit zwei Folgeapplikationen den Kornertrag und den Proteingehalt erhöht und damit die N-Verwertung verbessert.

SELING & KAGE (2006) untersuchten in ihrer Studie die Wirkung unterschiedlicher N-Düngergaben auf den N-Saldo von Wintergerste. Durch die abnehmende N-Effizienz bei hohen N-Düngergaben stieg der N-Saldo den Autoren zufolge auf 78 kg ha^{-1} . Kombiniert mit einer hohen organischen Düngung erreichte der N-Saldo auf 231 kg ha^{-1} , was das Risiko der N-Auswaschung deutlich erhöht (SELING & KAGE, 2006, HEUMANN et al., 2013).

Der N-Gehalt in der oberirdischen Biomasse wird neben der Höhe der N-Düngung vom Pflanzenalter beeinflusst. LE GOUIS et al. (1992), DORDAS (2012) sowie ZHAO et al. (2014) registrierten mit zunehmendem Pflanzenalter, unabhängig vom Sortentyp, einen deutlichen Rückgang des N-Gehalts. Varianten mit einer hohen N-Versorgung wiesen ZHAO et al. (2014) zufolge zu Messbeginn einen N-Gehalt von bis zu 4,3% auf, während in ungedüngten Varianten eine N-Konzentration von knapp 3,0% gemessen wurde. Mit zunehmendem Biomasseaufwuchs geht der N-Gehalt zurück und erreicht bis zur Ernte je nach N-Versorgung zwischen 0,5% und 1,4% im Stroh (GRANT et al., 1991^B, LE GOUIS et al., 1992, DORDAS, 2012).

Das Produkt aus dem N-Gehalt und dem TM-Aufwuchs ist die N-Aufnahme. Bis zum Vegetationsende im Herbst war die N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse bei Gerste mit 5 kg ha^{-1} gering (HEUMANN et al., 2013). Zu Beginn der Vegetationsperiode stellten CARRECK & CHRISTIAN (1991) in zweizeiliger Gerste eine N-Aufnahme von 13 kg ha^{-1} fest. Unverhältnismäßig warme Winter, in denen weiterhin eine N-Aufnahme aus dem Bodenpool möglich war, ließen den Autoren zufolge die N-Aufnahme zu Vegetationsbeginn auf 49 kg ha^{-1} steigen. Bis zum Zweiknotenstadium erhöhte sich bei MAIDL et al. (1996) die N-Aufnahme deut-

lich, wobei sich die des zweizeiligen Sortentyps (113 kg ha^{-1}) deutlich von der des mehrzeiligen (95 kg ha^{-1}) unterschied. Danach stieg die N-Aufnahmerate deutlich an. Der Studie von CARRECK & CHRISTIAN (1991) zufolge, nahm zweizeilige Wintergerste bis zur Blüte täglich durchschnittlich $1,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ auf. Gegen Ende der Milchreife erreicht die N-Aufnahme das Maximum (DELOGU et al., 1998, MAIDL et al. 1996, ANGÁS et al., 2006). Ab diesem Zeitpunkt wurde kein weiterer N mehr von den Pflanzen aufgenommen. MAIDL et al. (1996) fanden sogar einen deutlichen Rückgang des von den Pflanzen aufgenommenen N bis zur Ernte von 85 kg ha^{-1} bei mehrzeiliger und 65 kg ha^{-1} bei zweizeiliger Wintergerste, was sich mit den Beobachtungen von DELOGU et al. (1998), MARSHALL & ELLIS (1998), ANGÁS et al. (2006) deckt. Somit nehmen mehrzeilige Sortentypen bis zur je nach Standort und Jahr bis zu $282 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ in die oberirdische Biomasse auf, während die N-Aufnahme zweizeiliger Sortentypen zum selben Zeitpunkt geringer ist (244 kg ha^{-1}) (CARRECK & CHRISTIAN, 1991, MAIDL et al., 1996, MARSHALL & ELLIS, 1998, ANGÁS et al., 2006). Den Autoren zufolge nehmen zwei- und mehrzeilige Gerstenpflanzen bis zur Ernte ohne N-Düngung bis zu $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ auf.

Der in den vegetativen Pflanzenteilen enthaltene Stickstoff wird während des Wachstums von den Halmen und Blättern in die Körner transportiert. DORDAS (2012) fand heraus, dass unabhängig vom Sortentyp mehr als die Hälfte des Stickstoffs in die Körner verlagert wird. CARRECK & CHRISTIAN (1991) publizierten eine N-Verlagerung in die generativen Pflanzenteile von bis zu 81%. Ursache dafür ist laut FISCHBECK et al. (1997) die sink-Funktion der Ähre, über die die Pflanze den Stickstoff aus der Biomasse in die generativen Organe transportiert.

2.7 Einflüsse auf die Ertragsvariabilität landwirtschaftlicher Flächen

Die Variabilität der Erträge landwirtschaftlicher Böden wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Vor allem bodenphysikalische und bodenchemische Parameter sowie die Topographie des Schlags wirken sich auf die Ertragsbildung auf den Teilflächen aus (HATFIELD, 2000, OLIVER et al., 2010). Weiterhin beeinflussen die Witterung sowie eine unterschiedliche Bewirtschaftung von Teilschlägen die Kornerträge ebenso wie die heterogene Verteilung von Nährstoffen und Bodenverdichtungen (MAIDL et al., 1999, HATFIELD, 2000, KELLER et al., 2012).

Kulturartübergreifend reagieren alle Pflanzen auf unterschiedliche Standortbedingungen innerhalb eines Feldes mit Ertragsveränderungen, wie JAMES & GODWIN (2003) bei Gerste,

LIEBLER (2003), TAYLOR et al. (2003), SCHÄCHTL (2004), LAWES et al. (2009) und JOHNEN et al. (2014) bei Weizen, SCHÄCHTL (2004) bei Kartoffeln, LIEBLER (2003) bei Mais sowie MÜLLER (2005) bei Raps feststellten. Ursache für die Ertragsvariabilität innerhalb eines Schlags sind die Bodentextur und Bodenstruktur sowie der variierende Humusgehalt, die Speicherfähigkeit pflanzennutzbaren Wassers und die unterschiedliche Durchwurzelungstiefe (MAIDL et al., 1999, KELLER et al., 2012, JOHNEN et al., 2014).

KELLER et al. (2012) zufolge besitzt ein optimaler Boden neben ausreichend Grobporen für die Ableitung überschüssigen Wassers auch einen großen Anteil an Mittel- und Feinporen, die das Wasser pflanzenverfügbar speichern können. Zu viele Feinporen verringern jedoch die hydraulische Leitfähigkeit und sorgen durch Staunässe für geringere Erträge im Vergleich zu Böden mit hoher Leitfähigkeit, wie KELLER et al. (2012) zeigten. Besitzt ein Boden einen zu hohen Anteil an Grobporen, wie bei Sandböden, so verringert sich das Ertragspotential eines Standortes aufgrund der schlechteren Wasserspeicherfähigkeit.

MAIDL et al. (1999) fanden auf heterogenen Flächen stark schwankende Getreideerträge; die Autoren berichten von Variationskoeffizienten von bis zu 23,8%. Während in Jahren mit ausreichend Niederschlag die Differenz zwischen guten und schwächeren Standorten weniger deutlich ausgeprägt ist, tritt vor allem in trockenen Jahren der Effekt einer schlechteren Wasserspeicherfähigkeit des Bodens auf den Kornertrag hervor (LAWES et al., 2009, MOELLER et al., 2009). NE-Standorte bilden bei unterdurchschnittlichen Regenmengen in der Vegetationszeit deutlich weniger Ertrag aus als Hohertragszonen, bei denen das höhere Wasserangebot zu einer Verlängerung der Assimilationszeit und damit bis zu 30% höheren Kornerträgen bei Weizen führt (SCHÄCHTL, 2004). Vergleichbare Ergebnisse publizierten TAYLOR et al. (2003), bei denen Weizen auf einem guten Standort 10 dt ha⁻¹ mehr Ertrag gegenüber einem Sandstandort erreichte. Vorteile haben sandige Böden dagegen in sehr feuchten Jahren, da durch den hohen Grobporenanteil das überschüssige Wasser schnell abgeleitet werden kann, während sich auf den ertragreichen Böden mit einer geringeren Wasserleitfähigkeit Staunässe bildet. Unter solchen extrem feuchten Bedingungen können die schlechteren Böden sogar höhere Kornerträge erreichen (TAYLOR et al., 2003, JAMES & GODWIN, 2003, SCHÄCHTL, 2004, JOHNEN et al., 2014). In Jahren mit ausreichend Niederschlag profitieren Pflanzen neben dem höheren Bodenwasservorrat von der besseren N-Speicherung und dem höheren N-Angebot auf den ertragreichen Teilschläge, während auf NE-Standorten mehr Stickstoff, vor allem nach hohen Niederschlagsmengen, ausgewaschen wird, was zu einer Ertragsreduktion trotz gleicher N-Düngung führt (LIEBLER, 2003, SCHÄCHTL, 2004). Vergleichbare Ergebnisse

erzielten JAMES & GODWIN (2003) bei zweizeiliger Wintergerste, bei der in unterschiedlichen Ertragszonen trotz gleicher N-Düngermengen unterschiedliche Kornerträge erzielt wurden.

Der ausgeprägte Jahreseffekt führt zu einer hohen Variabilität der Kornerträge auf unterschiedlichen Standorten, weshalb in keinem Jahr dieselbe Ertragsabstufung wiedergefunden wird (LAMB et al., 1997, SCHÄCHTL, 2004). Werden allerdings die Relativerträge verglichen, so sind diese über die Jahre sehr stabil (SCHÄCHTL, 2003, KELLER, 2012). Vergleichbare Ergebnisse schildert SCHLIEPHAKE (2011), der für Raps eine enge Beziehung zwischen Relativerträgen und dem absoluten Jahresertrag fand und damit ein ähnliches Ertragsverhalten sowohl in starken als auch schwachen Jahren feststellte.

Obwohl die Erträge und N-Entzüge innerhalb eines Feldes deutlich variieren, werden die Schläge in der landwirtschaftlichen Praxis bisher überwiegend einheitlich gedüngt (DAMPNEY et al., 1999). Die Pflanzen in den NE-Zonen können unter diesen Bedingungen den gedüngten Stickstoff oftmals nicht vollständig verwerten, was in diesen Teilbereichen zu hohen N-Salden und N-Verlusten führt.

2.8 N-Düngeverfahren und Empfehlungen zur N-Düngung

2.8.1 Sensorgestützte, teilflächenspezifische Düngeverfahren

AUERNHAMMER (2001) beschreibt verschiedene Ansätze der teilschlagspezifischen Düngung, die zur Optimierung des N-Einsatzes beitragen sollen. Im Mapping-Verfahren (Mapping) erfolgt die Nährstoffversorgung anhand von Ertrags- und Bodenkarten. Aufgrund der schwankenden Witterung – und damit jahresspezifischer Ertragserwartungen von Teilflächen – sind Karten allerdings allein nur bedingt für die Optimierung der N-Düngung zu nutzen, was aus den Ergebnissen von WELSH et al. (2003^A) und WELSH et al. (2003^B) hervorgeht, die einen Mapping-Ansatz mit einer Online-Messung der Pflanzenentwicklung bei Gerste und Weizen verglichen.

Eine weitere Möglichkeit, Pflanzenbestände angepasst zu düngen, stellt nach AUERNHAMMER (2001) das Online-Verfahren (Online) dar. Bei diesem Verfahren erfasst ein Sensor während der Überfahrt die aktuelle Nährstoffversorgung der Pflanzen und passt die N-Düngung anhand eines Regelalgorithmus an. SCHÄCHTL (2004) kritisiert dieses System, da der von der Messtechnik erfasste Versorgungszustand nur die standort- und witterungsabhängigen Bedingungen der Vergangenheit darstellt. Gleichzeitig führt eine Düngung nach dem Online-

Verfahren laut EBERTSEDER et al. (2003) zu höheren N-Gaben auf NE-Standorten, während HE-Standorte weniger Stickstoff erhalten. Dieses Düngesystem führt letztlich zu einer verschlechterten N-Effizienz und damit zu N-Überschüssen in den Niedrigertragszonen. Um die Präzision von Sensorsystemen zu erhöhen, fordern deshalb AUERNHAMMER (2001) und EBERTSEDER et al. (2003), Sensorsysteme mit zusätzlichen Hintergrundinformationen wie Boden- und Ertragskarten oder auch Wettersimulationskarten zu kombinieren (Online + Mapping). Ein solches Verfahren ermöglicht es unter Berücksichtigung eines realistischen Ertragspotentials, die Pflanzenbestände je nach aktuellem Nährstoffzustand zu versorgen.

MAIDL et al. (2004) verglichen diese drei Düngeverfahren mit einer schlageinheitlichen Düngung bei Weizen. Dabei zeigte sich, dass die Kombination aus historischen Schlagdaten und einer Online-Messung (Online + Mapping) einem Mapping-Ansatz in der Ertragsleistung signifikant überlegen ist. Gleichzeitig war die applizierte N-Düngermenge gegenüber dem Online-Verfahren im Durchschnitt 6% geringer.

Das an der TU München entwickelte Düngeverfahren Online + Mapping für Winterweizen besteht aus zwei Teilen – einem Messalgorithmus und einem Düngealgorithmus mit den ertragspezifischen, optimalen N-Aufnahmekurven, in denen auch die Produktqualität berücksichtigt wird (MAIDL, 2011^A, Maidl, 2011^B). Die Abschätzung der aktuellen N-Aufnahme (NA_{akt}) erfolgt über Messalgorithmen, die an den Vegetationsindex REIP angepasst sind, anhand einer linearen Gleichung. Dabei stellt a die Steigung und b den Achsenabschnitt dar (Gleichung 7).

Die aktuelle N-Aufnahme wird mit der Soll-N-Aufnahme zum jeweiligen Entwicklungsstadium des Weizens verglichen. Haben die Pflanzen für das jeweilige Ertragspotential zu viel bzw. zu wenig N aufgenommen, so reduziert bzw. erhöht sich die zu düngende N-Menge. Weiterhin geht in die Kalkulation des N-Düngerbedarfs die Menge N ein, die bis zum nächsten Düngetermin aufgenommen werden soll (Gleichung 8). Die Gleichung wird um den Korrekturfaktor DIMA erweitert. Darin sind vier einzelne Faktoren zusammengefasst, die in gegenseitiger Wechselwirkung zueinander stehen. Zum einen fließt über den Faktor DIMA die durchschnittliche Wirkungsdauer bei der Berechnung der N-Düngermenge ein. Diese muss in die N-Düngerberechnung einbezogen werden, da der N-Dünger eine kurzfristige Sofortwirkung zum jeweiligen Düngetermin sowie eine langfristige indirekte Wirkung aufweist, die sich mit den folgenden Düngergaben überlagert. Weiterhin wird berücksichtigt, dass ein Teil des applizierten N-Düngers im Boden immobilisiert wird und damit den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung steht, während andererseits wiederum N aus dem vorhandenen Bodenpool

mineralisiert wird. Die Ausnutzungsrate des N-Düngers ist ebenso im Faktor DIMA eingerechnet.

$$(7) \quad NA_{akt} = REIP \cdot a + b$$

$$(8) \quad \text{N-Düngermenge} = (NA_{nD} - NA_{Soll} + (NA_{Soll} - NA_{akt})) \cdot DIMA$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
NA_{akt}	$kg\ ha^{-1}$	aktuelle N-Aufnahme
a	-	a-Wert, Steigung der linearen Regressionsgeraden
b	-	b-Wert, Y-Achsenabschnitt der linearen Regressionsgeraden
N-Düngermenge	$kg\ ha^{-1}$	benötigte N-Düngermenge
NA_{nD}	$kg\ ha^{-1}$	standortspezifische Soll-N-Aufnahme bis zum nächsten Düngetermin
NA_{Soll}	$kg\ ha^{-1}$	standortspezifische Soll-N-Aufnahme zum Düngetermin
DIMA	-	Faktor DIMA

Für die teilflächenspezifische Düngung von Raps wurde von PAHLMANN (2013) ein Düngungsverfahren entwickelt, das auf Ergebnissen von HENKE et al. (2009) aufbaut. Diese stellten eine enge Beziehung ($R^2 = 0,68$) zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr fest. Der Algorithmus von PAHLMANN (2013) berechnet die optimale N-Düngermenge im Frühjahr in Abhängigkeit der mittleren optimalen N-Düngermenge aller Teilflächen und der mit einem Korrekturfaktor c (-1,31) gewichteten Differenz der N-Aufnahme im Herbst der jeweiligen Teilfläche zur mittleren N-Aufnahme im Herbst aller Teilflächen (Gleichung 9). Die mittlere optimale N-Düngermenge aller Teilflächen wird einheitlich um $-30\ kg\ ha^{-1}$ korrigiert (PAHLMANN, 2013).

$$(9) \quad N_{opt(TF)} = mN_{opt} + c \cdot (N_{auf(TF)} - mN_{auf})$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$N_{opt(TF)}$	$kg\ ha^{-1}$	optimale N-Düngermenge der Teilfläche
mN_{opt}	-	mittlere optimale N-Düngermenge aller Teilflächen
c	-	Korrekturfaktor (-1,31)
$N_{auf(TF)}$	$kg\ ha^{-1}$	N-Aufnahme der Teilfläche
mN_{auf}	$kg\ ha^{-1}$	mittlere N-Aufnahme aller Teilflächen

2.8.2 Sensorgestützte N-Düngesysteme verschiedener Hersteller

Seit einigen Jahren vertreiben mehrere Firmen Systeme zur sensorgestützten, teilflächenspezifischen N-Düngung. Die am Markt angebotenen N-Düngeverfahren unterscheiden sich in den Düngealgorithmen und in den verwendeten Vegetationsindices bzw. in den mit den Sensoren gemessenen Wellenlängen.

YARA

Die Firma YARA vertreibt passive und aktive Düngesensoren. Beide Sensoren messen das vom Pflanzenbestand reflektierte Licht, wobei passive Sensoren nur bei Tageslicht einsetzbar sind. Aktive Sensoren verfügen über eine eigene Lichtquelle und sind somit tagesgangunabhängig. Die Sensoren sind mit Düngesystemen verbunden, die bei Wintergetreide und Winter-raps sowie bei mehreren Sommerungen einsetzbar sind (YARA, 2014). Die Sensoren erfassen die N-Aufnahme von Pflanzenbeständen. Daraus wird die für den Pflanzenbestand nötige N-Düngermenge abgeleitet. Während beim Getreide die Startgabe ohne Sensor gegeben wird, ist für die folgenden beiden Applikationstermine zum Schossen und Schieben des Fahnenblattes sowie als Qualitätsgabe bei Winterweizen zu BBCH 49 eine Sensordüngung möglich. Die Regelung der N-Gaben erfolgt anhand des Nährstoffstatus der Pflanzen. Je höher die N-Aufnahme des Pflanzenbestandes ist, desto geringer fällt die Düngergabe aus. Dagegen erhöht sich die Düngergabe bei sinkender N-Aufnahme. Um eine N-Überdüngung sehr schwacher Bestände zu vermeiden, wird die Düngung zurückgefahren, sobald ein definierter Sensorwert unterschritten wird (YARA, 2014, AGRICON, 2014^A). Vor einer Sensorüberfahrt ist eine Kalibration auf dem Feld nötig. Dazu wird gemäß den Herstellerangaben einer vorher gemessenen Referenzfläche die optimale N-Menge zugeordnet.

Die N-Düngung zu Raps kann über zwei Verfahren mit dem YARA-Sensor vorgenommen werden. Um die N-Düngung nach der Relativkalibrierung durchführen zu können, muss eine repräsentative Fahrgasse abgefahren werden (YARA, 2014, AGRICON, 2014^A). Dieser wird eine durchschnittliche N-Düngermenge zugeordnet, was laut dem Hersteller zu einer bedarfsgerechten Düngerverteilung führt. Mit diesem Verfahren können demnach Unterschiede im Bestand ausgeglichen werden. Das zweite Düngeverfahren basiert auf der Messung der N-Aufnahme (YARA, 2014, AGRICON, 2014^A). Über die Differenz der aktuellen N-Aufnahme und dem entsprechenden Soll-N-Aufnahmewert für die erste und zweite Gabe wird die nötige N-Düngermenge kalkuliert. Das führt dazu, dass – wie bei Getreide auch – gut entwickelte Rapsbestände weniger N erhalten als schwach entwickelte. Die Düngermenge der ersten Gabe

kann alternativ bereits über die N-Aufnahme im Herbst bestimmt werden (WRÓBEL, 2014). Im Anschluss an die Überfahrt kurz vor Vegetationsende erfolgt die Erstellung von Streukarten, anhand derer zu VB die N-Düngung durchgeführt wird. Weiterhin fließen das Ertragsniveau, die Auswinterung und das N-Nachlieferungspotential in die N-Düngeralkulation ein (WRÓBEL, 2014, AGRICON, 2014^B).

Die Messung der N-Aufnahme erfolgt über den Index YARA[®], der aus zwei Wellenlängen des gemessenen Reflexionsspektrums berechnet wird (Gleichung 10) (JASPER et al., 2009).

$$(10) \quad \text{YARA}^{\text{®}} = 100 \cdot (\ln R_{760} - \ln R_{730})$$

Fritzmeier ISARIA

Das N-Düngesystem ISARIA der Firma Fritzmeier ist ein aktives Sensorsystem, das über Dioden verschiedene Wellenlängen aussendet. Aus der Rückstrahlung werden Vegetationsindices berechnet, die die N-Aufnahme des Pflanzenbestandes abbilden (FRITZMEIER, 2015). Dieses N-Düngesystem verfügt über zwei unterschiedliche Düngemodi.

Sollen die Pflanzen nach dem Einpunktmodus gedüngt werden, ist eine Kalibrationsfahrt über den Bestand nötig (LIMBRUNNER, 2014). Dieser Kalibration wird eine Düngermenge zugeordnet, die der Landwirt ausbringen möchte. So erhöht oder reduziert der Sensor je nach N-Aufnahme des Pflanzenbestandes die N-Düngermenge. Weiterhin ist es möglich, den Sensor so einzustellen, dass eine vorgegebene, durchschnittliche N-Düngermenge nicht überschritten wird. Um die Düngeverteilung auf das Ertragsniveau anpassen und damit die N-Düngung effizienter gestalten zu können, besteht die Möglichkeit der Kartenhinterlegung. Hierfür dienen Ertrags- und Bodenkarten (LIMBRUNNER, 2014).

Der zweite verfügbare Modus entspricht dem von der TU München entwickelten Düngesystem (MAIDL, 2011^A, MAIDL 2011^B). Dieses ist für die Entwicklungsstadien BBCH 30 bis BBCH 65 in Winterweizen einsetzbar. Der Algorithmus ermittelt sensorbasiert die aktuelle N-Aufnahme des Pflanzenbestandes. Die N-Aufnahme wird mit der für das Ertragsniveau und das Entwicklungsstadium optimalen N-Aufnahme verglichen. Haben die Pflanzen zu viel bzw. zu wenig N aufgenommen, so wird die Differenz zwischen aktueller und optimaler N-Aufnahme auf die N-Düngermenge angerechnet. Die Berechnung der N-Düngermenge zu einem bestimmten Entwicklungsstadium erfolgt über die Differenz zwischen den Soll-N-Aufnahmen des aktuellen Düngezeitpunktes und der optimalen N-Aufnahme zum nächsten ge-

planten Düngetermin. In diesem Ergebnis werden bei der N-Düngung die N-Immobilisierung, die N-Ausnutzungsrate, die N-Mobilisierung aus dem Boden und die Wirkungsdauer des Dünger-N mitberücksichtigt.

Greenseeker

Von der Firma Landdata Eurosoft wird der Sensor Greenseeker vertrieben. Dieses Messsystem erfasst die Pflanzenreflexion und bildet daraus den Vegetationsindex NDVI. Der Düngelalgorithmus wird vom Anwender kalibriert (BOSCH, 2011). Dies geschieht, indem eine für den Pflanzenbestand des Feldes repräsentative Fahrgasse abgefahren wird. Dabei werden die NDVI-Werte erfasst. Am Ende der Kalibrationsfahrt müssen den Messwerten Düngermengen zugeordnet werden. Dazu werden vier Intervalle gebildet; die höchsten Düngermengen werden den niedrigen NDVI-Werten zugeordnet, um den Pflanzenbestand zu fördern (BOSCH, 2011). Hohe Messwerte lassen auf einen sehr gut versorgten Pflanzenbestand schließen, weshalb in diesen Bereichen die Düngermengen reduziert werden können. Dieses Messverfahren ist in den Kulturen Weizen, Gerste und Raps anwendbar.

2.8.3 N-Düngeralkulationen

Im folgenden Abschnitt werden Verfahren zur Kalkulation des N-Bedarfs von Wintergerste und Winterraps einiger Bundesländer sowie von Frankreich vorgestellt. In der Bundesrepublik Deutschland unterscheiden sich die Düngesysteme der einzelnen Bundesländer. Mit der neuen Düngeverordnung soll allerdings ein bundeseinheitlicher Standard zur Ermittlung des N-Bedarfs der Ackerkulturen eingeführt werden (BLAG, 2012, EISELE, 2013). Die Berechnung der N-Düngermengen wird EDV-gestützt erfolgen. Die Düngebedarfsermittlung soll auf einheitlichen, ertragsabhängigen Gesamtsollwerten für die einzelnen Kulturen beruhen. Standort- und jahresspezifische Einflüsse werden durch Korrekturfaktoren berücksichtigt (BLAG, 2012).

Düngeberatungssystem Stickstoff (DSN) (Bayern) (WENDLAND ET AL., 2012, LFL, 2014)

Die Berechnung der N-Düngermengen erfolgt nach der N-Sollwertmethode. In Abhängigkeit des Ertragsniveaus werden für Raps N-Sollwerte für die erste und zweite Düngergabe ausgegeben. Für die erste Düngerapplikation zu Vegetationsbeginn wird der N-Sollwert durch mehrere Größen korrigiert. Der zu Vegetationsbeginn gemessene N_{\min} -Wert wird vollständig auf

die zu düngende N-Menge angerechnet. Des Weiteren wird die langjährige organische Düngung in Abhängigkeit des Viehbesatzes (GV ha^{-1}) mit einem N-Abzug von bis zu 40 kg ha^{-1} berücksichtigt. Auch eine mineralische oder organische Herbstdüngung reduziert die erste Düngergabe. Ebenso werden Vorfrüchte und Zwischenfrüchte sowie eine mögliche Strohabfuhr in die Düngeberechnung einbezogen. Auf leichten Böden wird ein N-Zuschlag von 10 kg ha^{-1} empfohlen, während die N-Mineralisierung auf humosen Standorten eine Reduzierung um diesen Betrag erfordert. Außerdem wird die Bestandesentwicklung über Winter in der N-Düngeralkulation mit dem Wert von 20 kg ha^{-1} N berücksichtigt. Die N-Düngermenge zu Schossbeginn wird nach ähnlichen Vorgaben kalkuliert, allerdings ohne erneute N_{\min} -Untersuchung.

Das Berechnungsschema für Wintergerste entspricht dem für Winterraps. Hier werden für die Startgabe ebenfalls der N_{\min} -Gehalt des Bodens, die Bestandesentwicklung, der Standort, die Vorfrucht sowie die Ernterückstände und die organische Düngung berücksichtigt. Für die Gaben zu Schossbeginn und BBCH 39 sind Sollwerte zu verwenden, die um die genannten Faktoren korrigiert werden.

Stickstoffdüngedarfsrechnung für Ackerland (Baden-Württemberg) (GRIMM, 2010, SCHNEIDER-GÖTZ ET AL., 2010, LTZ, 2013)

In Baden-Württemberg wird der Gesamtbedarf für die N-Düngung in Abhängigkeit des erwarteten Kornertrags anhand eines spezifischen N-Entzugswerts berechnet. Für die nicht erntefähige Restpflanze erhöht sich die ertragsabhängige N-Düngermenge um 20 kg ha^{-1} bei Wintergerste und um 50 kg ha^{-1} bei Raps. Außerdem fließen in die Berechnung des Gesamtdüngedarfs der mineralische N-Gehalt im Boden und die für die Pflanzen nutzbare N-Lieferung aus dem Boden unter Berücksichtigung der Bodenart mit ein. Erntereste der Vorfrucht sowie die N-Speicherung von Zwischenfrüchten und eine N-Düngung im Herbst werden auf die N-Düngermenge mit bis zu 40 kg ha^{-1} je nach Pflanzenart und Bodenbearbeitung vor dem Winter angerechnet. Die N-Mineralisierung aus dem N-Pool, der in Folge langjähriger organischer Düngung entstanden ist, wird in Abhängigkeit vom Viehbesatz kalkuliert. Sowohl der N-Gesamtbedarf als auch die maximale N-Düngermenge unterliegen Höchstgrenzen. Für Wintergerste werden N-Düngergaben von 210 kg ha^{-1} bzw. 150 kg ha^{-1} und für Raps von 250 kg ha^{-1} bzw. 170 kg ha^{-1} N bis 190 kg ha^{-1} als Höchstgrenze angegeben. Werden die Höchstgrenzen überschritten, so muss die N-Düngermenge dementsprechend reduziert werden. Für die erste N-Düngergabe wird kulturabhängig ein Höchstdüngewert angegeben, der

nicht überschritten werden darf. Für Raps bewegen sich die maximalen N-Düngermengen zwischen 70 kg ha^{-1} und 90 kg ha^{-1} und für Wintergerste bei 50 kg ha^{-1} . Die N-Restmenge wird zu den folgenden Terminen appliziert.

Richtwerte für die Düngung (Schleswig-Holstein) (SAUERMANN et al., 2009, SIELING et al., 2009, LK-SH, 2013, OBENAUF, 2014)

In Schleswig-Holstein wird der Düngebedarf für Raps und Gerste über zwei verschiedene Systeme ermittelt. Für Getreide werden Sollwerte für drei Ertragsklassen, die von niedrig bis mittel, mittel bis hoch, hoch bis sehr hoch reichen, gebildet. Bei der Wintergerste entsteht so ein Korridor der N-Sollwerte zwischen 140 kg ha^{-1} und 220 kg ha^{-1} . Vom N-Sollwert wird ein standortabhängiger N_{\min} -Wert abgezogen, der über Bodenproben von 0 cm bis 60 cm Tiefe ermittelt wird. Der N-Düngerbedarf wird um weitere Zu- bzw. Abschläge korrigiert. In der Summe darf in der N-Düngeralkulation eine maximale N-Menge von 40 kg ha^{-1} angerechnet werden. Die Korrekturen sind abhängig vom Boden, der Bestandesentwicklung und der Witterung. Die Höhe der Startgabe wird unter anderem abhängig vom Saatzeitpunkt, der Bestandesentwicklung sowie der Grundbodenbearbeitung bestimmt. Die verbleibende Folgedüngung erfolgt zum Schossbeginn (BBCH 30) und zum Fahnenblattstadium (BBCH 39).

Das Modell zur Rapsdüngung wurde mit der Universität Kiel entwickelt. Die Bestimmung der N-Düngermenge im Frühjahr bei Winterraps richtet sich zum einen nach dem standortspezifischen Sollwert, zum anderen nach der N-Aufnahme im Herbst. In Untersuchungen der Universität Kiel wurde festgestellt (HENKE, 2007), dass die optimale N-Düngermenge im Frühjahr negativ mit der N-Aufnahme im Herbst korreliert. Das bedeutet, dass die Düngermenge im Frühjahr mit steigender N-Aufnahme im Herbst reduziert werden kann, ohne dass Ertragsverluste auftreten. Als Grundlage für die Berechnung wird die oberirdische Biomasse von mehreren über den Schlag verteilten, jeweils einen Quadratmeter großen Flächen geschnitten. Nach der Waage der Schnittproben wird der Mittelwert der Biomasse [kg] mit dem Faktor 45 multipliziert. Das Ergebnis stellt die N-Aufnahme dar. Von diesem Wert wird die Soll-N-Aufnahme (50 kg ha^{-1}) abgezogen und das Ergebnis mit dem Faktor 0,7 multipliziert. Ist die N-Aufnahme vor dem Winter bei Raps höher als 50 kg ha^{-1} , so reduziert sich die zu düngende N-Menge um den berechneten Wert; liegt dagegen eine Unterversorgung vor, so wird dieser Wert auf den Sollwert addiert.

Réglette acote colza (Frankreich) (HEBINGER, 2005, HEBINGER, 2009, CETIOM, 2014)

Als Berechnungsgrundlage für die N-Menge dient eine realistische Ertragserwartung. Der N-Bedarf wird aus dem erwarteten Kornertrag, der mit dem Faktor 7 multipliziert wird, sowie dem nach der Ernte im Boden verfügbaren N_{\min} kalkuliert. Dabei ist der N-Bedarf auf maximal 330 kg ha^{-1} begrenzt. Davon werden Werte für den N_{\min} nach dem Winter und das N-Mineralisierungspotential des Bodens abgezogen. Unterliegen die Felder außerdem einer langjährigen organischen Düngung, so wird eine N-Menge von 40 kg ha^{-1} angerechnet. Des Weiteren wird die N-Aufnahme vor und nach dem Winter über die Biomasse abgeschätzt. Über das Feld verteilt wird die oberirdische Biomasse von zwei bis vier Flächen von je einem Quadratmeter Größe geschnitten und gewogen. Der daraus gebildete Mittelwert wird mit einem für die Region spezifischen Faktor (65 bzw. 70) multipliziert. Das Ergebnis daraus ist die N-Aufnahme. Der Mittelwert der N-Aufnahme im Herbst und im Frühjahr wird von der benötigten Gesamtdüngermenge subtrahiert. Die Verteilung der N-Menge richtet sich nach der Bestandesentwicklung und der Düngermenge (Tab. 1). Gut entwickelte Bestände mit einem N-Düngerbedarf von maximal 100 kg ha^{-1} erhalten eine einmalige Gabe zwischen BBCH 31 und BBCH 53. Normal entwickelte Bestände mit einem N-Düngerbedarf von 100 kg ha^{-1} bis 170 kg ha^{-1} erhalten zu Vegetationsbeginn eine schwache N-Startgabe (60 kg ha^{-1} bis 80 kg ha^{-1}), die restliche N-Düngermenge wird zwischen BBCH 31 und BBCH 53 appliziert. Hohe N-Düngergaben können auf drei Termine aufgeteilt werden. Die erste N-Applikation (60 kg ha^{-1}) erfolgt zu Vegetationsbeginn. Zwischen Schossbeginn und Knospenschieben werden mindestens 70 kg ha^{-1} Mineraldünger-N appliziert. Zu BBCH 57 soll die letzte N-Applikation erfolgen (40 kg ha^{-1}).

Tab. 1: Aufteilung der nach der réglette acote colza berechneten N-Düngermengen im Frühjahr in Abhängigkeit der Pflanzenentwicklung von unterschiedlichen Entwicklungsstadien.

Pflanzenentwicklung	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]	N-Düngerverteilung [kg ha^{-1}] zu Termin		
		VB	BBCH 31 – 53	BBCH 57
gut	< 100		100	
mittel	100 - 170	60 - 80	40 - 90	
gering	> 170	60	mind. 70	40

Bestandesführung (BEFU) (Sachsen) (FÖRSTER, 2013, SCHLIEPHAKE ET AL., 2014)

BEFU ist ein computergestütztes Programm zur Berechnung des N-Düngerbedarfs. BEFU berücksichtigt bei der N-Düngermengenberechnung deutlich mehr Einflussfaktoren als die

anderen beschriebenen Modelle. Neben dem erwarteten Kornertrag müssen die Bodenart und die Entstehung des Bodens sowie der Skelettgehalt und die Durchwurzelungstiefe angegeben werden. In die Berechnung des N-Düngerwertes fließt die N_{\min} -Analyse bis 60 cm Bodentiefe ein, weitere Makro- und Mikronährstoffe können angegeben werden. Weiterhin wird in diesem Programm die Fruchtfolge berücksichtigt, indem die Vorfrucht und die am Feld verbleibenden Nebenprodukte angerechnet werden. In einem weiteren Eingabeschritt müssen die organische Düngung über Stroh, Zwischenfrüchte und Dünger aus der Tierhaltung mit den Ausbringmengen angegeben werden. Die Art und Intensität der Bodenbearbeitung fließt ebenfalls in die Düngerberechnung mit ein. Außerdem findet die Bestandesentwicklung Eingang. Bei Raps werden die Pflanzendichte sowie die Pflanzenbiomasse bzw. der Wurzelhalsdurchmesser berücksichtigt. Über die beiden letztgenannten Größen ist eine Abschätzung der N-Aufnahme vor dem Winter möglich. Diese wird auf die N-Düngermenge im Frühjahr angerechnet. Weiterhin beeinflusst der Verlust von Blattmasse über den Winter die N-Düngermenge. Das Verhältnis zwischen der Startgabe und der Folgedüngung zum Strecken der Rapspflanzen liegt bei 40% : 60%. Bei Gerste wird lediglich eine N-Düngeempfehlung für die erste Gabe berechnet. Dabei wird wie bei Raps beschrieben vorgegangen. Das Programm empfiehlt ein Splitting der Anfangsgabe im Verhältnis 2/3 zu 1/3. Für die beiden nachfolgenden Gaben wird ein Nitratschnelltest empfohlen.

N-Bedarfsermittlung nach dem Sollwertkonzept (Nordrhein-Westfalen) (LWK-NRW, 2014^A, LWK-NRW, 2014^B, N_{\min} -NRW, 2014)

Auch in Nordrhein-Westfalen wird die N-Sollwertmethode angewendet. Für einen Ertragsbereich von 25 dt ha⁻¹ bis 40 dt ha⁻¹ wird bei Raps eine N-Düngermenge von 200 kg ha⁻¹ empfohlen. Diese N-Düngermenge kann allerdings um 30 kg ha⁻¹ nach oben bzw. unten angepasst werden, wenn die Ertragserwartung das vorgegebene Intervall verlässt. Vom N-Sollwert wird der im Boden verfügbare N_{\min} subtrahiert. Weitere Zu- und Abschläge in Abhängigkeit der Bodenart und des Humusgehalts des Bodens können angerechnet werden, ebenso wie eine langjährige organische Düngung. Weitere Korrekturen sind in Abhängigkeit der Entwicklung des Rapsbestandes möglich. In der Summe dürfen die Zu- und Abschläge von der N-Düngermenge 40 kg ha⁻¹ nicht überschreiten. Die Startgabe soll laut dieser Empfehlung betont werden (etwa 2/3 der Gesamtdüngermenge), während die Anschlussdüngung geringer ausfallen kann. Das Ablaufschema zur Berechnung der N-Düngermengen in Wintergerste ähnelt dem von Raps. Der N-Sollwert beträgt für diese Kultur 180 kg ha⁻¹, ohne dass die Möglichkeit besteht, die Ertragserwartung in die Berechnung einfließen zu lassen. Über Korrekturwerte

werden der Standort und die Bewirtschaftung berücksichtigt. Etwa ein Drittel der Gesamtdüngermenge wird zu Vegetationsbeginn appliziert. Die verbleibende Restmenge wird je zur Hälfte als Schossergabe (BBCH 30 bis BBCH 32) und als Spätgabe (ab BBCH 39 bis BBCH 49) gegeben.

Tab. 2: Übersicht und Einschätzung der Düngesysteme der verschiedenen Länder.

Kriterium	Bundesland						Nordrhein-Westfalen
	Bayern	Baden-Württemberg	Schleswig-Holstein	Frankreich	Sachsen		
EDV-gestützt	x	-	x	x	x		x
Berechnungsvorlage	x	x	x	x			x
Kalkulation des N-Bedarfs	Sollwert ertragsabhängig	Berechnung N-Entzug	Sollwert ertragsabhängig	Berechnung N-Entzug	Sollwert ertragsabhängig	Sollwert ertragsabhängig	Sollwert ertragsabhängig
Empfehlungen zur Düngeraufteilung	-	-	-	-x	x		x
Begrenzungen bei Korrekturfaktoren	-	x	x	-	-		x
Höchstdüngermengen	-	x	-	-	-		-
Datenumfang	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch		mittel
Berechnungsaufwand	mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch	hoch		mittel-hoch
Berücksichtigung von Teilflächen	-	-	-	-	-		-
Korrekturmöglichkeit der weiteren Gaben	x	-	-	-	x		-
N-Düngermenge Raps [kg ha ⁻¹]	175	179	178	130	135		207
N-Düngermenge Gerste [kg ha ⁻¹]	215	146	135	-	100 zzgl. Nitrat-Test 2. + 3. Gabe		157

Kalkulation der N-Düngermengen bei Raps mit: Kornerttrag 45 dt ha⁻¹, N_{min}: 25 kg ha⁻¹, keine organische Düngung, keine Strohabfuhr, normale Entwicklung, Biomassebildung vor Winter: 2 kg m⁻² Frischmasse bzw. 90 kg ha⁻¹ N-Aufnahme, mittlere Auswinterung. Bei Gerste: Kornerttrag 80 dt ha⁻¹, N_{min}: 25 kg ha⁻¹, keine organische N-Düngung, keine Strohabfuhr, normale Entwicklung

2.9 Arbeitshypothesen

Ausgehend vom Stand des Wissens und der Technologie (Kapitel 2) werden für Winterraps und Wintergerste folgende Arbeitshypothesen zur sensorgestützten, teilflächenspezifischen N-Düngung sowie zur Erhöhung der N-Effizienz abgeleitet. Diese Arbeitshypothesen werden experimentell geprüft.

1. Die zeitliche und mengenmäßige Verteilung der N-Düngermenge beeinflusst die Ertragsbildung, die N-Aufnahme und die Biomasseentwicklung von Winterraps und Wintergerste. Eine zeitlich und mengenmäßig optimierte N-Applikation führt zu einer effizienten N-Verwertung in beiden Kulturen.
2. Vegetationsindices wie der NDVI, IRR oder der IRG bilden die N-Aufnahme und den TM-Aufwuchs von Winterraps und Wintergerste unabhängig vom Entwicklungsstadium und der Sortenwahl ab. Diese Indices sind damit anderen Indices überlegen und somit für die Schätzung der N-Aufnahme sehr gut geeignet.
3. Auf der Grundlage langjähriger Versuchsdaten können Mess- und Applikationsalgorithmen für Winterraps und Wintergerste entwickelt werden. Mit diesen Algorithmen können Ertragszonen der Schläge bei der N-Düngung berücksichtigt werden.
4. Mit dem Einsatz der N-Düngesysteme ist es möglich, den N-Aufwand standortangepasst zu optimieren und die N-Effizienz zu erhöhen, ohne Ertrags- und Qualitätsverluste hinnehmen zu müssen.

3 Material und Methoden

3.1 Standortbeschreibung

Versuchsstationen und Bodenbedingungen

In den Versuchsstationen Roggenstein und Dürnast der TU München wurden in den Versuchsjahren 2012 bis 2014 N-Steigerungsversuche, Sortenversuche und Streifenversuche für die Fruchtarten Winterraps und Wintergerste durchgeführt, um experimentelle Daten für die Erarbeitung neuer Düngesysteme zu gewinnen. Darüber hinaus dienen die Sortenversuche dazu, den Sorteneinfluss auf verschiedene Vegetationsindices zu testen. Über die Streifenversuche wurden die neu entwickelten Düngesysteme unter Praxisbedingungen getestet (Tab. 3).

Tab. 3: Übersicht über die in den Jahren 2012 bis 2014 an den Standorten Roggenstein und Dürnast durchgeführten Versuche.

Kultur	Standort	Versuch	Jahr		
			2012	2013	2014
	Roggenstein	HE und NE (mz, zz)	x	x	x
		Streifenversuch		x	
Wintergerste	Dürnast	HE und NE (mz)	x	x	
		N-Steigerung (zz)	x	x	
		Sorte	x		
Raps	Roggenstein	HE und NE	x	x	x
		Streifenversuch		x	
		Sorte	x	x	

Die Versuchsstation Roggenstein liegt etwa 60 km südlich von Freising am westlichen Rand der Münchener Schotterebene (48°10'47.46"N, 11°19'12.96"E). Ein Teil der Böden dieses Versuchsstandortes besteht aus mittel- bis tiefgründigen Braunerden mittlerer Güte. Diese ertragreichen Braunerden entstanden aus Decklehm bzw. Molassematerial (Tab. 4). Da die Flächen teilweise heterogen sind, wurden für die Kennwerte die Minimal- und Maximalwerte angegeben. Die weniger ertragsstarken Böden sind als Anmoorgleye, die vornehmlich durch die hohen Grundwasserstände geprägt sind, sowie als Pararendzinen aus carbonatreichem Schotter anzusprechen. Nach der Einordnung von ROßBERG ET AL. (2007) gehört dieser Standort noch zu dem Boden-Klima-Raum Tertiär Hügelland Donau Süd.

Tab. 4: Bodenphysikalische und bodenchemische Kennwerte der Versuchsschläge in Roggenstein (BIS BAYERN, 2015^A).

Bodenart	Schlagbezeichnung							
	U 1/2	U 3/4	U 5/6/7	Lager rechts	M 1/8	M 4	M 2/3	Bergacker
Bodentyp	sL Braunerde/ Anmoorgley	sL Braunerde/ Anmoorgley	sL Pararendzina	Mo (kalkhaltiger) Anmoorgley	SL humusreiche Pararendzina	sL/Mo Pararendzina/ Parabraunerde/ Anmoorgley	SL humusreiche Pararendzina	sL - SL Braunerde aus Molassematerial
Ackerzahl	50 - 54	50 - 54	47 - 54	32 - 37	47	50 - 53	47	46 - 62
nFK [mm]	106 - 149	146 - 150	65 - 142	58	88	57 - 150	36	100 - 150
pH	6,2 - 7,4	5,9 - 6,1	6,2 - 7,1	6,7	7,3	6,1 - 7,0	5,5	5,7 - 6,3
P [mg 100g ⁻¹]	4,4 - 7,1	3,9 - 4,6	4,6 - 9,9	9,4	4,5	4,0 - 5,4	9,6	6,3 - 11,7
K [mg 100g ⁻¹]	11,0 - 19,0	15,0 - 17,0	16,0 - 20,0	18,0	15,0	15,0 - 20,0	18,0	16,0 - 20,0
C _t [%]	1,3 - 2,3	1,1 - 1,4	1,1 - 2,3	6,7	5,1	1,3 - 4,9	5,5	1,2 - 1,4
N _t [%]	0,10 - 0,14	0,09 - 0,11	0,09 - 0,17	0,50	0,34	0,10 - 0,34	0,34	0,10 - 0,13

Die Versuchsstation Dürnast (48°24'18.30"N, 11°41'38.96"E) befindet sich nahe Freising. An diesem Standort herrschen Braunerden vor. Die Hügelkuppen sind erodiert und bilden aufgrund des hohen Sand- und Kiesanteils die Teilflächen mit geringem Ertragspotential (NE-Standorte), während in den Tallagen ertragreiche Kolluvien zu finden sind (HE-Standorte) (Tab. 5). Auf Flächen mit stark wechselnden Böden wurden die Minimal- und Maximalwerte angegeben. Dieser Standort gehört ebenfalls zum Tertiär Hügelland Donau Süd (ROBBERG ET AL., 2007).

Tab. 5: Bodenphysikalische und bodenchemische Kennwerte der Versuchsschläge in Dürnast (BIS Bayern, 2015^B).

	Schlagbezeichnung			
	Baumacker	D 4	Sieblerfeld	Kroberg
Bodenart	sL	sL	sL - L	SL - L
Bodentyp	Braunerde	Braunerde/ Pseudogley	Braunerde	Braunerde
Ackerzahl	50	55	44 - 57	44 - 64
nFK [mm]	124	180	100 - 160	90 - 150
pH	6,4	6,6	5,8 - 6,3	6,5 - 6,6
P [mg 100g ⁻¹]	7,0	3,8	4,6 - 6,5	4,4 - 8,4
K [mg 100g ⁻¹]	13,0	17,0	12,0	9,0 - 12,0
C _t [%]	1,3	1,2	1,1	1,2 - 1,3
N _t [%]	0,13	0,11	0,11	0,09 - 0,11

Klima und Witterung

Die Versuchsstandorte liegen im bayerischen Alpenvorland im warmgemäßigten und immerfeuchten Bereich (HÄCKEL, 1986). Die Flächen von Roggenstein befinden sich 528 m üNN, die von Dürnast 476 m üNN (Tab. 6). Im Mittel von dreißig Jahren (1981 bis 2010) ist das Klima in Roggenstein mit 954 mm Niederschlag und 8,5 °C deutlich feuchter und etwas wärmer als in Dürnast (791 mm, 8,4 °C).

Tab. 6: Höhenlage, durchschnittlicher Jahresniederschlag und mittlere Lufttemperatur der Versuchsstationen Roggenstein und Dürnast (DWD, 2014^A, DWD, 2014^B, DWD, 2014^C, DWD, 2014^D).

	Roggenstein	Dürnast
Höhenlage üNN [m]	528	476
Jahresniederschlag [mm]	954	791
mittl. Lufttemperatur [°C]	8,5	8,4

Witterung im Untersuchungszeitraum

Nachfolgend wird der für die Versuchsergebnisse relevante Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum 2012 bis 2014 beschrieben (Tab. 7 bis Tab. 10). Aufgrund der räumlichen Nähe beider Versuchsstandorte unterschied sich die Witterung nur geringfügig. So war der Winter 2011/2012 in Roggenstein und Dürnast bis zum Januar mild. Es folgte ein sehr kalter Februar, verbunden mit einer geringen Schneedecke bzw. mit Kahlfrösten. Dem Winter schloss sich bis in den Mai ein überdurchschnittlich warmes und trockenes Frühjahr an. Nur im April fiel mehr Regen als im langjährigen Mittel. Die Folgemonate waren sehr niederschlagsreich mit bis zu 201 mm im August am Standort Roggenstein. Nach einem gemäßigten, etwas trockenen Herbst 2012 kam ein sehr früher Wintereinbruch Ende Oktober. Der Winter 2012/2013 fiel deutlich zu kalt aus und hielt sich mit Kälte und beständiger Schneedecke bis Ende März. Einem teilweise zu kühlen Frühjahr mit hohen Niederschlagsmengen im Mai und Juni folgten ein sehr trockener und warmer Juli und August. Der Herbst 2013 war vergleichsweise feucht. Ihm schloss sich ein sehr milder Winter an. Die überdurchschnittlich warme Witterung hielt bis Juli 2014 an. Gleichzeitig fielen von Februar bis Ende Juni nur 50% der ansonsten für diesen Zeitraum üblichen Niederschlagsmenge. Lediglich der Mai 2014 war in Dürnast, im Gegensatz zu Roggenstein, aufgrund starker Gewitterregen ausreichend feucht. Reichlich Regen fiel an beiden Standorten erst mit Beginn des Sommers. Dieses Versuchsjahr schloss mit einem milden, feuchten Herbst ab.

Tab. 7: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 sowie das langjährige Temperaturmittel (1981 bis 2010) an der Versuchsstation Roggenstein (LfL Wetter, 2015^A, DWD, 2014^A).

	Versuchsjahr				Ø 1981 - 2010
	2011	2012	2013	2014	
Januar	-0,3	0,9	-0,2	1,9	-0,8
Februar	1,0	-4,5	-2,1	3,2	0,0
März	4,9	6,4	1,2	6,4	3,8
April	11,0	8,5	8,5	10,0	8,3
Mai	13,7	13,9	11,0	11,9	13,1
Juni	15,9	16,9	15,3	17,0	16,0
Juli	15,8	17,9	20,0	17,9	18,1
August	18,5	18,4	18,2	16,0	17,6
September	14,9	13,5	13,3	13,9	13,4
Oktober	8,1	8,3	9,6	11,0	8,8
November	2,9	4,5	3,6	5,3	3,4
Dezember	3,0	1,1	1,2	2,7	0,3
Ø	9,1	8,8	8,3	9,8	8,5

Tab. 8: Monatliche Niederschlagsmengen [mm] im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 sowie das langjährige Niederschlagsmittel (1981 bis 2010) an der Versuchsstation Roggenstein (LfL Wetter, 2015^B, DWD, 2014^B).

	Versuchsjahr				Ø 1981 - 2010
	2011	2012	2013	2014	
Januar	44,8	106,2	64,7	64,6	56,0
Februar	11,2	26,9	63,6	13,3	50,0
März	53,0	23,9	37,7	25,1	69,0
April	16,1	83,1	33,2	31,7	64,0
Mai	104,4	56,9	154,6	66,6	104,0
Juni	194,9	169,4	152,8	31,7	108,0
Juli	156,6	55,9	32,9	154,5	118,0
August	61,6	201,8	7,3	94,5	105,0
September	93,6	56,6	96,4	72,1	79,0
Oktober	45,1	61,7	78,6	84,1	64,0
November	3,1	61,7	56,8	46,3	66,0
Dezember	108,1	77,0	9,9	57,6	71,0
Σ	892,5	981,1	788,5	742,1	954,0

Tab. 9: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 sowie das langjährige Temperaturmittel (1981 bis 2010) an der Versuchsstation Dürnast (LfL Wetter, 2015^B, DWD, 2014^C).

	Versuchsjahr				
	2011	2012	2013	2014	Ø 1981 - 2000
Januar	-0,6	0,8	-0,3	1,5	-1,1
Februar	0,4	-4,4	-1,8	2,9	-0,2
März	4,8	6,0	1,1	6,5	4,0
April	11,0	8,7	8,5	10,0	8,2
Mai	13,8	14,1	11,4	12,1	13,2
Juni	16,2	16,9	15,3	16,7	16,1
Juli	15,8	18,1	19,7	18,1	17,9
August	18,3	18,2	17,8	15,9	17,4
September	14,7	13,3	13,2	13,9	13,2
Oktober	8,1	7,9	9,5	10,8	8,7
November	2,6	4,5	3,7	5,5	3,3
Dezember	2,8	0,6	1,1	2,4	0,1
Ø	9,0	8,7	8,3	9,7	8,4

Tab. 10: Monatliche Niederschlagsmengen [mm] im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 sowie das langjährige Niederschlagsmittel (1981 bis 2010) an der Versuchsstation Dürnast (LfL Wetter, 2015^B, DWD, 2014^B).

	Versuchsjahr				
	2011	2012	2013	2014	Ø 1981 - 2000
Januar	46,0	105,7	62,7	56,6	41,0
Februar	15,1	14,4	66,5	11,0	36,0
März	56,5	15,4	20,8	20,8	51,0
April	32,7	50,0	40,6	29,9	48,0
Mai	58,6	68,7	133,2	166,7	84,0
Juni	147,5	136,7	159,6	40,4	89,0
Juli	175,6	117,5	17,2	154,1	107,0
August	76,2	170,0	99,7	97,8	88,0
September	92,1	57,9	90,0	66,5	74,0
Oktober	37,3	42,9	69,5	117,7	58,0
November	1,4	69,7	57,4	40,7	55,0
Dezember	102,3	83,1	11,5	46,3	61,0
Σ	841,3	932,0	828,7	848,5	791,0

3.2 Versuchsanlagen und Versuchsdurchführung

3.2.1 N-Steigerungsversuche Roggenstein

Winterraps

Die N-Steigerungsversuche in Winterraps wurden angelegt, um den Einfluss einer in Menge und Zeit differenzierten N-Düngung auf die Ertragsbildung, den Biomasseaufwuchs, die N-Aufnahme sowie das Reflexionsverhalten dieser Ackerkultur zu untersuchen.

Am Standort Roggenstein wurden die N-Steigerungsversuche bei der Fruchtart Winterraps als einfaktorielle, randomisierte Blockanlagen mit dem Hauptfaktor N-Düngung in vierfacher Wiederholung angelegt. Die N-Steigerungsversuche wurden auf einem Standort mit hohem Ertragspotential (HE) und einem Standort mit niedrigem Ertragspotential (NE) durchgeführt.

Bei Winterraps waren die Parzellen grundsätzlich als Doppelparzellen aufgebaut. Davon fungierte eine Parzelle als Druschparzelle, die andere als Beprobungsparzelle für Biomasse-schnitte. Die Parzellen waren 3 m breit und 10 m lang, was zu einer Grundfläche von 30 m² je Parzelle führte. Die Anlage der Druschparzellen erfolgte als Kerndruschparzellen.

Die Saatstärke bei Raps lag versuchsübergreifend bei 40 Körnern je m². Der Abstand der Drillreihen betrug 12,5 cm. Die Aussaat erfolgte zum optimalen Termin zu Beginn der letzten Augustdekade in ein gepflühtes und feinkrümeliges Saatbett (Tab. 11). Die Beerntung der Rapsversuche in den Jahren 2012 bis 2014 erfolgte bei vollständiger Reife der Pflanzen Ende Juli mit einem Parzellenmähdrescher „Delta“ der Firma Wintersteiger im Kerndruschverfahren.

Tab. 11: Termine für die Aussaat und Ernte der N-Steigerungsversuche HE und NE Winterraps in Roggenstein, 2012 bis 2014.

	Versuchsjahr		
	2011/2012	2012/2013	2013/2014
Aussaat	23.08.2011	20.08.2012	22.08.2013
Ernte	19.07.2012	28.07.2013	19.07.2014

Bei einer Schneidwerksbreite von 1,5 m wurden 15 m² Parzellenfläche gedroschen. Die Erfassung des Einzelparzellenertrags und die Entnahme der Kornprobe erfolgten automatisch beim Druschvorgang.

Die Sortenwahl in den N-Steigerungsversuchen orientierte sich an den Sortenempfehlungen und Standortbedingungen. Im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 wurde in Roggenstein die Hybridsorte Xenon angebaut. Diese etwas frühreife Sorte zeichnet sich laut Bundessortenamt (BSA, 2013) durch hohe Kornerträge und Ölgehalte aus (Tab. 12). Die Vorwinterentwicklung und die Pflanzenlänge wurden durchschnittlich bewertet.

Tab. 12: Bewertung der Sorteneigenschaften für die Rapsorte Xenon (BSA, 2013).

Sorte	Linie, Hybrid	Blühbeginn	Reife	Pflanzen- länge	Entwicklung vor Winter	TKG	Kornertrag	Ölertrag
Xenon	H	2	4	5	5	5	8	7

Um unterschiedliche Rapsbestände mit differenzierter Biomasse- und Ertragsbildung und gleichzeitig heterogenem Reflexionsverhalten zu erzeugen, wurde eine hohe Zahl an N-Stufen in den Roggensteiner N-Steigerungsversuch integriert (Tab. 13). Die 26 Varianten des HE-Standes unterschieden sich sowohl in der Höhe der N-Düngermenge als auch in deren Verteilung. So variierten bereits die Herbstgaben in 20 kg N-Schritten zwischen 0 kg ha⁻¹ bis 60 kg ha⁻¹ N. Ebenso variierten die N-Düngermengen zu Vegetationsbeginn (VB) und Schossbeginn (BBCH 30) in der Menge. Als Vergleichsvariante diente die N-Stufe 1 (N 1), die keine N-Düngung erhielt. Die Maximalvariante wurde mit insgesamt 280 kg ha⁻¹ N gedüngt. Weitere Variationen ergaben sich durch unterschiedliche Düngeterminierungen zu verschiedenen Entwicklungsstadien des Rapsbestandes und eine differenzierte Düngerverteilung. Die Düngermenge steigt nicht mit der Nummer der N-Stufe, weil seit 2005 N-Steigerungsversuche mit unveränderten Varianten (**fettgedruckt**) durchgeführt werden, während die übrigen N-Stufen im Verlauf der Jahre hinzugefügt oder in der N-Menge und N-Verteilung verändert wurden.

Die Zahl der N-Stufen war im Raps NE-Versuch reduziert und umfasste 18 N-Stufen, die sich ebenfalls in der Höhe der Düngung im Herbst und der zeitlichen und mengenmäßigen N-Verteilung im Frühjahr unterschieden. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit und Zuordnung war die Bezeichnung der N-Stufen im Raps NE-Versuch identisch zu der im Raps HE-Versuch.

Tab. 13: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha⁻¹] des N-Steigerungsversuchs HE und NE Winterraps in Roggenstein, in den Jahren 2013 und 2014.

N-Stufe	HE-Standort				N-Stufe	NE-Standort			
	Herbst	VB	BBCH 30	Summe		Herbst	VB	BBCH 30	Summe
N 1	0	0	0	0	N 1	0	0	0	0
N 2	0	60	60	120	N 2	0	60	60	120
N 3	20	60	60	140	N 3	20	60	60	140
N 4	0	90	120	210	N 5	0	60	120	180
N 5	0	60	120	180	N 7	0	120	60	180
N 6	0	120	90	210	N 9	20	90	120	230
N 7	0	120	60	180	N 10	20	60	120	200
N 8	0	120	120	240	N 11	20	120	90	230
N 9	20	90	120	230	N 12	20	120	60	200
N 10	20	60	120	200	N 14	40	120	60	220
N 11	20	120	90	230	N 15	40	60	120	220
N 12	20	120	60	200	N 16	40	90	120	250
N 13	20	120	120	260	N 18	40	120	90	250
N 14	40	120	60	220	N 19	40	60	60	160
N 15	40	60	120	220	N 21	60	60	60	180
N 16	40	90	120	250	N 22	40	160	0	200
N 17	40	120	120	280	N 23	40	0	160	200
N 18	40	120	90	250	N 25	60	30	60	150
N 19	40	60	60	160					
N 20	60	60	120	240					
N 21	60	60	60	180					
N 22	40	160	0	200					
N 23	40	0	160	200					
N 24	60	30	120	210					
N 25	60	30	60	150					
N 26	20	30	30	80					

Wintergerste

Ziel der N-Steigerungsversuche in Wintergerste war es, den Einfluss einer differenzierten N-Düngung auf das Reflexionsverhalten und den Biomasseaufwuchs sowie die Ertragsbildung zu erhalten. Am Standort Roggenstein wurden die N-Steigerungsversuche als einfaktorielle,

randomisierte Blockanlagen mit dem Hauptfaktor N-Düngung in vierfacher Wiederholung angelegt. Der Versuch wurde auf einem HE-Standort und einem NE-Standort angelegt.

Die Parzellen wurden als Doppelparzellen mit einer Fläche von 30 m² (Breite: 3 m, Länge: 10 m) angelegt. Dabei wurde eine Parzelle als Druschparzelle, die andere als Beprobungsparzelle für die Biomasseschnitte verwendet. Die Beprobungsparzellen bei Gerste wurden in sechs gleich große Teilstücke von 3,7 m² unterteilt, um die Probenahme mit einem Biomassevollernter des Herstellers Hege vornehmen zu können.

Die Saatstärke bei Wintergerste betrug bei der mehrzeiligen Sorte (mz) Meridian 340 Körner je m², bei der zweizeiligen Sorte (zz) Sandra 280 Körner je m² bei einem Reihenabstand von 12,5 cm. Die Aussaat erfolgte im Versuchszeitraum für Wintergerste zum optimalen Termin in der letzten Septemberdekade in ein gepflühtes, gut strukturiertes Saatbett (Tab. 14). Bei Erreichen der Tотреife der Gerstenpflanzen wurden die Versuche mit einem Parzellenmähdrescher „Delta“ im Kerndruschverfahren geerntet. Die Erntefläche umfasste 15 m². Bereits während des Druschvorgangs wurde der Parzellenertrag erfasst und eine Kornprobe für weiterführende Analysen entnommen.

Tab. 14: Termine für die Aussaat und Ernte des N-Steigerungsversuches HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste in Roggenstein, 2012 bis 2014.

	Versuchsjahr		
	2011/2012	2012/2013	2013/2014
Aussaat	26.09.2011	17.09.2012 (mz) 18.09.2012 (zz)	24.09.2014
Ernte	10.07.2012	15.07.2013	27.06.2014 (NE) 04.07.2014 (HE)

Die Sortenwahl im N-Steigerungsversuch Wintergerste fiel auf die mehrzeilige Sorte Meridian und die zweizeilige Sorte Sandra. Beide Sorten sind in die mittlere Reifegruppe eingestuft (Tab. 15). Die mehrzeilige Sorte ist im Vergleich zur zweizeiligen etwas länger. Beide Sorten sind sehr ertragreich, wobei Sandra den Ertrag über eine hohe Bestandesdichte mit sehr hohem Tausend-Korn-Gewicht (TKG) bei gleichzeitig sehr geringer Kornzahl pro Ähre generiert. Die geringere Bestandesdichte und ein mittleres TKG kompensiert Meridian dagegen durch eine hohe Kornzahl pro Ähre.

Tab. 15: Bewertung der Sorteneigenschaften für die mehrzeilige Sorte Meridian und die zweizeilige Sorte Sandra (BSA, 2013).

Sorte	Typ	Ährenschieben	Reife	Pflanzenlänge	Bestandesdichte	Kornzahl pro Ähre	TKG	Korntrag Stufe 2
Meridian	mz	5	5	5	4	7	5	8
Sandra	zz	4	5	4	8	1	8	7

Die Verteilung der Düngermenge erfolgte zu drei entwicklungsphysiologisch wichtigen Terminen (Tab. 16). Der Startgabe zu Vegetationsbeginn (VB) folgte eine zweite Düngergabe zum Zweiknotenstadium (BBCH 32). Die letzte Düngerapplikation wurde zu BBCH 39 (Fahnenblatt vollständig entwickelt) durchgeführt. Die N-Düngermengen reichten von 0 kg ha⁻¹ in der Variante ohne N-Düngung bis 260 kg ha⁻¹ in der Maximalvariante, wobei eine unterschiedliche Aufteilung der N-Mengen vorgenommen wurde. Der N-Steigerungsversuch Wintergerste in Roggenstein ging aus den N-Steigerungsversuchen in Dürnast hervor. An diesem Versuch wurden geringe Änderungen und Erweiterungen bezüglich der N-Düngerstufen vorgenommen, so dass die Gesamtdüngermenge nicht wie üblich mit der Nummer der N-Stufe steigt. Diejenigen Varianten, die unverändert blieben sind gekennzeichnet (**fettgedruckt**).

Tab. 16: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des N-Steigerungsversuchs HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste in Roggenstein, in den Jahren 2013 und 2014.

N-Stufe	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe
N 1	0	0	0	0
N 2	40	30	70	140
N 3	40	30	40	110
N 4	40	60	40	140
N 5	70	30	40	140
N 6	40	120	0	160
N 7	70	90	0	160
N 8	70	30	70	170
N 9	70	60	40	170
N 10	70	60	70	200
N 11	70	90	40	200
N 12	40	90	70	200
N 13	40	120	40	200
N 14	90	90	40	220
N 15	70	120	40	230
N 16	40	90	40	170
N 17	90	120	50	260
N 18	20	20	0	40

3.2.2 N-Steigerungsversuche Dürnast

Mit den N-Steigerungsversuchen in Dürnast sollte die Wirkung einer zeitlichen und mengenmäßigen Variation der N-Düngermenge auf die Pflanzenreflexion, die Biomassebildung und die Ertragsbildung von Wintergerste untersucht werden. Der Versuch der mehrzeiligen Wintergerste war sowohl auf einem HE-Standort als auch einem NE-Standort angelegt. Für die zweizeilige Wintergerste wurde ausschließlich ein N-Steigerungsversuch angelegt.

Die technische Ausstattung an diesem Versuchsstandort erforderte andere Parzellengrößen als in Roggenstein. So betrug die Parzellengrundfläche bei der zweizeiligen und der mehrzeiligen Gerste $12,5 \text{ m}^2$ bei einer Breite von $1,25 \text{ m}$ und einer Länge von 10 m . Die Parzellen des HE- und NE-Versuchs bei mehrzeiliger Wintergerste waren als Doppelparzellen angelegt, von denen eine als Druschparzelle, die andere als Beprobungsparzelle für die manuellen Bio-

masseschnitte fungierte. Am N-Steigerungsversuch der zweizeiligen Wintergerste wurden Dreifachparzellen angelegt, von denen zwei zur Biomassebeprobung dienten. Diese waren in sechs gleichgroße Flächen (4,7 m²) unterteilt, um die Biomasseschnitte mit einem Biomassevollernter der Marke Haldrup durchführen zu können.

Die mehrzeilige Gerste wurde mit 300 Körnern je m², die zweizeilige Gerste mit 350 Körnern je m² mit einem Reihenabstand von 12,5 cm gedrillt. Die Aussaat der N-Steigerungsversuche erfolgte zum optimalen Termin in der letzten Septemberdekade in ein gepflügtes, gut strukturiertes Saatbett (Tab. 17). Die Parzellen wurden bei Erreichen der Totreife mit einem Parzellenmähdrescher „Elite“ der Firma Wintersteiger abgeerntet. Das anfallende Erntegut wurde vollständig in Leinensäcken aufgefangen. Die Bestimmung des Parzellenertrags erfolgte durch Wiegen der Säcke. Für weiterführende Analysen wurden Kornproben entnommen.

Tab. 17: Termine für die Aussaat und Ernte von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste der N-Steigerungsversuche in Dürnast, 2012 bis 2014.

	Versuchsjahr	
	2011/2012	2012/2013
Aussaat	21.09.2011 (mz)	17.09.2012 (zz)
	28.09.2011 (zz)	26.09.2012 (mz)
Ernte	10.07.2012	19.06.2013 (zz)
		16.07.2013 (mz)

Da die N-Steigerungsversuche bei Wintergerste in Dürnast schon in den Jahren vor 2012 durchgeführt wurden und keine Sortenwechsel stattfinden sollten, fiel die Sortenwahl bis zum Versuchsjahr 2012 auf die zweizeilige Sorte Duet und die mehrzeilige Sorte Highlight (Tab. 18). Die Sorte Highlight reift mittelspät ab und besitzt recht langes Stroh. Um die hohen Kornträge realisieren zu können, gleicht Highlight die geringe Bestandesdichte vor allem durch das höhere TKG aus. Duet dagegen bestockt sehr stark, wegen der geringen Kornzahl je Ähre und dem vergleichsweise kleinen TKG ist die Ertragsleistung im mittleren Bereich eingestuft. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Gerstenversuche zwischen den Standorten Roggenstein und Dürnast gewährleisten zu können und um aktuelle Sorten in die Versuche aufzunehmen, wurde im Versuchsjahr 2013 ein Sortenwechsel zu Sandra und Meridian durchgeführt (vgl. Tab. 15).

Tab. 18: Bewertung der Sorteneigenschaften für die mehrzeilige Sorte Highlight und die zweizeilige Sorte Duet (BSA, 2013 & BSA, 2015).

Sorte	Typ	Ähren- schieben	Reife	Pflanzen- länge	Bestandes- dichte	Kornzahl pro Ähre	TKG	Kornertrag Stufe 2
Highlight	mz	6	6	7	3	6	7	8
Duet	zz	5	5	5	7	3	6	5

Tab. 19: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des N-Steigerungsversuchs HE und NE mehrzeilige Wintergerste in Dürnast sowie des N-Steigerungsversuchs zweizeilige Wintergerste in Dürnast, dargestellt am Beispiel des Jahres 2013.

HE und NE Versuch mz Gerste					N-Steigerung zz Gerste				
N-Stufe	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe	N-Stufe	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe
N 1	0	0	0	0	N 1	0	0	0	0
N 2	40	30	0	70	N 2	40	30	0	70
N 3	40	30	40	110	N 3	40	30	40	110
N 4	40	60	40	140	N 4	40	60	40	140
N 5	70	30	40	140	N 5	70	30	40	140
N 6	40	120	0	160	N 6	70	30	70	170
N 7	70	90	0	160	N 7	70	60	40	170
N 8	70	30	70	170	N 8	70	60	70	200
N 9	70	60	40	170	N 9	70	90	40	200
N 10	70	60	70	200	N 10	40	90	40	170
N 11	70	90	40	200	N 11	40	90	70	200
N 12	40	90	70	200	N 12	40	120	0	160
N 13	40	120	40	200	N 13	70	90	0	160
N 14	90	90	40	220	N 14	40	120	40	200
N 15	70	120	40	230	N 15	70	120	40	230
N 16	40	90	40	170	N 16	90	120	50	260

Die N-Düngung des HE- und NE-Versuchs von mehrzeiliger Gerste wurde zu den physiologisch wichtigen Entwicklungsstadien VB, BBCH 32 und BBCH 39 durchgeführt (Tab. 19). Dabei variierte die gesamte N-Düngermenge zwischen 0 kg ha^{-1} in der Variante ohne N-Düngung und 230 kg ha^{-1} . Weitere Variationen zwischen den N-Stufen ergaben sich durch eine unterschiedliche Verteilung der N-Düngermenge. Aufgrund der langen Versuchsdauer

wurden Varianten verändert, weswegen sich die N-Stufen der Versuche für zwei- und mehrzeilige Wintergerste hinsichtlich der N-Verteilung und N-Menge unterscheiden.

Der N-Steigerungsversuch der zweizeiligen Wintergerste umfasste ab dem Jahr 2013 16 N-Stufen (Tab. 19). Die bereits vor dem Versuchsjahr 2013 bestehenden N-Stufen sind hervorgehoben (**fettgedruckt**). Die N-Gesamtmenge reichte von 0 kg ha⁻¹ in der ungedüngten Variante N 1 bis maximal 260 kg ha⁻¹ (N 16). Neben der Höhe der N-Düngung variierte auch die Verteilung des Mineraldünger-N.

3.2.3 Sortenversuche Winterraps und Wintergerste

Die Sortenversuche bei Winterraps, zwei- und mehrzeiliger Wintergerste wurden angelegt, um den Einfluss von Sorteneigenschaften wie Blatthaltung und unterschiedliche Menge photoaktiver Elemente (etwa Chlorophyll) auf das Reflexionsverhalten eines Pflanzenbestandes zu untersuchen.

Winterraps

Der Sortenversuch bei Winterraps wurde ausschließlich am Standort Roggenstein durchgeführt. Die Parzellengröße, Aussaat und Ernte sowie Durchführung des Sortenversuchs war identisch mit der des N-Steigerungsversuchs bei Winterraps in Roggenstein. Neben dem Faktor Sorte wurde der Einfluss einer unterschiedlichen N-Düngung untersucht, weshalb dieser Versuch als zweifaktorielle randomisierte und vierfach wiederholte Blockanlage angelegt wurde. Die Sortenwahl in den Rapsortenversuchen richtete sich nach den aktuellen Sortenempfehlungen und dem Anbauumfang der jeweiligen Sorte sowie nach den Ergebnissen der Landessortenversuche. Da das Sortenangebot bei Raps schnellen Änderungen unterworfen ist, wechselte die Sortenauswahl in diesem Versuch häufig. Aus diesem Grund ist die Sortenwahl für das Versuchsjahr 2013 dargestellt. In diesem Jahr bestand der Rapsversuch aus zwei Liniensorten (L), einer Halbzwerghybride (HZ) und mehreren Hybridsorten (H) (Tab. 20).

Über die unterschiedliche N-Düngung war es möglich differenzierte Bestände zu erzeugen. Die N-Düngung in Winterraps unterschied sich in der N-Düngermenge im Herbst sowie der Düngerverteilung zu VB und Schossbeginn (Tab. 21). Insgesamt erhielt die N-Stufe N 2 20 kg ha⁻¹ N mehr als die Vergleichsvariante.

Tab. 20: Bewertung der Sorteneigenschaften für verschiedene Rapsorten im Sortenversuch Raps am Beispiel des Versuchsjahres 2013 (BSA, 2013).

Sorte	Linie (L), Hybrid (H)	Blühbeginn	Reife	Pflanzen- länge	Entwicklung vor Winter	TKG	Kornertrag	Ölgehalt
Adriana	L	3	5	5	5	5	7	8
DK Exstorm	H	3	5	6	5	4	8	7
ES Alegria	L	2	4	4	5	4	7	7
Genie	H	3	5	5	5	4	8	8
PR 44 D 06	H				EU Sorte			
Xenon	H	2	4	5	5	5	8	7

Tab. 21: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des Sortenversuchs Raps.

N-Stufe	Herbst	VB	BBCH 30	Summe
N 1	0	60	120	180
N 2	20	120	60	200

Wintergerste

Der Sortenversuch Wintergerste wurde analog zum N-Steigerungsversuch der zweizeiligen Wintergerste am Standort Dürnast angelegt und durchgeführt. Dieser Versuch bestand in den Jahren 2010 bis 2012 aus je fünf Sorten zweizeiliger und mehrzeiliger Gerste (Tab. 22). Die Sortenwahl richtete sich nach den aktuellen Sortenempfehlungen und dem Anbauumfang der jeweiligen Sorte sowie nach den Ergebnissen der Landessortenversuche.

Um heterogene Bestände innerhalb der Sorten zu erzeugen, unterschieden sich die N-Düngermengen des Sortenversuchs Wintergerste deutlich (Tab. 23). Während in der N 1 110 kg ha^{-1} Mineraldünger-N appliziert wurden, erhielt die N 2 200 kg ha^{-1} N. Neben der Düngermenge unterschieden sich die N-Stufen in der Verteilung der N-Gaben.

Tab. 22: Bewertung der Sorteneigenschaften von zwei- und mehrzeiligen Sortentypen im Sortenversuch Wintergerste, Jahr 2010 bis 2013 (BSA, 2013, BSA, 2015).

Sorte	Typ	Ähren-schieben	Reife	Pflanzen-länge	Bestandes-dichte	Kornzahl pro Ähre	TKG	Kornertrag Stufe 2
Fridericus	mz	5	5	5	4	6	6	6
Highlight	mz	6	6	7	3	6	7	8
Merlot	mz	6	5	6	4	7	5	7
Yokohama	mz	6	6	6	4	6	5	6
Zzoom	mz	4	5	5	4	7	5	9
Duet	zz	5	5	5	7	3	6	5
Finesse	zz	5	5	4	8	3	6	6
Manureva	zz	4	4	4	7	3	6	7
Metaxa	zz	4	5	3	9	1	7	7
Reni	zz	5	5	5	5	2	9	5

Tab. 23: N-Stufen sowie N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des Sortenversuchs Wintergerste.

N-Stufe	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe
N 1	40	30	40	110
N 2	70	90	40	200

3.2.4 Streifenversuche

Um die entwickelten Düngesysteme unter Praxisbedingungen hinsichtlich der Wirkung auf den Kornertrag, die N-Effizienz, die Qualität und den N-Saldo prüfen zu können, wurden im Jahr 2013 in der Versuchsstation Roggenstein Streifenversuche mit Winterraps auf dem Schlag M 4 und mit Wintergerste auf dem Schlag Bergacker angelegt.

Versuchsanlage Winterraps

Die Parzellen des Streifenversuchs Raps waren fahrgassenbedingt 12 m breit und 40 m lang, woraus eine Grundfläche von 480 m^2 je Parzelle resultiert. Darin enthalten war eine Kerndruschparzelle mit 1,5 m Breite und 12 m Länge. Die praxisübliche Saatstärke lag für

Raps bei 40 Körnern je m², der Reihenabstand betrug 12,5 cm. Der Raps wurde optimal in der letzten Augustdekade in ein gegrubbertes, feinkrümeliges Saatbett ausgesät (Tab. 24).

Tab. 24: Aussaat- und Erntetermine in den Streifenversuchen Wintergerste und Raps im Jahr 2013.

	Wintergerste	Raps
Aussaat	18.09.2012	22.08.2012
Ernte	16.07.2013	31.07.2013

Die Ernte erfolgte zur Vollreife Ende Juli. Um die Einzelerträge der Rapsparzellen zuverlässig zu erhalten, mussten die Kerndruschparzellen zuerst mit einem handelsüblichen Großmährescher freigesprochen werden. Im Anschluss daran konnten die Parzellen mit einem Parzellenmährescher Delta der Firma Wintersteiger beerntet werden. Mit diesem Mährescher war es möglich während der Fahrt den Kornertrag der Einzelparzellen zu erfassen sowie Kornproben für die weitere Analyse zu entnehmen. Die Kerndruschparzellen waren 12 m lang und 1,5 m breit, was eine Druschfläche von 18 m² ergab.

Die Sortenwahl fiel auf die Hybridsorte Avatar. Diese frühblühende Sorte ist in das mittlere Reifesegment eingruppiert und erreicht sehr hohe Kornerträge bei gleichzeitig hohem Ölgehalt (Tab. 25).

Tab. 25: Bewertung der Sorteneigenschaften der Rapssorte Avatar im Streifenversuch (BSA, 2013).

Sortenbezeichnung	Linie (L), Hybrid (H)	Blühbeginn	Reife	Pflanzenlänge	Entwicklung vor Winter	TKG	Kornertrag	Ölgehalt
Avatar	H	2	4	5	5	4	9	8

Versuchsanlage Wintergerste

Im Streifenversuch mit Wintergerste waren die Parzellen ebenfalls fahrgassenbedingt 12 m breit und 40 m lang, woraus eine Grundfläche von 480 m² je Parzelle resultierte. Diese großen Parzellen wurden im Kerndruschverfahren (Breite: 1,5 m, Länge: 12 m) über einen Parzellenmährescher beerntet. Die Aussaat der Wintergerste erfolgte in der letzten Septemberdekade mit einer Saatstärke von 300 Körnern je m² bei einem Reihenabstand von 12,5 cm in Pflugsaat nach der Vorfrucht Winterweizen (Tab. 24).

Die Ernte des Versuchs erfolgte zur Vollreife Mitte Juli. Das Verfahren glich dem im Streifenversuch Winterraps. Erst wurden die Kerndruschparzellen mit einem Großmährescher freigesprochen und im Anschluss folgte die Ernte mit dem Parzellenmährescher. Zeitgleich mit dem Drusch wurden der Parzellenertrag und Kornproben für weitere Analysen gewonnen.

Die Sortenwahl fiel auf die mehrzeilige Sorte Meridian, die auch in den Exaktversuchen angebaut wurde (vgl. Tab. 15).

Erstellen des Parzellenplans

Die Parzellengrenzen beider Versuche wurden per handgetragenen, hochgenauem GPS-System der Firma GeoConcept eingemessen. Über die GPS-Punkte konnte durch das GIS-Programm QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2013) ein Parzellenplan als Polygon-Layer erstellt werden, dem die Parzellennummern zugeordnet werden konnten.

Erstellen der Ertragszonen

Zur Validierung der Düngesysteme für Winterraps und Wintergerste mussten auf den Versuchsschlägen Ertragszonen eingerichtet werden. Die wechselnden Wachstumsbedingungen innerhalb eines Feldes können näherungsweise über die nutzbare Feldkapazität (nFK) abgebildet werden. Aus diesem Grund wurden zur Erstellung der Ertragszonen zuvor erzeugte Karten der nFK herangezogen. Ausgehend von langjährigen kulturspezifischen Durchschnittserträgen auf dem jeweiligen Standort wurden diese als das mittlere zu erwartende Ertragsniveau angenommen (Tab. 26).

Tab. 26: Erwartete Kornerträge [dt ha⁻¹] im Bereich des niedrigen, mittleren und hohen Ertragsniveaus in den Streifenversuchen Raps und Gerste, 2013.

Kultur	Ertragsniveau		
	niedrig	mittel	hoch
Winterraps	30	40	50
Wintergerste	70	80	90

Dieses Ertragsniveau wurde für alle Teilschläge angenommen, auf denen ebenfalls die nutzbare Feldkapazität für diesen Schlag mittlere Werte aufwies. Zonen mit einer höheren nutzbaren Feldkapazität wurde das höhere Ertragsniveau zugewiesen, während Teilflächen mit einer geringeren Wasserspeicherfähigkeit als NE-Standorte bestimmt wurden. Für die Ermittlung

der potentiellen Ertragsleistung des HE- bzw. NE-Standortes bei Winterraps und Wintergerste wurde eine Zunahme bzw. Abnahme des Ertragsniveaus um 10 dt ha^{-1} von der mittleren Ertragserswartung angenommen.

N-Düngung der Streifenversuche Winterraps und Wintergerste

In den Streifenversuchen beider Kulturen wurden drei verschiedene Düngesysteme verglichen (Abb. 2). Als Vergleichsvariante diente die Variante **DSN** (Düngeberatungssystem Stickstoff der LfL), die schlageinheitlich bewirtschaftet wurde. Weiterhin wurde ein Düngeverfahren (**Mapping**) getestet, das ausschließlich die Ertragszonen berücksichtigte. Die dritte Variante war das entwickelte Düngesystem **Online + Mapping**, das die N-Aufnahme mit einem Sensor erfasst und unter Berücksichtigung des Ertragspotentials eine Düngeempfehlung berechnet. Jedem dieser Düngeverfahren wurde ein Streifen zugeordnet und so oft wiederholt, wie es die Versuchsfläche zuließ.

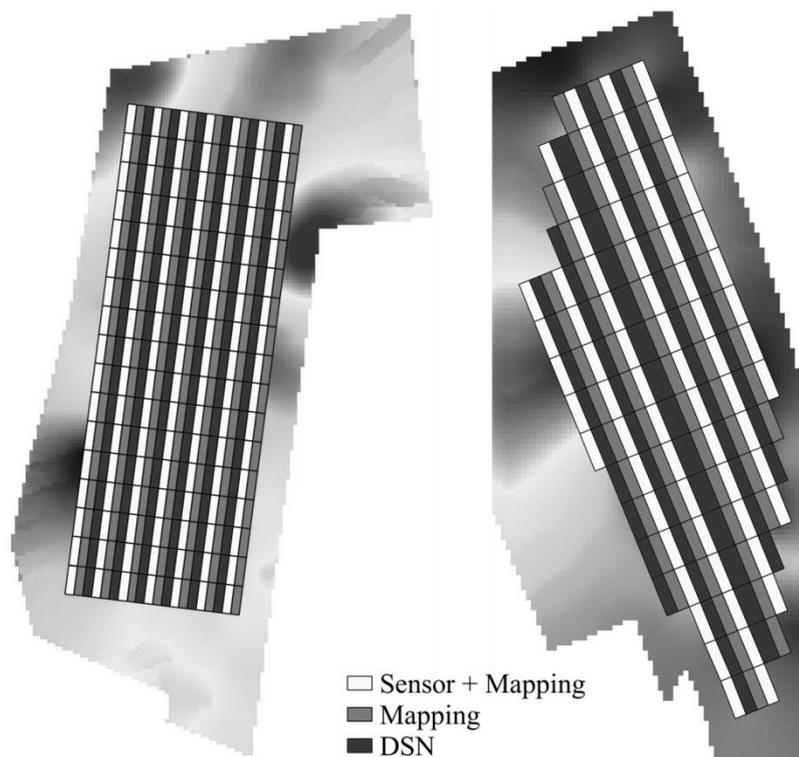


Abb. 2: Anlageschema der Streifenversuche Winterraps (links) und Wintergerste (rechts) mit der nutzbaren Feldkapazität im Hintergrund, Versuchsjahr 2013 (hell: geringe nFK, dunkel: hohe nFK).

Streifenversuch Winterraps

Die N-Düngermenge der Vergleichsvariante DSN wurde nach dem DSN-Berechnungsschema berechnet. In diesem Verfahren werden neben dem Sollwert, der im Frühjahr enthaltene mine-

ralische N im Boden (N_{\min}), die Bestandesentwicklung nach dem Winter, die Vorfrucht, die organische Düngung und die Herbstdüngung berücksichtigt. Das genaue Berechnungsverfahren wurde bereits im Literaturteil beschrieben (Kapitel 2.8.3), der Rechenweg ist im Anhang einsehbar (Tab. A 1). Insgesamt wurde ein N-Düngerbedarf im Frühjahr von 166 kg ha^{-1} berechnet (Tab. 27).

Für die Variante Mapping wurde zu Vegetationsende die N-Aufnahme im Herbst über den Biomasseaufwuchs geschätzt. Dazu wurde nach der im Kapitel 2.8.3 beschriebenen Schnittmethode zur Abschätzung der N-Aufnahme verfahren, indem in die Gleichung für den Termin Herbst das Gewicht der mittleren oberirdischen Biomasse eingesetzt wurde.

Tab. 27: N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des Streifenversuchs Winterraps mit den Düngesystemen DSN, Mapping und Online + Mapping, aufgetragen nach Düngetermin und Ertragsniveau, 2013.

Düngesystem	Ertragsniveau	Düngetermin			Summe
		Herbst	VB	BBCH 30	
DSN	niedrig	40	86	80	206
	mittel	40	86	80	206
	hoch	40	86	80	206
Mapping	niedrig	40	28	51	119
	mittel	40	40	75	155
	hoch	40	51	95	187
Online + Mapping	niedrig	40	21 - 57	0 - 51	63 - 118
	mittel	40	23 - 42	42 - 78	105 - 161
	hoch	40	41 - 56	77 - 104	158 - 200

Zugleich wurde die ertragspotentialabhängige optimale N-Aufnahme im Herbst berechnet. Die gesamte benötigte N-Düngermenge richtete sich nach dem zu erwartenden N-Entzug über das Korn, der um einen standortabhängigen N-Verwertungsfaktor korrigiert wurde. Die zu applizierende N-Düngermenge wurde so kalkuliert, dass auf den N-Düngerbedarf im Frühjahr die Differenz zwischen der optimalen N-Aufnahme im Herbst und der aktuellen N-Aufnahme im Herbst addiert wurde (Gleichung 11).

Über dieses Verfahren wurde ein N-Düngerbedarf für das Frühjahr von 79 kg ha^{-1} im NE-Bereich und 147 kg ha^{-1} im HE-Bereich kalkuliert. Von der N-Düngermenge wurden 35% zu VB und 65% zu Schossbeginn appliziert. Die N-Düngung im Herbst erfolgte einheitlich mit 40 kg ha^{-1} .

$$(11) \quad \text{ND}_F = \text{N}_{\text{Bed}} + (\text{NAH}_{\text{opt}} - \text{NAH}_{\text{akt}})$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ND_F	kg ha^{-1}	benötigte N-Düngermenge im Frühjahr
N_{Bed}	kg ha^{-1}	N-Düngebedarf
NAH_{opt}	kg ha^{-1}	optimale N-Aufnahme im Herbst
NAH_{akt}	kg ha^{-1}	aktuelle N-Aufnahme im Herbst

In der Variante Online + Mapping erfolgte gegen Vegetationsende eine Spektralmessung des Pflanzenbestandes über das handgetragene Spektrometer der Firma tec5. Über die Messwerte des Vegetationsindex VX 2 wurden die N-Aufnahmen berechnet. Aufgrund der negativen Korrelation der N-Aufnahme im Herbst mit der N-Düngermenge im Frühjahr konnte die optimale N-Düngermenge für die Frühjahrsdüngung berechnet werden. Das genaue Verfahren zur Abschätzung der N-Aufnahme und der Kalkulation der standortspezifischen optimalen N-Düngermenge im Frühjahr ist im Ergebnisteil (Kapitel 4.1.6.1 & Kapitel 4.1.7) erläutert. Die Verteilung der N-Düngermenge im Frühjahr erfolgte im Verhältnis 35% (VB) zu 65% (BBCH 30). Waren die N-Düngermengen im NE-Bereich sehr gering, so wurden diese als Einmalgabe zu VB appliziert. Die Herbstdüngung erfolgte schlageinheitlich mit einer N-Menge von 40 kg ha^{-1} . Die Gesamt-N-Düngermengen dieses Düngesystems lagen zwischen 110 kg ha^{-1} und 182 kg ha^{-1} .

Streifenversuch Wintergerste

Die N-Düngermengen des Düngesystems DSN wurden der N-Empfehlung zu Wintergerste entnommen. Diese Empfehlung wurde für den Versuchsschlag über das Programm DSN der LfL berechnet. Gegenüber der Empfehlung des DSN wurde die N-Düngung zu VB von 60 kg ha^{-1} auf 70 kg ha^{-1} angehoben, um den durch einen späten Wintereinbruch geschwächten Bestand in der Entwicklung zu fördern. Die N-Düngermengen zur zweiten (50 kg ha^{-1}) und dritten (70 kg ha^{-1}) Gabe wurden nach der Empfehlung des DSN übernommen (Tab. 28). Das Berechnungsschema ist im Literaturteil (Kapitel 2.8.3) näher beschrieben und der konkrete Rechenweg im Anhang einsehbar (Tab. A 2).

Tab. 28: N-Düngermengen [kg ha^{-1}] des Streifenversuchs Gerste mit den Düngesystemen DSN, Mapping und Online + Mapping, aufgetragen nach Düngetermin und Ertragsniveau, 2013.

Düngesystem	Ertragsniveau	Düngetermin			Summe
		VB	BBCH 32	BBCH 39	
DSN	niedrig	70	50	70	190
	mittel	70	50	70	190
	hoch	70	50	70	190
Mapping	niedrig	70	47	31	149
	mittel	70	60	40	170
	hoch	70	61	40	171
Online + Mapping	niedrig	70	13 - 48	28 - 39	110 - 157
	mittel	70	21 - 73	28 - 39	119 - 182
	hoch	70	29 - 72	28 - 33	127 - 170

Für das Düngesystem Mapping wurden die N-Düngermengen nach einem eigenen Ansatz kalkuliert. Dieser basiert auf dem erwarteten Korn-N-Entzug des jeweiligen Teilschlags. Der Korn-N-Entzug wird aus dem Kornertrag, dem TS-Gehalt und dem N-Gehalt im Korn berechnet (Gleichung 12). Aus der Multiplikation des N-Entzugs mit einem N-Verwertungsfaktor entsteht die benötigte N-Düngermenge (Gleichung 13).

Dieser Faktor gibt die durchschnittliche N-Verwertung des eingesetzten Mineraldünger-N an. Um die korrekte N-Düngermenge zu erhalten, muss der N-Bedarf mit diesem Faktor erweitert werden¹. Zu Vegetationsbeginn wurden einheitlich 70 kg ha^{-1} Mineraldünger-N appliziert. Der verbleibende Rest der gesamten benötigten N-Düngermenge wurde im Verhältnis 0,6 : 0,4 zu BBCH 32 und BBCH 39 appliziert. Die N-Düngermengen betragen zwischen 149 kg ha^{-1} und 171 kg ha^{-1} .

¹ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde dieser Faktor nicht dargestellt.

$$(12) \quad N_{\text{Ent}} = \text{KE} \cdot \text{TS} \cdot \text{NG}_{\text{Korn}}$$

$$(13) \quad \text{ND} = N_{\text{Ent}} \cdot \text{NV}_{\text{Faktor}}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
N_{Ent}	kg ha^{-1}	N-Entzug über das Korn
KE	dt ha^{-1}	Kornertrag
TS	%	TS-Gehalt im Korn
NG_{Korn}	%	N-Gehalt im Korn, abgeleitet über den Proteingehalt
ND	kg ha^{-1}	benötigte N-Düngermenge
$\text{NV}_{\text{Faktor}}$	-	N-Verwertungsfaktor

Das Düngesystem Online + Mapping basiert auf zwei Teilsystemen: Der Schätzung der N-Aufnahme und dem Düngelalgorithmus. Die Bestimmung der N-Aufnahme erfolgt über Schätzalgorithmen mit dem Vegetationsindex VX 2. Die Ableitung der N-Düngeempfehlung basiert auf ertragsabhängigen, optimalen N-Aufnahmekurven, über die die benötigte N-Düngermenge berechnet wird. Darüber hinaus fließt die aktuelle N-Aufnahme in die Kalkulation ein. Auch werden in diesem System über den Faktor DIMA die N-Mineralisierung, N-Wirkungsdauer, N-Immobilisierung und N-Ausnutzung des N-Düngers berücksichtigt. Eine detaillierte Erklärung zur Ableitung und Funktion des Düngesystems ist dem Kapitel 4.2.7 zu entnehmen. Die Gesamt-N-Düngermengen der nach dem System Online + Mapping gedüngten Variante lagen zwischen 110 kg ha^{-1} und 182 kg ha^{-1} . Die Startgabe zu Vegetationsbeginn von 70 kg ha^{-1} Mineraldünger-N wurde schlageinheitlich ausgebracht.

Technische Durchführung der Düngung

Die Düngung der Streifenversuche erfolgte GPS-gesteuert über einen pneumatischen Auslegerstreuer AERO 2220 der Firma Rauch. Zu jedem Düngetermin wurden für die Parzellen Düngermengen berechnet. Diese wurden dem im GIS-Programm erstellten Parzellenplan zugeordnet und auf einen Outdoor-Computer übertragen. Dieser war sowohl mit dem Düngerstreuerterminal als auch mit einer hochgenauen GPS-Antenne verbunden. Beim Überfahren der jeweiligen Parzellengrenze wurde durch das GPS-Signal die Parzelle mit der zugehörigen N-Düngermenge erkannt und an das Terminal gesendet, so dass die richtige Ausbringmenge eingestellt wurde.

3.2.5 Weitere Versuche

In die Datenauswertung gingen nicht nur die beschriebenen Versuche ein. Um eine breite Datenbasis sowohl für die Entwicklung der Düngesysteme als auch für die Tests der Vegetationsindices auf ihre Reaktion auf verschiedene Sortentypen sowie deren Messpräzision zu schaffen, wurde ergänzend auf Versuche aus Vorjahren zurückgegriffen. Da sich diese in der Anlage und Beprobung nicht von den beschriebenen Versuchen unterscheiden, wird auf das Versuchsdesign und die Durchführung nicht näher eingegangen. Allerdings änderten sich die Zahl der N-Stufen und die Sortenwahl im Verlauf der Versuchsjahre. Die Versuche an den Standorten Roggenstein und Dürnast, die zusätzlich bei der Auswertung verwendet wurden, sind in Tab. 29 und Tab. 30 dargestellt.

Tab. 29: Übersicht über die ausgewerteten Versuche des Standortes Roggenstein.

Kultur	Versuch	Jahr												
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014			
Wintergerste	HE und NE (mz, zz)											x	x	x
	Streifenversuch												x	
Raps	Sorte			x	x	x						x	x	
	HE		x	x	x	x		x				x	x	x
	NE										x	x	x	x
	Streifenversuch												x	

Tab. 30: Übersicht über die ausgewerteten Versuche des Standortes Dürmast.

Kultur	Versuch	Jahr													
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Wintergerste	HE und NE mz											x	x	x	x
	N-Steigerung zz			x	x	x	x	x				x	x	x	x
	N-Steigerung mz		x	x	x	x	x	x							
Raps	Sorte													x	x
Raps	N-Steigerung											x	x	x	

3.3 Pflanzenschutz und Nährstoffversorgung

Um die Reflexionsmessungen nicht zu beeinflussen, war ein optimaler Pflanzenschutz Aufwand nötig. Der Einsatz von Herbiziden, Fungiziden, Wachstumsregulatoren und Insektiziden erfolgte kulturartspezifisch nach den Gesichtspunkten des integrierten Pflanzenbaus in Abhängigkeit der Bestandessituation unter Zuhilfenahme gängiger Entscheidungshilfen (ISIP, 2015, GERSTENMODELL BAYERN, 2005, PROPLANT, 2015)

Weiterhin wurde auf eine optimale Versorgung mit Grund- und Spurennährstoffen geachtet, um die Pflanzenreflexion nicht durch einen möglichen Nährstoffmangel zu beeinträchtigen. Die Nährstoffversorgung erfolgte in Anlehnung an die Bodenuntersuchungen und Ansprüche der Kulturart über den Nährstoffentzug (WENDLAND et al., 2012).

3.4 Beprobung, Probennahme, Messverfahren (Analysen)

3.4.1 Biomassebeprobung bei Raps

Die Biomasseschnitte in den N-Steigerungsversuchen wurden bei Raps zu wichtigen Entwicklungsstadien der Kulturart durchgeführt (Tab. 31). So starteten in allen Jahren die Beprobungen bereits im Herbst gegen Ende Oktober. Weitere Beprobungstermine stellten der Beginn des Streckungswachstums (BBCH 30) und des Blütenschiebens (BBCH 50) sowie die Hauptblüte dar. Mit Beginn des Versuchsjahres 2012 wurde außerdem zu Vegetationsbeginn und kurz vor der Vollreife des Pflanzenbestandes (BBCH 85) beprobt.

Tab. 31: Datum der Biomasseschnitte des N-Steigerungsversuchs HE und NE Winterraps sowie des Sortenversuchs von Winterraps zu verschiedenen Terminen in Roggenstein, 2012 bis 2014.

Termin	N-Steigerungsversuch HE und NE			Sortenversuch	
	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2011/2012	2012/2013
Herbst	31.10.2011	24.10.2012	28.10.2013	02.11.2011	24.10.2012
VB	06.03.2012 (HE) 07.03.2012 (NE)	11.03.2013	26.02.2014	-	-
BBCH 30	21.03.2012	09.04.2013	17.03.2014	-	08.04.2013
BBCH 50	30.03.2012 (NE) 02.04.2012 (HE)	18.04.2013	27.03.2014	02.04.2012	-
BBCH 65	26.04.2012	14.05.2013 (HE) 15.05.2013 (NE)	23.04.2014	-	-
BBCH 85	28.06.2012	08.07.2013	23.06.2014	-	-

In Roggenstein wurden pro Schnitttermin zwei Quadratmeter (zweimal ein Quadratmeter) in den Beprobungspartellen geschnitten. Daraufhin folgte die Einwaage des gesamten Probenmaterials, um den Frischmasseertrag pro Hektar zu bestimmen. Nach der Einwaage wurde eine Mischprobe des Materials gehäckselt; ein Teil des Häckselgutes wurde in Crispac-Beutel verpackt und erneut eingewogen. Auf diesen Arbeitsgang folgte die Trocknung der Proben bei 60 °C im Trockenschrank. Nachdem die Proben das Wasser vollständig abgegeben hatten, wurden sie erneut gewogen. Über die Ein- und Auswaage wurde der Trockensubstanzgehalt (TS) berechnet, der für die Kalkulation des Trockenmasseaufwuchses nötig war. Die Bestimmung des N-Gehalts in der Biomasse erfolgte im Labor. Über den N-Gehalt der Biomasse und den TM-Aufwuchs war es möglich, die N-Aufnahme des Pflanzenbestandes zu berechnen.

3.4.2 Biomassebeprobung bei Gerste

Am Standort Roggenstein wurden Biomasseschnitte im HE und NE Versuch Gerste zu den entwicklungsphysiologisch wichtigen Stadien beider Sortentypen durchgeführt. Start der Probenahme war zu Schossbeginn (BBCH 30), weitere Schnitte wurden zum Zweiknotenstadium (BBCH 32), zum Spitzen des Fahnenblattes (BBCH 39), zum Grannenspitzen (BBCH 49) und zur Vollblüte (BBCH 65) durchgeführt (Tab. 32). Außerdem folgte zur Vollreife (BBCH 92) ein Schnitt zur Bestimmung der Ertragsstruktur.

Tab. 32: Datum der Biomasseschnitte des N-Steigerungsversuchs HE und NE Roggenstein zu verschiedenen Terminen von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste, 2012 bis 2014.

Termin	Versuchsjahr		
	2011/2012	2012/2013	2013/2014
BBCH 30	04.04.2012	23.04.2013	28.03.2014
BBCH 32	17.04.2012	30.04.2013	04.04.2014 (HE) 09.04.2014 (NE)
BBCH 39	-	-	15.04.2014 (HE) 17.04.2014 (NE)
BBCH 49	02.05.2012 (HE) 03.05.2012 (NE)	08.05.2013	28.04.2014 (NE) 29.04.2014 (HE)
BBCH 65	15.05.2012	05.06.2013	12.05.2014 (HE) 13.05.2014 (NE)
BBCH 92	04.07.2012	15.07.2013	03.07.2014

Die Biomasseschnitte wurden zu Schossbeginn manuell durchgeführt. Mit elektrischen Gartenscheren wurden aus den Randreihen der Druschparzellen fünf mal zwei Meter lange Streifen entnommen, was einer Beprobungsfläche von 1,25 m² entspricht. Ab BBCH 32 kam ein Biomassevollernter zum Einsatz, der die Teilstücke der Beprobungsparzellen beerntete. Die Gesamtmasse des Teilstücks wurde eingewogen, woraus der Frischmasseertrag abgeleitet wurde. Aus der Gesamtprobe wurde eine Teilprobe entnommen, die im Groblabor gehäckselt und eingewogen wurde. Nach einem Trocknungsvorgang bei 60 °C erfolgte durch die Auswaage der Probe die Bestimmung des TS-Gehalts und des TM-Aufwuchses.

Am Standort Dürnast wurde zu den wichtigen Entwicklungsstadien der Biomasseaufwuchs untersucht (Tab. 33). Der HE- und NE-Versuch wurden über die gesamte Vegetation per Hand beerntet, indem eine Reihe über die gesamte Parzellenlänge von 10 m entnommen wurde, was einer Fläche von 1,25 m² entspricht. Der N-Steigerungsversuch sowie der Sortenversuch wurden zu den beiden ersten Schnittterminen manuell mit elektrischen Gartenscheren, später maschinell mit dem Biomassevollernter beerntet. Für die Ertragsstruktur wurden in allen Versuchen wieder manuell 1,25 m² entnommen. Die Weiterverarbeitung der Biomasseproben erfolgte wie in den Versuchen in Roggenstein.

Tab. 33: Datum der Biomasseschnitte des N-Steigerungsversuchs HE und NE von mehrzeiliger und des N-Steigerungsversuchs für zweizeilige Wintergerste in Dürnast, 2012 bis 2013 sowie des Sortenversuchs Wintergerste in Dürnast 2012 zu verschiedenen Terminen.

Termin	N-Steigerungsversuch zz N-Steigerungsversuch HE u. NE mz		Sortenversuch
	Versuchsjahr		Versuchsjahr
	2011/2012	2012/2013	2011/2012
BBCH 30	10.04.2012	23.04.2013	10.04.2012
BBCH 32	23.04.2012	03.05.2013 (zz)	23.04.2012
BBCH 39	-	02.05.2013 (mz)	-
BBCH 49	02.05.2012 (mz) 11.05.2012 (zz)	13.05.2013 (mz) 15.05.2013 (zz)	11.05.2012
BBCH 65	22.05.2012	21.05.2013 (mz) 05.06.2013 (zz)	21.05.2012
BBCH 92	02.07.2012 (zz) 09.07.2012 (mz)	18.06.2013 (zz) 16.07.2013 (mz)	09.07.2012

3.4.3 Analyse der Pflanzenproben

Für die Analyse des N-Gehalts in der Biomasse und im Stroh wurden die getrockneten Pflanzenproben aus den Biomasse- und Ertragsstrukturschnitten mit einer Brabender Mühle auf 0,5 mm Größe gemahlen und im Labor auf ihren N-Gehalt untersucht. Ein Teil der Pflanzenproben wurde über den Elementaranalysator vario MAX CNS der Firma elementar auf den N-Gehalt untersucht. Dieses Gerät arbeitet nach dem Prinzip der katalytischen Rohrverbrennung unter Sauerstoffzufuhr und hohen Temperaturen (ELEMENTAR, 2004). Die Verbrennungsgase werden in diesem System gereinigt und über einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor analysiert.

Ein weiterer Teil der Proben wurde über die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) analysiert. Hierzu wurde ein Gerät der Firma Foss verwendet. Die Eichkurven zur Bestimmung des N-Gehalts wurden selbst erstellt.

Die Analyse auf Korninhaltsstoffe bei Raps und Gerste wurde ebenfalls über die NIRS-Technologie durchgeführt. Die Rapssaat wurde an der LfL (2012) und der Saaten-Union (2013 und 2014) auf den Protein- und Ölgehalt untersucht. Die N-Gehalte der Gerstenproben wurden am eigenen NIRS-Gerät bestimmt. Die Bestimmung der Kornfeuchte erfolgte über den Granomat der Firma Pfeuffer und über das Trocknen der druschfeuchten Proben bei 60 °C. Aus dem Verhältnis der Einwaage/Auswaage berechnete sich der TS-Gehalt des Korns.

Das TKG wurde erfolgte nach der vollständigen Trocknung der Körner mit einem Körnerzählgerät der Marke Pfeuffer bestimmt.

3.4.4 Analyse der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in den Streifenversuchen

Um die unterschiedliche Wasserspeicherfähigkeit der Flächen, auf denen die Streifenversuche angelegt wurden ermitteln zu können, wurden Bodenproben in einem Raster entnommen. Mit Hilfe eines schleppermontierten, hydraulisch betätigten Bodenprobenentnahmegärts betrug der Abstand zwischen den Probenahmepunkten in einer Fahrgasse in Längsrichtung 40 m. Diese Einstichpunkte wurden in Querrichtung um zwei Fahrgassenbreiten (24 m), bei einer gleichzeitigen Verschiebung der Entnahmepunkte in Längsrichtung um 20 m, versetzt. Somit entstand ein Netz aus Probenahmepunkten. Diese Punkte wurden in aufsteigender Reihenfolge mit einem tragbaren GPS-Gerät der Marke Garmin eingemessen.

Mit dem Bodenprobenentnahmegerät wurden gleichzeitig vier Pürckhauer-Borstäbe langsam unter mehrmaligem Drehen so tief wie möglich in den Boden gedrückt; damit konnten Bodenproben einzeln aus den Tiefen 0 cm bis 30 cm, 30 cm bis 60 cm und 60 cm bis 90 cm entnommen werden.

Die Körnungsanalyse der Bodenproben zur Bestimmung der Bodenart führte das Ingenieurbüro Häusler durch. Ein Teil der Analyse erfolgte mit der Fingerprobe, der andere Teil mit der von der VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) standardisierten Schlämmanalyse. Weitere für die Berechnung der nFK wichtige Parameter wie der durchwurzelbare Horizont, der Skelettanteil und der Humusgehalt wurden ebenfalls analysiert und bei der Kalkulation der nFK berücksichtigt. Für die Lagerungsdichte, die zur Bestimmung der Trockenrohdichte nötig ist, wurde ein mittlerer, landwirtschaftlichen Böden entsprechender Wert angenommen (HÄUSLER, 2012). Die Daten zur Kalkulation entstammen der BODENKUNDLICHEN KARTIERANLEITUNG (2005).

Die GPS-Daten und nFK-Werte wurden in QGIS zusammengeführt und über das Statistikprogramm R in einem 5 m-Raster innerhalb der Schlaggrenzen interpoliert.

3.5 Pflanzenreflexion

3.5.1 Funktion und Aufbau des Spektrometers

Die Reflexionsmessungen wurden seit Versuchsbeginn mit einem passiven Spektrometer der Firma tec5 durchgeführt (TEC5, 2010, STRENNER, 2011). Dieses System besteht aus einer Messsonde, einer Recheneinheit zur Auswertung der Daten und einer separaten Batterie zur Stromversorgung (Abb. 3). Die Messsonde ist aus zwei Kanälen aufgebaut, von denen ein nach oben gerichteter Referenzkanal (a) die Globalstrahlung erfasst und der zu Boden gerichtete Messkanal (b) die Reflexion des Pflanzenbestandes misst. Durch diese beiden Kanäle lassen sich Intensitätsschwankungen so wie Änderungen in der spektralen Verteilung des Sonnenlichts ausschalten. Damit üben nur noch die Reflexionseigenschaften des gemessenen Pflanzenbestandes Einfluss auf das Messergebnis aus. Das einfallende Licht wird über zwei Glasfaserkabel zu einem Interferenzgitter geleitet, wo das Licht in einzelne Wellenlängen aufgespalten wird. Das Licht der einzelnen Wellenlängen wird von einem Diodenarray erfasst. Die Berechnung der Reflexionssignatur erfolgt über die Division des einfallenden Lichts durch die Bestandesreflexion. Gleichzeitig wird dieser Quotient auf die Weißstandarddaten korrigiert (geräteinternes Standardspektrum: BaSO₄).

Das Wellenlängenspektrum des Spektrometers umfasst den Bereich zwischen 365 nm und 1052 nm. Die spektrale Auflösung beträgt 3,3 nm. Weitere Kenndaten zum tec5 Spektrometer sind der Übersicht in Tab. 34 zu entnehmen.

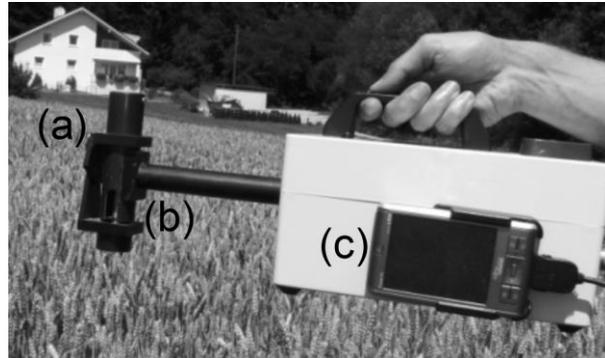


Abb. 3: Spektrometer der Firma tec5 mit dem Referenzkanal (a), dem Messkanal (b) und dem Pocket PC (c).

Tab. 34: Detaillierte Auflistung der technischen Eigenschaften des in den Versuchen verwendeten Spektrometers tec5.

Bauteil	Eigenschaften
	zweikanaliges Messsystem
Spektrale Kanäle	Referenzkanal mit Cosinus Streuscheibe Messkanal mit Öffnungswinkel 25°
Messbereich	365 nm bis 1052 nm
Auflösung	3,3 nm
Integrationszeit	Modus manuell: 3 ms bis 6500 ms; Modus automatisch
Messung	Scope Mode (Zeitabstand der Messungen frei wählbar) Einzelmessung manuell ausgelöst

3.5.2 Datenaufbereitung und Auswertungsverfahren

Die im Verlauf der Messungen gespeicherten Daten wurden von der Speicherkarte des Pocket PC (c) (Abb. 3) als PZ.2 Dateien auf einen Rechner übertragen und dort bis 2012 über ein excelbasiertes Auslesemakro aus dem Jahr 2010 ausgelesen sowie für weitere Arbeitsschritte aufbereitet und abgelegt. Ab 2012 kam zusätzlich ein Java[®]-basiertes Auswerteprogramm zum Einsatz. Über das reflektierte Wellenlängenspektrum der Pflanzenbestände konnten aus charakteristischen Wellenlängenbereichen unterschiedliche Vegetationsindices berechnet werden. Die für die Indexberechnung nötigen Wellenlängen befinden sich im grünen, roten und nahinfraroten Bereich des Wellenspektrums. Der Rechenweg und die nötigen Wellenlän-

gen sind nachfolgend dargestellt (Tab. 35). Im Kapitel 2.4 wurde bereits näher auf die verschiedenen Indices eingegangen.

Tab. 35: Gleichungen und Quellen der in den Versuchen verwendeten Vegetationsindices (R: Reflexion einer bestimmten Wellenlänge).

Vegetations-index	Gleichung für Vegetationsindex	Quelle
VX 1 ²	keine Angabe	keine Angabe
VX 2 ²	keine Angabe	keine Angabe
VX 3 ²	keine Angabe	keine Angabe
NDVI	$\frac{R_{780} - R_{670}}{R_{780} + R_{670}}$	ROUSE et al., 1974
IRR	$\frac{R_{780}}{R_{670}}$	PEARSON & MILLER, 1972
IRG	$\frac{R_{780}}{R_{550}}$	TAKEBE et al., 1990
IRI 1	$\frac{R_{740}}{R_{730}}$	REUSCH, 1997
SAVI	$(1 + 0,5) \cdot \left(\frac{R_{780} - R_{670}}{R_{780} + R_{670} + 0,5} \right)$	HUETE, 1988
NDI 2	$\frac{R_{780} - R_{740}}{R_{780} + R_{740}}$	MÜLLER et al., 2008
SR 1	$\frac{R_{740}}{R_{780}}$	MÜLLER et al., 2008
SR 2	$\frac{R_{780}}{R_{740}}$	MÜLLER et al., 2008

3.5.3 Durchführung der Reflexionsmessungen

Die Reflexionsmessungen bei Raps und Gerste wurden zeitgleich mit den Biomasseschnitten durchgeführt. Damit orientierten sich die Messungen an den wichtigen Entwicklungsstadien der beiden Kulturen. Während bei Raps die Messungen bereits im Herbst starteten, begannen die Reflexionsmessungen bei Wintergerste in allen Versuchsjahren erst zum Schossbeginn

² Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Darstellung der Gleichung sowie der Quelle für die Vegetationsindices VX 1, VX 2 und VX 3 verzichtet.

(BBCH 30). Die Messungen endeten bei beiden Kulturen beim Erreichen der Hauptblüte. Genauere Informationen zu den einzelnen Messterminen sind den Tab. 31 bis Tab. 33 zu den Biomasseschnitten zu entnehmen.

Während für die Biomasseschritte die Beprobungspartien verwendet wurden, fanden die Reflexionsmessungen hauptsächlich in den Druschpartien statt. Pro Parzelle wurden mindestens sieben Einzelmessungen durchgeführt, von denen jede separat ausgelöst wurde. Die Messungen wurden unter der jeweiligen Partiennummer als PZ.2 Datei auf einer SD-Karte des Pocket-PC (Abb. 3 (c)) gespeichert. Bei den Messungen wurde der Messkanal etwa 50 cm über dem Pflanzenbestand geführt. Da der Öffnungswinkel 25° betrug, ergab sich pro Messung eine gemessene Fläche von $0,038 \text{ m}^2$. Insgesamt wurden also mindestens $0,27 \text{ m}^2$ pro Parzelle gemessen.

3.6 Berechnungsformeln

Zur Ökonomischen Bewertung der Düngesysteme für Winterraps und für Wintergerste wurde für beide Kulturen die N-Kostenfreie Leistung (NKfL) berechnet. Um möglichst objektive Erzeugerpreise in diesen Zeitraum zu verwenden, wurde auf die Preise in der Datensammlung „Landwirtschaftliche Erzeugerpreise in Bayern“ zurückgegriffen (HAMM ET AL., 2014). Der Reinnährstoffpreis des N-Düngers in diesem Versuchsjahr wurde den Planungs- und Bewertungsdaten der LfULG (LfULG SACHSEN, 2015) entnommen.

Die NKfL für Wintergerste wurde über die Subtraktion der Kosten für den N-Dünger von den Einnahmen durch den Verkauf des Erntegutes kalkuliert (Gleichung 14).

Bei der Rapsabrechnung wurde für die Berechnung der NKfL neben dem Kornertrag auch die Qualität in Form des Ölgehalts berücksichtigt (Gleichung 15). Der Standardölgehalt beträgt 40%. Zuschläge erfahren Partien mit höheren Werten, während bei Unterschreitung dieses Wertes Abschläge verrechnet werden (FUNK, 2012). Der Ölgehalt ging im Verhältnis 1,5 : 1 in die Abrechnung ein. Die Kosten für die N-Düngung wurden wiederum vom Umsatz abgezogen.

$$(14) \quad \text{NKfL}_{\text{WG}} = (\text{KE}_{\text{WG}} \cdot \text{P}_{\text{WG}}) - (\text{P}_{\text{N}} \cdot \text{N}_{\text{Menge}})$$

$$(15) \quad \text{NKfL}_{\text{WR}} = ((\text{KE}_{\text{WR}} \cdot \text{P}_{\text{WR}}) + (\text{Öl}\% - 40\%) \cdot 1,5 \cdot \text{P}_{\text{WR}}) - (\text{P}_{\text{N}} \cdot \text{N}_{\text{Menge}})$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
NKfL_{WG}	€ ha ⁻¹	N-Kostenfreie Leistung Wintergerste
KE_{WG}	dt ha ⁻¹	Kornertrag Wintergerste
P_{WG}	€ dt ⁻¹	Erzeugerpreis für Wintergerste (21,5 € dt ⁻¹)
P_{N}	€ kg ⁻¹	Preis für das kg N als Reinnährstoff (0,94 € kg N ⁻¹)
N_{Menge}	kg ha ⁻¹	eingesetzte N-Menge
NKfL_{WR}	€ ha ⁻¹	N-Kostenfreie Leistung Winterraps
KE_{WR}	dt ha ⁻¹	Kornertrag Winterraps
P_{WR}	€ dt ⁻¹	Erzeugerpreis für Winterraps (47,9 € dt ⁻¹)
Öl	%	Ölgehalt im Ernteprodukt

Um den Effekt der N-Düngung auf die Umwelt sowie die Verwertung des eingesetzten N-Düngers zu analysieren, wurden der N-Saldo sowie die N-Effizienz gerechnet. Der N-Saldo ist die Differenz zwischen der Zufuhr an organischem und mineralischem N-Dünger und dem N-Entzug über das Ernteprodukt (Gleichung 16). Hierbei ist eine möglichst ausgeglichene N-Düngung anzustreben. Über die nach RATHKE et al. (2006) kalkulierte N-Effizienz wird die Menge an produzierten kg Korn je kg Dünger-N ausgedrückt (Gleichung 17).

$$(16) \quad \text{N-Saldo} = \text{N}_{\text{Zu}} - \text{N}_{\text{Ent}}$$

$$(17) \quad \text{N-Effizienz} = \frac{\text{KE}}{\text{N}_{\text{Zu}}}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
N-Saldo	kg ha ⁻¹	Differenz zwischen N-Zufuhr und N-Abfuhr
N_{Zu}	kg ha ⁻¹	Summe der Zufuhr an mineralischem und organischem N-Dünger
N_{Ent}	kg ha ⁻¹	N-Entzug über das Korn
N-Effizienz	kg kg ⁻¹	N-Effizienz
KE	kg ha ⁻¹	Kornertrag

Das Verhältnis zwischen der im Frühjahr applizierten N-Düngermenge und dem über das Korn entzogenen N wird über die prozentuale N-Verwertung ausgedrückt (Gleichung 18).

Diese Größe wurde über die Division des N-Entzugs über das Korn durch die Summe des im Frühjahr applizierten Mineraldünger-N berechnet. Die N-Verwertung wurde zur Entwicklung des Düngesystems von Winterraps benötigt, um die Standortunterschiede in die Düngerberechnung einfließen lassen zu können.

$$(18) \quad NV = \frac{N_{\text{Ent}}}{\text{NDF}}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
NV	%	N-Verwertung
N_{Ent}	kg ha^{-1}	N-Entzug über das Korn
NDF	kg ha^{-1}	N-Düngermenge im Frühjahr

3.7 Statistische Auswertung

Die Aufbereitung der in den Feldversuchen gewonnenen Daten sowie die Erstellung von Tabellen erfolgte über das Tabellenkalkulationsprogramm Excel. Die statistische Auswertung wurde mit den Statistikprogrammen R (R CORE TEAM, 2015) und SPSS (SPSS INC. RELEASED, 2009) durchgeführt. Sämtliche Regressionsgleichungen und die daraus resultierenden Bestimmtheitsmaße wurden über SPSS kalkuliert. Die varianzanalytische Untersuchung sowie die Gestaltung der Abbildungen sämtlicher Versuchsergebnisse erfolgte dagegen mit dem frei verfügbaren Programm R.

Für die statistische Auswertung wurden gemischt-lineare Modelle verwendet. Um sicherstellen zu können, dass eine Varianzanalyse möglich ist, wurden die Residuen des Modells mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Bei Normalverteilung und signifikantem Einfluss eines Hauptfaktors auf die abhängige Variable erfolgte zusätzlich ein Mittelwertvergleich mit dem R-Paket „lsmmeans“ (LENTH, 2015). Unterschiedliche Buchstaben in den Tabellen kennzeichnen die Signifikanz bei $p < 0,05$.

Lag keine Normalverteilung vor, so wurde der Einfluss der Faktoren auf die abhängige Variable mit dem Kruskal-Wallis-Test getestet. Grundsätzlich wurde der Faktor Wiederholung in allen Modellen als zufälliger Faktor gesetzt.

Für die Sortenversuche in Winterraps und Wintergerste wurde anstatt einer Varianzanalyse eine Kovarianzanalyse mit der Kovariaten N-Aufnahme gerechnet, um den Einfluss dieser Größe auf die Vegetationsindices zu testen.

Für die Varianzanalysen wurden folgende Signifikanzniveaus angegeben:

n.s.: nicht signifikant

* : $p < 0,05$ (signifikant)

** : $p < 0,01$ (hoch signifikant)

*** : $p < 0,001$ (sehr hoch signifikant)

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Auswertungen der zur Verfügung stehenden Mess- und Ertragsdaten sowie die Herleitung der Düngesysteme für Winterraps und Wintergerste erläutert. Die Resultate sind getrennt nach Kulturen beschrieben.

4.1 Ergebnisse – Winterraps

4.1.1 Wirkung gestaffelter N-Gaben zu Winterraps

Um vor allem den Effekt der N-Düngung auf den Kornertrag, den N-Entzug über das Korn, den N-Saldo, die N-Kostenfeie Leistung und die N-Effizienz analysieren (Tab. 36) und daraus eine fundierte N-Düngeempfehlung ableiten zu können, wurde neben den von 2012 bis 2014 erhobenen eigenen Daten auch auf Werte des Standortes Roggenstein seit dem Jahr 2005 zurückgegriffen. In der Varianzanalyse der Variablen mit den Faktoren N-Stufe und Jahr, wurde für jede der Variablen ein höchstsignifikanter Effekt der Hauptwirkungen gefunden. Die Wirkung der N-Düngung war allerdings nicht immer gleich, sondern variierte mit der Jahreswitterung, wie die signifikante (Kornertrag) bis höchstsignifikante (N-Effizienz) Wechselwirkung der Faktoren N-Stufe und Jahr zeigt. Allerdings war der Einfluss der Interaktion begrenzt, da deren F-Wert im Vergleich zu den F-Werten der Hauptwirkung N-Stufe und Jahr vernachlässigbar gering war. Da sich die N-Stufen im Verlauf der Versuchsjahre änderten, wurden zur statistischen Auswertung nur Varianten verwendet, die über den gesamten Analysezeitraum unverändert blieben.

Tab. 36: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den Kornertrag, den N-Entzug Korn, den N-Saldo und die N-Effizienz mit den Faktoren N-Stufe und Jahr (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

Faktor	Kornertrag	N-Entzug	N-Saldo	N-Effizienz
N-Stufe	873,5***	930,6***	925,8***	704,5***
Jahr	122,3***	169,5***	169,5***	119,6***
N-Stufe*Jahr	1,5*	1,7**	1,7**	2,9***

4.1.1.1 Kornertrag

Im neunjährigen Durchschnitt wurden durch eine N-Düngung von 120 kg ha⁻¹ die Kornerträge im Vergleich zu denen der ungedüngten Parzellen (21,8 dt ha⁻¹) mehr als verdoppelt

(Tab. 37). Bereits mit dieser Menge wurden 85% des in der N-Stufe N 15 erzielten Maximalertrags ($56,2 \text{ dt ha}^{-1}$) erreicht. Ein Anheben der Frühjahrs-N-Menge ließ das Ergebnis nochmals um 12% ansteigen. Ab der N-Stufe N 5 erhielten alle N-Stufen im Frühjahr dieselbe Menge N in unterschiedlicher Verteilung, indem ein Teil der N-Varianten frühbetonte und der andere Teil spätbetonte N-Düngergaben erhielt. In den höheren N-Stufen wurde lediglich die Frühjahrsmenge um eine Herbstapplikation von 20 kg ha^{-1} N (N 10 und N 12) bzw. 40 kg ha^{-1} N (N 14 und N 15) erweitert. Diese zusätzliche Maßnahme brachte einen maximalen Ertragszuwachs von 3 dt ha^{-1} im Vergleich zu den im Herbst ungedüngten Varianten N 5 und N 7. Die Verteilung der N-Menge im Frühjahr hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Durchschnittserträge. Tendenziell war allerdings ein Mehrertrag in denjenigen Varianten festzustellen, die den Großteil des Mineraldünger-N erst zu Schossbeginn erhielten.

Tab. 37: Mittelwerte für den Kornertrag, den N-Entzug Korn, den N-Saldo und die N-Effizienz (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]				Kornertrag [dt ha^{-1}]	N-Entzug [kg ha^{-1}]	N-Saldo [kg ha^{-1}]	N-Effizienz [kg kg^{-1}]
	Herbst	VB	BBCH 30	Summe				
N 1	0	0	0	0	21,8 a	49,0 a	- 49,0 a	
N 2	0	60	60	120	47,9 b	120,1 b	-0,1 b	39,8 a
N 3	20	60	60	140	49,8 b	126,5 b	13,5 c	35,5 b
N 5	0	60	120	180	53,6 c	150,8 cd	29,2 d	29,6 c
N 7	0	120	60	180	53,4 c	146,9 c	33,1 d	29,7 c
N 10	20	60	120	200	55,0 c	155,4 cd	44,6 e	27,5 d
N 12	20	120	60	200	54,1 c	151,6 cd	48,4 ef	27,1 de
N 14	40	120	60	220	55,7 c	155,8 cd	64,2 g	25,3 f
N 15	40	60	120	220	56,2 c	161,1 d	58,9 fg	25,6 ef

4.1.1.2 N-Entzug über das Korn

Im Durchschnitt von neun Jahren entzog Raps am Standort Roggenstein dem Boden in den ungedüngten Varianten $49,0 \text{ kg ha}^{-1}$ N (Tab. 37). Dieser Wert wurde durch eine N-Düngergabe mehr als verdreifacht (N 5). Allerdings zeigte sich auch, dass eine N-Düngergabe im Herbst von den Pflanzen nicht vollständig verwertet werden kann. Bei ansonsten gleicher N-Düngermenge im Frühjahr (N 5, N 15) erhöhte eine zusätzliche N-Düngermenge von 40 kg ha^{-1} im Herbst den N-Entzug über das Korn um knapp 10 kg ha^{-1} . Die N-Verteilung wirkte sich vernachlässigbar gering auf den N-Entzug aus, wobei die Varianten mit einer spätbetonten Düngung tendenziell mehr N abfuhren als die frühbetonten.

Zwischen dem Kornertrag und dem N-Entzug über das Korn bestand ein enger, positiver Zusammenhang (Abb. 4). Das bedeutet, dass eine Steigerung des Kornertrags um eine Dezitonne pro Hektar zu einem Zuwachs des N-Entzugs von 3,03 kg ha⁻¹ führt. Um eine breitere Datengrundlage zu erhalten, wurde für die Regression auf sämtliche N-Stufen zurückgegriffen. Darüber hinaus wurde auch der N-Steigerungsversuch Winterraps in Dürnast verwendet.

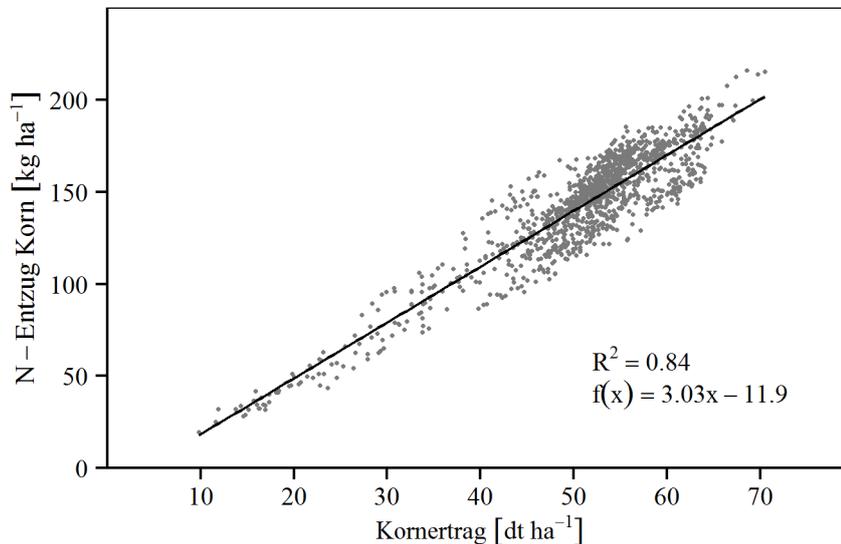


Abb. 4: Regression zwischen dem Kornertrag und dem N-Entzug über das Korn (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch Winterraps, Dürnast, 2008 bis 2010).

4.1.1.3 N-Saldo

Die Höhe und Verteilung des eingesetzten N beeinflusste den N-Saldo sehr hoch signifikant (Tab. 37). Während in den ungedüngten Parzellen (N 1) dem Boden knapp 50 kg ha⁻¹ N entzogen wurden, reichte eine N-Düngermenge von 120 kg ha⁻¹ im Frühjahr für einen ausgeglichenen N-Saldo aus. In den N-Stufen N 5 und N 7 betrug die N-Salden bei einer N-Düngermenge von 180 kg ha⁻¹ im Frühjahr je nach Düngevariante 29,2 kg ha⁻¹ (N 5) bzw. 33,1 kg ha⁻¹ (N 7). Das bedeutet, dass von den zusätzlich applizierten 60 kg ha⁻¹ Mineraldünger-N nur 50% über die Körner entzogen wurde. Die Ergänzung der Frühjahrsdüngung um 20 kg ha⁻¹ N bzw. 40 kg ha⁻¹ N im Herbst erhöhte ebenfalls den N-Saldo.

Von dem im Herbst gedüngten Mineraldünger-N wurden 25% über die Körner abgefahren. Mit der Herbstdüngung erhöhten sich die N-Salden auf bis zu 64,2 kg ha⁻¹. Eine tendenzielle Verbesserung des N-Überschusses war möglich, wenn die Betonung der N-Gabe im Frühjahr zu Schossbeginn statt zu Vegetationsbeginn erfolgte.

4.1.1.4 N-Effizienz

Die N-Effizienz drückt aus, wie viel kg Korn pro eingesetztem kg Mineraldünger-N von den Rapspflanzen gebildet wurden. Während mit einer N-Düngermenge von 120 kg ha⁻¹ (N 2) noch 39,8 kg Korn pro appliziertem Dünger-N produziert wurden, senkte ein Anheben der N-Düngermenge auf 180 kg ha⁻¹ (N 5, N 7) die N-Effizienz auf knapp 30 kg kg⁻¹ (Tab. 37). Bei gleichbleibender N-Versorgung im Frühjahr reduzierte eine N-Düngung im Herbst mit 20 kg ha⁻¹ bzw. 40 kg ha⁻¹ diese N-Effizienz nochmals deutlich auf minimal 25,3 kg kg⁻¹ (N 14). In den Varianten N 5 und N 7 ohne Herbsdüngung machte es keinen Unterschied, ob eine früh- oder spätbetonte N-Applikation durchgeführt wurde. Mit Herbsdüngung dagegen bildeten diejenigen N-Varianten mehr Korn je kg N, die eine geringe Startgabe in Kombination mit einer betonten zweiten N-Düngergabe (BBCH 30) erhielten (N 10, N 15), als solche mit einem frühbetonten N-Verteilung (N 12, N 14).

4.1.1.5 Qualitätsparameter Öl- und Proteingehalt

Sowohl die N-Stufe als auch das Jahr wirkten sich höchstsignifikant auf die beiden Qualitätsparameter Öl- und Proteingehalt aus (Tab. 38). Allerdings war deren Effekt auf diese Korninhaltsstoffe nicht in jedem Jahr gleich ausgeprägt, wie die signifikante Interaktion zwischen den beiden Hauptfaktoren zeigt. Deren F-Werte erreichten bei der Variablen Ölgehalt nur 0,9% bzw. bei der Variablen Proteingehalt 1,0% des F-Wertes des Faktors N-Stufe, so dass der Einfluss der Wechselwirkung als vernachlässigbar angesehen werden kann.

Tab. 38: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Faktoren N-Stufe und Jahr für Ölgehalt und Proteingehalt (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

Faktor	Ölgehalt	Proteingehalt
N-Stufe	170,5***	314,4***
Jahr	143,3***	258,3***
N-Stufe*Jahr	1,6*	3,2***

Zwischen der absoluten N-Düngermenge und dem Ölgehalt im Korn bestand ein negativer Zusammenhang (Tab. 39). Während in der ungedüngten Variante N 1 eine Ölkonzentration von 48,6% gemessen wurde, reduzierte sich dieser Parameter um 3,7% (absolut) auf 44,9% in der 180 kg ha⁻¹ N Variante (N 5). Bei ansonsten gleicher N-Düngermenge im Frühjahr wirkte sich eine zusätzliche N-Düngung im Herbst nicht auf die Ölbildung aus. Weiterhin zeigte

sich, dass durch die Verteilung der N-Düngermenge im Frühjahr der Ölgehalt leicht zu beeinflussen war. Frühbetonte N-Gaben (N 5, N 10, N 15) erhöhten den Ölgehalt um durchschnittlich 0,2% (absolut) gegenüber spätbetonten (N 7, N 12, N 14).

Tab. 39: Mittelwerte für den Öl- und Proteingehalt im Rapskorn (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				Ölgehalt [%]	Proteingehalt [%]
	Herbst	VB	BBCH 30	Summe		
N 1	0	0	0	0	48,6 a	15,3 a
N 2	0	60	60	120	46,7 b	17,2 b
N 3	20	60	60	140	46,6 b	17,5 b
N 5	0	60	120	180	44,9 c	19,3 c
N 7	0	120	60	180	45,2 c	19,0 c
N 10	20	60	120	200	44,9 c	19,4 c
N 12	20	120	60	200	45,0 c	19,2 c
N 14	40	120	60	220	44,9 c	19,2 c
N 15	40	60	120	220	44,8 c	19,7 c

Je mehr N den Rapspflanzen zur Verfügung stand, desto höher war der Proteingehalt in den Körnern (Tab. 39). So stieg der Proteingehalt von 15,3% in den ungedüngten Versuchspartellen (N 1) auf 19,3% in der N-Stufe N 5, die 180 kg ha⁻¹ Gesamt-N erhielt. Zusätzliche N-Gaben im Herbst, wie in den N-Stufen N 10, N 12, N 14 und N 15, brachten keine nennenswerte Veränderung des Proteingehalts mit sich. Proteinsteigernd wirkte sich neben dem Anheben der N-Menge auch deren Verteilung aus, da die Partellen mit einer spätbetonten N-Düngung zu Schossbeginn (N 5, N 7, N 15) durchschnittlich 0,4% (absolut) mehr Protein im Korn speicherten als die frühbetonten.

Beziehung zwischen der N-Düngung und dem Öl- sowie Proteingehalt

Um herauszufinden, ob eine Beziehung zwischen der Höhe der N-Düngermenge und dem Öl- bzw. Proteingehalt besteht, wurde für jedes einzelne Versuchsjahr sowie auch für den ab 2012 hinzugekommenen NE-Standort eine lineare Regressionsanalyse zwischen den genannten Faktoren in Abhängigkeit der N-Düngermenge gerechnet.

Wie die Bestimmtheitsmaße der Regression zwischen der applizierten N-Menge und dem gemessenen Ölgehalt im Korn zeigen, konnten in den Einzeljahren auf den guten Standorten

bis zu 77% der Variabilität des Ölgehalts durch die N-Düngermenge erklärt werden (Tab. 40). Auf den schwächeren Standorten in den Jahren 2012 bis 2014 waren es maximal 49%.

Tab. 40: Bestimmtheitsmaße sowie Y-Achsenabschnitt (b-Wert) und Steigung (a-Wert) der Regressionsgleichungen zwischen der N-Düngermenge und dem Öl- bzw. Proteingehalt im Korn, dargestellt nach Einzeljahren und Standorten (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Jahr	Ölgehalt			Proteingehalt		
	R ²	b-Wert	a-Wert	R ²	b-Wert	a-Wert
2005 HE	0,65	49,2	-2,2	0,79	13,5	2,8
2006 HE	0,70	49,6	-2,2	0,85	14,9	2,3
2007 HE	0,76	49,1	-2,1	0,74	15,7	2,5
2008 HE	0,76	49,4	-2,1	0,77	15,1	2,5
2009 HE	0,77	47,5	-1,8	0,79	17,2	2,1
2011 HE	0,49	49,5	-1,4	0,51	13,9	1,6
2012 HE	0,61	49,3	-1,3	0,73	13,6	1,8
2012 NE	0,33	49,1	-1,6	0,38	13,8	2,4
2013 HE	0,70	45,6	-1,4	0,75	16,9	1,4
2013 NE	0,34	45,2	-0,8	0,51	17,2	1,1
2014 HE	0,69	49,4	-2,3	0,77	14,1	2,6
2014 NE	0,49	48,4	-3,0	0,52	15,0	3,1
Gesamt	0,31	48,6	-1,9	0,34	15,1	2,1

Die Wirkung der N-Düngung auf den Ölgehalt war allerdings nicht in jedem Jahr gleich, wie die Steigung (a-Wert) und der Y-Achsenabschnitt (b-Wert) der Regressionsgeraden zeigen (Tab. 40). Die Steigung gibt den Anteil der Veränderung im Ölgehalt pro 100 zusätzlich eingesetzten kg N an. So schwankten die a-Werte zwischen -0,8 und -3,0, wobei die extremen Werte auf den NE-Versuchen 2013 und 2014 ermittelt wurden. Während im Versuchsjahr 2013 eine N-Düngung sehr geringe Änderungen im Ölgehalt verursachte (-0,8% (100 kg N)⁻¹) sorgte sie im folgenden Jahr für einen überaus deutlichen Rückgang der Ölkonzentration (-3,0% (100 kg N)⁻¹). Neben der Steigung änderte sich in Abhängigkeit des Jahres der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Y-Achse. Je nach Standort und Jahr reichten die b-Werte von 45,2 bis 49,6, wobei die Werte auf dem NE-Standort tendenziell schwächer als auf dem HE-Standort waren.

In der Gesamtbetrachtung über alle Jahre und Standorte ging der Ölgehalt um (absolut) 1,9% pro 100 kg eingesetztem Mineraldünger-N zurück. Gleichzeitig sorgte der große Jahreseffekt dafür, dass die N-Düngermenge und der Ölgehalt gering korrelierten ($R^2 = 0,31$).

Vergleichbar zum Ölgehalt bestand eine enge Korrelation zwischen Protein und N-Düngermenge in den Einzeljahren, wie die R^2 -Werte von bis zu 0,85 zeigen (Tab. 40). Pro 100 kg mehr eingesetztem Mineraldünger-N wurden über die Jahre hinweg auf dem HE-Standort absolut 1,6% bis 2,8% mehr Protein gebildet. Auf dem NE-Standort schwankte die Wirkung des Mineraldünger-N auf den Proteingehalt im Korn zwischen 1,1% (100 kg N^{-1}) und 3,8% (100 kg N^{-1}). In der Gesamtbetrachtung der Jahre reagierte der Proteingehalt mit einem Zuwachs von 2,1% pro 100 kg eingesetztem N auf die N-Düngung. Dabei korrelierte die N-Düngung eher gering mit der Proteinbildung ($R^2 = 0,34$).

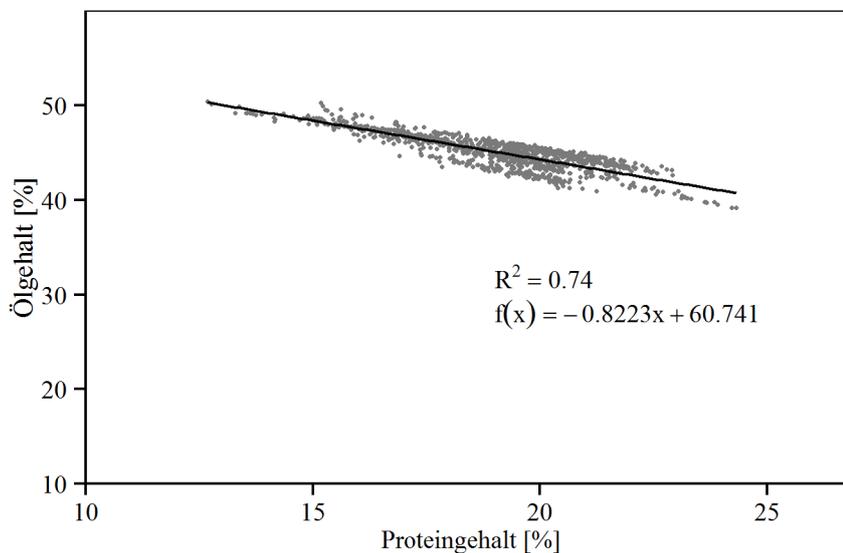


Abb. 5: Regression zwischen dem Proteingehalt und Ölgehalt im Rapskorn (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Die gegenläufige Reaktion beider Qualitätsparameter auf die N-Düngung bedingte eine negative Korrelation zueinander (Abb. 5). Das hohe Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,74$) beweist den hohen ölreduzierenden Einfluss des Proteingehalts. Somit geht die Öleinlagerung um 0,82% (absolut) zurück bei einer gleichzeitigen Zunahme des Eiweißgehalts von 1,0% (absolut).

4.1.1.6 Einfluss der Terminierung der N-Düngung

Um den Einfluss der Terminierung der N-Düngermenge auf die Parameter Kornertrag, Öl- und Proteingehalt, den N-Entzug über das Korn, den N-Saldo sowie die N-Effizienz erfassen zu können, wurden die N-Stufen N 22 bis N 24 ausgewertet (Tab. 41), die jedoch nur in den

Jahren 2007 bis 2012 miteinander angelegt waren. Aufgrund der signifikanten Wechselwirkung der beiden Hauptfaktoren war beim N-Saldo kein Mittelwertvergleich möglich.

Tab. 41: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Faktoren N-Stufe und Jahr für den Kornertrag, den Öl- und Proteingehalt, den N-Entzug Korn, den N-Saldo sowie die N-Effizienz (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2007 bis 2012).

Faktor	Kornertrag	Ölgehalt	Proteingehalt	N-Entzug	N-Saldo	N-Effizienz
N-Stufe	10,2***	57,8***	75,4***	6,6**	6,6**	10,2***
Jahr	60,1***	89,4***	273,2***	90,3***	90,3***	60,1***
N-Stufe*Jahr	6,7***	3,7**	8,1***	6,5***	6,5***	6,7***

Der Unterschied zu den bisher ausgewerteten N-Stufen besteht darin, dass in diesen drei N-Varianten die N-Düngermenge extrem verteilt wurde, indem die N-Düngermenge im Frühjahr je nach Variante vollständig zu einem Termin appliziert wurde (VB, BBCH 30 oder BBCH 50). Je später im Vegetationsverlauf die Frühjahrsgabe die N-Düngung durchgeführt wurde, desto weniger Öl wurde in den Rapskörnern gefunden (Tab. 42). Während eine N-Düngung zu VB (N 22) den höchsten Ölgehalt erzielte (46,0%), bildeten die Rapspflanzen der N 23, die den N-Dünger erst zu Schossbeginn erhielten, bereits 0,7% (absolut) weniger Öl. Eine weitere Verzögerung der N-Düngung bis BBCH 50 verminderte den Ölgehalt auf 44,6%. Genau gegenläufig verhielt sich der Proteingehalt im Korn. Je später die Düngung erfolgte, desto mehr Protein wurde im Korn gebildet, so dass in Folge einer späten N-Düngung (N 24) ein Eiweißgehalt von 20,3% im Korn zu finden war, während eine Gabe zu VB einen Proteingehalt von 18,7% ermöglichte.

Tab. 42: Mittlerer Kornertrag, Proteingehalt und Ölgehalt in Abhängigkeit der N-Verteilung (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2007 bis 2012).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]					Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Proteingehalt [%]	Ölgehalt [%]
	Herbst	VB	BBCH 30	BBCH 50	Summe			
N 22	40	160	0	0	200	54,3 a	18,7 a	46,0 a
N 23	40	0	160	0	200	54,5 a	19,5 b	45,3 b
N 24	40	0	0	160	200	51,9 b	20,3 c	44,6 c

Auf die Ertragsleistung von Raps hatte die Terminierung der N-Applikation ebenfalls einen signifikanten Einfluss. Während es keine Rolle spielte, ob der N-Dünger zu VB oder BBCH 30 appliziert wurde, führte eine weitere Verzögerung des Düngetermins zu einem deutlichen Ertragsrückgang auf 51,9 dt ha⁻¹ (N 24). Der N-Entzug erhöhte sich durch eine

spätere N-Düngung auf 155 kg ha^{-1} (N 23), eine weitere Verzögerung der N-Düngung bis zum Beginn des Blütenschiebens brachte allerdings keine Änderung mit sich (Tab. 43). Entsprechend dem höheren N-Entzug sank der N-Saldo bei einer verzögerten N-Düngung zu Schossbeginn (N 23). Ein weiteres Aufschieben der N-Düngung erhöhte den N-Saldo vernachlässigbar. Sowohl bei einer frühen N-Düngung zu Vegetationsbeginn als auch einer N-Düngung zu BBCH 30 war kein Unterschied auf die N-Effizienz festzustellen. Dagegen wirkte sich eine Verzögerung der N-Applikation auf den Beginn des Blütenschiebens (N 24) negativ auf die N-Effizienz aus ($25,9 \text{ kg kg}^{-1}$).

Tab. 43: Mittlerer N-Entzug über das Korn, N-Saldo und mittlere N-Effizienz in Abhängigkeit der N-Verteilung (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2007 bis 2012).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]					N-Entzug [kg ha^{-1}]	N-Saldo [kg ha^{-1}]	N-Effizienz [kg kg^{-1}]
	Herbst	VB	BBCH 30	BBCH 50	Summe			
N 22	40	160	0	0	200	147,9 a	52,1 a	27,2 a
N 23	40	0	160	0	200	155,4 b	44,6 b	27,2 a
N 24	40	0	0	160	200	153,9 b	46,1 b	25,9 b

4.1.3 Vergleich Hohertrags- und Niedrigertragsstandort

Neben dem N-Steigerungsversuch auf einem HE-Standort wurde von 2012 bis 2014 ein Düngerversuch auf einem NE-Standort angelegt. Im Dreijahresmittel beeinflusste der Standort neben der N-Düngung die Bildung der Qualitätsparameter Protein- und Ölgehalt deutlich (Tab. 44). Während im NE-Bereich mehr Protein als am HE-Standort gebildet wurde, verhielt es sich beim Ölgehalt genau umgekehrt, der bei gleicher Bestandesführung 0,6% (absolut) niedriger war. Besonders auffällig traten die Standortunterschiede beim Kornertrag hervor. Trotz identischer Düngung fiel das Drusergebnis am NE-Standort etwa 26% geringer aus als auf dem HE-Standort. Analog zum Kornertrag verhielt sich die N-Aufnahme in das Korn. Infolge des höheren N-Entzugs waren die N-Salden gemittelt über alle N-Stufen auf dem HE-Standort weit geringer als am NE-Standort, auf dem $34,3 \text{ kg ha}^{-1}$ N mehr zurückblieben. Wie bereits der N-Saldo andeutet, verminderte sich die N-Effizienz von Winterraps auf dem NE-Standort.

Tab. 44: Mittelwerte über alle N-Stufen auf dem HE- und NE-Standort für den Kornertrag, den N-Entzug Korn, den Öl- und Proteingehalt, den N-Saldo und die N-Effizienz (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Standort	Kornertrag [dt ha ⁻¹]	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	Proteingehalt [%]	Ölgehalt [%]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [kg kg ⁻¹]
HE	55,2 a	147,8 a	18,2 a	45,2 a	14,6 a	33,2 a
NE	40,8 b	113,3 b	18,9 b	44,6 b	48,9 b	25,6 b

4.1.2 TM-Aufwuchs und N-Aufnahme von Winterraps

4.1.2.1 Entwicklung der oberirdischen Biomasse

Über die Varianzanalyse ließ sich während der gesamten Vegetation ein höchstsignifikanter Effekt der N-Düngung sowie des Jahres auf die Bildung von oberirdischer Biomasse von Raps nachweisen (Tab. 45). In dieser Statistik wurde mit allen im Versuch verwendeten N-Stufen der Jahre 2005 bis 2014 des HE-Standortes in Roggenstein gerechnet. Für eine bessere Übersicht wurden für den weiteren Verlauf die N-Stufen N 1 ohne N-Düngung, N 3 mit einer Gesamt-N-Düngermenge von 140 kg ha⁻¹ und N 15 mit 220 kg ha⁻¹ N-Düngermenge ausgewählt.

Tab. 45: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs von Raps mit den Hauptfaktoren N-Stufe und Jahr für verschiedene Termine (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

Termin	Faktor		
	N-Stufe	Jahr	N-Stufe*Jahr
Herbst	146,9***	48,3***	2,7**
BBCH 30	77,6***	99,1***	2,0***
BBCH 50	53,3***	167,0***	1,8**
BBCH 65	110,5***	331,9***	4,0***
BBCH 85	60,3***	66,3***	2,1**

Zweieinhalb Monate nach der Aussaat betrug die oberirdische Trockenmasse in den ungedüngten Rapsparzellen (N 1) im neunjährigen Durchschnitt am HE-Standort 13,2 dt ha⁻¹ (Abb. 6). Die Biomasse stieg im Herbst um 5,0 dt ha⁻¹ TM bzw. 9,3 dt ha⁻¹ TM an, wenn eine N-Gabe mit 20 kg ha⁻¹ bzw. 40 kg ha⁻¹ erfolgte (N 3, N 15). Der Zuwachs an Biomasse war bis zum Beginn des Längenwachstums in allen N-Varianten vernachlässigbar gering. Die ungedüngten Parzellen verdoppelten den TM-Aufwuchs bis zur Hauptblüte, was einem tägli-

chen Zuwachs von etwa $0,5 \text{ dt ha}^{-1}$ TM im Zeitraum BBCH 30 bis BBCH 65 entspricht. Von der Blüte bis zur Abreife verdoppelten die ungedüngten Pflanzen erneut ihr Gewicht.

Dagegen förderte eine N-Düngung das Wachstum der Pflanzen deutlich, wie die Entwicklung der Biomasse der N-Stufen N 3 und N 15 zeigt. Der Biomassezuwachs dieser Varianten erreichte in der Zeit zwischen BBCH 30 und BBCH 65 durchschnittlich $1,1 \text{ dt ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ TM. Zur Abreife der Rapspflanzen wurde der Höchstwert in der N-Stufe N 15 gemessen ($156,1 \text{ dt ha}^{-1}$ TM). Obwohl die N-Stufe N 3 nur etwa 60% des in der N-Stufe N 15 applizierten N erhielt, bildete sie je nach Entwicklungsstadium zwischen 80% und 96% der oberirdischen Biomasse dieser hochversorgten Variante aus.

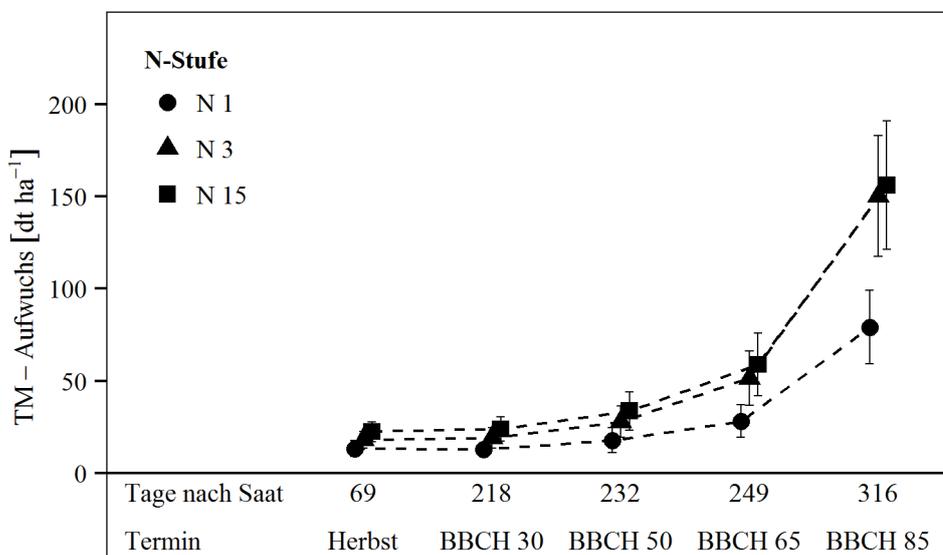


Abb. 6: Entwicklung des TM-Aufwuchses von Raps während der Vegetation für die N-Stufen N 1, N 3, N 15 (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

Neben der Ertragsleistung und der Kornqualität von Raps beeinflusste die Ertragsfähigkeit des Standortes auch die Biomassebildung über die gesamte Vegetation hindurch höchstsignifikant, wie die Varianzanalyse mit den im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 gewonnenen Daten zeigt (Tab. 46). Auf dem NE-Standort war der TM-Aufwuchs trotz gleicher Düngermenge über die gesamte Vegetation hinweg um etwa ein Drittel geringer als auf dem HE-Standort.

Tab. 46: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs von Raps mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort zu verschiedenen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	Termin					
	Herbst	VB	BBCH 30	BBCH 50	BBCH 65	BBCH 85
N-Stufe	23,8***	16,9***	21,1***	21,6***	32,9***	31,1***
Jahr	10,9***	31,7***	1,3	69,7***	153,7***	16,9***
Standort	96,0***	270,3***	143,7***	298,6***	271,3***	104,5***
N-Stufe*Jahr	1,1	1,1	1,2	2,2**	3,0***	1,0
N-Stufe*Standort	0,3	1,3	2,1*	2,5*	1,6	1,9
Jahr*Standort	6,2	28,3***	33,2***	46,0***	22,9***	7,8***

Wie aus Abb. 7 zu entnehmen ist, verlief die Entwicklung der Biomasse auf beiden Standorten bis zum Schossbeginn annähernd parallel. Mit Beginn des Längenwachstums bildeten die Pflanzen auf dem HE-Standort pro Tag durchschnittlich $0,5 \text{ dt ha}^{-1}$ TM mehr als die Pflanzen auf dem NE-Standort. Kurz vor der Ernte wurde der maximale Biomasseaufwuchs erreicht, wobei $144,0 \text{ dt ha}^{-1}$ TM (HE) bzw. $114,5 \text{ dt ha}^{-1}$ TM (NE) gemessen wurden.

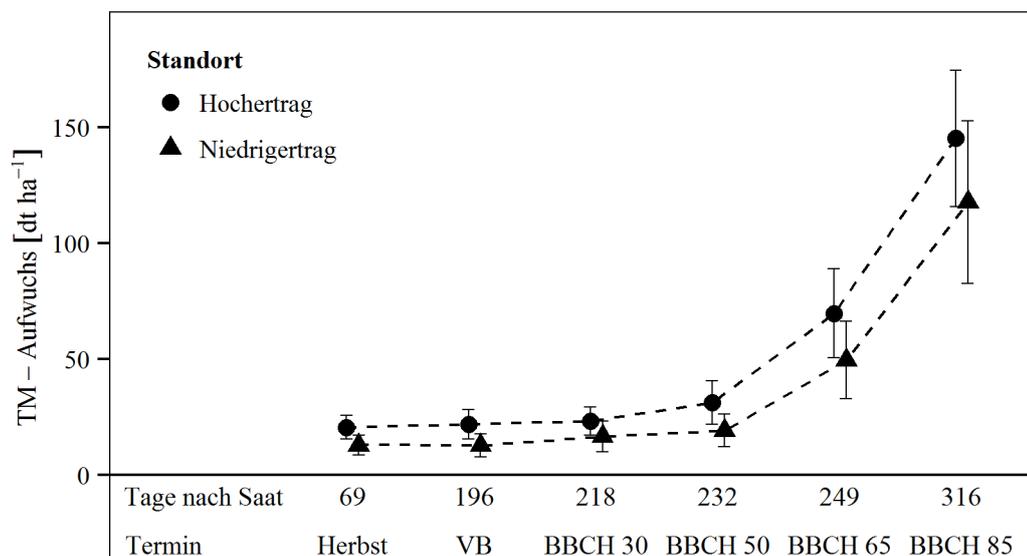


Abb. 7: Entwicklung des TM-Aufwuchses von Raps während der Vegetation auf dem HE- und NE-Standort, Mittelwert über neun ausgewertete N-Stufen (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Die Daten zu BBCH 85 zeigen neben dem Effekt der N-Düngermenge auch den Einfluss der N-Düngerverteilung auf die Pflanzenentwicklung auf Standorten unterschiedlicher Ertragsfähigkeit (Tab. 47). Auch bei hohen N-Düngergaben sind die Standorteinflüsse nachweisbar. Mit einer N-Düngung von 120 kg ha^{-1} wurden 82% (HE) bzw. 87% (NE) mehr oberirdische Biomasse als in den Parzellen der N-Stufe N 1 ohne Mineraldünger-N gebildet. Eine zusätzli-

che Steigerung der N-Düngermenge führte an beiden Teilschlägen noch zu einem weiteren, statistisch aber nicht absicherbaren Anstieg der TM-Produktion auf maximal 165,2 dt ha⁻¹ in der N 14 (HE) und 139,0 dt ha⁻¹ in der Variante N 10 (NE). Das bedeutet, dass die N-Düngermenge der N 2 ausreichte, um 88% (HE) bzw. 76% (NE) des in der hochversorgten Variante erzielten maximalen Biomasseaufwuchses zu erzeugen. Die Verteilung des Mineraldünger-N beeinflusste auf beiden Teilschlägen die Bildung der oberirdischen Biomasse. Auf dem HE-Standort bildeten die Parzellen der N-Stufe N 5 (157,7 dt ha⁻¹ TM) ohne Herbstdüngung mit einer geringen Startgabe zu VB mehr oberirdische Biomasse als die der N 7 (145,7 dt ha⁻¹ TM), die eine kräftige Startgabe zu VB erhielten. Auf dem NE-Standort wurden 112,7 dt ha⁻¹ TM (N 5) bzw. 117,1 dt ha⁻¹ TM (N 7) gemessen. Wurde der Mineraldünger-N dagegen bereits im Herbst appliziert, so waren standortunabhängig die Varianten mit der frühbetonten N-Düngung jenen mit schwacher Startgabe tendenziell überlegen. Dabei trat der Unterschied vor allem in denjenigen N-Stufen auf, die im Herbst bereits 40 kg ha⁻¹ Mineraldünger-N erhielten. Zwischen der frühbetonten N 14 und der späteren N 15 betrug die Differenz im Biomasseaufwuchs 14,6 dt ha⁻¹ TM (HE) bzw. 11,5 dt ha⁻¹ TM (NE).

Tab. 47: Mittlerer TM-Aufwuchs in Raps zu BBCH 85 im HE- und NE-Bereich (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				TM [dt ha ⁻¹]	
	Herbst	VB	BBCH 30	Summe	HE	NE
N 1	0	0	0	0	80,1 a	56,5 a
N 2	0	60	60	120	145,8 b	105,7 b
N 3	20	60	60	140	150,0 b	109,6 bc
N 5	0	60	120	180	157,7 b	112,7 bc
N 7	0	120	60	180	145,7 b	117,1 bc
N 10	20	60	120	200	148,7 b	139,0 b
N 12	20	120	60	200	153,6 b	138,3 b
N 14	40	120	60	220	165,2 b	131,7 bc
N 15	40	60	120	220	150,6 b	120,2 bc

4.1.2.2 Entwicklung der N-Aufnahme

Die Faktoren N-Düngung und Jahr beeinflussten die N-Aufnahme auf dem HE-Standort über alle Schnitttermine im Untersuchungszeitraum von 2005 bis 2014 sehr hoch signifikant (Tab. 48).

Tab. 48: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die N-Aufnahme von Raps mit den Hauptfaktoren N-Stufe und Jahr zu verschiedenen Terminen (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

Termin	Faktor		
	N-Stufe	Jahr	N-Stufe*Jahr
Herbst	87,8***	44,1***	2,2*
BBCH 30	41,1***	72,0***	3,0***
BBCH 50	180,2***	318,7***	3,9***
BBCH 65	199,9***	73,9***	2,6***
BBCH 85	11,2***	54,8***	0,7

In Abb. 8 ist der Verlauf der N-Aufnahme der drei N-Stufen dargestellt. Im neunjährigen Durchschnitt nahmen die Varianten ohne N-Düngung $31,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ vor der Vegetationsruhe auf. Wurde im Herbst, wie in den N-Stufen N 3 ($20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) und N 15 ($40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$), eine N-Applikation durchgeführt, so wurde dieser Nährstoff von den Rapspflanzen nahezu vollständig in die oberirdische Biomasse eingelagert. In der N 3 wurden $48,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ und in der N 15 $69,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gefunden. Bis BBCH 30 veränderte sich die N-Aufnahme in der N 1 kaum. $17,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (N 3) bzw. $18,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (N 15) mehr als im Herbst wurden dagegen in den beiden anderen Varianten zu Schossbeginn ermittelt. Ab diesem Zeitpunkt stieg der N-Bedarf der Pflanzen merklich an. In dem zweiwöchigen Intervall bis zum Blütenschieben konnten die hochversorgten Pflanzen der N 15 im Mittel von drei Jahren $3,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ N}$ in der Biomasse speichern. Die Aufnahmerate dieser N-Variante steigerte sich bis zur Blüte und erreichte im Zeitraum zwischen Beginn des Blütenschiebens und der Hauptblüte einen täglichen Zuwachs von $5,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ N}$. Nach BBCH 65 verringerten die Rapspflanzen die N-Aufnahmerate, so dass in der N 15 bis BBCH 85 eine N-Aufnahme von $265,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ermittelt wurde. Eine geringere N-Düngergabe, wie in der N 3, führte zu geringeren täglichen N-Aufnahmeraten im Vergleich zwischen BBCH 30 und BBCH 50 bzw. BBCH 50 ($3,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ N}$) und BBCH 65 ($4,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ N}$) und somit zu einer geringeren Gesamt-N-Aufnahme ($207,4 \text{ kg ha}^{-1}$). Ohne N-Versorgung nahmen die Pflanzen bis zur Ernte $94,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ auf.

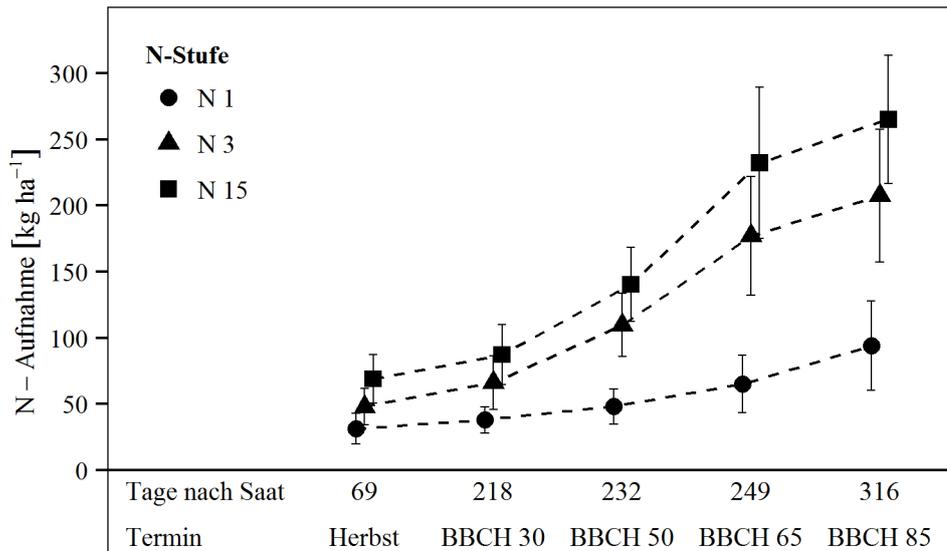


Abb. 8: Entwicklung der N-Aufnahme von Raps während der Vegetation für die N-Stufen N 1, N 3, N 15 (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

Die Ertragsfähigkeit des Standortes beeinflusste die N-Aufnahme terminübergreifend ebenso höchstsignifikant wie die beiden anderen Faktoren Jahr und N-Stufe (Tab. 49). Der Vergleich der F-Werte aus dieser Varianzanalyse für den Versuchszeitraum 2012 bis 2014 zeigt außerdem, dass der Standort in diesem Versuchszeitraum einen größeren Effekt auf die N-Aufnahme hatte als das Jahr und die N-Düngung.

Tab. 49: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable N-Aufnahme mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort zu verschiedenen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	Termin					
	Herbst	VB	BBCH 30	BBCH 50	BBCH 65	BBCH 85
N-Stufe	72,4***	9,8***	31,9***	34,6***	67,0***	30,5***
Jahr	20,7***	46,1***	17,5***	72,1***	84,9***	62,4***
Standort	113,1***	94,3***	293,4***	347,0***	316,8***	103,8***
N-Stufe*Jahr	3,4*	1,2	1,5	3,0***	3,0***	1,2
N-Stufe*Ort	0,8	1,2	3,4**	5,5***	3,8***	2,5*
Jahr*Ort	3,6*	3,0	32,0***	53,2***	12,6***	1,0

Beim Vergleich der beiden Standorte im Mittel aller N-Stufen waren die N-Aufnahmeraten auf dem HE-Standort über die gesamte Vegetation hinweg deutlich höher als am NE-Standort (Abb. 9). Zwischen den Herbstmessungen und dem Schossbeginn erhöhte sich die N-Aufnahme um 19,2 kg ha⁻¹ (HE) und um 12,0 kg ha⁻¹ (NE). Erst mit Vegetationsbeginn begannen die Rapspflanzen deutlich mehr N aufzunehmen. Dabei unterschieden sich die N-

Aufnahmeraten beider Standorte im Mittel von drei Jahren deutlich voneinander. Bis BBCH 30 wurden auf dem HE-Standort täglich $1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ von den Rapspflanzen aufgenommen. Auf dem NE-Standort waren es nur $0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ N}$. Mit Eintritt in das Längenwachstum erhöhte sich die N-Aufnahmerate auf $3,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (HE) bzw. $1,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (NE). Der stärkste Zuwachs wurde nach BBCH 50 gemessen. Bis zur Hauptblüte wurden von den Pflanzen täglich $4,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ bzw. $3,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aufgenommen. Nach der Hauptblüte sank die N-Aufnahmerate deutlich ab, so dass kurz vor der Ernte in der oberirdischen Biomasse eine N-Aufnahme von $250,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (HE) bzw. $189,7 \text{ kg ha}^{-1}$ (NE) ermittelt wurde.

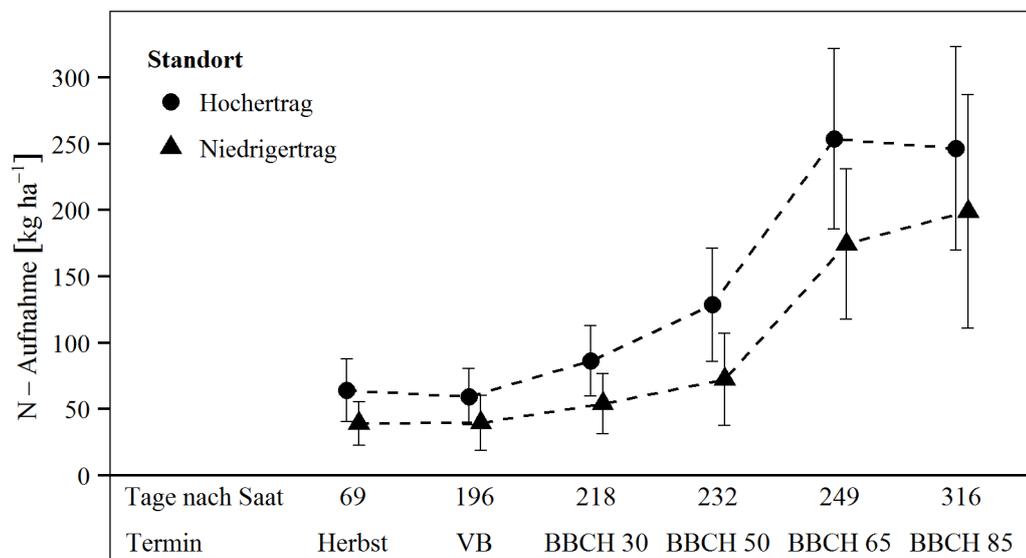


Abb. 9: Entwicklung der N-Aufnahme von Raps während der Vegetation auf dem HE- und NE-Standort, Mittelwert aller N-Stufen (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Wie aus den dreijährigen Vergleichsdaten hervorgeht, hatte vor allem die absolute N-Düngermenge Einfluss auf die vollständige N-Aufnahme kurz vor der Ernte (Tab. 50). Diese Beobachtung wurde auf beiden Standorten gemacht. Bei der Reaktion auf die Verteilung des Mineraldünger-N waren Unterschiede zwischen den Teilschlägen festzustellen. Auf dem NE-Standort wiesen die spätbetonten Varianten unabhängig von der Herbstdüngung etwas höhere N-Aufnahmen auf als die frühbetonten. Auf dem HE-Standort war dieser Effekt nur in den im Herbst ungedüngten N-Stufen N 5 und N 7 vergleichbar. Die höher versorgten N-Stufen reagierten dabei auf eine Betonung der ersten Gabe mit einer stärkeren N-Aufnahme.

Tab. 50: Mittlere N-Aufnahme von Raps zu BBCH 85 im HE- und NE-Bereich (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				N-Aufnahme [kg ha ⁻¹]	
	Herbst	VB	BBCH 30	Summe	HE	NE
N 1	0	0	0	0	111,2 a	74,3 a
N 2	0	60	60	120	230,0 b	163,7 b
N 3	20	60	60	140	229,9 b	156,5 b
N 5	0	60	120	180	298,2 c	199,0 bc
N 7	0	120	60	180	254,3 bc	192,9 bc
N 10	20	60	120	200	261,4 bc	250,3 c
N 12	20	120	60	200	292,1 c	229,2 bc
N 14	40	120	60	220	297,9 c	221,5 bc
N 15	40	60	120	220	284,4 bc	220,1 bc

Einfluss der Winterwitterung auf Biomasse- und N-Verluste

Neben der Entwicklung der Biomasseentwicklung und der N-Aufnahme im Vegetationsverlauf wurde die Reaktion der Rapspflanzen auf kalte bzw. warme Winter untersucht. Dazu wurden die im Herbst unterschiedlich hoch angedüngten N-Stufen N 1, N 3 und N 15 auf die Biomasseproduktion sowie die N-Aufnahme im Herbst und zu Vegetationsbeginn untersucht. Die varianzanalytische Auswertung der Daten aus dem Intervall 2012 bis 2014 ergab eine höchstsignifikante Wirkung des Jahres, des Standortes und der N-Stufe auf den Biomasseaufwuchs sowie die N-Aufnahme (Tab. 51).

Tab. 51: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme von Winterraps zu den Terminen Herbst und VB mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Standort und Jahr (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	TM-Aufwuchs		N-Aufnahme	
	Herbst	VB	Herbst	VB
N-Stufe	28,0***	32,1***	96,4***	23,2***
Standort	96,0***	129,5***	123,6***	75,5***
Jahr	10,9***	16,9***	27,4***	26,1***
N-Stufe*Standort	0,3	0,0	1,9	2,8
N-Stufe*Jahr	1,1	1,3	7,5***	3,4*
Standort*Jahr	6,2	8,2	3,3*	0,2

Die über den HE- und NE-Standort gemittelten Werte der Einzeljahre zeigen, dass mit steigender N-Düngung im Herbst die Rapspflanzen auch mehr Biomasse produzierten (Tab. 52). Die Menge der oberirdischen Biomasse sowie die Winterwitterung beeinflussten den Verlust. So gingen im besonders kalten Winter 2011/2012 durchschnittlich 26% der Biomasse verloren. Der höchste Rückgang wurde in der N 3 ermittelt, während in den ungedüngten Parzellen der geringste Biomasseverlust auftrat. Überdurchschnittlich warme Winter, wie im Versuchsjahr 2013/2014, führten zu einem weiteren TM-Zuwachs von bis zu 5,0 dt ha⁻¹ (N 15). In den Varianten N 1 und N 3 war das Wachstum über den Winter 2013/2014 etwas geringer.

Tab. 52: Mittelwerte für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme von Raps im Herbst und zu VB in den N-Stufen N 1, N 3 und N 15, dargestellt nach Einzeljahren, gemittelt über den HE- und NE-Standort (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Jahr	N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				TM-Aufwuchs [dt ha ⁻¹]		N-Aufnahme [kg ha ⁻¹]	
		Herbst	VB	BBCH 30	Summe	Herbst	VB	Herbst	VB
2012	1	0	0	0	0	15,1 a	11,4 a	31,4 a	29,1 a
	3	20	60	60	140	17,9 ab	12,2 a	43,0 b	33,1 a
	15	40	60	120	220	20,4 b	16,2 b	55,4 c	46,8 b
2013	1	0	0	0	0	12,6 a	14,8 a	38,1 a	49,3 a
	3	20	60	60	140	15,3 a	16,9 ab	45,5 a	56,8 ab
	15	40	60	120	220	20,7 b	19,2 b	84,9 b	63,5 b
2014	1	0	0	0	0	9,5 a	13,9 a	27,2 a	24,2 a
	3	20	60	60	140	14,7 b	15,2 a	41,8 b	50,2 b
	15	40	60	120	220	16,5 b	21,5 b	52,5 c	55,3 b

Mit den Biomasseverlusten 2012 gingen N-Verluste einher. In den ungedüngten Varianten waren die N-Verluste über den Winter gering. In den bereits im Herbst gedüngten Varianten wurden bis zu 9,9 kg ha⁻¹ N infolge des Blattverlustes über den Winter freigesetzt. Im Gegensatz dazu speicherte Raps mehr N, wenn die Pflanzen über die Wintermonate weiterwachsen konnten. Im Winter 2013/2014 wurden so zwischen 2,5 kg ha⁻¹ N und 8,4 kg ha⁻¹ N aufgenommen.

4.1.3 Entwicklung der Messwerte der Vegetationsindices in der Vegetation

Für eine bessere Übersicht und Darstellbarkeit wird im folgenden Abschnitt bei allen Vegetationsindices nur auf die N-Stufen N 1 (0 kg ha⁻¹ N), N 3 (140 kg ha⁻¹ N) und N 14 (220 kg ha⁻¹ N) im Versuchszeitraum 2012 bis 2014 eingegangen.

Beim Vegetationsindex VX 1 wurde zwischen Herbst und Vegetationsbeginn im Mittel des HE- und NE-Standortes in den beiden gedüngten Varianten (N 3, N 14) ein deutlicher Rückgang der Messwerte festgestellt (Abb. 10)³. In den ungedüngten Parzellen veränderte sich der Messwert des VX 1 kaum. Bis zum Blütenschieben stieg der Messwert stark an (N 14). Mit dem Eintritt in die Blüte veränderte sich das Reflexionsverhalten vor allem in den ungedüngten Parzellen. Hier war ein deutlicher Rückgang des VX 1 zu erkennen. In den gedüngten Varianten war dagegen ein leichter Zuwachs messbar.

Beim VX 2 gingen die Messwerte zu VB im Vergleich zu den Herbstmessungen deutlich zurück. Dabei beeinflusste die N-Düngermenge im Herbst den Rückgang, da sich die Messwerte in den hoch versorgten Varianten stärker verringerten als in den gering bzw. ungedüngten N-Varianten. Von Vegetationsbeginn bis BBCH 50 stiegen die Messwerte des VX 2 deutlich an, wobei ein erneuter Rückgang der Messwerte in der Hauptblüte zu beobachten war. Die gesamte Messperiode hindurch war dieser Index in der Lage, die N-Düngevarianten zu unterscheiden.

Auch über den VX 3 war es die gesamte Vegetationsperiode hindurch möglich, die drei N-Stufen voneinander deutlich abzugrenzen (Abb. 10). Anders als bei den übrigen Indices wurde bei diesem kein Rückgang der Messwerte zu VB gegenüber den Herbstmessungen gefunden. In den beiden gedüngten N-Varianten N 3 und N 14 stiegen die Werte bis zur Hauptblüte kontinuierlich an. In der Variante ohne N-Düngung dagegen wurde bereits zu BBCH 50 die höchste Messung erzielt.

Beim NDVI lagen im Vergleich zu den Herbstmessungen die Werte zu VB bis zu 25% niedriger. Das Niveau vor dem Winter erreichte dieser Index bei allen N-Stufen erst wieder zum Blütenschieben. In der Blüte fielen die Werte erneut auf Werte zwischen 0,59 (N 1) und 0,75 (N 14).

Eine unterschiedliche N-Düngung konnte sowohl vom IRR als auch vom IRG über die gesamte Vegetation hinweg detektiert werden. Bei allen N-Stufen gingen die Messwerte des IRR zu Beginn der Vegetation deutlich zurück. Dabei war die Reduktion in der N 1 mit -42% am geringsten (N 14: -61%). Im weiteren Vegetationsverlauf änderten sich die Messungen in den ungedüngten Parzellen nur noch geringfügig. Dagegen stiegen die Messwerte in den Varianten N 3 und N 14 im Vegetationsverlauf auf maximal 10,1 (N 3) bzw. 12,4 (N 14) zu Be-

³ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde in Abb. 10 auf die Beschriftung der Y-Achse bei den Vegetationsindices VX 1, VX 2 und VX 3 verzichtet.

ginn des Blütenschiebens an. Messungen zur Hauptblüte von Raps hatten eine Verringerung der Messwerte zur Folge.

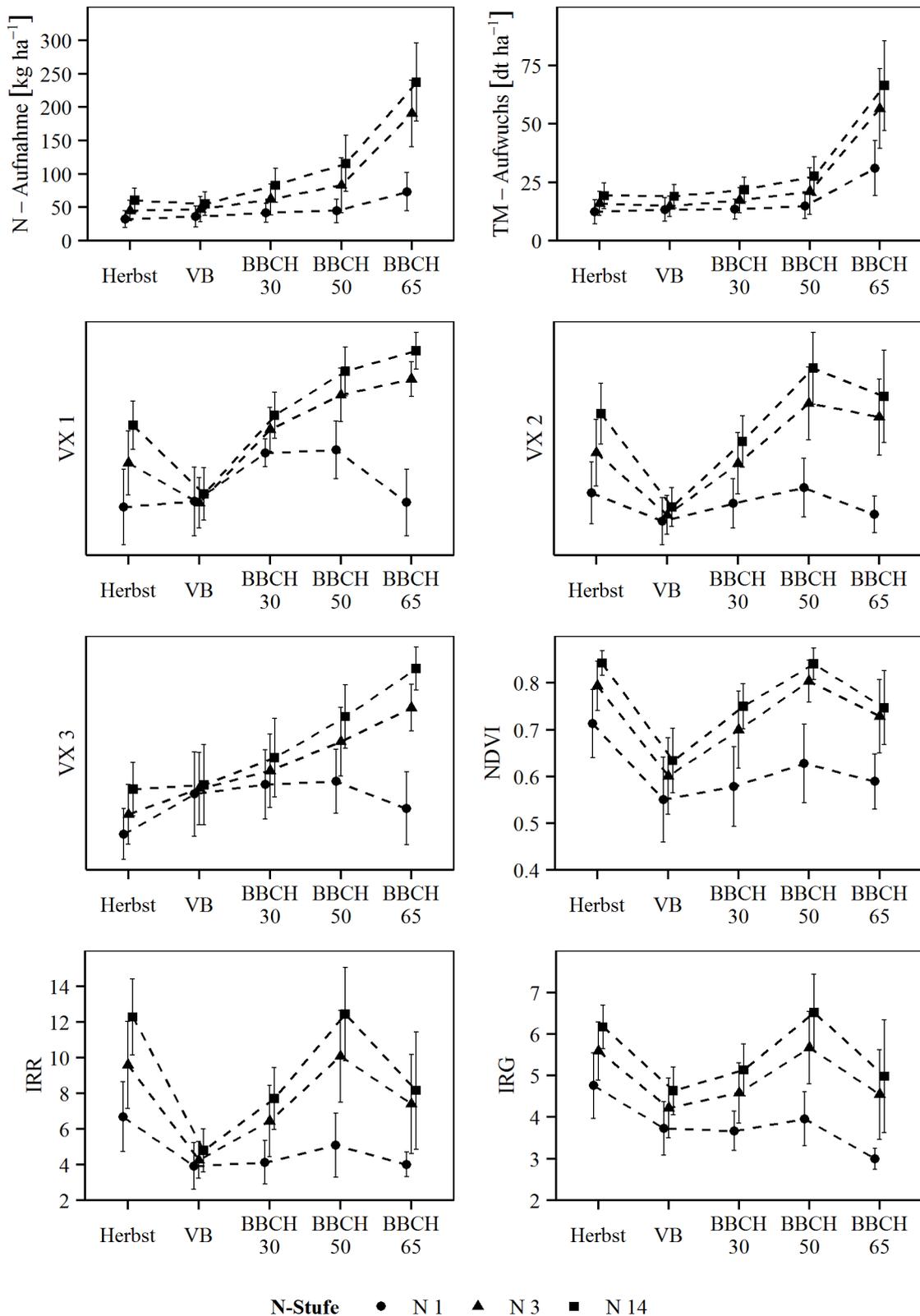


Abb. 10: Entwicklung der N-Aufnahme und des TM-Aufwuchses von Raps sowie Verlauf der Messwerte verschiedener Vegetationsindizes in Abhängigkeit der N-Stufen N 1, N 3 und N 14 während der Vegetation im Mittel des HE- und NE-Standortes (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Mit den Indices IRG und IRR konnten unterschiedliche Düngervarianten über die gesamte Vegetation hinweg voneinander unterschieden werden. Allerdings war die Depression der Messwerte zu VB beim IRG mit maximal -25% nicht so stark ausgeprägt wie beim IRR. In der weiteren Wachstumsphase der Pflanzen erhöhten sich die Messwerte des IRG bei beiden gedüngten N-Stufen bis zum Beginn des Blütenschiebens, in der Blüte fielen die Messungen wieder auf ein ähnliches Niveau wie zu Vegetationsbeginn. Anders als die Messwerte der mit N versorgten Parzellen blieben die Werte des IRG in den ungedüngten Parzellen von VB bis BBCH 50 ohne große Veränderungen und sanken erst zu BBCH 65 weiter auf 3,0 ab.

Über den IR 1 war es möglich, die drei unterschiedlich gedüngten N-Varianten voneinander zu unterscheiden (Abb. 11). Allerdings fielen die Messwerte zu Vegetationsbeginn deutlich ab. Jedoch wurde das vorwinterliche Messniveau in allen untersuchten N-Stufen bereits wieder zu BBCH 30 erreicht. Bis zur Hauptblüte wurde maximal ein Wert von 1,2 (N 14) gemessen. In den ungedüngten Varianten wurde das Maximum bereits zu BBCH 50 erreicht.

Der Verlauf des SAVI war dem des NDVI ähnlich. Zu Vegetationsbeginn brachen die Messungen um bis zu 36% (N 14) ein. Im weiteren Vegetationsverlauf erholten sich die Messwerte zwar bis BBCH 50, überstiegen das Niveau vor dem Winter aber nicht.

Ein ebenfalls deutlicher Einfluss der unterschiedlichen N-Düngermengen war beim NDI 2 festzustellen. Bereits in den Herbstmessungen differenzierten dessen Messwerte deutlich. Nur reagierte dieser Index zu VB in den mit N versorgten Parzellen mit einem deutlichen Rückgang der Messwerte gegenüber den Herbstmessungen. Mit dem Wachstum der Pflanzen erhöhten sich die Messwerte des Vegetationsindex kontinuierlich bis zur Vollblüte des Rapses. In den Varianten ohne N-Düngung war ab BBCH 50 ein Rückgang der Messungen von 0,05 auf 0,04 festzustellen.

Die beiden Simple Ratios SR 1 und SR 2 verwenden dieselben Wellenlängen. Allerdings werden für die Berechnung der SR 2 Zähler und Nenner der SR 1 vertauscht, so dass der Verlauf der SR 2 entgegengesetzt zur SR 1 ist. Aus diesem Grund sowie zur besseren Vergleichbarkeit mit den übrigen Indices wird nur auf die SR 2 eingegangen. Bei diesem Index stiegen die Messwerte der ungedüngten N 1 bis zum Beginn des Blütenschiebens (1,1) kontinuierlich an. Erst mit der Blüte war ein leichter Rückgang zu erkennen. In den N-Stufen N 3 und N 14 verringerten sich die Messungen über den Winter kaum bzw. nur geringfügig. Ab dem Vegetationsbeginn stiegen die Werte bis BBCH 65 kontinuierlich an. Von der Blüte der Rapsplan-

zen blieb dieser Vegetationsindex unbeeinflusst, so dass in diesem Stadium Messwerte von bis zu 1,22 (N 14) erhoben wurden.

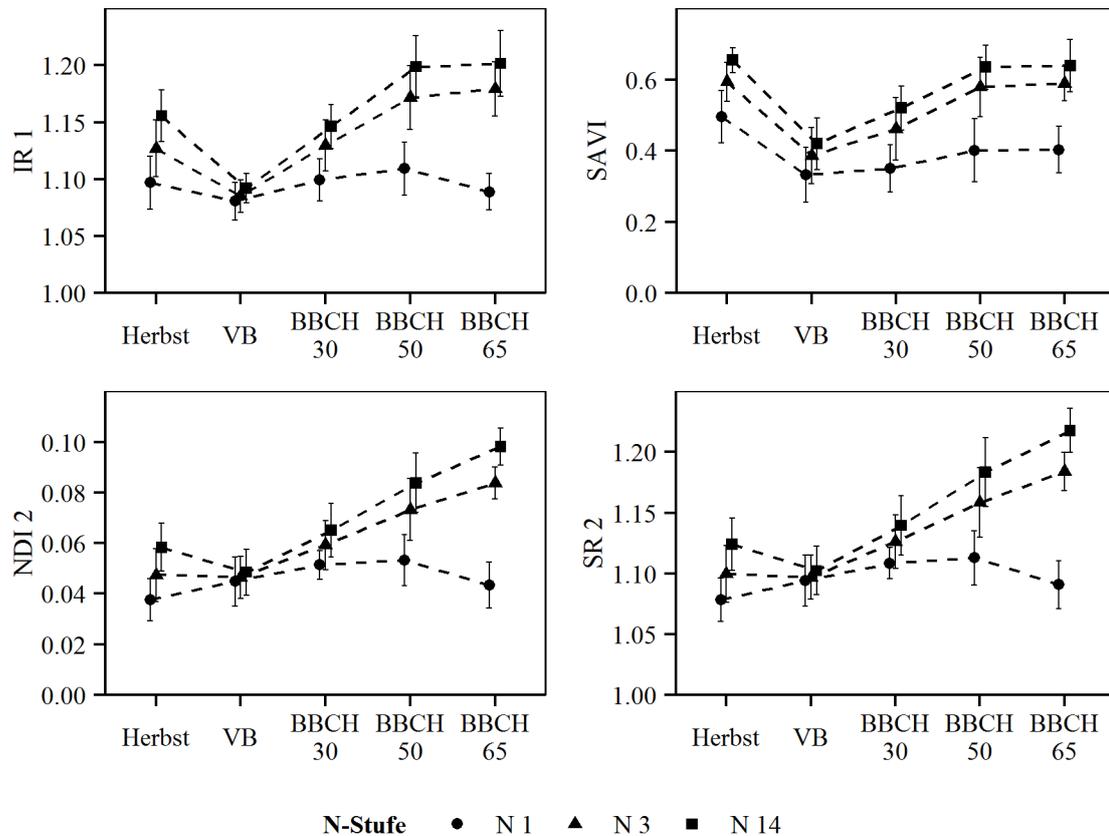


Abb. 11: Entwicklung der N-Aufnahme und des TM-Aufwuchses von Raps sowie Verlauf der Messwerte verschiedener Vegetationsindices in Abhängigkeit der N-Stufen N 1 , N 3 und N 14 während der Vegetation im Mittel des HE- und NE-Standortes (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

4.1.4 Abbildung der N-Aufnahme und der Biomasse durch Vegetationsindices

4.1.4.1 Eignung von Vegetationsindices zur Abbildung der N-Aufnahme

Um zu analysieren, ob eine sichere Bestimmung der N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse mit Hilfe der von den Pflanzen reflektierten Strahlung möglich und welcher Vegetationsindex dafür geeignet ist, wurden die Messwerte der Indices mit den N-Aufnahmeraten der Pflanzen korreliert. Um eine möglichst breite Datenbasis zu erhalten, wurde neben den N-Steigerungsversuchen in Roggenstein auf dem HE- und NE-Standort auch auf ältere Versuchsdaten seit 2005 zurückgegriffen. Ab dem Jahr 2009 wurden vier neue Indices (VX 3, NDI 2, SR 1, SR 2) in die Analysen aufgenommen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde ein Intervall von 2005 bis 2014 ohne diese Indices und ein Intervall (2009 bis 2014) mit diesen Indices untersucht.

In den einzelnen Jahren waren die Unterschiede in der Messpräzision zwischen den Indices gering (Tab. A 4). VX 1 und VX 2, die infrarotbasierten Indices IRR, IRG und IR 1 sowie die ab 2009 zusätzlich geprüften VX 3, NDI 2 sowie SR 1 und SR 2 wiesen eine annähernd gleich hohe Messgüte auf. Je nach Jahr und Termin betrug die Bestimmtheitsmaße dieser Indices in Abhängigkeit davon, ob eine lineare oder quadratische Regressionsgleichung gewählt wurde, zwischen 0,56 und 0,93. Die Zweibandindices NDVI und SAVI erreichten geringere R^2 -Werte zwischen 0,43 und 0,87.

Abbildung der N-Aufnahme mit Vegetationsindices im Zeitraum 2005 bis 2014

Über den Zeitraum von 2005 bis 2014 betrachtet, korrelierte die N-Aufnahme im Herbst in der linearen Regression am besten mit den Messwerten des VX 2 ($R^2 = 0,77$) (Tab. 53). Beim NDVI sowie den infrarotbasierten IRR, IRG und IR 1 lagen die R^2 -Werte zwischen 0,47 und 0,58. Beim VX 1 ergab sich ein R^2 -Wert von 0,39. Keine Beziehung zur N-Aufnahme wies der SAVI auf. Im weiteren Verlauf der Vegetation verbesserten sich die Bestimmtheitsmaße beim VX 1 trotz Biomassezuwachs und der Veränderung des pflanzlichen Erscheinungsbildes infolge des Längenwachstums zu BBCH 30 und BBCH 50 nicht, sondern blieben auf dem im Herbst erreichten Niveau. Vergleichbare Ergebnisse wurden für die Zweibandindices NDVI und SAVI sowie für den IRR und den IRG ermittelt. Dagegen verzeichnete der VX 2 einen deutlichen Rückgang der Messgenauigkeit ($R^2 = 0,50$). Zur Vollblüte war mit allen untersuchten Indices keine Aussage zur N-Aufnahme mehr möglich.

Ein Sättigungseffekt war in dem langen Betrachtungszeitraum vor allem bei den Messwerten des NDVI zu erkennen. Bei diesem Index erhöhten sich die Bestimmtheitsmaße um 0,17 im Herbst und zum Blütenschieben um 0,15, wenn statt mit einer linearen Regressionsgeraden mit einer quadratische Funktion gerechnet wurde. Wie aus Abb. 12 hervorgeht, war der NDVI nicht in der Lage N-Aufnahmeraten von über 40 kg ha^{-1} im Herbst bzw. 90 kg ha^{-1} zu BBCH 50 ausreichend zu trennen. Die übrigen Indices wiesen auch bei hohen N-Aufnahmen im Herbst und zu BBCH 30 eine zu vernachlässigende Sättigung auf. Erst zum Blütenschieben zeichnete sich ein Sättigungseffekt bei allen übrigen Indices deutlicher ab, wobei sich auch in diesem Fall der VX 2 am stabilsten erwies⁴.

⁴ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Beschriftung der Y-Achse beim Vegetationsindex VX 2 in Abb. 12 verzichtet.

Tab. 53: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen N-Aufnahme in Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Termin	Gleichung	VX 1	VX 2	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI
Herbst	lin.	0,39	0,77	0,50	0,58	0,53	0,47	0,02
	quad.	0,47	0,79	0,67	0,65	0,60	0,53	0,10
BBCH 30	lin.	0,38	0,66	0,37	0,44	0,59	0,37	0,05
	quad.	0,40	0,69	0,45	0,47	0,62	0,41	0,07
BBCH 50	lin.	0,40	0,50	0,33	0,38	0,50	0,29	0,05
	quad.	0,51	0,56	0,48	0,47	0,58	0,40	0,13
BBCH 65	lin.	0,01	0,00	0,07	0,07	0,07	0,01	0,04
	quad.	0,22	0,22	0,20	0,17	0,18	0,21	0,15

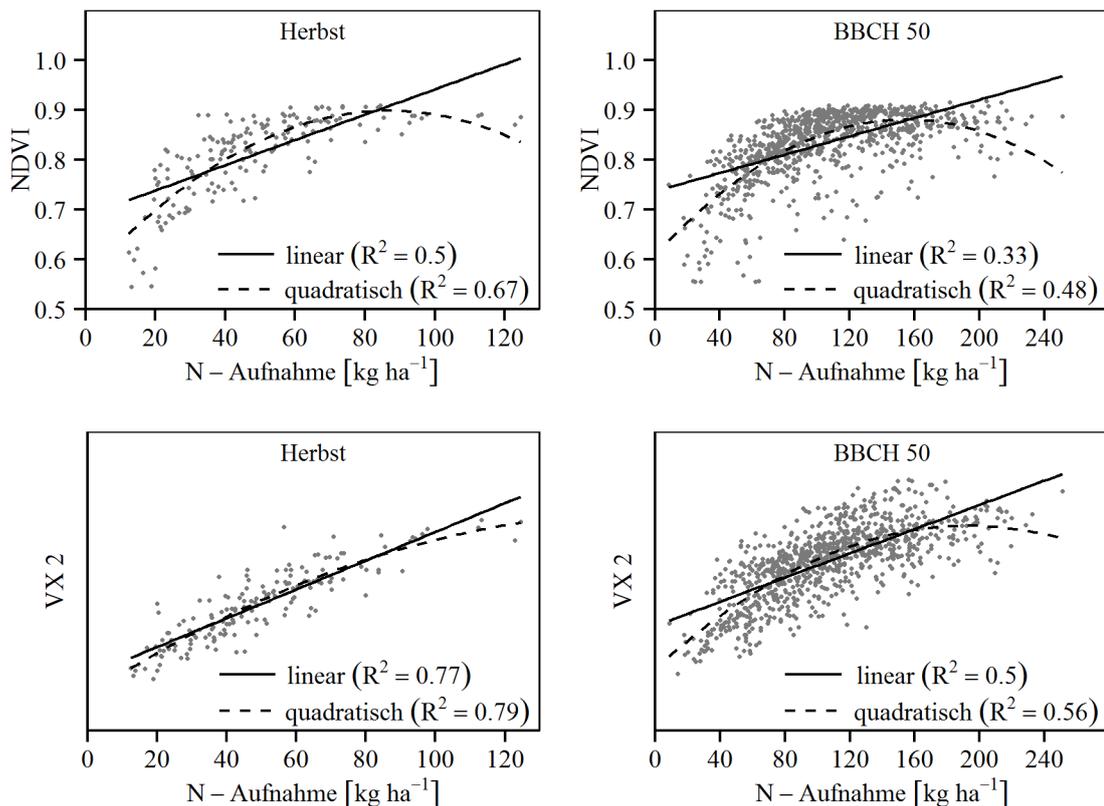


Abb. 12: lineare und quadratische Regressionsfunktion zwischen der N-Aufnahme und den Messwerten der Vegetationsindices NDVI (oben) und VX 2 (unten) im Herbst (links) und zu BBCH 50 (rechts) (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Abbildung der N-Aufnahme mit Vegetationsindices im Zeitraum 2009 bis 2014

Die Messwerte der Vegetationsindices, die ab dem Versuchsjahr 2009 kalkuliert wurden, korrelierten mäßig mit der N-Aufnahme im Herbst, wie die R^2 -Werte von 0,47 bis 0,59 zeigen (Tab. 54). Damit lagen sie auf einem ähnlichen Niveau wie die Indices VX 1, NDVI sowie die Indices IRR und IRG. Die Präzision des VX 2 ($R^2 = 0,77$) wurde auch in diesem Untersuchungsintervall von keinem anderen Index erreicht. Im weiteren Vegetationsverlauf änderten sich die Bestimmtheitsmaße der hinzugefügten Vegetationsindices nicht. Zur Vollblüte konnten weder der VX 3 noch der NDI 2 sowie die SR 1 und SR 2 eine sichere Abschätzung der N-Aufnahme vornehmen. Wie beim VX 2 unterschieden sich die R^2 -Werte der linearen und quadratischen Regression dieser Indices über alle Messtermine nur wenig, was auf einen geringen Sättigungseffekt zurückzuführen ist.

Tab. 54: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen N-Aufnahme in Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE Winteraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winteraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Termin	Gleichung	VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
Herbst	lin.	0,62	0,77	0,47	0,58	0,66	0,63	0,67	0,46	0,59	0,59	0,59
	quad.	0,68	0,79	0,50	0,74	0,72	0,69	0,71	0,64	0,62	0,62	0,62
BBCH 30	lin.	0,48	0,61	0,36	0,39	0,42	0,58	0,40	0,32	0,51	0,51	0,51
	quad.	0,49	0,65	0,37	0,49	0,46	0,61	0,45	0,39	0,51	0,51	0,51
BBCH 50	lin.	0,48	0,49	0,58	0,34	0,42	0,49	0,37	0,23	0,54	0,54	0,54
	quad.	0,58	0,57	0,63	0,48	0,49	0,56	0,48	0,36	0,61	0,61	0,60
BBCH 65	lin.	0,05	0,01	0,25	0,10	0,14	0,15	0,02	0,04	0,10	0,10	0,10
	quad.	0,13	0,10	0,29	0,12	0,15	0,15	0,06	0,05	0,15	0,16	0,15

In den Versuchsjahren 2012 bis 2014 wurden zusätzliche Messungen zu Vegetationsbeginn durchgeführt (Tab. 55). Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme und den Messwerten der Vegetationsindices waren zu diesem Messtermin sehr unterschiedlich. Während für die Indices VX 1, VX 3, NDI 2 sowie die beiden Simple Ratios SR 1 und SR 2 nur geringe R^2 -Werte gefunden wurden, lag das Bestimmtheitsmaß bei den übrigen Indices zwischen 0,44 und 0,59. Diese hohen R^2 -Werte müssen allerdings vor dem Hintergrund des kurzen Untersuchungsintervalls eingeordnet werden. In den langen Messintervallen lag die Messpräzision in den Frühjahrmessungen der meisten Indices und vor allem von NDVI und SAVI deutlich niedriger. Somit ist davon auszugehen,

dass auch die Messgenauigkeit zu Vegetationsbeginn bei einem längeren Versuchsintervall deutlich zurückgehen wird, was eine Abschätzung der N-Aufnahme zu VB erschwert.

Tab. 55: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen N-Aufnahme in Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Termin	Gleichung	VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
Herbst	lin.	0,61	0,73	0,44	0,57	0,70	0,66	0,72	0,52	0,59	0,59	0,59
	quad.	0,66	0,76	0,46	0,74	0,75	0,71	0,75	0,73	0,61	0,61	0,61
VB	lin.	0,19	0,50	0,06	0,48	0,51	0,44	0,44	0,59	0,15	0,15	0,15
	quad.	0,21	0,53	0,07	0,54	0,52	0,51	0,48	0,63	0,18	0,18	0,18
BBCH 30	lin.	0,73	0,73	0,39	0,53	0,66	0,70	0,75	0,66	0,69	0,68	0,69
	quad.	0,73	0,74	0,40	0,59	0,67	0,71	0,76	0,70	0,69	0,68	0,69
BBCH 50	lin.	0,67	0,52	0,72	0,36	0,52	0,59	0,60	0,39	0,74	0,74	0,75
	quad.	0,72	0,55	0,74	0,44	0,54	0,61	0,64	0,46	0,77	0,77	0,77
BBCH 65	lin.	0,15	0,00	0,34	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03	0,23	0,23	0,22
	quad.	0,33	0,10	0,42	0,08	0,06	0,07	0,15	0,19	0,35	0,36	0,34

4.1.4.2 Eignung von Vegetationsindices zur Abbildung der Biomasse

Neben der N-Aufnahme wurde untersucht, ob auch der TM-Aufwuchs mit den Messwerten der Indices korreliert. Für die Auswertung der Ergebnisse wurde zur besseren Übersicht ausschließlich der Zeitraum 2009 bis 2014 verwendet.

Mit der oberirdischen Biomasse korrelierten in den Einzeljahren im Herbst vor allem die Indices VX 1, VX 2 und IR 1 gut mit R^2 -Werten bis zu 0,88 (Tab. A 5). Mit dem weiteren Vegetationsverlauf war ein leichter Rückgang in der Fähigkeit zur Abbildung des TM-Aufwuchses festzustellen. Eine hohe Messgenauigkeit war dagegen bei keinem Index gegeben, wenn mehrere Jahre zusammengefasst wurden (Tab. 56). Für eine Bestimmung des Biomasseaufwuchses im Herbst eignete sich in diesem untersuchten Intervall der IRG am besten ($R^2 = 0,71$). Die übrigen Vegetationsindices waren ungenauer. Ihre Bestimmtheitsmaße erreichten Werte zwischen 0,42 (VX 3) und 0,62 (SAVI). Mit Beginn des Längenwachstums konnte der TM-Aufwuchs mit immer geringerer Genauigkeit über die verschiedenen Indices abgebildet werden, so dass zur Blüte nur noch maximal 27% (IRG) der Variabilität der Messwerte durch die oberirdische Biomasse erklärt werden konnten.

Tab. 56: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen dem TM-Aufwuchs in Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2009 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Termin	Gleichung	VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 1
Herbst	lin.	0,48	0,48	0,42	0,52	0,56	0,71	0,56	0,62	0,49	0,49	0,49
	quad.	0,48	0,49	0,42	0,59	0,57	0,73	0,57	0,67	0,49	0,49	0,49
BBCH 30	lin.	0,27	0,47	0,23	0,32	0,32	0,49	0,25	0,20	0,32	0,32	0,32
	quad.	0,27	0,48	0,24	0,35	0,32	0,49	0,25	0,21	0,33	0,33	0,33
BBCH 50	lin.	0,29	0,30	0,43	0,28	0,35	0,39	0,24	0,09	0,38	0,38	0,38
	quad.	0,35	0,35	0,47	0,36	0,39	0,43	0,30	0,18	0,42	0,43	0,42
BBCH 65	lin.	0,00	0,09	0,21	0,20	0,25	0,27	0,08	0,10	0,04	0,04	0,04
	quad.	0,06	0,11	0,23	0,20	0,25	0,27	0,09	0,10	0,07	0,07	0,07

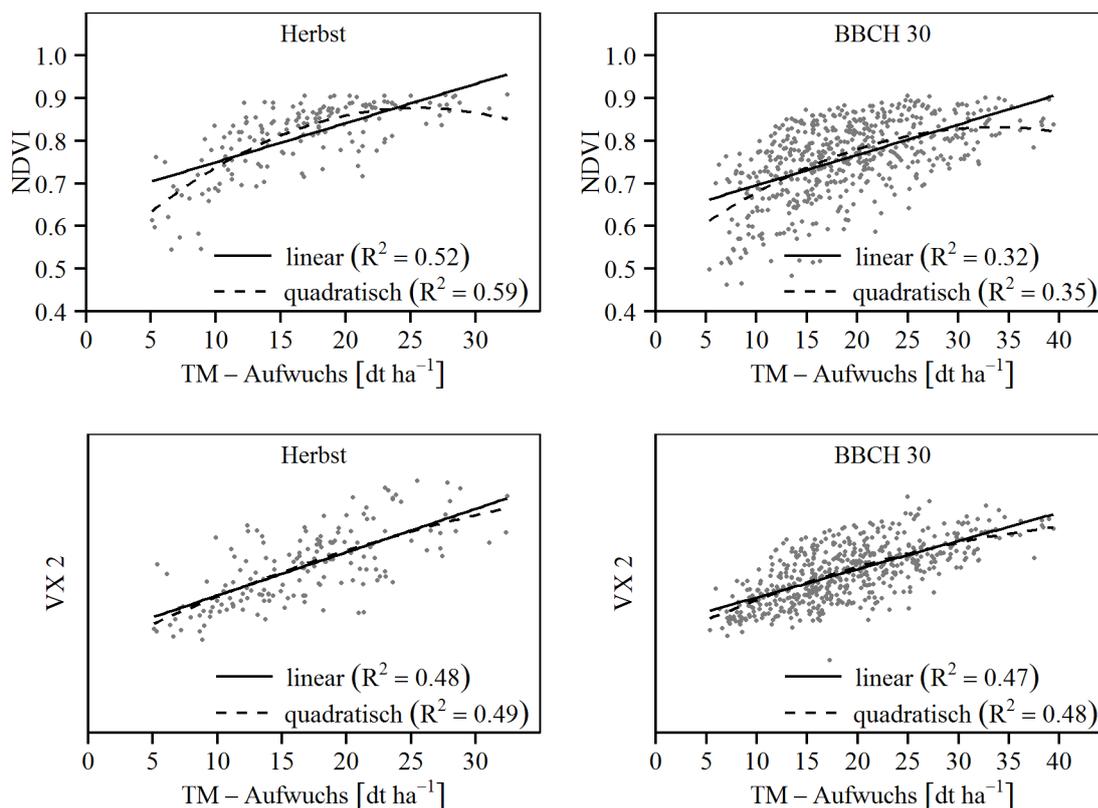


Abb. 13: Regressionsgleichungen zwischen dem TM-Aufwuchs im Herbst (links) und BBCH 30 (rechts) und den Messwerten der Vegetationsindices NDVI (oben) und VX 2 (unten) (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein 2009 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Bis auf den NDVI war bei den Vegetationsindices kein Sättigungseffekt zu erkennen, da die Bestimmtheitsmaße der linearen und quadratischen Regressionsgleichung vor allem im Herbst und zu Schossbeginn sehr nahe beieinander lagen (Tab. 56). Der NDVI dagegen rea-

gierte beim Überschreiten eines TM-Aufwuchses von 10 dt ha⁻¹ nur noch mit geringen Veränderungen der Messwerte (Abb. 13)⁵.

4.1.5 Auswertung der Sortenversuche in Winterraps

4.1.5.1 Auswertung des Sortenversuchs im Zeitraum 2007 bis 2009

Im Zeitraum 2007 bis 2009 wurden sechs Sorten angebaut und auf ihre Unterschiede im Biomasseaufwuchs sowie in der N-Aufnahme analysiert. Zeitgleich zu den Biomasseschnitten wurden Spektralmessungen durchgeführt, um den Effekt unterschiedlicher Sorten auf die Messwerte verschiedener Indices untersuchen zu können.

Einfluss der Sortenwahl auf die Biomasse und die N-Aufnahme

Den Biomasseaufwuchs beeinflusste in diesem Versuchszeitraum vor allem der Faktor Jahr (Tab. 57). Daneben führte eine differenzierte N-Düngung zu unterschiedlichen Erträgen der oberirdischen Biomasse. Eine Auswirkung der Sortenwahl auf den Biomasseaufwuchs konnte zu keinem Schnitttermin festgestellt werden. Aufgrund der signifikanten Wechselwirkung zwischen den Hauptfaktoren Sorte und Jahr im Herbst, war zu diesem Termin kein Mittelwertvergleich möglich.

Tab. 57: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme mit den unabhängigen Faktoren Sorte, N-Stufe und Jahr für verschiedene Entwicklungsstadien (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2007 bis 2009).

Faktor	TM-Aufwuchs			N-Aufnahme		
	Herbst	BBCH 30	BBCH 50	Herbst	BBCH 30	BBCH 50
Sorte	1,4	0,8	1,5	2,2	0,2	1,5
N-Stufe		10,0**	118,5***		92,6***	117,9***
Jahr	20,0***	41,0***	114,4***	1,5	11,0***	40,7***
Sorte*N-Stufe		0,3	1,0		0,6	0,2
Sorte*Jahr	3,0*	1,8	1,5	2,9*	1,8	2,1
N-Stufe*Jahr		0,7	14,3***		1,0	3,9

Auf die N-Aufnahme hatten die beiden Hauptfaktoren Jahr und Sorte nur zu den Herbstmessungen keinen gesicherten Effekt (Tab. 57). Ein Sorteneffekt auf diese Größe war auch zu den

⁵ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Beschriftung der Y-Achse beim Vegetationsindex VX 2 in Abb. 13 verzichtet.

Frühjahrsterminen nicht nachzuweisen. Zu diesen Stadien wirkten ausschließlich die Jahre und die unterschiedliche N-Düngung verändernd auf den in den Pflanzen enthaltenen N.

Die TM-Aufwüchse lagen im Herbst eng zusammen, wobei die Differenz zwischen des Sorten Mendel und NK-Fair am größten war (3,6 dt ha⁻¹ TM) (Tab. 58). Bis zum Schieben des Blütenstandes erhöhte sich die oberirdische Biomasse deutlich auf maximal 27,9 dt ha⁻¹ TM (Oase). Den geringsten Wert verzeichnete die Sorte Smart.

Die geringste N-Aufnahme im Herbst wies die kohlhernieresistente Sorte Mendel auf (47,6 kg ha⁻¹). 10,4 kg ha⁻¹ N mehr wurden bei NK-Fair gemessen. Aufgrund der signifikanten Wechselwirkung zwischen den Faktoren Jahr und Sorte zu diesem Termin war allerdings kein Mittelwertvergleich möglich. Im weiteren Vegetationsverlauf lagen die Minimal- und Maximalwerte 2,6 kg ha⁻¹ N (BBCH 30) und 11,7 kg ha⁻¹ N (BBCH 50) auseinander. Zu diesen Vegetationsstadien wirkten ausschließlich die Jahre und die unterschiedliche N-Düngung verändernd auf die N-Aufnahme der Pflanzen.

Tab. 58: Mittelwerte für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme von Rapssorten zu unterschiedlichen Terminen, Mittelwert über alle N-Stufen (Sortenversuch Winter-raps, Roggenstein, 2007 bis 2009).

Sorte	TM-Aufwuchs [dt ha ⁻¹]			N-Aufnahme [kg ha ⁻¹]		
	Herbst	BBCH 30	BBCH 50	Herbst	BBCH 30	BBCH 50
Elektra	20,8	19,3 a	26,0 a	49,5	59,5 a	85,4 a
Mendel	18,4	17,6 a	26,3 a	47,6	58,5 a	88,7 a
NK-Fair	22,0	19,3 a	24,5 a	58,0	60,7 a	82,7 a
Oase	20,4	18,4 a	27,9 a	54,7	61,1 a	93,0 a
Smart	21,1	18,4 a	23,5 a	53,0	58,6 a	82,7 a
Titan	21,1	17,8 a	26,1 a	56,0	61,2 a	94,4 a

Einfluss der Sortenwahl auf die Vegetationsindices

Aufgrund der Sortenwechsel während des Versuchszeitraums wurden das Intervall von 2007 bis 2009 sowie die Einzeljahre 2012 und 2013 ausgewertet. Im mehrjährigen Betrachtungszeitraum beeinflusste der Faktor Jahr die Messwerte der Vegetationsindices signifikant bis sehr hochsignifikant (Tab. 59). Nur beim NDVI zum Termin Herbst war kein Jahreseffekt auf die Messungen nachweisbar. Dagegen wirkten sich unterschiedliche N-Aufnahmemengen deutlich auf die Vegetationsindices aus. Wie bei allen Indices zu beobachten war, erhöhten sich im Vegetationsverlauf die Quadratsummen (SSQ-Werte) der Kovariaten, womit deren

Einfluss auf die Messergebnisse stieg. Während der Effekt des Jahres, wie den SSQ-Werten zu entnehmen ist, im Herbst noch den der N-Aufnahme übertraf, sank dessen Einfluss stetig. Zum Knospenschieben erreichten die SSQ-Werte des Faktors Jahr bei den meisten Indices zwischen 11% (IRG) bis 19% (NDVI) der SSQ-Werte der Kovariaten N-Aufnahme. Weit höher war der Anteil noch beim IR 1 (31%) und VX 2 (43%).

Ein Sorteneffekt konnte bei allen untersuchten Indices zu keinem der Messtermine nachgewiesen werden. Darüber hinaus war der Einfluss der Sorte auf die Messungen der einzelnen Vegetationsindices im Vergleich zur Wirkung der Kovariaten vor allem zu den beiden späteren Terminen gering, wie aus den SSQ-Werten hervorgeht. Während beim IRG im Herbst der Sorteneffekt stärker als die Wirkung der N-Aufnahme war, glichen sich beim NDVI zu diesem Messtermin die SSQ-Werte der Sorte und der Kovariaten annähernd. Dagegen reduzierten sich die SSQ-Werte des Faktors Sorte auf 76% der SSQ-Werte der Kovariaten beim VX 1. Noch geringer war das Verhältnis zwischen diesen beiden Größen beim VX 2 (51%) und SAVI (41%).

Im weiteren Vegetationsverlauf lag das Verhältnis der SSQ-Werte des Faktors Sorte und der Kovariaten zwischen 2,3% (IR 1) und 11,9% (VX 1) und zum Knospenschieben zwischen 4,4% (SAVI) und 5,9% (NDVI). Am geringsten wurde jedoch der VX 2 von den Sorteneigenschaften beeinflusst. Hier erreichte der Sorteneffekt zu Schossbeginn 1,6% der Wirkung der N-Aufnahme und zu BBCH 50 3,7%.

Tab. 59: SSQ-Werte und Signifikanzen der Kovarianzanalyse für die verschiedenen untersuchten Vegetationsindices mit der Kovariaten N-Aufnahme und den unabhängigen Faktoren Sorte sowie Jahr zu unterschiedlichen Terminen (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2007 bis 2009).

Kovariate	VX 1			VX 2			NDVI			IRR		
	Herbst	BBCH 30	BBCH 50	Herbst	BBCH 30	BBCH 50	Herbst	BBCH 30	BBCH 50	Herbst	BBCH 30	BBCH 50
N-Aufnahme	1,5*	18,8***	39,5***	0,02*	0,47***	0,93***	0,001*	0,14***	0,09***	27,7**	299,9***	523,3***
Sorte	1,1	2,2	1,9	0,01	0,01	0,03	0,001	0,01	0,01	22,1	10,5	28,5
Jahr	20,5***	33,1***	6,7***	0,03*	0,09***	0,39***	0,005	0,04***	0,02***	51,7***	50,9***	64,5***

Kovariate	IRG			IR 1			SAVI		
	Herbst	BBCH 30	BBCH 50	Herbst	BBCH 30	BBCH 50	Herbst	BBCH 30	BBCH 50
N-Aufnahme	1,0*	10,9***	42,8***	0,002*	0,043***	0,09***	0,004*	0,25***	0,20***
Sorte	1,4	0,3	2,3	0,001	0,001	0,01	0,002	0,02	0,01
Jahr	6,8***	2,7**	4,8***	0,004**	0,004**	0,03***	2,22***	4,0***	2,49***

4.1.5.2 Auswertung der Sortenversuche der Jahre 2012 und 2013

Der in den Jahren 2012 und 2013 vollzogene Sortenwechsel erforderte eine einzeljährige Auswertung dieser Versuchsjahre.

Einfluss der Sortenwahl auf die Biomasse und die N-Aufnahme im Jahr 2012

Im Jahr 2012 unterschieden sich die Sorten im Herbst höchstsignifikant im Biomasseaufwuchs (Tab. A 6). Zwischen dem geringsten (Amilia) und dem höchsten TM-Aufwuchs (Alabaster) lagen $6,3 \text{ dt ha}^{-1}$ (Tab. 60). Bis zum Knospenschieben erhöhte sich die oberirdische Biomasse auf maximal $27,4 \text{ dt ha}^{-1}$ (Marquis). Zu diesem Stadium war kein Sorteneinfluss nachweisbar. Bei der N-Aufnahme war in der Herbstmessung kein statistisch signifikanter Unterschied feststellbar, während die N-Aufnahmewerte zu Beginn des Blütenschiefens zwischen $84,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (Amilia) und $107,0 \text{ kg ha}^{-1}$ (Compass) schwankten. Ein Mittelwertvergleich war zu diesem Entwicklungsstadium aufgrund der signifikanten Wechselwirkung zwischen beiden Hauptfaktoren nicht möglich.

Tab. 60: TM-Aufwuchs und N-Aufnahme von Rapssorten zu den Terminen Herbst und BBCH 50, Mittelwert über alle N-Stufen (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2012).

Sorte	TM-Aufwuchs [dt ha^{-1}]		N-Aufnahme [kg ha^{-1}]	
	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50
Alabaster	24,3 b	26,3 a	59,5 a	99,1
Amillia	18,0 a	21,3 a	48,4 a	84,3
Compass	21,1 ab	26,4 a	55,0 a	107,0
Dimension	22,6 ab	26,9 a	56,8 a	105,1
Marquis	21,7 ab	27,4 a	55,6 a	107,1
PR46W20	19,6 ab	25,6 a	51,1 a	103,6
Visby	23,0 ab	25,7 a	58,8 a	106,6
Xenon	23,2 ab	24,9 a	56,7 a	99,0

Einfluss der Sortenwahl auf die Vegetationsindices im Jahr 2012

Wie im langen Untersuchungszeitraum 2007 bis 2009 erwiesen sich auch 2012 alle in die Analyse einbezogenen Vegetationsindices zu jedem Messtermin als sortenunabhängig (Tab. 62). Demgegenüber beeinflusste die N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse die Messwerte aller Indices durchgehend hoch- bzw. höchstsignifikant. Die Quadratsumme des Faktors Sorte erreichte zu den Herbstmessungen bei den Indices NDVI, IRR und IRG Werte zwischen

57% und 74% der SSQ-Werte der Kovariaten N-Aufnahme. Bei den übrigen Indices war dieses Verhältnis geringer und schwankte zwischen 15% (SAVI) und 37% (VX 3). Bis zum Beginn des Blütenschiebens steigerte sich der Einfluss der N-Aufnahme weiter, wie aus der vergrößerten Differenz zwischen zu den SSQ-Werten des Faktors Sorte hervorgeht.

Einfluss der Sortenwahl auf die Biomasse und die N-Aufnahme im Jahr 2013

Im Versuchsjahr 2013 wurden die Biomasseschnitte zu den Terminen Herbst und BBCH 30 durchgeführt. Dabei produzierten zu beiden Terminen alle Sorten annähernd die gleiche Trockenmasse (Tab. 61). Gleiches gilt für die N-Aufnahme, die bei allen Sorten auf annähernd gleichem Niveau lag. Aufgrund der signifikanten Wechselwirkung zwischen dem Faktor Sorte und der N-Stufe war zu BBCH 30 kein Mittelwertvergleich möglich (Tab. A 7).

Tab. 61: TM-Aufwuchs und N-Aufnahme von Rapssorten zu den Terminen Herbst und BBCH 30, Mittelwert über alle N-Stufen (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2013).

Sorte	TM-Aufwuchs [dt ha ⁻¹]		N-Aufnahme [kg ha ⁻¹]	
	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30
Adriana	8,2 a	15,7 a	27,0 a	64,8
DK Exstorm	8,1 a	13,6 a	31,6 a	62,9
ES Alegria	9,4 a	14,8 a	29,5 a	64,3
Genie	8,1 a	12,7 a	29,4 a	53,1
PR 44D06	9,0 a	13,1 a	30,3 a	57,1
Xenon	7,6 a	14,4 a	28,7 a	61,3

Einfluss der Sortenwahl auf die Vegetationsindices im Jahr 2013

Anders als in den bisherigen Auswertungen beschrieben, trat im Jahr 2013 ein statistisch nachweisbarer Sorteneffekt bei fast allen Indices zu beiden Messterminen auf (Tab. 63). Nur der NDVI und der IRR reagierten im Herbst nicht auf einen Sortenwechsel. Allerdings war im Herbst die Wirkung des Sorteneffekts auf die Messwerte geringer als die der N-Aufnahme, wie aus dem Vergleich der Quadratsummen hervorgeht. Während beim VX 3 sowie beim NDI 2 und beim SR 1 der Effekt der Sorte noch bis zu 62% des Effekts der N-Aufnahme auf die Messwerte erreichte, war die Wirkung der Sorte im Vergleich zu der der Kovariaten bei den übrigen Indices mit Werten zwischen 20% (NDVI) und 36% (IR 1) weit geringer.

Tab. 62: SSQ-Werte und Signifikanzen der Kovarianzanalyse für die verschiedenen untersuchten Vegetationsindices mit der Kovariaten N-Aufnahme und dem unabhängigen Faktor Sorte zu unterschiedlichen Terminen (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2012).

Kovariate	VX 1		VX 2		VX 3		NDVI		IRR		IRG	
	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50
	N-Aufnahme	32,4***	10,7***	0,14***	0,18***	0,000***	0,000***	0,03**	0,02***	38,5***	71,0***	2,3**
Faktor	9,5	1,1	0,05	0,02	0,000	0,000	0,02*	0,00	22,0	10,4	1,7	1,2

Kovariate	IR 1		SAVI		NDI 2		SR 1		SR 2	
	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50
	N-Aufnahme	0,01***	0,01***	0,05***	0,04***	0,001***	0,001***	0,004***	0,004***	0,006***
Faktor	0,00	0,00	0,01	0,01	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001

Tab. 63: SSQ-Werte und Signifikanzen der Kovarianzanalyse für die verschiedenen untersuchten Vegetationsindices mit der Kovariaten N-Aufnahme und dem unabhängigen Faktor Sorte zu unterschiedlichen Terminen (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2013).

Kovariate	VX 1		VX 2		VX 3		NDVI		IRR		IRG	
	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30
	N-Aufnahme	22,3***	19,7***	0,17***	0,03***	0,000***	0,000***	0,03***	0,03***	81,5***	3,0***	7,6***
Faktor	7,5**	34,6**	0,04**	0,03***	0,000***	0,000***	0,01	0,04**	18,3	4,3**	2,1**	2,4***

Kovariate	IR 1		SAVI		NDI 2		SR 1		SR 2	
	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30
	N-Aufnahme	0,005***	0,002***	0,04***	0,03***	0,001***	0,000***	0,002***	0,001***	0,005***
Faktor	0,000	0,002***	0,01	0,03**	0,000***	0,000***	0,001***	0,001**	0,002**	0,001**

4.1.6 Bestimmung der N-Aufnahme von Winterraps

4.1.6.1 Abschätzen der N-Aufnahme über die Pflanzenreflexion

Wie die Ergebnisse aus dem vorangehenden Kapitel 4.1.4 zeigen, bildeten alle Indices die N-Aufnahme am besten im Herbst ab. Die höchste Korrelation zur N-Aufnahme wies zu diesem Messtermin der VX 2 auf, darüber hinaus war kein Sorteneinfluss und Sättigungseffekt bei hohen N-Aufnahmen festzustellen. Deshalb wurde dieser Index für die Bestimmung der N-Aufnahme ausgewählt. Für die Berechnung der N-Aufnahme im Herbst wurde eine lineare Regressionsgleichung verwendet. Diese entstand aus der Korrelation zwischen der N-Aufnahme im Herbst und den Messwerten des Vegetationsindex VX 2, die über den langen Zeitraum von 2005 bis 2014 erhoben wurden. Durch das Umformen dieser Regressionsgleichung (Gleichung 19) sowie dem Einsetzen des Messwertes wird die aktuelle N-Aufnahme ermittelt (Gleichung 20)⁶.

$$(19) \quad VX\ 2 = a \cdot NAH_{akt} + b$$

$$(20) \quad NAH_{akt} = \frac{VX\ 2 - a}{b}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	-	a-Wert, Steigung der linearen Regressionsgeraden
b	-	b-Wert, Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden
NAH _{akt}	kg ha ⁻¹	aktuelle N-Aufnahme im Herbst

4.1.6.2 Abschätzung der N-Aufnahme über die Schnittmethode

Schätzung der N-Aufnahme über Regressionsgleichungen

Damit die N-Düngermenge von Winterraps im Frühjahr auch ohne Sensormessungen kalkuliert werden kann, wurde eine Schnittmethode auf Basis der Verfahren zur N-Bedarfsermittlung in Frankreich und Schleswig Holstein (vgl. Kapitel 2.8.3) entwickelt. Damit ist es möglich, die N-Aufnahme von Raps zu jedem Entwicklungsstadium präzise abzuschätzen.

Auf Grundlage langjähriger Versuchsdaten wurden Regressionsanalysen zwischen dem Frischmasseaufwuchs und der N-Aufnahme durchgeführt, wobei zwischen diesen beiden Faktoren ein enger Zusammenhang festgestellt wurde (Tab. 64). Zu den Herbstmessungen korre-

⁶ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Angabe der a- und b-Werte in Gleichung 19 und Gleichung 20 verzichtet.

lierte das Frischmassegewicht eines Quadratmeters eng mit der N-Aufnahme ($R^2 = 0,86$). Mit fortschreitendem Vegetationsstadium sank das Bestimmtheitsmaß auf minimal 0,75 zu BBCH 65. Wie aus den Regressionsgleichungen zwischen dem Frischmasseaufwuchs und der N-Aufnahme zu den einzelnen Terminen Herbst, VB, BBCH 30, BBCH 50 und BBCH 65 hervorgeht, war die Steigung der Regressionsgleichung nicht konstant.

Tab. 64: Bestimmtheitsmaße sowie Gleichung der linearen Regressionsgeraden aus der Regression zwischen dem FM-Aufwuchs je m^2 und der N-Aufnahme pro ha zu verschiedenen Terminen (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch Winterraps, Dürnast, 2008 bis 2010).

Termin	R^2	Gleichung
Herbst	0,86	$NA_{akt} = 36,8 \cdot FM + 8,9$
VB	0,77	$NA_{akt} = 55,3 \cdot FM + 3,7$
BBCH 30	0,83	$NA_{akt} = 40,7 \cdot FM + 20,7$
BBCH 50	0,75	$NA_{akt} = 32,3 \cdot FM + 34,4$
BBCH 65	0,75	$NA_{akt} = 36,7 \cdot FM + 17,8$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
NA_{akt}	$kg\ ha^{-1}$	zum jeweiligen Schnittzeitpunkt aktuelle N-Aufnahme
FM	$kg\ m^{-2}$	oberirdischer Frischmasseaufwuchs

Zur Ermittlung der N-Aufnahme werden die Regressionsgleichungen der einzelnen Termine als Schätzgleichungen verwendet (Tab. 64). Dazu wird das Gewicht eines Quadratmeters oberirdischer Biomasse in die für den Termin passende Gleichung eingesetzt.

Die Schätzgleichungen (Tab. 64) wurden anhand des Sortenversuchs auf ihre Präzision getestet. In der Gegenüberstellung zwischen der mit Hilfe der Schätzgleichung kalkulierten N-Aufnahme und der im Versuch gemessenen N-Aufnahme zeigte sich, dass die gemessenen und geschätzten N-Aufnahmewerte im Herbst stark korrelierten ($R^2 = 0,89$) (Abb. 14 & Tab. 65). Zu den weiteren Terminen sank das Bestimmtheitsmaß auf minimal 0,80 (BBCH 50).

Diese hohe Genauigkeit wurde auch in der durchschnittlichen Abweichung der geschätzten von der gemessenen N-Aufnahme beobachtet. Im Herbst wurde mit dem eben beschriebenen Verfahren die N-Aufnahme leicht überschätzt (Tab. 66). Dieser Wert stieg bis BBCH 50 auf $8,6\ kg\ ha^{-1}$ N an. Nur in der Blüte wurde die N-Aufnahme deutlich unterschätzt.

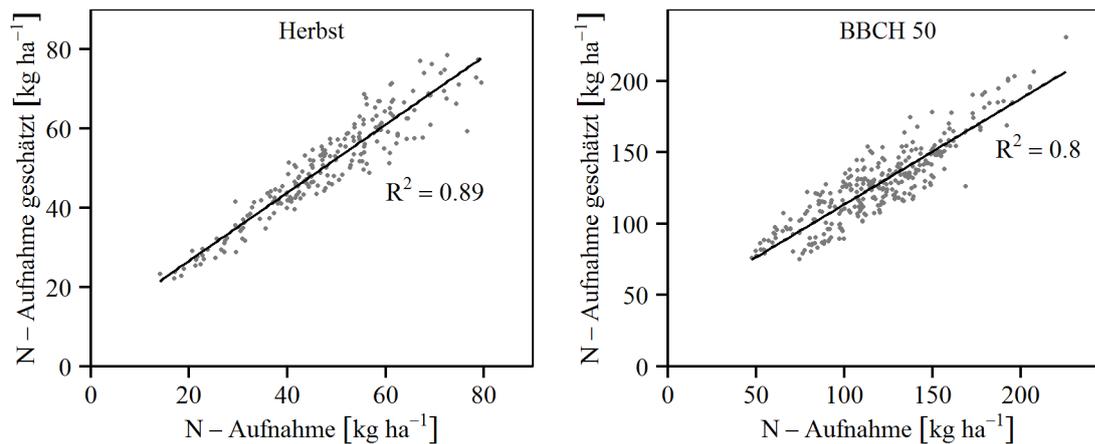


Abb. 14: Regressionsgleichungen zwischen gemessener und über die Regressionsgleichung geschätzter N-Aufnahme für die Termine Herbst (links) und BBCH 50 (rechts) (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2013).

Tab. 65: Bestimmtheitsmaße sowie Steigung (a-Wert) und Y-Achsenabschnitt (b-Wert) der linearen Regressionsgleichung ($f(x) = a \cdot x + b$) zwischen gemessener und über die Regressionsgleichungen geschätzter N-Aufnahme für verschiedene Termine (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2013).

Termin	R ²	a-Wert	b-Wert
Herbst	0,89	0,86	9,5
VB	0,82	0,80	11,7
BBCH 30	0,87	0,91	12,7
BBCH 50	0,80	0,74	39,5
BBCH 65	0,87	0,72	45,0

Tab. 66: Mittlere Abweichung [kg ha^{-1} N] der über die Schätzgleichungen bzw. nach dem Verfahren der LK-SH geschätzten N-Aufnahme von der gemessenen N-Aufnahme zu verschiedenen Terminen (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein 2005 bis 2013).

Termin	Schätzgleichung		LK-SH	
	Abweichung [kg ha^{-1}]	Standardabweichung	Abweichung [kg ha^{-1}]	Standardabweichung
Herbst	2,9	4,6	3,1	5,2
VB	1,7	10,1	-10,9	11,1
BBCH 30	6,9	9,6	-8,3	10,3
BBCH 50	8,6	15,3	11,0	17,6
BBCH 65	-11,7	24,7	10,1	22,5

Schätzung der N-Aufnahme nach der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein

Zur Einordnung der Schätzgenauigkeit des eigenen Verfahrens wurde auch das von der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (LK-SH) empfohlene Vorgehen getestet. Dieses verwendet zur Schätzung der N-Aufnahme im Herbst den Faktor 45, mit dem der durchschnittliche Frischmasseaufwuchs eines Quadratmeters multipliziert wird (Gleichung 21).

$$(21) \quad \text{NAH}_{\text{akt}} = 45 \cdot \text{FM}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
NAH_{akt}	kg ha^{-1}	aktuelle N-Aufnahme im Herbst
FM	kg m^{-2}	oberirdischer Frischmasseaufwuchs

Dabei erfolgte nicht nur die Abschätzung der N-Aufnahme im Herbst über diese Vorgehensweise, sondern auch für die weiteren Termine im Vegetationsverlauf. Um die Präzision dieses Verfahrens für alle Termine ermitteln zu können, wurde zwischen den Werten der gemessenen und geschätzten N-Aufnahme eine Regression berechnet (Abb. 15 & Tab. 67). Es zeigte sich, dass die N-Aufnahme vor allem im Herbst und zu Schossbeginn sehr genau über dieses Verfahren abgeschätzt werden konnte. Nur zu Schossbeginn korrelierten der Frischmasseaufwuchs und die N-Aufnahme etwas weniger, wie das R^2 von 0,80 zeigt.

Im Herbst waren die Schätzungen über dieses von der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein empfohlene Verfahren sehr präzise. Die geschätzten N-Aufnahmewerte wichen durchschnittlich von der gemessenen N-Aufnahme um $3,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ab (Tab. 66). Die Schätzgenauigkeit dieser Methode nahm im Vegetationsverlauf jedoch immer mehr ab.

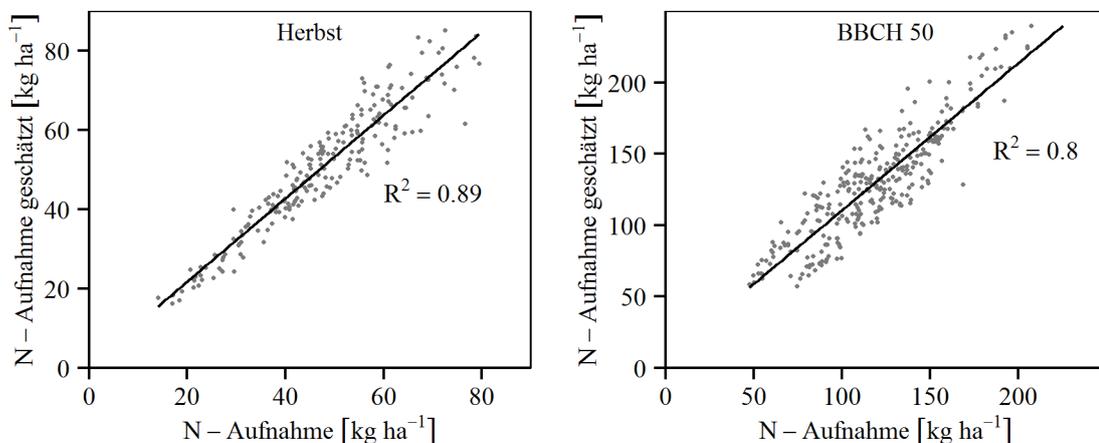


Abb. 15: Regressionsgleichungen zwischen gemessener und der nach der Methode der LK-SH geschätzten N-Aufnahme für die Termine Herbst (links) und BBCH 50 (rechts) (Sortenversuch Winter-raps, Roggenstein, 2005 bis 2013).

Tab. 67: Bestimmtheitsmaße sowie Steigung (a-Wert) und Y-Achsenabschnitt (b-Wert) der linearen Regressionsgleichung ($f(x) = a \cdot x + b$) zwischen gemessener und der nach der LK-SH geschätzten N-Aufnahme für verschiedene Termine (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2013).

Termin	R ²	a-Wert	b-Wert
Herbst	0,89	1,05	0,75
VB	0,82	0,65	6,54
BBCH 30	0,87	1,01	-8,84
BBCH 50	0,80	1,03	7,20
BBCH 65	0,87	0,89	33,38

4.1.7 Entwicklung eines Düngesystems für Winterraps

In diesem Abschnitt wird die Herleitung und die Entwicklung des Düngesystems Raps beschrieben. Dieses Verfahren basiert auf der sensorgestützten Messung der N-Aufnahme der Rapspflanzen im Herbst sowie auf Regelkurven, über die die optimale, ertragsangepasste N-Düngermenge im Frühjahr berechnet wird. Gleichzeitig wird die Pflanzenentwicklung bei der Verteilung der N-Düngermenge im Frühjahr berücksichtigt.

4.1.7.1 Einfluss der N-Düngermenge auf den Kornertrag von Winterraps

Um den Zusammenhang zwischen der gesamten N-Düngermenge, der N-Düngermenge im Frühjahr, den N-Mengen zu den einzelnen Düngeterminen und dem Kornertrag zu prüfen, wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Wie die Ergebnisse zeigen, konnte die gesamte applizierte N-Düngermenge 71% der Variabilität des Kornertrages der Versuchsjahre 2005 bis 2014 erklären (Abb. 16). Eine vergleichbare Güte wies die N-Düngermenge im Frühjahr auf ($R^2 = 0,66$).

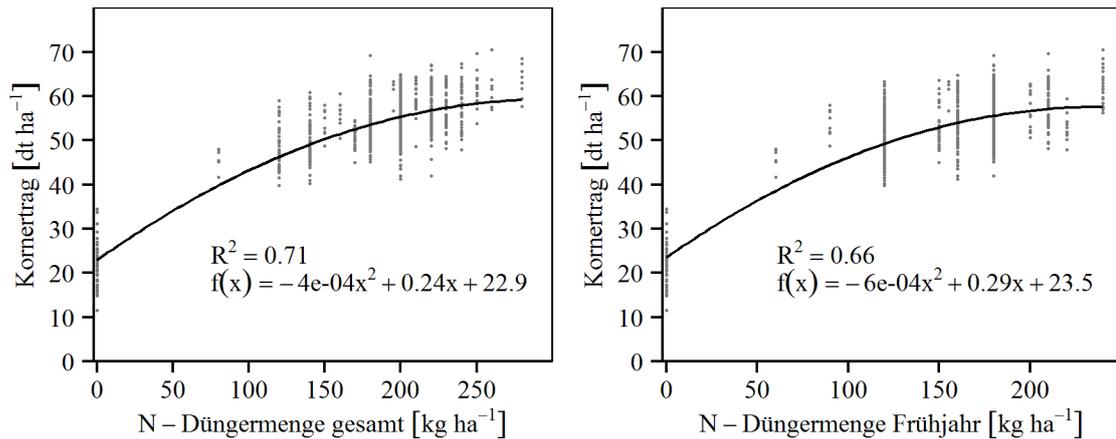


Abb. 16: Regressionen zwischen der gesamten N-Düngermenge (links) sowie der N-Düngermenge Frühjahr (rechts) und dem Kornertrag (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

Tab. 68: Bestimmtheitsmaße und quadratische Regressionsgleichungen zwischen der N-Düngermenge zu VB, BBCH 30 und BBCH 50 und dem Kornertrag (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014).

Termin	R ²	Gleichung
VB	0,06	$f(x) = 3e-04 \cdot x^2 + b \cdot x + c$
BBCH 30	0,15	$f(x) = -1,2e-03 \cdot x^2 + b \cdot x + c$
BBCH 50	0,01	$f(x) = -3e-04 \cdot x^2 + b \cdot x + c$

Die Regressionsanalyse zur Wirkung der N-Düngermengen zu den Einzelterminen VB, Schossbeginn und BBCH 50 auf den Kornertrag brachte abweichende Ergebnisse (Tab. 68). Die engste Korrelation mit der N-Düngung war noch zu Schossbeginn zu beobachten. Zu diesem Termin wurden 15% der Variabilität des Kornertrags von Raps durch die Höhe der N-Düngung beeinflusst. Weit geringer war der Effekt auf die Ertragsbildung durch eine N-Düngung zu Vegetationsbeginn sowie einer späten Düngung zu Beginn des Knospenschiebens. Hier lagen die R²-Werte bei 0,06 (VB) und 0,01 (BBCH 50). Die Ergebnisse zeigen somit, dass die N-Düngermengen zu den Einzelterminen keinen Ertragseffekt aufweisen, weshalb für das Düngesystem die Gesamt-N-Düngermenge im Frühjahr verwendet wurde.

4.1.7.2 Bestimmung der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr

Wie die eigenen Ergebnisse in Kapitel 4.1.1.1 zeigen, besitzt Winterraps ein breites Düngeoptimum. Somit ist es möglich, die N-Düngermenge ohne deutliche Ertragsverluste zu reduzieren. Aus diesem Grund wurde die optimale N-Düngermenge und nicht die maximale N-

Düngermenge berechnet. Die optimale N-Düngermenge gibt als ökonomische Größe den Punkt an, an dem der über die Ertragssteigerung gewonnene monetäre Grenzertrag den durch eine zusätzliche N-Düngung hervorgerufenen Kosten entspricht (STEINHAUSER et al., 1992).

Vorgehensweise zur Kalkulation der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr

Über die quadratischen Gleichungen der Produktionsfunktion, die aus den N-Steigerungsversuchen der einzelnen Versuchsjahre an den Standorten Roggenstein (2005 bis 2014) und Dürnast (Versuchsjahre 2008 bis 2010) gewonnen wurden, wurde für jeden Standort und jedes Jahr die optimale N-Düngermenge im Frühjahr bestimmt. Dazu wurde die quadratische Produktionsfunktion (Gleichung 22) in die Gleichung zur Berechnung des Gewinns (Gleichung 23) eingesetzt. Über die Ableitung und Umformung dieser neu gebildeten Gleichung wurde die optimale N-Düngermenge bestimmt (Gleichung 24).

$$(22) \quad KE = a \cdot ND^2 + b \cdot ND + c$$

$$(23) \quad G = P_{WR} \cdot KE - P_N \cdot ND - FK$$

$$(24) \quad ND_{opt} = \frac{P_{WR} \cdot b - P_N}{(2 \cdot P_{WR} \cdot a \cdot -1)}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	-	Stauchung/Streckung der Produktionsfunktion
b	-	Steigung der Produktionsfunktion (Verschiebung in x- und y-Richtung)
c	-	Konstante der Produktionsfunktion
ND	kg ha ⁻¹	N-Düngermenge
G	€ ha ⁻¹	Gewinn
P _{WR}	€ ha ⁻¹	Erzeugerpreis für Winterraps (47,9 € dt ⁻¹)
KE	dt ha ⁻¹	Kornertrag
P _N	€ kg ⁻¹	Preis für das kg N als Reinnährstoff (0,94 € kg ⁻¹)
FK	€ ha ⁻¹	sonstige für das Produktionsverfahren anfallende feste Kosten
ND _{opt}	kg ha ⁻¹	optimale N-Düngermenge

Beziehung zwischen der N-Aufnahme der Rapspflanzen und der N-Düngermenge

Wie im vorhergehenden Abschnitt 4.1.7.1 festgestellt, korrelierten die Teildüngermengen zu VB und BBCH 30 kaum mit dem Kornertrag. Somit war es nötig, die Gesamtdüngermenge zu einem frühen Stadium zu bestimmen. Da das Düngesystem für Winterraps auf der N-Aufnahme der Rapspflanzen aufbauen soll, wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr und der N-Aufnahme im Herbst besteht. Dazu wurden die optimalen N-Düngermengen im Frühjahr mit der durchschnittlichen N-Aufnahme im Herbst korreliert (Abb. 17). Wie aus der Regression zu erkennen ist, war die N-Aufnahme im Herbst für 49% der Variation der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr verantwortlich. Gleichzeitig war die Steigung dieser Regression negativ. Das bedeutet, dass jedes zusätzlich im Herbst aufgenommene kg N die N-Düngermenge im Frühjahr reduziert⁷.

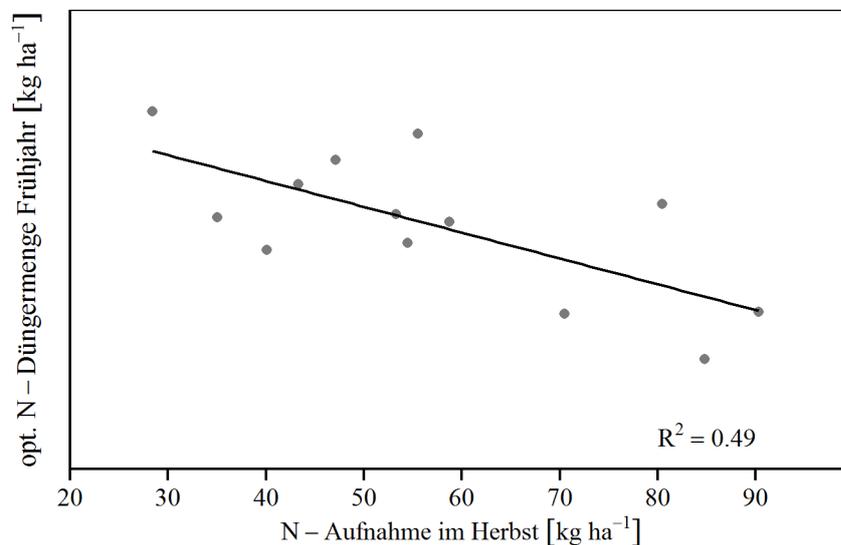


Abb. 17: Lineare Regression zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch Winterraps, Dürnast, 2008 bis 2010).

Dasselbe Verfahren wurde auch für die Düngetermine VB und BBCH 30 durchgeführt. Hierzu wurde die N-Aufnahme zu VB mit der optimalen N-Düngermenge Frühjahr korreliert (Abb. 18). Dafür standen lediglich die Daten aus dem dreijährigen (2012 bis 2014) HE- und NE-Versuch in Roggenstein zur Verfügung. Dabei zeigte sich ein leicht positiver Zusammenhang zwischen der N-Aufnahme zu Vegetationsbeginn und der optimalen N-Düngermenge. Wie an der Steigung der Regressionsgeraden zu erkennen ist, steigt die optimale N-Düngermenge im Frühjahr, wenn sich die N-Aufnahme zu VB um ein Kilogramm N je Hek-

⁷ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Angabe der a- und b-Werte der Regressionsgeraden sowie auf die Beschriftung der Y-Achse in Abb. 17 verzichtet.

tar erhöht⁸. Allerdings war die Beziehung zwischen diesen beiden Größen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,29 als gering einzuordnen.

Für die Regression zwischen der N-Aufnahme zu BBCH 30 und der optimalen N-Düngermenge ab diesem Termin standen erneut langjährige Daten aus dem HE- und NE-Versuch (2005 bis 2014) in Roggenstein sowie dem N-Steigerungsversuch in Dürnast (2007 bis 2010) zur Verfügung. Zu diesem Entwicklungsstadium konnte etwa ein Drittel der Variabilität der optimalen N-Düngermenge durch die N-Aufnahme zu Schossbeginn erklärt werden (Abb. 19). Zugleich führte auch zu diesem Termin ein Anstieg der N-Aufnahme zu BBCH 30 zu einer Reduktion der benötigten optimalen N-Düngermenge⁹.

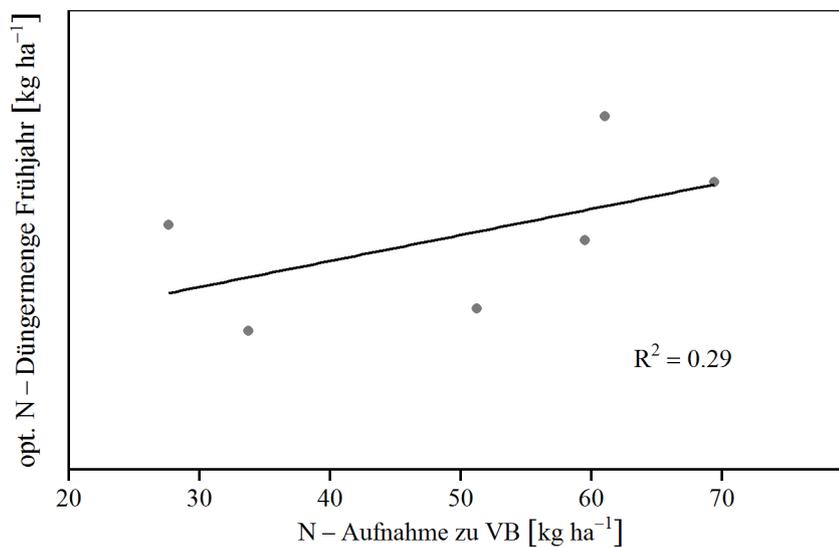


Abb. 18: Lineare Regression zwischen der N-Aufnahme zu VB und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

⁸ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Angabe der a- und b-Werte der Regressionsgeraden sowie auf die Beschriftung der Y-Achse in Abb. 18 verzichtet.

⁹ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Angabe der a- und b-Werte der Regressionsgeraden sowie auf die Beschriftung der Y-Achse in Abb. 19 verzichtet.

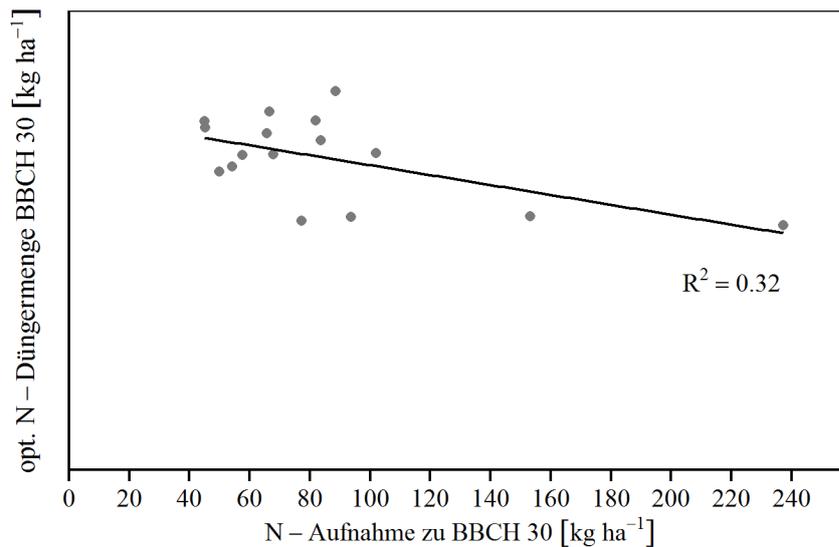


Abb. 19: Lineare Regression zwischen der N-Aufnahme zu BBCH 30 und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr (N-Steigerungsversuch HE Wintertraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Wintertraps, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch Wintertraps, Dürnast 2008 bis 2010).

Zusammenfassend korrelierte die N-Aufnahme im Herbst vor Vegetationsende am besten mit der N-Düngermenge im Frühjahr, weshalb dieser Zeitpunkt für die Bestimmung der teilflächenspezifischen, entwicklungsangepassten N-Düngung im Frühjahr zu nutzen ist. Diese kann über die mit einem Sensor gemessene Reflexion der Rapspflanzen im Herbst vor Vegetationsende geschätzt werden. Das Verfahren dazu sowie der passende Vegetationsindex wurden bereits in Kapitel 4.1.6.1 beschrieben. Alternativ zu Sensormessungen kann als Richtwert zur Bemessung der N-Aufnahme im Herbst auch die Schnittmethode verwendet werden (vgl. Kapitel 4.1.6.2).

Reduzierung der N-Düngermenge bei einem akzeptierten Ertragsverlust von 1%

Bereits im Abschnitt 4.1.1.1 wurde deutlich, dass bei Raps ab einer bestimmten N-Düngermenge eine Erhöhung der N-Applikationsmenge nur noch zu geringen Ertragszuwächsen führt. Der Grund dafür liegt in dem breiten N-Optimum, wie die Regressionskurven aus der Korrelation zwischen der N-Düngermenge im Frühjahr und dem Kornertrag für die Jahre 2009 und 2014 auf dem HE-Standort in Roggenstein beispielhaft zeigen (Abb. 20). So konnte die N-Düngermenge im Versuchsjahr 2009, die zum Erreichen des Maximalertrags nötig war, bei einem gleichzeitigen Ertragsrückgang von 1% um $27,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ zurückgenommen werden. Wurden 2% weniger Ertrag akzeptiert, so war es möglich, $38,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ einzusparen. Im Versuchsjahr 2014 konnten bei akzeptierten Ertragseinbußen von 1% $28,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ und von 2% $40,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ eingespart werden.

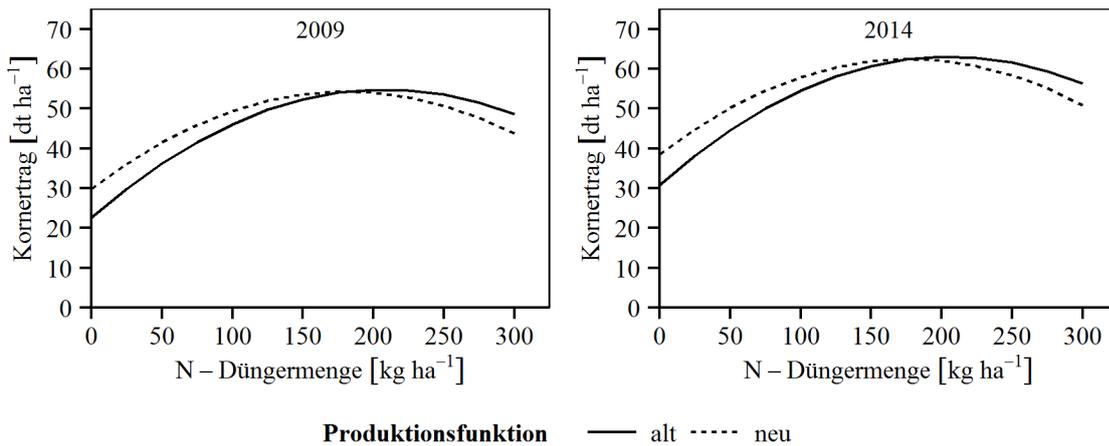


Abb. 20: Verlauf der Produktionsfunktion ohne (alt) und mit (neu) akzeptiertem Ertragsrückgang von 1% in Abhängigkeit der N-Düngung und des Kornertrags (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2009 und 2014).

Dieser Effekt, dass bei Raps eine deutliche Reduzierung der N-Düngermenge ohne merkliche Ertragsverluste möglich ist, sollte für das Düngesystem genutzt werden. Um die Ertragsverluste bei einer gleichzeitig möglichst großen Einsparung von Mineraldünger-N so gering wie möglich zu halten, wurde eine weitere Regressionsgleichung erstellt, bei der mit optimalen N-Düngermengen für 1% geringere Kornerträge gerechnet wurde. Diese neuen Daten für die optimale N-Düngermenge im Frühjahr wurden mit der N-Aufnahme im Herbst korreliert (Abb. 21). Auch hier bestand eine negative Beziehung zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr. Im Vergleich zur ersten Berechnung verschob sich durch die Akzeptanz eines Ertragsverlustes von 1% und der damit verbundenen geringeren benötigten N-Düngermenge die Regressionsgerade auf der Y-Achse nach unten¹⁰.

¹⁰ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Angabe der a- und b-Werte der Regressionsgeraden sowie auf die Beschriftung der Y-Achse in Abb. 21 verzichtet.

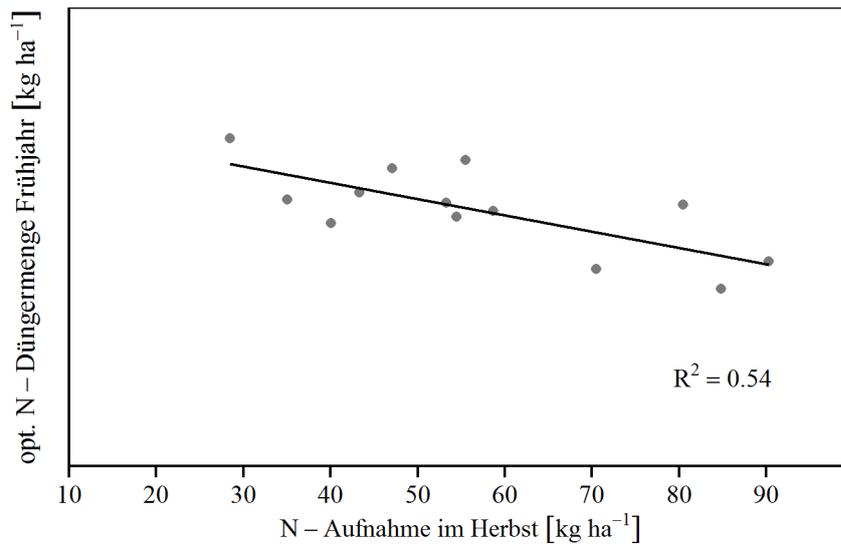


Abb. 21: Regression zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch Winterraps, Dürnast, 2008 bis 2010).

Die Gleichung 25 zeigt beispielhaft die Berechnung der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr mit der Regressionsgleichung bei einem akzeptierten Ertragsverlust von 1%. Für die weitere Entwicklung des Düngesystems diene diese Regressionsgleichung als Referenzgerade.

$$(25) \quad \text{NDF}_{\text{opt}} = a \cdot \text{NAH}_{\text{akt}} + b$$

$$(26) \quad \text{NDF}_{\text{opt}} = (a \cdot \text{NAH}_{\text{akt}} + b) + (\text{NEnt}_{\text{akt}} - \text{NEnt}_{\text{Ref}})$$

$$(27) \quad \text{NDF}_{\text{opt}} = (a \cdot \text{NAH}_{\text{akt}} + b) + (\text{NEnt}_{\text{akt}} - \text{NEnt}_{\text{Ref}}) \cdot (0,91 + (1,3\% \cdot (\text{KE}_{\text{akt}} - \text{KE}_{\text{Ref}})))$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
NDF_{opt}	kg ha^{-1}	optimale N-Düngermenge im Frühjahr
a	-	Steigung der Referenzgeraden
b	-	Y-Achsenabschnitt der Referenzgeraden
NAH_{akt}	kg ha^{-1}	aktuelle N-Aufnahme im Herbst
NEnt_{akt}	kg ha^{-1}	N-Entzug Korn des Teilschlags
NEnt_{Ref}	kg ha^{-1}	N-Entzug Korn der Referenzgeraden
KE_{akt}	dt ha^{-1}	erwarteter Kornertrag des Teilschlags
KE_{Ref}	dt ha^{-1}	Kornertrag der Referenzgeraden

4.1.7.3 Anpassung der Düngefunktion an verschiedene Ertragsniveaus

Die zuvor in Abb. 21 beschriebene Regressionsgerade wurde für eine durchschnittliche Ertragsleistung von $53,5 \text{ dt ha}^{-1}$ berechnet und dient somit als Referenzgerade für die Anpassung der N-Düngung an unterschiedliche Ertragszonen. Um die Ertragsfähigkeit des jeweiligen Standortes miteinfließen zu lassen, muss diese Gerade auf der Y-Achse unter Beibehaltung der Steigung verschoben werden. Die Differenz zur Referenzgeraden entsteht durch die Ermittlung des N-Entzugs über das Korn. Ist der erwartete Kornertrag demnach geringer oder höher als der der Referenzlinie, so wird der entsprechende aktuelle N-Entzug ($N_{\text{Ent}_{\text{akt}}}$) von dem der Referenzgeraden ($N_{\text{Ent}_{\text{Ref}}}$) subtrahiert bzw. addiert, was zur Verschiebung der Düngergeraden führt (Gleichung 26).

Allerdings ist bei der Verschiebung die unvollständige Verwertung des ausgebrachten N-Düngers zu berücksichtigen. Wie die Auswertung der Versuchsergebnisse an den Standorten Roggenstein und Dürnast zeigt, lag die prozentuale N-Verwertung der Frühjahrs-N-Düngung auf dem ertragsschwachen Schlag durchschnittlich bei 79,1% und auf den Feldern mit hohem Ertragspotential bei 91,4% (Tab. 69). Im Mittel der Jahre wurden auf diesen Flächen $43,2 \text{ dt ha}^{-1}$ (NE) bzw. $52,9 \text{ dt ha}^{-1}$ (HE) geerntet. Damit sinkt die N-Verwertung in diesem Ertragsbereich mit Abnahme der Ertragserwartung um eine Dezitonne um durchschnittlich 1,3%. Da nicht mehr Daten für ertragsschwächere und ertragsstärkere Standorte zur Verfügung standen, wurde dieser Wert von 1,3% als Standardwert für die Zu- bzw. Abnahme der N-Verwertung bei einer Veränderung der Ertragserwartung um eine Dezitonne verwendet.

Tab. 69: Durchschnittliche N-Verwertung im Frühjahr und das mittlere Ertragsniveau der HE- und NE-Zonen (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch Winterraps, Dürnast, 2008 bis 2010).

Standort	N-Verwertung Frühjahr [%]	mittl. Ertragsniveau [dt ha ⁻¹]
HE-Standort	91,4	52,9
NE-Standort	79,1	43,2

Ausgehend von der hohen durchschnittlichen Ertragsleistung, die sich für die Referenzgerade ergab, kann hier die für den HE-Standort ermittelte N-Verwertung (Tab. 69) von 91,4% angesetzt werden. Diese reduziert sich auf Standorten mit geringerer Ertragserwartung um 1,3% pro dt Kornertrag. Um die Höhe der Reduzierung bestimmen zu können, war es nötig die Differenz zwischen dem erwarteten aktuellen Kornertrag und dem Kornertrag der Referenzgera-

den zu bilden. Multipliziert mit der Differenz zwischen dem erwarteten aktuellen N-Entzug über das Korn und dem N-Entzug der Referenzgeraden führt dieses Verfahren dazu, dass sich die Düngegerade weniger weit nach unten verschiebt und damit mehr Mineral-N-Dünger ausgebracht wird (Gleichung 27).

Mit Ertragsniveaus über dem der Referenzgeraden wurde wie in Gleichung 27 verfahren. Über 60 dt ha^{-1} allerdings erreichte die N-Verwertung 100%, so dass bei höheren Kornerträgen dieser Faktor nicht mehr berücksichtigt zu werden braucht. Über dieses Verfahren ist es nun möglich, die N-Düngermenge im Frühjahr standortangepasst und in Abhängigkeit des Ertragspotentials zu berechnen. Ein Beispiel über den Verlauf der Düngegeraden zeigt die Abb. 22¹¹.

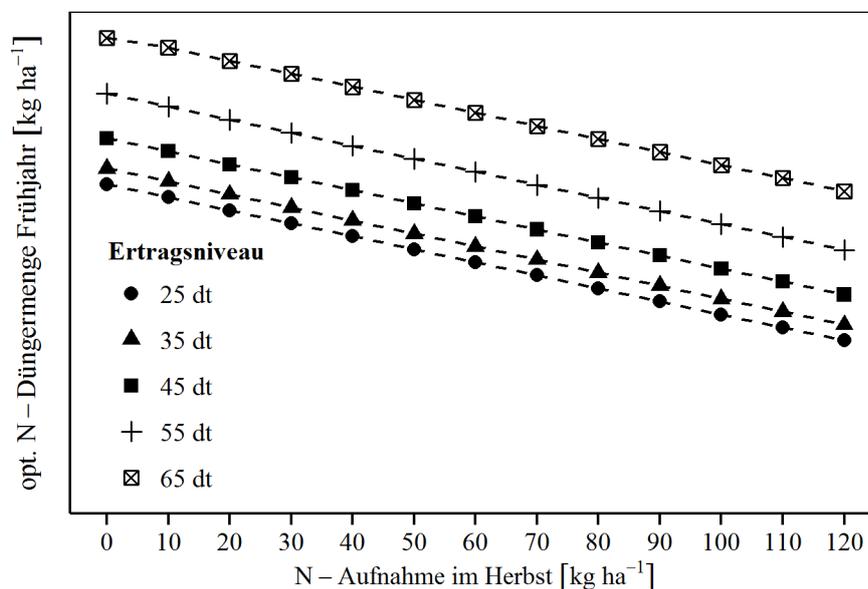


Abb. 22: Düngekurven für die optimale N-Düngermenge von Winterraps im Frühjahr in Abhängigkeit der N-Aufnahme im Herbst für verschiedene Ertragsniveaus.

4.1.7.4 N-Verteilung in Abhängigkeit der Winterwitterung

Neben der Höhe der N-Düngergabe beeinflusst die N-Düngerverteilung die Ertragsbildung von Raps sowie die Effizienz des eingesetzten N. Wie bereits in Kapitel 4.1.1.1 beschrieben, waren diejenigen Varianten tendenziell überlegen, die ein Drittel der gesamten N-Düngermenge im Frühjahr als Startgabe und die verbleibenden zwei Drittel der N-Düngermenge zu Schossbeginn erhielten. Diese N-Verteilung ist im Dünagesystem allerdings nicht statisch, sondern muss in Abhängigkeit der Auswinterungsschäden verändert werden.

¹¹ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Y-Achsenbeschriftung in Abb. 22 verzichtet.

So ist es, wie die Auswertung des Versuchsjahres 2007 zeigt, nach milden Wintern ohne Auswinterungsschäden besser, die Startgabe zu VB gering zu halten und erst die Folgegabe zu betonen (N 5 und N 10) (Tab. 70). In diesem Jahr war es sogar sinnvoll, die gesamte N-Düngermenge von 160 kg ha⁻¹ ohne eine N-Gabe zu VB erst zu Schossbeginn (N 23) zu applizieren. Eine zu späte N-Düngung war allerdings auch nach diesem sehr milden Winter unproduktiv und führte zu einem Ertragsverlust von 2,6 dt ha⁻¹. Ähnliche Ergebnisse wurden nach dem sehr milden Winter 2013/2014 beobachtet. Allerdings waren die Ertragsunterschiede zwischen den einzelnen N-Stufen wesentlich geringer.

Nach harten Wintern mit übermäßigem Blattverlust, wie 2009 und 2012, wurde dagegen in denjenigen Parzellen mehr geerntet, die eine hohe Startgabe mit 120 kg ha⁻¹ Mineraldünger-N erhielten (Tab. 70). Unter solchen winterlichen Bedingungen war der ertragssteigernde Effekt einer frühbetonten N-Gabe vor allem in den N-Stufen, die im Herbst ohne N-Versorgung blieben, besonders auffällig. Im Schnitt der Jahre 2009 und 2012 wurden in der N 7 2,1 dt ha⁻¹ mehr gemessen als in der schwach angedüngten N 5. Dieser Effekt war in den mit 20 kg ha⁻¹ N im Herbst versorgten Parzellen deutlich geringer. Im Vergleich zu der aufgeteilten Düngergabe schnitt 2009 und 2012 eine einmalige Düngergabe von 160 kg ha⁻¹ N zu VB besser ab. Wurde diese Menge ohne eine Gabe zu VB erst zu einem späteren Zeitpunkt gestreut (N 23 bzw. N 24), so konnten die Rapspflanzen das Ertragspotential nicht voll ausschöpfen.

Tab. 70: Mittlere Kornträge [dt ha⁻¹] von Jahren mit schwachen (2007 & 2014) und starken Auswinterungsschäden (2009 & 2012), ausgewählte N-Stufen (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2007, 2009, 2012, 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]					schwache Auswinterung		starke Auswinterung	
	Herbst	VB	BBCH 30	BBCH 50	Summe	Jahr		Jahr	
						2007	2014	2009	2012
N 5	0	60	120	0	180	52,7 ab	61,9 a	53,5 ab	57,6 a
N 7	0	120	60	0	180	52,3 ab	60,5 a	54,7 a	60,5 a
N 10	20	60	120	0	200	55,78 b	62,2 a	54,3 a	60,7 a
N 12	20	120	60	0	200	51,3 ab	62,0 a	54,6 a	60,9 a
N 22	40	160	0	0	200	48,7 a	61,6 a	55,6 a	61,9 a
N 23	40	0	160	0	200	55,3 b	61,3 a	54,5 a	59,8 a
N 24	40	0	0	160	200	52,7 ab	-	51,1 a	59,1 a

4.1.8 Streifenversuch Winterraps

Um das für Winterraps abgeleitete sensorbasierte Düngesystem (Online + Mapping) unter Praxisbedingungen zu testen, wurde 2013 ein Streifenversuch angelegt. Zum Vergleich wurden ein teilschlagspezifisches Verfahren Mapping sowie eine schlageinheitlich gedüngte, nach der Empfehlung des Düngberatungssystems Stickstoff der LfL berechnete Variante DSN geprüft. Durch die Kombination der Onlinemessung und des Ertragspotentials des Teilschlags konnte die N-Düngermenge um 73,0 kg ha⁻¹ gegenüber dem Verfahren DSN gesenkt werden. Beim Verzicht auf die Sensorunterstützung und bei alleiniger Berücksichtigung der Ertragszonen lag das Reduktionspotential bei 50,6 kg ha⁻¹ N (Tab. 71).

Tab. 71: Mittelwerte für die applizierte N-Düngermenge, den Kornertrag, den Öl- und Proteingehalt und die NKfL unterschiedlicher Düngerverfahren (Streifenversuch Winterraps, Roggenstein, 2013).

Düngerverfahren	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]	Kornertrag [dt ha ⁻¹]	Ölgehalt [%]	Proteingehalt [%]	NKfL [€ ha ⁻¹]
DSN	206,0 a	53,6 a	42,6 a	20,2	2472,1 a
Mapping	155,4 b	49,8 b	43,2 b	19,5	2352,1 b
Online + Mapping	133,0 c	48,4 c	43,5 c	19,2	2310,8 b

Diese geringen N-Düngermengen zogen eine deutliche Ertragsminderung nach sich. So erreichten die Verfahren Online + Mapping und Mapping nur 90% bzw. 93% des Kornertrags der nach dem Verfahren DSN gedüngten Parzellen. Bei genauerer Betrachtung der Teilschläge zeigte sich, dass nur im HE-Standort (50 dt ha⁻¹ Ertragserwartung) kein Unterschied zwischen den Düngerverfahren bestand (Tab. 72). Im Gegensatz zur Variante DSN, die auf allen Teilschlägen gleich hohe Kornerträge erzielte, sanken die Druschergebnisse der anderen Düngesysteme auf 46,2 dt ha⁻¹ (Mapping) bzw. 43,2 dt ha⁻¹ (Online + Mapping) auf dem NE-Standort.

Tab. 72: Mittlerer Kornertrag [dt ha⁻¹] in den Düngerverfahren DSN, Mapping sowie Online + Mapping, aufgetragen nach Ertragsniveau (Streifenversuch Winterraps, Roggenstein, 2013).

Düngerverfahren	Ertragsniveau [dt ha ⁻¹]		
	30	40	50
DSN	53,6 a	53,3 a	54,0 a
Mapping	46,2 b	50,2 b	52,2 a
Online + Mapping	43,2 c	48,9 b	52,4 a

Der Qualitätsparameter Proteingehalt war von der N-Düngermenge beeinflusst. Die Variante DSN wies einen um 1,0% (absolut) höheren Proteingehalt auf als die Parzellen des Verfahrens Online + Mapping (Tab. 72). Aufgrund der hohen signifikanten Wechselwirkung zwischen den Hauptfaktoren Düngeverfahren und Ertragsniveau war hier kein Mittelwertvergleich möglich (Tab. A 8). Genau gegenläufig zum Proteingehalt verhielt sich die Größe Ölgehalt, die den Maximalwert (43,5%) in der Variante Online + Mapping erreichte.

Bedingt durch die hohen Kornerträge wurde in den nach DSN gedüngten Parzellen die höchste NKfL erzielt (2472,1 € ha⁻¹). Der geringere N-Aufwand sowie der etwas höhere Ölgehalt in den Verfahren Mapping und Online + Mapping konnten die durch die geringeren Kornerträge aufgetretenen monetären Verluste bei weitem nicht ausgleichen. Somit belief sich der Verlust des Einsatzes dieser beiden Düngesysteme gegenüber der DSN auf -120,1 € ha⁻¹ (Mapping) und -161,3 € ha⁻¹ (Online + Mapping).

Einhergehend mit den hohen Kornerträgen und hohen Proteinkonzentrationen im Verfahren DSN entzog Raps in dieser Variante am meisten N (157,4 kg ha⁻¹) über das Korn (Tab. 73). Infolge der geringeren N-Düngermengen und damit reduzierten Kornerträgen bei den Verfahren Mapping und Online + Mapping war der N-Entzug Korn verringert.

Tab. 73: Mittelwerte für den N-Entzug über die applizierte N-Düngermenge, den Kornertrag, den Öl- und Proteingehalt und die NKfL unterschiedlicher Düngeverfahren (Streifenversuch Winter-raps, Roggenstein, 2013).

Düngeverfahren	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [kg kg ⁻¹]
DSN	157,4 a	48,6 a	26,0 a
Mapping	141,8 b	13,6 b	32,7 b
Online + Mapping	135,8 c	-2,8 c	38,8 c

Gemittelt über alle Teilschläge verblieben auf den nach DSN einheitlich gedüngten Parzellen 48,6 kg ha⁻¹ N. Dagegen war der N-Saldo in den Verfahren Mapping sowie Online + Mapping nahezu ausgeglichen. Bei einer detaillierten Betrachtung des N-Saldos auf den Teilschlägen zeigte sich allerdings ein anderes Bild (Abb. 23). Im Verfahren DSN war der N-Saldo über alle Teilstücke annähernd gleich hoch. Anders verhielt sich diese Größe in den nach dem Mappingverfahren gedüngten Parzellen. Infolge der geringeren N-Düngermengen auf den ertragsschwächeren Teilflächen sank der N-Saldo auf bis zu -11 kg ha⁻¹. Mit Sensorunterstützung wurde auf dem 30 dt ha⁻¹ Teilschlag noch mehr N entzogen als über Mineraldünger zu-

geführt wurde ($-30,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$). Dieselbe Menge N blieb in dieser Variante auf dem HE-Standort zurück.

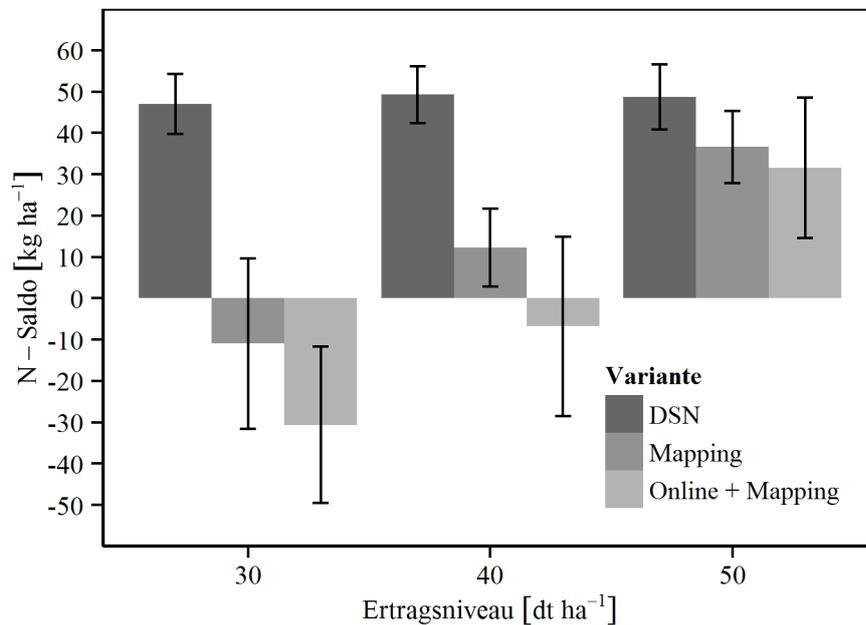


Abb. 23: Mittlerer N-Saldo der Düngeverfahren DSN, Mapping und Online + Mapping für unterschiedliche Ertragsniveaus (Streifenversuch Winterraps Roggenstein, 2013).

Die N-Effizienz von Raps wurde in diesem Versuch deutlich von der N-Düngermenge beeinflusst (Tab. 73). Mit der hohen schlageinheitlichen N-Düngermenge des Verfahrens DSN wurden durchschnittlich $26,0 \text{ kg Korn je kg Mineraldünger-N}$ produziert. Die sinkenden N-Düngermengen hatten bereits in der Variante Mapping einen Anstieg auf $32,7 \text{ kg kg}^{-1}$ zur Folge. Im Verfahren Online + Mapping, in dem die N-Aufnahme im Herbst und das Ertragsniveau für die Berechnung der N-Düngermenge im Frühjahr berücksichtigt werden, wurde der Mineraldünger-N am effizientesten verwertet.

4.2 Ergebnisse – Wintergerste

4.2.1 Wirkung gestaffelter N-Gaben zu zwei- und mehrzeiliger Wintergerste

Die Auswertung der Kornertragsdaten basiert auf den Daten des N-Steigerungsversuchs für zweizeilige und mehrzeilige Wintergerste auf dem HE-Standort und dem NE-Standort in Roggenstein in den Jahren 2012 bis 2014.

Neben dem Kornertrag wurden die Variablen Proteingehalt, N-Entzug über das Korn, N-Saldo und N-Effizienz hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von den Faktoren N-Stufe, Sortentyp und Ort varianzanalytisch untersucht. Da bei keiner der Variablen eine Normalverteilung der Residuen vorlag, wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Nach diesem Test hatten die unabhängigen Faktoren durchgehend einen sehr hochsignifikanten Effekt (Tab. 74).

Tab. 74: F-Werte und Signifikanzen des Kruskal-Wallis-Tests für die abhängigen Variablen Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug Korn, N-Saldo und N-Effizienz mit den unabhängigen Faktoren N-Stufe, Sortentyp und Standort (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	Kornertrag	Proteingehalt	N-Entzug	N-Saldo	N-Effizienz
N-Stufe	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***
Sortentyp	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***
Standort	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***

Aus diesem Grund wurde eine Varianzanalyse getrennt nach Standorten für jeden Sortentyp berechnet. Als unabhängige Faktoren wurden die N-Stufe und das Jahr hinsichtlich deren Einfluss auf die abhängigen Variablen Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug über das Korn, N-Saldo sowie N-Effizienz getestet (Tab. 75). Sowohl bei zweizeiliger als auch bei mehrzeiliger Wintergerste erwiesen sich diese Hauptfaktoren für alle abhängigen Variablen als höchstsignifikant. Auf dem HE-Standort war der Effekt des Jahres durchwegs stärker ausgeprägt als der der N-Stufe. Auf dem NE-Standort war der Jahres- und Düngungseinfluss weniger deutlich. Bei den meisten Variablen war die Wechselwirkung zwischen den Hauptfaktoren höchstsignifikant. Jedoch waren die F-Werte der Interaktionen durchgehend deutlich geringer als die der Hauptwirkungen, weshalb Mittelwertvergleiche möglich waren.

Tab. 75: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die unabhängigen Variablen Kornertrag, Proteingehalt, N-Entzug Korn, N-Saldo und N-Effizienz mit den unabhängigen Faktoren N-Stufe und Jahr, nach Sortentyp und Standort getrennt (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Sortentyp	Standort	Faktor	Kornertrag	Proteingehalt	N-Entzug	N-Saldo	N-Effizienz
zz	HE	N-Stufe	221,2***	67,9***	222,6***	52,8***	378,5***
		Jahr	1023,9***	292,3***	281,0***	289,1***	1025,8***
		N-Stufe*Jahr	5,6***	4,1***	8,1***	7,9***	3,5***
	NE	N-Stufe	12,0***	82,4***	83,4***	45,4***	57,3***
		Jahr	13,1***	85,3***	186,0***	186,0***	11,3***
		N-Stufe*Jahr	0,9	3,3***	2,9***	2,9***	0,9
mz	HE	N-Stufe	260,3***	27,3***	168,7***	35,3***	691,7***
		Jahr	1744,9***	133,4***	288,3***	275,8***	1442,7***
		N-Stufe*Jahr	5,0***	1,5	3,4***	4,1***	5,2***
	NE	N-Stufe	9,0***	51,3***	46,9***	34,1***	64,2***
		Jahr	17,3***	120,4***	181,9***	188,2***	14,3***
		N-Stufe*Jahr	1,7*	1,8*	3,5***	3,1***	1,0

4.2.1.1 Kornertrag und Proteingehalt

Kornertrag

Im dreijährigen Versuchsdurchschnitt erreichte die zweizeilige Wintergerste auf dem HE-Standort einen Kornertrag von 96,3 dt ha⁻¹ (Tab. 76). Ohne mineralische N-Düngung (N 1) wurden 36,9 dt ha⁻¹ geerntet. Eine N-Düngermenge von 70 kg ha⁻¹ (N 2) reichte bereits für eine Verdoppelung des Kornertrags gegenüber der ungedüngten Variante aus. Bei der doppelten Menge Mineraldünger-N (N 5) erhöhte sich der Kornertrag um 21,6 dt ha⁻¹ auf 97,3 dt ha⁻¹, was 89% des Maximalertrags (109,0 dt ha⁻¹) in der N 15 entspricht. Um diesen Ertrag zu erreichen, waren zusätzliche 90 kg ha⁻¹ N nötig. Dies entspricht pro Dezitonne Mehrertrag einem N-Aufwand von 7,7 kg ha⁻¹. Neben der N-Menge beeinflusste auch die Verteilung der N-Düngergaben die Ertragsbildung. Allerdings war in den Varianten mit gleicher N-Menge und unterschiedlicher Verteilung kein statistisch gesicherter Unterschied nachzuweisen und damit waren allenfalls Tendenzen zu erkennen. Bis auf die Varianten mit 160 kg ha⁻¹ N (N 6, N 7) wurde mehr Ertrag gebildet, wenn zu Vegetationsbeginn stärker gedüngt wurde. Wie in den mit 200 kg ha⁻¹ N versorgten N-Stufen (N 10 bis N 13) zu sehen ist,

verbesserte neben einer kräftigen Startgabe eine hohe zweite Gabe in Kombination mit einer geringen dritten N-Applikation den Kornertrag.

Tab. 76: Mittlerer Kornertrag [dt ha⁻¹] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				zweizeilig		mehrzeilig	
	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe	HE	NE	HE	NE
N 1	0	0	0	0	36,9 a	40,6 a	46,5 a	46,9 a
N 2	40	30	0	70	75,7 b	73,9 b	92,7 b	82,2 b
N 3	40	30	40	110	93,0 c	84,2 bc	105,5 c	90,8 b
N 4	40	60	40	140	96,0 cd	86,1 bc	112,8 d	90,5 b
N 5	70	30	40	140	97,3 cde	88,3 bc	114,2 de	91,0 b
N 6	40	120	0	160	102,2 def	88,8 bc	117,7 de	90,8 b
N 7	70	90	0	160	101,2 def	93,9 c	115,7 de	95,1 b
N 8	70	30	70	170	101,8 defg	89,1 bc	116,2 de	93,8 b
N 9	70	60	40	170	100,8 def	88,8 bc	118,4 de	94,3 b
N 10	70	60	70	200	102,1 efg	90,6 bc	119,5 de	94,1 b
N 11	70	90	40	200	107,2 gh	92,6 c	120,9 e	90,5 b
N 12	40	90	70	200	106,4 fgh	88,9 bc	121,9 e	94,7 b
N 13	40	120	40	200	103,9 fgh	79,8 bc	120,7 de	84,9 b
N 14	90	90	40	220	107,7 gh	89,1 bc	120,3 de	93,1 b
N 15	70	120	40	230	109,0 h	85,9 bc	121,3 e	92,7 b
N 16	40	90	40	170	101,1 def	80,6 bc	117,9 de	84,1 b
Mittelwert					96,3 a	83,7 b	111,5 a	88,1 b

Auf dem NE-Standort wurde bei zweizeiliger Wintergerste ein durchschnittlicher Kornertrag von 83,7 dt ha⁻¹ erreicht. Die ungedüngte Variante brachte 40,6 dt ha⁻¹ Ertrag. Mit einer N-Gabe von 70 kg ha⁻¹ wurden auf diesem Standort 73,9 dt ha⁻¹ geerntet. Eine Verdoppelung dieser N-Düngermenge (N 5) erhöhte den Kornertrag um 16% (88,3 dt ha⁻¹), was bedeutet, dass in dieser Variante die N-Menge und die Verteilung für 94% des Maximalertrages (N 7) ausreichen. Der Effekt der N-Düngerverteilung war auf dem NE-Standort deutlicher als auf dem HE-Standort. So reagierte die zweizeilige Sorte mit Ertragszuwächsen auf hohe Startgaben. Besonders ausgeprägt war dieser Effekt in den 170 kg ha⁻¹ N Varianten. Hier steigerte eine kräftige Startgabe in der N 9 den Kornertrag gegenüber der N 16 mit einer eher geringen Startgabe um 8,2 dt ha⁻¹.

Wie aus dem durchschnittlichen Ertragsniveau von mehrzeiliger Wintergerste auf dem HE-Standort ($111,5 \text{ dt ha}^{-1}$) zu erkennen ist, war dieser Sortentyp leistungsfähiger als zweizeilige Wintergerste. Die ungedüngte Variante brachte $46,5 \text{ dt ha}^{-1}$ Kornertrag. Eine N-Düngung von 70 kg ha^{-1} (N 2) verdoppelte den Kornertrag nahezu. Der Maximalertrag wurde in der N 12 mit 200 kg ha^{-1} Gesamt-N-Düngermenge geerntet ($121,9 \text{ dt ha}^{-1}$). Die N 15 (230 kg ha^{-1} N) erreichte ein ähnliches Niveau. Allerdings zeigt die Versuchsauswertung auch, dass bereits mit 140 kg ha^{-1} N bei einer frühbetonten N-Düngung (N 5) knapp 94% des höchsten Kornertrages erzielt werden konnten. In der Tendenz führte bei mehrzeiliger Wintergerste eine geringere Startgabe bei gleicher N-Gesamtmenge zu leicht höheren Kornerträgen als eine frühbetonte Düngestrategie.

Das Ertragsniveau des NE-Standortes lag 21% unter dem des HE-Standortes. Während die ungedüngte Variante den gleichen Kornertrag wie auf dem HE-Standort erzielte, stieg der Kornertrag bei einer N-Düngermenge von 140 kg ha^{-1} auf $91,0 \text{ dt ha}^{-1}$ (N 5). Der Maximalertrag wurde mit 160 kg ha^{-1} N (N 7) erreicht. Wie beim zweizeiligen Sortentyp führte auch bei mehrzeiliger Gerste eine kräftige Startgabe zu tendenziell höheren Kornerträgen als eine spätbetonte N-Düngung.

Proteingehalt

Auf den Proteingehalt hatten neben der Standortwahl auch der Sortentyp sowie die N-Düngung einen Einfluss. Im dreijährigen Mittel wurde beim zweizeiligen (mehrzeiligen) Sortentyp auf dem HE-Standort ein Proteingehalt von 12,7% (13,0%) und auf dem NE-Standort von 14,0% (14,4%) gemessen (Tab. 77).

Bei der zweizeiligen Wintergerste wurde auf dem HE-Standort in der Parzelle ohne N-Düngung der geringste Proteingehalt analysiert (9,2%). Steigende N-Düngermengen verursachten einen signifikanten Anstieg auf maximal 14,0% (N 12). Eine weitere Steigerung der N-Düngermenge hatte keinen Effekt mehr auf den Proteingehalt im Korn. Das geringe Nährstoffspeichervermögen des NE-Standortes zeigte sich in der Kornqualität der zweizeiligen Gerste. In den ungedüngten Varianten wurden nur 8,0% Proteingehalt ermittelt. Mit steigender N-Menge erhöhte sich der Proteingehalt signifikant auf bis zu 16,4% in der N 13.

Mehrzeilige Wintergerste erzielte sowohl auf dem HE- als auch auf dem NE-Standort leicht höhere Proteingehalte als zweizeilige Gerste (Tab. 77). Auch dieser Sortentyp bildete Protein in Abhängigkeit der N-Düngermenge sowie der Verteilung des N-Düngers. So erhöhte sich

dieser Qualitätsparameter mit steigender Gesamt-N-Düngermenge von 10,8% (N 1) auf 14,3% (N 15) auf dem HE-Standort und von 9,1% (N 1) auf 16,5% (N 13) auf dem NE-Standort.

Auf beiden Standorten wurden sowohl bei zweizeiliger als auch bei mehrzeiliger Wintergerste hohe Proteingehalte erreicht, wenn neben der zweiten N-Applikation zum Zweiknotenstadium die letzte Gabe zu BBCH 39 betont wurde.

Tab. 77: Mittlerer Proteingehalt [%] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				zweizeilig		mehrzeilig	
	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe	HE	NE	HE	NE
N 1	0	0	0	0	9,2 a	8,0 a	10,8 a	9,1 a
N 2	40	30	0	70	9,5 a	10,0 b	10,9 ab	11,4 b
N 3	40	30	40	110	12,0 b	12,4 c	11,8 bc	13,2 c
N 4	40	60	40	140	12,3 bcd	14,0 d	12,6 cd	14,4 cd
N 5	70	30	40	140	12,1 bc	13,6 cd	12,5 cde	14,0 cd
N 6	40	120	0	160	12,7 cdef	14,0 d	13,1 cdef	14,7 cde
N 7	70	90	0	160	12,3 bcde	13,7 d	12,8 defg	14,1 def
N 8	70	30	70	170	13,3 fgh	14,8 def	13,7 defg	14,9 def
N 9	70	60	40	170	12,8 defg	14,3 de	13,0 defgh	14,7 defg
N 10	70	60	70	200	13,9 hi	15,4 def	14,0 efgh	15,2 defgh
N 11	70	90	40	200	13,5 ghi	15,4 def	13,5 fgh	15,3 defgh
N 12	40	90	70	200	14,0 i	15,8 ef	13,8 fgh	15,9 efgh
N 13	40	120	40	200	13,8 hi	16,4 f	13,9 gh	16,5 fgh
N 14	90	90	40	220	13,8 hi	15,5 def	13,8 gh	16,1 gh
N 15	70	120	40	230	14,0 i	16,1 f	14,3 h	16,2 gh
N 16	40	90	40	170	13,0 efg	15,4 def	13,4 h	15,6 h
Mittelwert					12,7 a	14,0 b	13,0 a	14,4 b

4.2.1.2 N-Entzug über das Korn

Der N-Entzug über das Korn ist das Produkt aus dem Kornertrag und dem N-Gehalt. Zwischen dem N-Entzug über das Korn des HE-Standortes und des NE-Standortes bestand bei der zweizeiligen Wintergerste ein deutlicher Unterschied. Im dreijährigen Mittel wurden 171,5 kg ha⁻¹ N (HE) bzw. 154,3 kg ha⁻¹ N (NE) entzogen (Tab. 78). Ohne N-Düngung wur-

den auf dem HE-Standort über das Erntegut $49,1 \text{ kg ha}^{-1}$ N abgefahren. Steigende N-Düngermengen hatten höhere N-Entzüge zur Folge. Ein Effekt der Verteilung konnte statistisch nicht eindeutig belegt werden. In den 200 kg ha^{-1} N Varianten (N 10 bis N 13) wurde nach einer schwachen Startgabe in Kombination mit einer hohen Abschlussdüngung (N 12) tendenziell mehr N über das Korn abgefahren, als in den frühbetonten N-Stufen N 10 und N 11.

Auf dem NE-Standort wurden zwischen $44,8 \text{ kg ha}^{-1}$ N (N 1) und $184,2 \text{ kg ha}^{-1}$ N (N 11) von den Körnern aufgenommen. Auf diesem Standort führte bei gleicher N-Gesamtmenge eine frühbetonte N-Düngung der Varianten N 5, N 7 und N 11 zu etwas höheren N-Entzügen gegenüber den spätbetonten Vergleichsvarianten.

Tab. 78: Mittlerer N-Entzug über das Korn [kg ha^{-1}] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]				zweizeilig		mehrzeilig	
	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe	HE	NE	HE	NE
N 1	0	0	0	0	49,1 a	44,8 a	66,5 a	57,6 a
N 2	40	30	0	70	102,3 b	98,4 b	136,2 b	122,4 b
N 3	40	30	40	110	149,7 c	134,9 c	175,1 c	154,6 c
N 4	40	60	40	140	160,3 cd	154,7 d	193,6 d	167,9 cd
N 5	70	30	40	140	160,7 cde	155,1 d	195,7 de	166,0 cd
N 6	40	120	0	160	174,2 def	158,6 de	209,1 efg	171,2 cde
N 7	70	90	0	160	173,0 ef	164,3 def	202,0 def	173,0 cde
N 8	70	30	70	170	184,8 fg	169,8 def	217,1 fghi	179,1 de
N 9	70	60	40	170	177,1 f	167,6 def	209,5 efg	183,9 de
N 10	70	60	70	200	198,3 gh	179,3 f	228,6 hij	184,5 de
N 11	70	90	40	200	198,1 h	184,2 f	223,1 ghij	181,1 de
N 12	40	90	70	200	203,2 h	177,6 ef	230,7 ij	193,0 e
N 13	40	120	40	200	196,6 gh	169,4 def	228,8 hij	183,0 de
N 14	90	90	40	220	206,4 h	177,7 ef	227,1 hij	192,7 e
N 15	70	120	40	230	209,5 h	177,3 ef	236,9 j	193,2 e
N 16	40	90	40	170	179,7 f	158,7 de	214,9 fgh	169,4 cde
Mittelwert					171,5 a	154,3 b	200,3 a	167,0 b

Einhergehend mit den höheren Kernerträgen der mehrzeiligen Wintergerste lag der N-Entzug über das Korn für den HE-Standort bei durchschnittlich $200,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tab. 78). In der unge-

düngten Variante N 1 betrug der N-Entzug über das Korn $66,5 \text{ kg ha}^{-1}$ und erhöhte sich mit steigender N-Versorgung auf maximal $236,9 \text{ kg ha}^{-1}$ N (N 15). Eine Betonung der beiden späteren Gaben vermehrte tendenziell die N-Abfuhr über das Korn.

Auf dem NE-Standort lagen die Extremwerte des N-Entzugs über das Korn zwischen $57,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (N 1) und $193,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (N 15).

4.2.1.3 N-Saldo

Infolge der sehr hohen Kornerträge und den damit verbundenen hohen N-Entzügen lag der N-Saldo bei zweizeiliger Wintergerste, die auf dem HE-Standort angebaut wurde, bei durchschnittlich $-11,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tab. 79). Nahezu ausgeglichen fiel der mittlere N-Saldo auf dem NE-Standort aus ($4,2 \text{ kg ha}^{-1}$).

Auf den ungedüngten Parzellen des N-Steigerungsversuchs bei zweizeiliger Wintergerste war der N-Saldo deutlich negativ ($-49,1 \text{ kg ha}^{-1}$). Steigende N-Düngermengen erhöhten den N-Saldo kontinuierlich. Erst mit einer N-Düngermenge von 200 kg ha^{-1} (N 10, N 11, N 13) wurde ein ausgeglichener N-Saldo zwischen $1,7 \text{ kg ha}^{-1}$ und $3,4 \text{ kg ha}^{-1}$ erreicht.

Auf dem NE-Standort war der N-Saldo der ungedüngten Variante deutlich negativ ($-44,8 \text{ kg ha}^{-1}$) (Tab. 79). Bereits 160 kg ha^{-1} Mineraldünger-N reichten auf diesem Feld für eine ausgeglichene N-Bilanz aus (N 6). In dieser N-Variante wurde die zweite N-Gabe stark betont, während die Startgabe eher schwach ausfiel. Höhere N-Düngergaben ließen die N-Salden auf bis zu $52,7 \text{ kg ha}^{-1}$ (N 15) ansteigen. Über alle N-Stufen betrachtet verringerte sich der N-Saldo bei einer kräftigen Startgabe in Kombination mit einer geringen Abschlussdüngung (N 5, N 7, N 11), während eine geringe Startgabe und eine hohe zweite bzw. dritte N-Applikation die N-Verluste ansteigen ließen (N 4, N 6, N 10, N 12, N 13).

Infolge höherer Kornerträge war der mittlere N-Saldo von mehrzeiliger Wintergerste mit $-40,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (HE) und $-8,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (NE) wesentlich niedriger als der N-Saldo des zweizeiligen Sortentyps.

Auf dem HE-Standort lag der N-Saldo in der ungedüngten Variante von mehrzeiliger Gerste bei $-66,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Zwar reduzierten steigende N-Düngermengen bei diesem Sortentyp die negativen N-Salden, allerdings konnten mit den im Versuch gegebenen N-Mengen keine ausgeglichenen N-Salden auf dem HE-Standort erreicht werden. Es waren Unterschiede zwischen den einzelnen N-Varianten bei der Verteilung der N-Menge erkennbar, jedoch konnten sie statis-

tisch nicht voneinander getrennt werden. Um einen möglichst geringen N-Saldo zu erreichen, war es für den mehrzeiligen Sortentyp auf diesem Standort nötig, mit einer kleinen N-Gabe zu VB zu starten und dann die beiden folgenden N-Applikationen deutlich zu erhöhen.

Mit den geringeren N-Entzügen auf dem NE-Standort verringerte sich auch der negative N-Saldo der ungedüngten Parzellen ($-57,6 \text{ kg ha}^{-1}$). Mit steigenden N-Düngermengen reduzierte sich diese negative Bilanz, bis mit einer N-Düngermenge von 170 kg ha^{-1} (N 16) ein ausgeglichener N-Saldo ($0,6 \text{ kg ha}^{-1}$) erzielt wurde. In dieser Variante wurde vor allem die zweite Gabe betont. Deutlich geringer war der N-Saldo, wenn, wie in der N 9, auf eine betonte Start- und Schossergabe eine geringe Abschlussdüngung folgte. Ähnlich reagierte dieser Wert in der 160 kg ha^{-1} N Variante (N 7). Bei den übrigen N-Stufen waren tendenziell die schwach angelegten Varianten im Vorteil.

Tab. 79: Mittlerer N-Saldo [kg ha^{-1}] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]				zweizeilig		mehrzeilig	
	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe	HE	NE	HE	NE
N 1	0	0	0	0	-49,1 a	-44,8 a	-66,5 a	-57,6 a
N 2	40	30	0	70	-32,3 bc	-28,4 ab	-66,2 a	-52,4 a
N 3	40	30	40	110	-39,7 ab	-24,9 b	-65,1 ab	-44,6 ab
N 4	40	60	40	140	-20,3 d	-14,7 bc	-53,6 abcd	-27,9 bc
N 5	70	30	40	140	-20,7 cd	-15,1 bc	-55,7 abc	-26,0 bc
N 6	40	120	0	160	-14,2 de	1,4 cdef	-49,1 bcd	-11,2 cd
N 7	70	90	0	160	-13,0 de	-4,3 cd	-42,0 cdef	-13,0 cd
N 8	70	30	70	170	-14,8 de	0,2 cde	-47,1 bcd	-9,1 cd
N 9	70	60	40	170	-7,1 ef	2,4 cdef	-39,5 def	-13,9 cd
N 10	70	60	70	200	1,7 fg	20,7 fg	-28,6 fg	15,5 ef
N 11	70	90	40	200	1,9 f	15,8 efg	-23,1 g	18,9 efg
N 12	40	90	70	200	-3,2 ef	22,4 g	-30,7 efg	7,0 def
N 13	40	120	40	200	3,4 f	30,6 gh	-28,8 fg	17,0 efg
N 14	90	90	40	220	13,6 gh	42,3 hi	-7,1 h	27,3 fg
N 15	70	120	40	230	20,5 h	52,7 i	-6,9 h	45,1 g
N 16	40	90	40	170	-9,9 ef	11,3 defg	-44,9 bcde	0,6 de
Mittelwert					-11,2 a	4,2 b	-40,5 a	-8,2 b

4.2.1.4 N-Effizienz

In der Auswertung der dreijährigen Daten des N-Steigerungsversuchs in Roggenstein war neben einem höchstsignifikanten Effekt des Sortentyps ein deutlicher Einfluss der Ertragsfähigkeit des Feldes und des N-Düngerregimes nachzuweisen. Die zweizeilige Wintergerste erreichte auf dem HE-Standort eine mittlere N-Effizienz von $62,2 \text{ kg kg}^{-1}$ bzw. auf dem NE-Standort eine N-Effizienz von $54,8 \text{ kg kg}^{-1}$ (Tab. 80).

Tab. 80: Mittlere N-Effizienz [kg kg^{-1}] von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste, nach N-Stufen und Standort (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]				zweizeilig		mehrzeilig	
	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe	HE	NE	HE	NE
N 1	0	0	0	0				
N 2	40	30	0	70	107,5 a	109,1 a	132,5 a	117,4 a
N 3	40	30	40	110	84,6 b	76,5 b	95,9 b	82,6 b
N 4	40	60	40	140	68,5 c	61,5 cd	80,6 c	64,6 c
N 5	70	30	40	140	69,5 c	63,0 c	81,5 c	65,0 c
N 6	40	120	0	160	63,8 de	55,5 cde	73,6 d	56,8 cde
N 7	70	90	0	160	63,2 d	58,7 cd	72,3 de	59,4 cd
N 8	70	30	70	170	59,9 de	52,4 def	68,4 f	55,2 cde
N 9	70	60	40	170	59,3 e	52,2 cdef	69,6 ef	55,5 cde
N 10	70	60	70	200	51,0 fg	45,3 efg	59,8 g	47,1 de
N 11	70	90	40	200	53,6 f	46,3 efg	60,4 g	45,3 de
N 12	40	90	70	200	53,2 f	44,5 fg	61,0 g	47,3 de
N 13	40	120	40	200	51,9 fg	39,9 g	60,4 g	42,5 e
N 14	90	90	40	220	48,9 gh	40,5 g	54,7 h	42,3 e
N 15	70	120	40	230	47,4 h	37,3 g	52,7 h	40,3 e
N 16	40	90	40	170	59,5 e	47,4 efg	69,3 ef	49,5 def
Mittelwert					62,2 a	54,8 b	72,5 a	58,1 b

Auf dem HE-Standort reduzierte sich die N-Effizienz von $107,5 \text{ kg kg}^{-1}$ in der N 2 mit 70 kg ha^{-1} Gesamt-N-Düngermenge mit steigender N-Versorgung auf $47,4 \text{ kg kg}^{-1}$ in der Maximalvariante (N 15) (Tab. 80). Das bedeutet, dass sich die Ausnutzung des N pro kg zusätzlich eingesetztem N um durchschnittlich $0,3 \text{ kg Korn je kg N}$ verschlechterte. Die Möglichkeit, die N-Effizienz auf diesem Standort durch eine angepasste Verteilung zu optimieren, war gering. Bis auf die 160 kg ha^{-1} N Varianten (N 6, N 7) waren die Pflanzen bei gleicher N-

Düngermenge in der Lage, bei einer kräftigen ersten Gabe zu VB etwas mehr Korn pro kg Mineraldünger-N zu bilden als bei einer schwachen Startgabe.

Während die zweizeilige Gerste auf dem NE-Standort bei einer Gesamt-N-Düngermenge von 70 kg ha^{-1} noch eine mit dem HE-Standort vergleichbare N-Effizienz von $109,1 \text{ kg kg}^{-1}$ aufwies, so verschlechterte sich dieser Wert bei einer Steigerung der N-Düngermenge um 40 kg ha^{-1} signifikant um 30% auf $76,5 \text{ kg kg}^{-1}$. Eine Verdopplung der Gesamtdüngermenge halbierte diesen Wert nahezu auf $40,5 \text{ kg kg}^{-1}$. Auf die Verteilung des N zeigten die Pflanzen eine ähnliche Reaktion wie auf dem HE-Standort. Bereits in den Varianten N 4 und N 5 und vor allem in den Varianten N 6 und N 7 zeigte sich, dass eine kräftige Startgabe die Verwertung des eingesetzten N-Düngers verbessert. Derselbe Effekt wurde auch in den N-Stufen N 10 und N 11 beobachtet.

Aus dem mineralischen N-Dünger bildete mehrzeilige Wintergerste im Vergleich zur zweizeiligen Gerste mehr Ertrag. Durchschnittlich wurden pro kg eingesetztem N auf dem HE-Standort $72,5 \text{ kg kg}^{-1}$ gebildet. Dieser Sortentyp war bereits bei geringen N-Mengen auf dem HE-Standort in der Lage, pro kg N $132,5 \text{ kg Korn}$ (N 2) bzw. $95,9 \text{ kg Korn}$ (N 3) zu produzieren. Steigende N-Düngermengen reduzierten die N-Effizienz signifikant auf minimal $52,7 \text{ kg kg}^{-1}$ (N 15). Um die hohen Erträge auf diesem Feld zu erreichen, war neben der N-Menge, wie bei der zweizeiligen Wintergerste auch, die optimale Verteilung dieses Nährstoffs entscheidend. Bei hohen N-Düngermengen von 200 kg ha^{-1} war die Variante am effizientesten (N 12), bei der auf eine schwache Startgabe zwei kräftige Gaben folgten. Bei geringeren N-Düngermengen waren diejenigen Varianten tendenziell effizienter, die eine kräftige Startgabe erhielten.

Auf dem NE-Standort war die N-Effizienz des mehrzeiligen Sortentyps deutlich geringer. Im dreijährigen Durchschnitt wurden $58,1 \text{ kg kg}^{-1}$ gebildet. Mit steigenden N-Düngermengen reduzierte sich die N-Effizienz von $117,4 \text{ kg kg}^{-1}$ (N 2) auf $40,3 \text{ kg kg}^{-1}$ (N 15). Grundsätzlich wurde auf dem NE-Standort der Mineraldünger-N besser ausgenutzt, wenn die Startgabe auf 70 kg ha^{-1} N erhöht wurde. Dies zeigt beispielhaft der Vergleich zwischen der N 9 ($55,5 \text{ kg kg}^{-1}$), die mit 70 kg ha^{-1} angedüngt wurde und der N 16 ($49,5 \text{ kg kg}^{-1}$), die mit 40 kg ha^{-1} angedüngt wurde. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch in den N-Stufen mit geringeren N-Gesamtmenen festgestellt.

4.2.2 Analyse der N-Aufnahme und der TM-Bildung bei Wintergerste

In die Auswertung der N-Aufnahme und des TM-Aufwuchses gingen die Daten des 2012 bis 2014 durchgeführten N-Steigerungsversuchs auf dem HE- und NE-Standort in Roggenstein für beide Sortentypen ein. Für die Variablen N-Aufnahme und TM-Aufwuchs wurde eine hoch- bzw. höchstsignifikante Wirkung der drei Faktoren Termin, Sortentyp und N-Stufe gefunden (Tab. 81), weshalb die Ergebnisse nach Sortentyp getrennt dargestellt werden.

Tab. 81: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Sortentyp und Termin sowie den abhängigen Variablen N-Aufnahme und TM-Aufwuchs (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	N-Aufnahme	TM-Aufwuchs
N-Stufe	163,7***	65,0***
Sortentyp	19,7***	10,6**
Termin	521,9***	1929,6***
N-Stufe*Sortentyp	0,5	0,1
N-Stufe*Termin	15,4***	18,4***
Sortentyp*Termin	4,1***	5,4***

4.2.2.1 Verlauf der N-Aufnahme

Sowohl der zwei- als auch der mehrzeilige Sortentyp reagierten höchstsignifikant auf eine differenzierte N-Düngung und unterschiedliche Wachstumsbedingungen (Tab. 82 & Tab. 83). Ebenso war es möglich über die Varianzanalyse einen deutlichen Jahreseinfluss nachzuweisen.

Tab. 82: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort für die N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	BBCH				
	30	32	49	65	92
N-Stufe	52,9***	88,9***	69,0***	59,6***	433,9***
Jahr	227,3***	268,8***	178,0***	129,9***	157,6***
Standort	24,9***	0,2	104,7***	26,7***	0,0
N-Stufe*Jahr	8,2***	3,4**	2,4***	1,8**	3,9***
N-Stufe*Standort	4,7**	2,4	3,1***	2,3**	1,3
Jahr*Standort	45,0***	25,9***	109,2***	56,8***	231,0***

Tab. 83: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort für die N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	BBCH				
	30	32	49	65	92
N-Stufe	36,1***	124,9***	62,3***	53,2***	259,3***
Jahr	116,9***	281,6***	139,8***	100,2***	88,2***
Standort	44,6***	9,4**	145,9***	25,2***	30,7***
N-Stufe*Jahr	2,2	3,8**	2,5***	1,2	2,5**
N-Stufe*Standort	7,1***	6,2***	3,0***	1,7*	2,9**
Jahr*Standort	14,3***	10,5***	67,6***	40,7***	161,1***

Um darstellen zu können, wie sich unterschiedliche N-Düngermengen auf die N-Aufnahme des Pflanzenbestandes während der Vegetationsperiode auswirken, sind in Abb. 24 und Abb. 25 des zwei- und mehrzeiligen Sortentyps nur drei N-Stufen exemplarisch dargestellt: Die ungedüngte Variante N 1, die N 5 mit einer N-Düngermenge von insgesamt 140 kg ha^{-1} und die N 11 (200 kg ha^{-1}).

Gemittelt über den HE- und NE-Standort nahmen die zweizeiligen Wintergerstenpflanzen der ungedüngten Variante N 1 von Schossbeginn ($37,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) bis BBCH 32 ($42,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) keine nennenswerten N-Mengen auf (Abb. 24). Bis zur Vollblüte des Gerstenbestandes war eine Zunahme um $25,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ zu verzeichnen. Danach gingen knapp 11% dieses N wieder verloren. Wegen der gleichen Startgabe von 70 kg ha^{-1} Mineraldünger-N verlief die N-Aufnahme in der N 5 und N 11 bis zum Zweiknotenstadium identisch. Im Zeitraum BBCH 30 bis BBCH 32 erhöhte sich die N-Aufnahme um 38%. Die unterschiedliche N-Düngermenge zu BBCH 32 machte sich ab diesem Termin bemerkbar. Während in der N 5 bis zum Grannenspitzen eine tägliche N-Aufnahme von $4,2 \text{ kg ha}^{-1}$ ermittelt wurde, reduzierte sich aufgrund der geringen Folgedüngung die tägliche N-Aufnahmerate bis zur Hauptblüte auf $2,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Die gut versorgte N 11 dagegen nahm im Intervall BBCH 32 bis BBCH 49 $4,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ auf. Die hohe zweite Gabe beeinflusste auch in der folgenden Wachstumsphase diese Größe deutlich, sodass in der Hauptblüte eine N-Aufnahme von $255,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ ermittelt wurde. Ab der Vollblüte ging die N-Menge in der oberirdischen Biomasse um 8% (N 5) bzw. 10% (N 11) zurück.

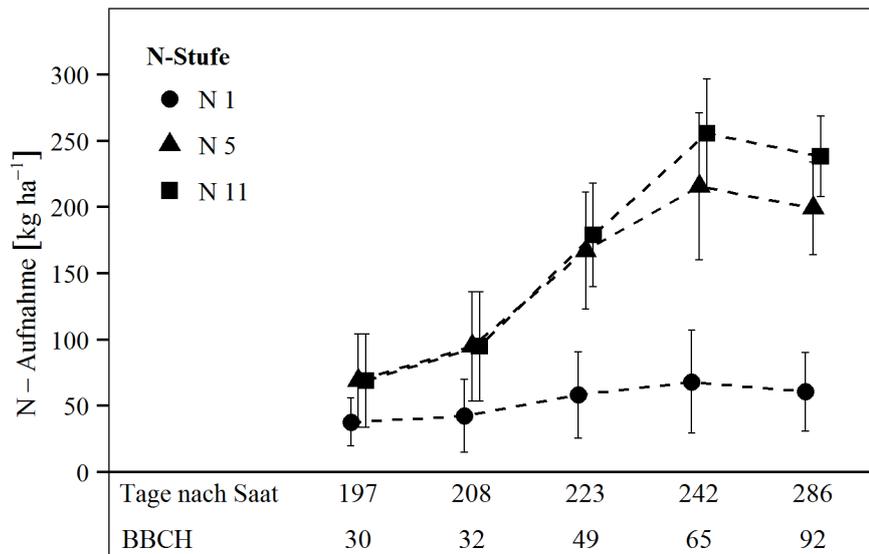


Abb. 24: Verlauf der N-Aufnahme in der Vegetation von zweizeiliger Wintergerste der N-Stufen N 1, N 5 und N 11 im Mittel von zwei Standorten (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

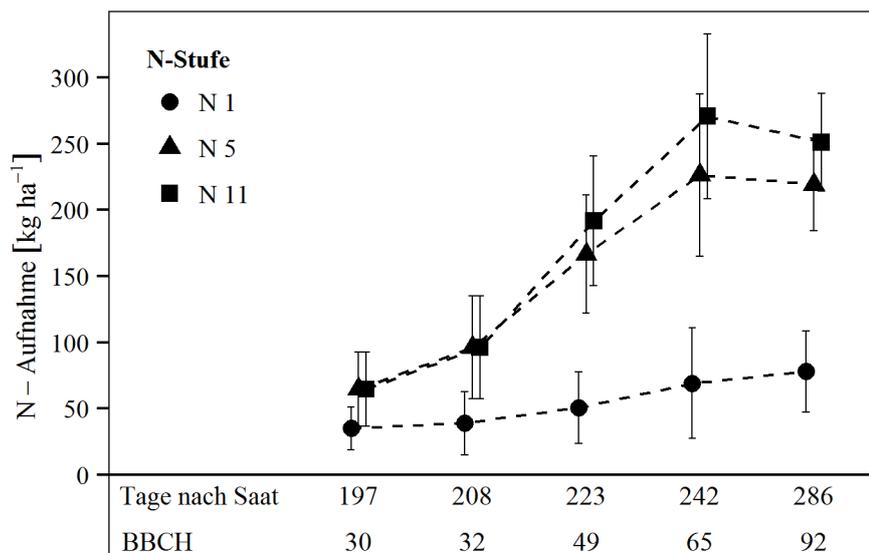


Abb. 25: Verlauf der N-Aufnahme in der Vegetation von mehrzeiliger Wintergerste der N-Stufen N 1, N 5 und N 11 im Mittel von zwei Standorten (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Die N-Aufnahme der ungedüngten mehrzeiligen Wintergerste steigerte sich kontinuierlich bis zur Ernte auf $78,0 \text{ kg ha}^{-1}$ (Abb. 25). Wegen der gleichen Startgabe entwickelte sich die N-Aufnahme in der N 5 und N 11 bis zum Zweiknotenstadium identisch. Erst ab diesem Entwicklungsstadium zeigten die N-Varianten unterschiedliche N-Aufnahmeraten. Bis BBCH 49 wurden in der N 5 täglich $4,2 \text{ kg ha}^{-1}$ N aufgenommen und in der hoch gedüngten N 11 $5,6 \text{ kg ha}^{-1}$. In den 19 Tagen bis zur Vollblüte des Gerstenbestandes erhöhte sich die N-Aufnahme nochmals, so dass zu diesem Messtermin in der N 5 $226,1 \text{ kg ha}^{-1}$ und in der N 11

270,7 kg ha⁻¹ im Pflanzenbestand gebunden waren. Ab diesem Zeitpunkt war ein leichter Rückgang des in der oberirdischen Biomasse gespeicherten N festzustellen.

4.2.2.2 Standorteinfluss auf die N-Aufnahme von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste

Um den HE- und NE-Standort bezüglich der N-Aufnahme vergleichen zu können, wurden die Daten aller N-Stufen des N-Steigerungsversuchs auf dem HE- und NE-Standort für zwei- und mehrzeilige Wintergerste in Roggenstein gemittelt und in Tab. 84 dargestellt. Bei zweizeiliger Gerste erhöhte sich die N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse auf dem HE-Standort zwischen Schossbeginn und Zweiknotenstadium nur geringfügig auf 66,7 kg ha⁻¹. Eine deutliche Zunahme wurde bis BBCH 49 ermittelt. Täglich stieg die N-Aufnahme um durchschnittlich 6,5 kg ha⁻¹. Danach verlangsamte sich die N-Aufnahmerate (2,5 kg ha⁻¹ d⁻¹), bis in der Hauptblüte 212,5 kg ha⁻¹ erreicht wurden. Bis zur Ernte ging wieder ein Teil dieses N (10%) verloren. Die N-Aufnahmerate auf dem NE-Standort erreichte ab BBCH 32 nicht das Niveau des Feldes mit den guten Wuchsbedingungen. Zwischen BBCH 32 und dem Grannenspitzen wurden 4,3 kg ha⁻¹ d⁻¹ sowie zwischen BBCH 49 und BBCH 65 3,2 kg ha⁻¹ d⁻¹ in die pflanzliche Biomasse aufgenommen, so dass bis zur Ernte ein Wert von 188,4 kg ha⁻¹ N in der oberirdischen Biomasse erreicht wurde.

Tab. 84: Verlauf der N-Aufnahme [kg ha⁻¹] von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste während der Vegetation auf dem HE- und NE-Standort, Mittelwerte über alle N-Stufen (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Sortentyp	Standort	BBCH				
		30	32	49	65	92
zz	HE	57,4 a	66,7 a	164,3 b	212,5 c	191,0 d
	NE	48,9 a	71,8 a	135,6 b	195,8 c	188,4 d
mz	HE	55,6 a	69,7 a	176,2 b	231,9 c	220,1 c
	NE	44,1 a	65,4 a	135,0 b	211,6 c	220,1 c

Die N-Aufnahme der mehrzeiligen Gerste erreichte zu den frühen Entwicklungsstadien vergleichbare Werte wie der zweizeilige Sortentyp (Tab. 84). In der folgenden Hauptwachstumsphase dagegen nahm der mehrzeilige Sortentyp täglich 7,1 kg ha⁻¹ (HE) bzw. 4,6 kg ha⁻¹ (NE) auf. Bis zur Blüte verlangsamte sich die tägliche N-Aufnahmerate in beiden Ertragszonen etwas (HE: 4,6 kg ha⁻¹ d⁻¹; NE: 4,0 kg ha⁻¹ d⁻¹).

4.2.2.3 Effekt der N-Düngung auf die N-Aufnahme zur Ernte

Die N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse zu BBCH 92 variierte beim zweizeiligen Sortentyp auf dem HE-Standort je nach N-Düngermenge und Verteilung des N (Tab. 85). Während in den Parzellen ohne N-Düngung $61,1 \text{ kg ha}^{-1}$ N gefunden wurden, erhöhte eine steigende N-Menge diesen Wert auf maximal $137,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (N 13). Der Effekt der N-Verteilung war auf diesem Standort sehr gering ausgeprägt. Tendenziell stieg die N-Aufnahme zur Vollreife bei einer schwachen Startgabe gegenüber der kräftigen ersten Gabe zu VB leicht. Vergleichbare Ergebnisse traten bei der zweizeiligen Wintergerste auf dem NE-Standort auf. Allerdings führte auf diesen Flächen eine frühbetonte N-Gabe zu etwas höheren N-Aufnahmen als die spätbetonten N-Applikationen.

Das N-Aufnahmevermögen der mehrzeiligen Wintergerste war auf beiden Standorten deutlich höher als das des zweizeiligen Sortentyps (Tab. 85). Bereits in der ungedüngten N-Stufe N 1 wurden $80,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (HE) bzw. $75,7 \text{ kg ha}^{-1}$ (NE) ermittelt. Dieser Wert erhöhte sich mit steigender N-Düngung auf $269,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (N 11) bzw. $253,8 \text{ kg ha}^{-1}$ (N 13). Eine frühbetonte N-Düngung erwies sich ebenfalls als vorteilhafter gegenüber einer Düngung mit geringer Startgabe und kräftiger zweiter Gabe.

Tab. 85: Durchschnittliche N-Aufnahmewerte [kg ha^{-1}] von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste auf dem HE- und NE-Standort für ausgewählte N-Stufen zu BBCH 92 (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]				zweizeilig		mehrzeilig	
	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe	HE	NE	HE	NE
N 1	0	0	0	0	61,1 a	60,4 a	80,3 a	75,7 a
N 3	40	30	40	110	175,5 b	163,4 b	199,0 b	199,0 b
N 4	40	60	40	140	192,2 c	199,4 c	222,2 c	215,4 bc
N 5	70	30	40	140	194,9 c	203,2 cd	226,8 cd	212,2 bc
N 9	70	60	40	170	213,4 d	218,3 de	244,1 de	234,0 cd
N 11	70	90	40	200	237,3 e	239,3 e	269,3 f	232,7 cd
N 13	40	120	40	200	237,6 e	232,0 e	266,4 f	253,8 d
N 16	40	90	40	170	214,7 d	207,2 cd	251,6 ef	224,6 c

4.2.2.4 Verlauf des TM-Aufwuchses

Für den oberirdischen TM-Aufwuchs ergaben varianzanalytische Untersuchungen zu den unterschiedlichen Messterminen während der Vegetationsperiode höchstsignifikante Effekte der Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort (Tab. 86 & Tab. 87).

Tab. 86: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort für den TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	BBCH				
	30	32	49	65	92
N-Stufe	9,4***	32,3***	32,1***	29,5***	172,5***
Jahr	48,9***	193,9***	116,6***	186,1***	61,0***
Standort	47,1***	7,8**	232,9***	119,8***	181,6***
N-Stufe*Jahr	3,7**	1,3	1,8*	1,4	3,7***
N-Stufe*Standort	1,2	2,8*	2,2**	2,1**	4,9***
Jahr*Standort	25,4***	11,6***	56,0***	45,9***	158,5***

Tab. 87: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren N-Stufe, Jahr und Standort für den TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	BBCH				
	30	32	49	65	92
N-Stufe	5,5**	38,4***	30,4***	32,1***	144,7***
Jahr	14,7***	157,7***	122,6***	162,5***	38,7***
Standort	63,3***	37,5***	297,6***	206,6***	343,6***
N-Stufe*Jahr	1,1	1,3	2,0**	1,3	4,7***
N-Stufe*Standort	1,8	5,5**	2,4**	3,2***	9,0***
Jahr*Standort	3,1	1,3	55,5***	37,1***	108,2***

Um darstellen zu können, wie sich unterschiedliche N-Düngermengen auf den TM-Aufwuchs des Pflanzenbestandes während der Vegetationsperiode auswirken, sind in Abb. 26 und Abb. 27 des zwei- und mehrzeiligen Sortentyps ebenfalls drei N-Stufen ausgewählt worden: die ungedüngte N 1 (0 kg ha⁻¹ N), die N 5 (140 kg ha⁻¹ N) und die N 11 (200 kg ha⁻¹ N).

Ohne N-Düngung bildete die zweizeilige Wintergerste 14,3 dt ha⁻¹ TM zu Beginn des Schossens aus (Abb. 26). Bis zur Ernte erhöhte sich der Biomasseaufwuchs auf 68,2 dt ha⁻¹ TM. Trotz eines Unterschieds von 60 kg ha⁻¹ in der Gesamt-N-Düngermenge verlief die Entwicklung der oberirdischen Biomasse in der N 5 und N 11 nahezu identisch. Ausgehend von 18,2 dt ha⁻¹ TM (BBCH 30) bildeten die Gerstenpflanzen bis zum Grannenspitzen 58,2 dt ha⁻¹ TM (N 5) bzw. 57,7 dt ha⁻¹ TM (N 11), was einem durchschnittlichen TM-Zuwachs von 1,5 dt ha⁻¹ d⁻¹ entspricht. Erst ab diesem Stadium differenzierten sich die beiden N-Stufen

etwas, so dass die N 5 bis zur Ernte 154,7 dt ha⁻¹ TM und die N 11 166,2 dt ha⁻¹ TM produzierte.

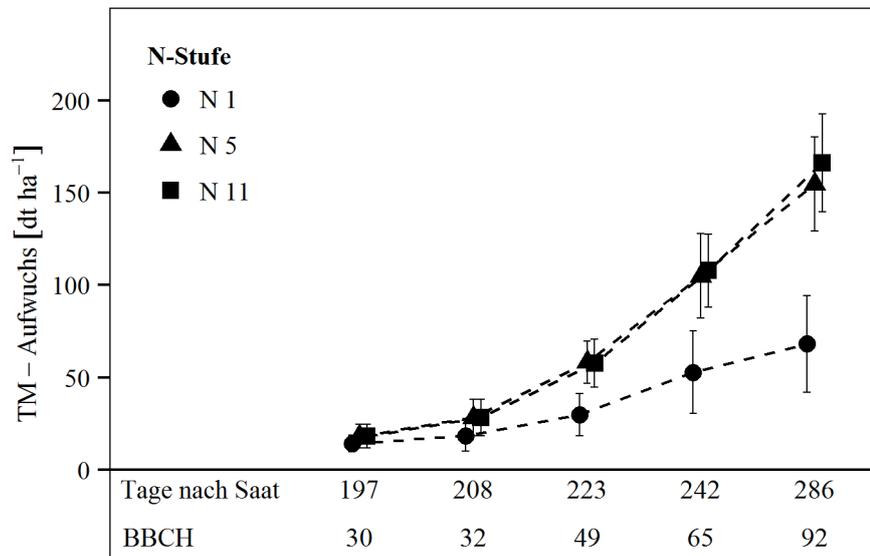


Abb. 26: TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste der N-Stufen N 1, N 5 und N 11 im Mittel von zwei Standorten im Verlauf der Vegetation (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Die Biomasseentwicklung bei mehrzeiliger Wintergerste war bis zum Erreichen des Grannenschiebens mit der zweizeiligen Wintergerste vergleichbar. Ab diesem Zeitpunkt produzierte der mehrzeilige Sortentyp mehr Biomasse, wie die Zuwachsraten der N 5 (2,7 dt ha⁻¹ d⁻¹ TM) und der N 11 (2,9 dt ha⁻¹ d⁻¹ TM) zeigen (Abb. 27). In der Vollreife wurden 164,4 dt ha⁻¹ TM bzw. 175,7 dt ha⁻¹ TM ermittelt.

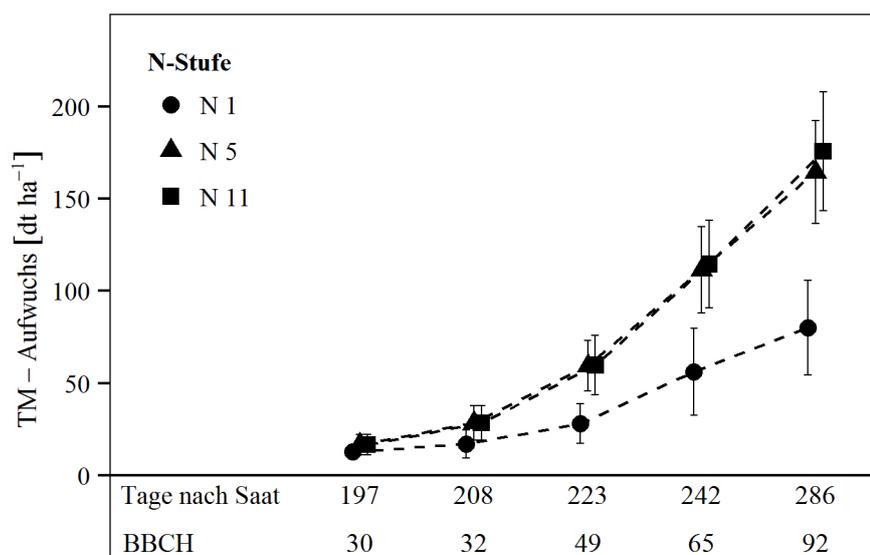


Abb. 27: TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste der N-Stufen N 1, N 5 und N 11 im Mittel von zwei Standorten im Verlauf der Vegetation (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

4.2.2.5 Standorteinfluss auf den TM-Aufwuchs von zwei- und mehrzeiliger Gerste

Zu Beginn der Datenerhebung war die Biomasse bei zweizeiliger Wintergerste sowohl auf dem HE- als auch NE-Standort identisch. Ein Standorteffekt trat erst ab BBCH 32 aufgrund höherer Zuwachsraten auf dem HE-Standort ($2,4 \text{ dt ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ TM}$) gegenüber dem NE-Standort ($1,5 \text{ dt ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ TM}$) auf (Tab. 88). Die unterschiedlichen Standortbedingungen führten dazu, dass bis zur Ernte auf dem HE-Standort $23,6 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ mehr Biomasse produziert wurde.

Tab. 88: TM-Aufwuchs [dt ha^{-1}] von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste während der Vegetation auf dem HE- und NE-Standort, Mittelwerte über alle N-Stufen (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste Roggenstein, 2012 bis 2014).

Sortentyp	Standort	BBCH				
		30	32	49	65	92
zz	HE	18,6 a	24,1 a	59,9 b	102,8 c	154,1 d
	NE	14,0 a	23,0 a	45,8 b	87,5 c	130,5 d
mz	HE	17,3 a	24,7 a	63,1 b	111,5 c	170,5 d
	NE	12,4 a	20,9 a	44,7 b	91,2 c	136,0 d

Die Biomasseaufwüchse von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste lagen zu Messbeginn auf einem vergleichbarem Niveau. Die gesamte Wachstumsperiode hindurch waren die Zuwachsraten bei der mehrzeiligen Wintergerste auf beiden Standorten etwas höher als beim zweizeiligen Sortentyp. Somit waren bis zur Ernte $170,5 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ (HE) bzw. $136,0 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ (NE) an oberirdischer Biomasse gebildet worden.

4.2.2.6 Einfluss einer gestaffelten N-Düngung auf die Biomasse

Wie sich neben der N-Menge auch die N-Verteilung auf die Biomassebildung auswirkt, zeigen die Auswertungen beider Sortentypen auf dem HE- und NE-Standort. Beispielfhaft wurden zur Vollblüte ausgewählte N-Stufen mit unterschiedlicher N-Düngung und N-Verteilung betrachtet. Zu diesem Entwicklungsstadium war der oberirdische TM-Aufwuchs bei zweizeiliger Wintergerste in den ungedüngten Parzellen beider Standorte vergleichbar (Tab. 89). Mit steigenden Düngermengen erhöhte sich die TM-Produktion auf dem HE-Standort. Mit 140 kg ha^{-1} (N 5) wurden bereits $115,0 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ erzielt. Eine weitere Steigerung der N-Düngermenge führte zu einem vernachlässigbaren TM-Zuwachs. Vor allem die N-Verteilung beeinflusste den TM-Aufwuchs, da frühbetonte Startgaben zu einer höheren Biomasseproduktion führten als schwach angedüngte Varianten (N 5, N 9, N 11). Der Effekt einer schwachen

Startgabe konnte auch durch eine kräftige zweite Gabe nicht mehr korrigiert werden. Auf dem NE-Standort entsprach die höchste Biomasse 85% des Maximalwertes auf dem HE-Standort. Allerdings produzierten auf diesem Standort diejenigen Varianten mehr Biomasse, bei denen die erste und zweite Gabe betont wurden.

Tab. 89: Durchschnittlicher TM-Aufwuchs [dt ha⁻¹] von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste auf dem HE- und NE-Standort für ausgewählte N-Stufen zu BBCH 65 (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

N-Stufe	N-Düngermenge [kg ha ⁻¹]				zweizeilig		mehrzeilig	
	VB	BBCH 32	BBCH 39	Summe	HE	NE	HE	NE
N 1	0	0	0	0	52,2 a	53,5 a	54,0 a	58,2 a
N 3	40	30	40	110	103,1 b	79,7 ab	113,1 bc	86,6 ab
N 4	40	60	40	140	102,4 b	93,0 bc	111,0 b	101,8 b
N 5	70	30	40	140	114,8 c	95,0 bc	124,2 bcd	98,7 b
N 9	70	60	40	170	115,0 c	99,3 c	124,6 cd	102,5 b
N 11	70	90	40	200	117,0 c	98,7 bc	130,0 d	99,1 b
N 13	40	120	40	200	109,9 bc	86,5 b	118,9 bcd	90,8 b
N 16	40	90	40	170	107,7 bc	89,0 bc	116,2 bc	90,7 b

Mehrzeilige Wintergerste bildete zur Hauptblüte vor allem in den gedüngten N-Stufen mehr Biomasse als der zweizeilige Sortentyp. Maximal wurden auf dem HE-Standort in diesem Vergleich 130,0 dt ha⁻¹ TM produziert (N 11). Auf dem Feld mit der geringeren Ertragserwartung wurde der Höchstwert (102,5 dt ha⁻¹ TM) bereits mit 170 kg ha⁻¹ Gesamt-N-Düngermenge erreicht. Eine hohe Startgabe sowie eine kräftige zweite Gabe förderten die Bildung oberirdischer Biomasse um durchschnittlich 9,5% gegenüber den Vergleichsvarianten mit gleicher N-Menge aber geringerer N-Gabe zu VB.

4.2.3 Verlauf der Messwerte der Vegetationsindices in der Vegetation

In diesem Abschnitt wird der Verlauf unterschiedlicher Vegetationsindices während der Vegetation der zweizeiligen Wintergerste dargestellt sowie die Eignung der Vegetationsindices geprüft, verschiedene N-Stufen voneinander zu trennen. Für eine bessere Übersicht wurden drei N-Stufen ausgewählt. Die ungedüngte N-Stufe N 1, die N 5 mit 140 kg ha⁻¹ Gesamt-N-Düngermenge und die N 14 mit 220 kg ha⁻¹ Gesamt-N-Düngermenge. Als Datenbasis wurde der dreijährige N-Steigerungsversuch auf dem HE- und NE-Standort in Roggenstein verwendet.

Der Vegetationsindex VX 1 reagierte in der ungedüngten Variante im Verlauf der Vegetation nur wenig (Abb. 28)¹². In dieser Variante erreichte der VX 1 sein Maximum bereits zum Grannenspitzen. Bis zur Hauptblüte verringerte sich der Messwert wieder. Anders verhielt sich der VX 1 in den gedüngten N-Varianten. Zwischen Schossbeginn und BBCH 49 stiegen die Messwerte des VX 1 fast linear in den gedüngten Varianten an. Danach veränderten sich die Messwerte bis zur Blüte nur noch wenig. Während die unterschiedliche Startgabe von 70 kg ha⁻¹ (N 5) und 90 kg ha⁻¹ (N 14) zu Beginn der Messungen kaum Auswirkungen hatte, so machte sich im weiteren Vegetationsverlauf die höhere N-Düngermenge der N 14 durch höhere Messwerte des VX 1 immer stärker bemerkbar.

Mit dem Vegetationsindex VX 2 war es möglich unterschiedlich gedüngte Bestände zu differenzieren (Abb. 28). Darüber hinaus reagierte dieser Index deutlich mit einer Veränderung der Messwerte auf das Pflanzenwachstum während der Vegetationsperiode. In den ungedüngten Parzellen war die Reaktion auf das Pflanzenwachstum noch gering. Vom Minimum zu BBCH 30 bis zum Maximum zu BBCH 49 erhöhte sich der Messwert nur um 4%. Darauf gingen die Messwerte des VX 2 bis zur Blüte zurück. Eine stärkere Reaktion zeigte der VX 2 in den mit N versorgten Varianten, die sich deutlich von den ungedüngten Parzellen abhoben. Während zu Schossbeginn noch kein merklicher Unterschied zwischen den N-Varianten N 5 und N 14 bestand, verstärkte sich der Effekt der N-Düngung hingegen im weiteren Vegetationsverlauf, bis zu BBCH 49 der maximale Messwert erreicht war. Anschließend war bis zur Hauptblüte keine Veränderung mehr in den Messungen festzustellen.

Der Vegetationsindex VX 3 trennte die unterschiedlichen N-Varianten sehr gut (Abb. 28). Die ungedüngten Varianten reflektierten die gesamte Vegetation über wenig Licht. Der Maximalwert wurde in dieser Düngevariante bereits zu BBCH 49 festgestellt. Von den ungedüngten Varianten hoben sich die Messungen in den gedüngten Parzellen deutlich ab. Von Messbeginn zu BBCH 30 erhöhte sich der Messwert des VX 3 mit fortschreitender Vegetation stetig, so dass bis zur Hauptblüte eine Verdoppelung des Ausgangswertes festgestellt werden konnte. Im Verlauf der Vegetation vergrößerte sich der Abstand der Messwerte zwischen der N 5 und der mit deutlich mehr Mineraldünger-N versorgten N 14. Am Ende wiesen die Messwerte der Parzellen am Ende eine Differenz von 15% auf.

¹² Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde in Abb. 28 auf die Beschriftung der Y-Achse bei den Vegetationsindices VX 1, VX 2 und VX 3 verzichtet.

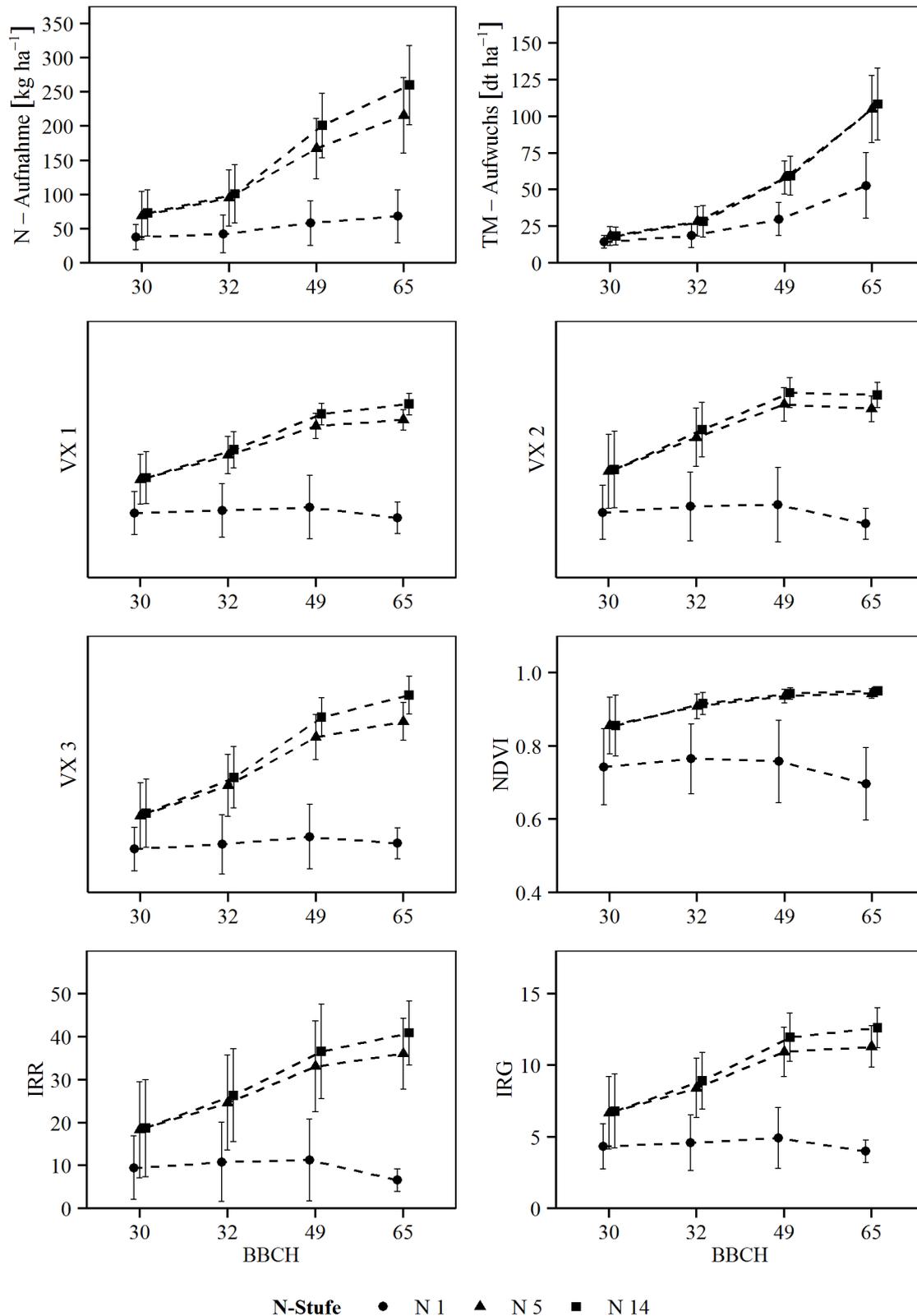


Abb. 28: Entwicklung von N-Aufnahme und TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste und Verlauf der Messwerte der Vegetationsindices VX 1, VX 2, VX 3, NDVI, IRR und IRG während der Vegetation für die N-Stufen N 1, N 5 und N 14 im Mittel beider Standorte (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Auf eine N-Düngung reagierte der NDVI mit deutlich höheren Messwerten als in den Parzellen ohne N-Düngung (Abb. 28). Von der Höhe der N-Düngung blieben die Messungen dieses

Index allerdings unbeeinflusst, da sich die Werte der N 5 und N 14 die gesamte Vegetationsperiode hindurch glichen. Erst zur Hauptblüte machte sich die höhere N-Düngung der N 14 leicht bemerkbar. Darüber hinaus veränderten sich die Messwerte dieses Index ab BBCH 49 nicht mehr. Ähnliches wurde in den ungedüngten Varianten beobachtet, in denen zwischen BBCH 32 und BBCH 49 derselbe Wert (0,76) erhoben wurde.

Sowohl der IRR als auch der IRG waren in der Lage, über die gesamte Vegetation hinweg eine Differenzierung der N-Düngevarianten zu detektieren (Abb. 28). In den ungedüngten N-Stufen unterlagen die Messwerte des IRR nur einer geringen Änderung, wobei zu BBCH 49 bereits das Maximum erreicht wurde. Bis zur Blüte sank der Messwert unter den zu Messbeginn ermittelten Wert auf 6,6. In den anderen Vergleichsvarianten machte sich die N-Düngung bemerkbar, da über die gesamte Messperiode ein Anstieg des Messwertes des IRR registriert wurde. Darüber hinaus war dieser Index in der Lage, die unterschiedlich versorgten N-Varianten deutlich voneinander zu trennen. Der Messwert des IRR in der N 5 verdoppelte sich nahezu von 18,3 (BBCH 30) auf 36,0 (BBCH 65). Die höhere N-Düngermenge in der N 14 mit 220 kg ha^{-1} verursachte einen größeren Anstieg des IRR von 18,7 zu Schossbeginn auf 40,9 in der Hauptblüte.

Vergleichbar zum IRR war der Verlauf der Messwerte des IRG über die Vegetationsperiode. Die Werte des IRG blieben in der ungedüngten N 1 bis BBCH 49 (4,92) auf einem niedrigen Niveau, an das sich ein deutlicher Rückgang von -19% bis zur Blüte anschloss (Abb. 28). Die N-Versorgung führte in der N 5 zu einem deutlichen Anstieg von 6,7 (Schossbeginn) auf 10,9 (BBCH 49). Höhere Düngergaben, wie in der N 14, erhöhten ebenfalls die Messwerte des IRG, so dass bis zum Grannenspitzen ein Messwert von 11,9 erzielt wurde. Anders als beim IRR reagierte der IRG nach BBCH 49 nur noch mit einem geringen Anstieg auf die höhere Biomasse. Die Messwerte erhöhten sich bis zur Vollblüte nur um 3,3% (N 5) bzw. 5,7% (N 14).

Der IR 1 war in der Lage, unterschiedlich gedüngte Bestände voneinander zu unterscheiden (Abb. 29). Die geringsten Messwerte wurden durchgehend in der ungedüngten Variante ermittelt, wobei der Unterschied zwischen dem Minimum (BBCH 30) und dem Maximum (BBCH 49) gering war. Mit N-Düngung war die Differenz zwischen den N-Stufen N 5 und N 14 zu Messbeginn gering. Im Verlauf der Vegetation differenzierten die Messwerte immer stärker, bis zu BBCH 49 Werte von 1,37 (N 5) bzw. 1,40 (N 14) erreicht wurden. Anschließend veränderte sich der Messwert des IR 1 bis zur Hauptblüte kaum mehr.

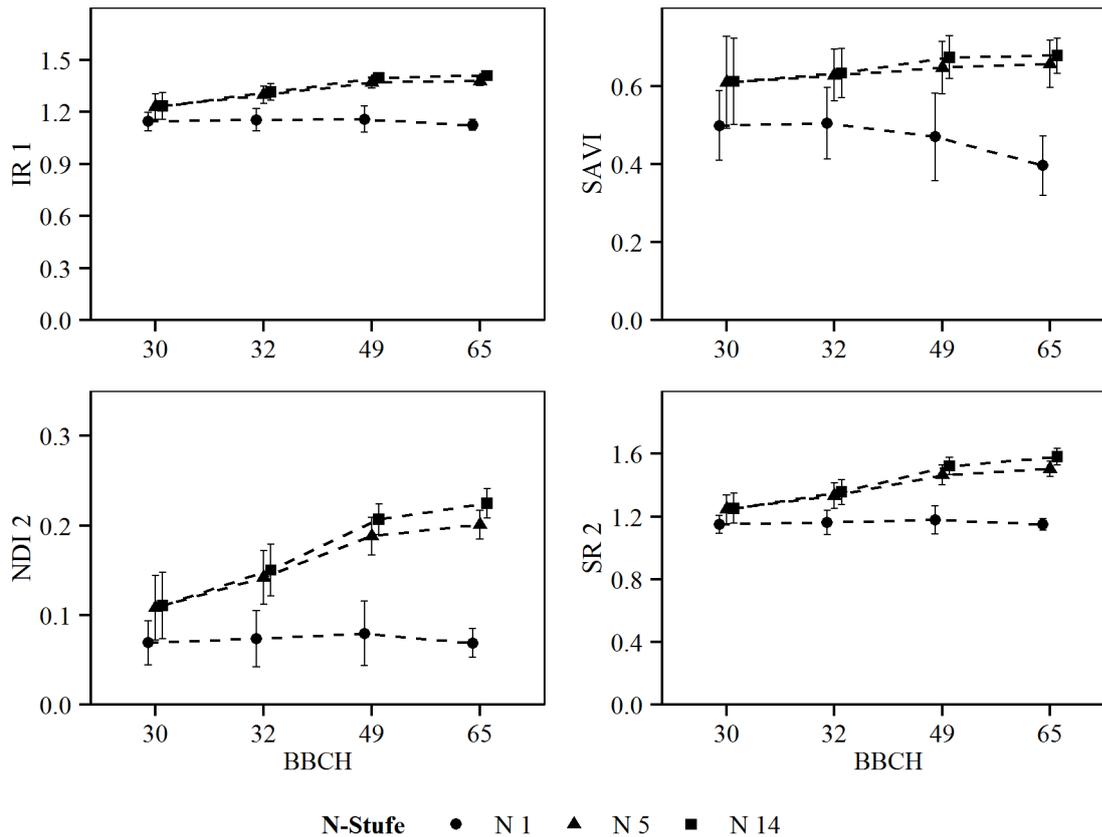


Abb. 29: Verlauf der Messwerte der Vegetationsindizes IR 1, SAVI, NDI 2 und SR 2 während der Vegetation in zweizeiliger Wintergerste für die N-Stufen N 1, N 5 und N 14 im Mittel beider Standorte (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Zu Beginn der Messungen konnte mit dem Vegetationsindex SAVI nur zwischen ungedüngter und gedüngter Variante unterschieden werden (Abb. 29). In den Parzellen ohne N-Düngung sank der Messwert des SAVI ab dem Zweiknotenstadium (0,50) kontinuierlich auf 0,40 (BBCH 65) ab. Demgegenüber reagierte dieser Index in den Varianten N 5 und N 14 mit kontinuierlich steigenden Werten auf das Pflanzenwachstum. Eine Differenzierung einer unterschiedlichen N-Düngung war mit diesem Index erst nach dem Erreichen des Zweiknotenstadiums möglich, da zu den vorherigen Terminen identische Messwerte auftraten.

Eine deutliche Differenzierung der N-Stufen wurde beim NDI 2 beobachtet. In den ungedüngten Varianten erreichte der NDI 2 nach einem kontinuierlichen Anstieg sein Maximum zu BBCH 49. Danach gingen die Messwerte bis zur Blüte wieder etwas zurück. Mit einer N-Düngung wurden deutlich höhere Werte des NDI 2 ermittelt. Hier stiegen die Messwerte von Messbeginn bis zur Blüte kontinuierlich an, wobei sich die N-Stufen im Vegetationsverlauf deutlich unterschieden. Somit wurde ein maximaler Wert von 0,20 in der N 5 bzw. von 0,22 in der N 14 gemessen.

Die Vegetationsindices SR 1 und SR 2 verwenden dieselben Wellenlängen. Der Unterschied besteht darin, dass Zähler und Nenner vertauscht wurden. Aus diesem Grund verlaufen die Werte über die Messperiode genau entgegengesetzt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den anderen Vegetationsindices wird deshalb nur auf den Index SR 2 eingegangen. Die ungedüngte Variante unterschied sich im Verlauf sowie in der Höhe der Messwerte deutlich von den gedüngten (Abb. 29). Während in den Parzellen ohne N-Düngung Werte zwischen 1,15 (BBCH 30) und 1,18 (BBCH 49) gemessen wurden, bewegten sich die Messwerte in der Variante N 5 von 1,25 (BBCH 30) bis 1,50 (BBCH 65). Ein Anheben der N-Gesamtmenge auf 220 kg ha^{-1} in der N 14 hatte höhere Messwerte von bis zu 1,58 (BBCH 65) zur Folge.

Alle geprüften Vegetationsindices reagierten bei der mehrzeiligen Wintergerste vergleichbar zum hier beschriebenen zweizeiligen Sortentyp (siehe Abb. A 1 & Abb. A 2)¹³.

4.2.4 Abbildung der N-Aufnahme und der Biomasse durch Vegetationsindices

In den Versuchen für Wintergerste wurden verschiedene Vegetationsindices aus der Pflanzenreflexion berechnet. Dabei sollten diejenigen Indices identifiziert werden, die die N-Aufnahme und den Biomasseaufwuchs am besten abbilden können.

4.2.4.1 Abbildung der N-Aufnahme mit Vegetationsindices in Einzeljahren

Um zu prüfen, welcher Vegetationsindex die N-Aufnahme am präzisesten abbilden kann, wurden neben den eigenen Versuchsdaten der Untersuchungsjahre von 2012 bis 2014 auch Messdaten vorangegangener N-Steigerungsversuche an den Standorten Roggenstein und Dürnast seit dem Jahr 2002 verwendet. Dazu wurden die N-Aufnahmewerte mit den Messwerten der verschiedenen Indices korreliert und die Bestimmtheitsmaße dieser Regressionen ermittelt. Die Daten wurden getrennt nach zweizeiligen und mehrzeiligen Sortentypen betrachtet, da, wie im nachfolgenden Kapitel 4.2.5.3 beschrieben, signifikante Unterschiede zwischen den Vegetationsindices durch die verschiedenen Sortentypen hervorgerufen werden.

Analysiert nach Einzeljahren waren bei zweizeiliger Wintergerste die Unterschiede innerhalb eines Versuchsjahres und Messtermins zwischen den R^2 -Werten der einzelnen Vegetationsindices gering. So wiesen der VX 1, der VX 2, der VX 3 und der IRR, der IRG sowie der infrarotbasierte IR 1 und die zusätzlich ab 2009 geprüften Indices NDI 2, SR 1 und SR 2 in den

¹³ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde in Abb. A 1 auf die Beschriftung der Y-Achse bei den Vegetationsindices VX 1, VX 2 und VX 3 verzichtet.

Einzeljahren zu den verschiedenen Terminen durchgehend eine ähnlich hohe Messpräzision auf (Tab. A 10). Beim Vergleich der Jahre und Termine untereinander zeigte sich allerdings, dass teils große Unterschiede in der Messpräzision zwischen den Jahren und Terminen bestehen. So bewegten sich je nach Jahr und Termin die Bestimmtheitsmaße der quadratischen Regressionsgleichung zwischen 0,25 und 0,95. Bei NDVI und SAVI schwankten die R^2 -Werte zwischen 0,23 und 0,93. Bei den meisten Indices veränderte sich die Messgenauigkeit im Verlauf der Vegetation, wobei zur Blüte die geringste Präzision bestand. Ein Indiz für einen auftretenden Sättigungseffekt sind Unterschiede der R^2 -Werte zwischen der linearen und quadratischen Regressionsgleichung. Für diesen Effekt anfällig erwies sich in den Einzelmessungen der NDVI. Bei allen anderen Indices war dieser Effekt nur schwach ausgeprägt bzw. trat, wie beim VX 2, erst später in der Vegetation auf. Die eben beschriebenen Beobachtungen konnten auch beim mehrzeiligen Sortentyp wiedergefunden werden (Tab. A 11). Allerdings war die Messpräzision in einzelnen Fällen etwas besser als bei zweizeiligen Sorten.

4.2.4.2 Abbildung der N-Aufnahme mit Vegetationsindices im Zeitraum 2002 bis 2014

Zweizeilige Wintergerste

Da bis zum Jahr 2009 ausschließlich die Vegetationsindices VX 1, VX 2, NDVI, IRR, IRG, IR 1 sowie SAVI berechnet wurden, konnten über den langen Messzeitraum (2002 bis 2014) die Bestimmtheitsmaße nur für diese Indices bestimmt werden. Nach der linearen Regression war die N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste eng mit den Messwerten des VX 2 korreliert ($R^2 = 0,76$) (Tab. 90). Bis zum Grannenspitzen sank das Bestimmtheitsmaß dieses Index auf 0,71. Ähnliche Werte der Bestimmtheitsmaße wie der VX 2 wiesen zu Bestockungsbeginn nur der IRR und IRG auf. Allerdings nahmen die R^2 -Werte des IRR mit den folgenden Terminen deutlich ab. Der IRG dagegen erwies sich im weiteren Vegetationsverlauf als sehr sicherer Vegetationsindex, da zum Grannenspitzen ein Bestimmtheitsmaß aus der linearen Regression zwischen der N-Aufnahme und dem Index von 0,78 berechnet wurde. Der VX 1 war zu Schossbeginn und zum Zweiknotenstadium für die Abschätzung der N-Aufnahme bei zweizeiliger Wintergerste weniger geeignet. Mit fortlaufender Vegetation erhöhte sich der R^2 -Wert dieses Index, so dass zu BBCH 49 ein Bestimmtheitsmaß von 0,77 berechnet wurde. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Vegetationsindices korrelierten die Messwerte des NDVI über die gesamte Vegetation hinweg nur mäßig mit der N-Aufnahme. Vergleichbare Ergebnisse waren beim IR 1 zu beobachten. Mit dem SAVI konnte zu keinem Termin eine sichere Aussage zur N-Aufnahme des Gerstenbestandes getroffen werden. Bei allen in diesem

Zeitraum getesteten Vegetationsindices war auffällig, dass zur Hauptblüte die Bestimmtheitsmaße der zweizeiligen Gerste deutlich abfielen, wobei zu diesem Stadium die Messwerte des VX 1 und IRG noch am besten mit der N-Aufnahme korrelierten.

Tab. 90: Bestimmtheitsmaße aus der der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013).

BBCH	Gleichung	VX 1	VX 2	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI
30	lin.	0,46	0,76	0,52	0,74	0,71	0,43	0,38
	quadr.	0,48	0,77	0,66	0,74	0,71	0,46	0,40
32	lin.	0,62	0,76	0,45	0,64	0,72	0,46	0,39
	quadr.	0,70	0,82	0,61	0,65	0,75	0,53	0,42
49	lin.	0,77	0,71	0,46	0,58	0,78	0,59	0,37
	quadr.	0,85	0,83	0,65	0,61	0,82	0,68	0,38
65	lin.	0,61	0,66	0,39	0,61	0,70	0,45	0,39
	quadr.	0,71	0,76	0,56	0,64	0,74	0,57	0,48

Beim NDVI war in der zweizeiligen Gerste über die gesamte Vegetation ein Sättigungseffekt festzustellen (Tab. 90 & Abb. 30). Dieser Effekt hatte eine Erhöhung der Bestimmtheitsmaße um 0,09 (BBCH 30), um 0,16 (BBCH 32) und um 0,19 (BBCH 49) zur Folge, wenn statt der linearen Regressionsgeraden eine quadratische Funktion gerechnet wurde. Aufgrund einer solchen Sättigung ist es über diesen Index nicht möglich, N-Aufnahmemengen über 50,0 kg ha⁻¹ (BBCH 32) und 100,0 kg ha⁻¹ (BBCH 49) sicher voneinander zu unterscheiden. Eine ähnliche Beobachtung wurde beim VX 2 zum Grannenspitzen gemacht¹⁴. N-Aufnahmewerte früherer Entwicklungsstadien konnten bei diesem Index dagegen ohne Sättigung abgebildet werden. Bei den übrigen Indices waren im Zeitraum bis zu BBCH 49 nur geringe Sättigungseffekte nachzuweisen.

¹⁴ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Beschriftung der Y-Achse beim Vegetationsindex VX 2 in Abb. 30 verzichtet.

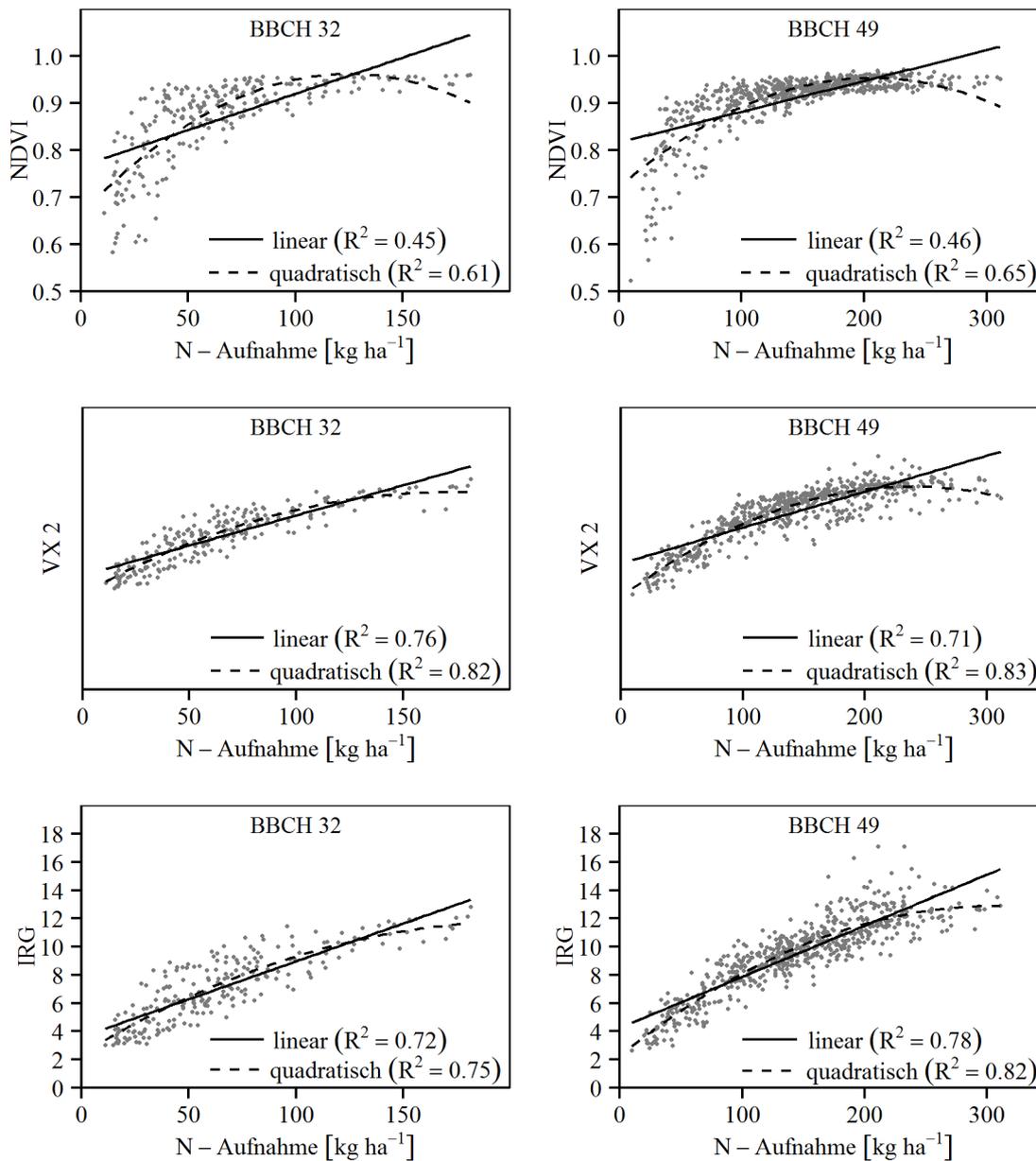


Abb. 30: Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme von zweizeiliger Gerste und den Messwerten der Indices NDVI, VX 2 und IRG zu BBCH 32 (links) und BBCH 49 (rechts) (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013).

Mehrzeilige Wintergerste

Vergleichbare Ergebnisse wurden in den linearen Regressionsgleichungen zwischen N-Aufnahme und Vegetationsindices für die mehrzeilige Gerste im Untersuchungszeitraum 2002 bis 2014 erzielt (Tab. 91). Zu den frühen Stadien BBCH 30 und BBCH 32 bildeten die Indices VX 2 und IRG die N-Aufnahme am besten ab. Während sich das Bestimmtheitsmaß beim VX 2 bis BBCH 49 etwas verringerte, erhöhte sich zu diesem Termin das R² beim IRG auf 0,78. Der VX 1 erwies sich ab dem Zweiknotenstadium (R² = 0,70) bis zum Grannenspitzen (R² = 0,73) als ebenfalls gut geeignet zum Abschätzen der N-Aufnahme. Die Indices

NDVI, IRR, IR 1 und SAVI waren zur Bestimmung der N-Aufnahme im Pflanzenbestand weniger gut geeignet. Zur Vollblüte sank bei sämtlichen Indices das R^2 auf Werte zwischen 0,30 (SAVI) und 0,69 (IRG) ab.

Tab. 91: Bestimmtheitsmaße aus der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008).

BBCH	Gleichung	VX 1	VX 2	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI
30	lin.	0,50	0,70	0,52	0,55	0,65	0,38	0,32
	quadr.	0,52	0,71	0,61	0,56	0,65	0,42	0,36
32	lin.	0,70	0,75	0,47	0,63	0,76	0,53	0,22
	quadr.	0,78	0,79	0,64	0,65	0,79	0,62	0,27
49	lin.	0,73	0,70	0,38	0,64	0,78	0,63	0,19
	quadr.	0,83	0,84	0,55	0,69	0,85	0,78	0,19
65	lin.	0,59	0,65	0,38	0,65	0,69	0,49	0,30
	quadr.	0,66	0,74	0,52	0,69	0,74	0,59	0,35

Wie bei der zweizeiligen Gerste traten auch bei der mehrzeiligen Gerste vor allem beim NDVI deutliche Sättigungseffekte auf (Tab. 91 & Abb. 31). So waren die R^2 -Werte der quadratischen Funktion um 0,17 (BBCH 32) höher als die der linearen Regressionsfunktion. Deutlich geringer fiel dieser Effekt bei den übrigen Indices aus, wobei der VX 2 und IR 1 ab BBCH 49 eine verstärkte Sättigung bei hohen N-Aufnahmeraten aufwiesen¹⁵.

¹⁵ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Beschriftung der Y-Achse beim Vegetationsindex VX 2 in Abb. 31 verzichtet.

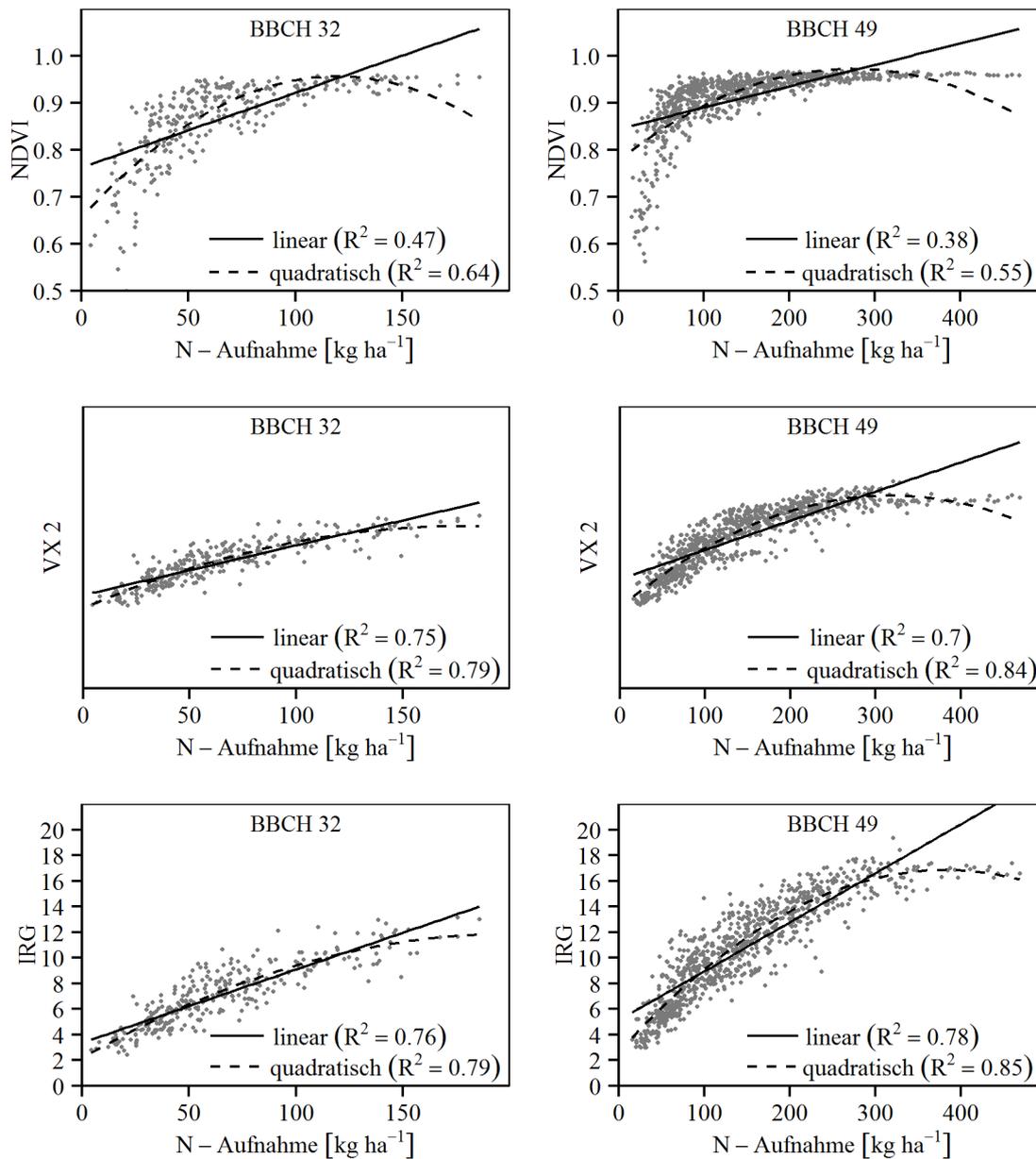


Abb. 31: Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme [kg ha⁻¹] von mehrzeilige Gerste und den Messwerten der Indices NDVI, VX 2 und IRG zu BBCH 32 (links) und BBCH 49 (rechts) (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008).

4.2.4.3 Abbildung der N-Aufnahme mit Vegetationsindices im Zeitraum 2009 bis 2014

Ab dem Versuchsjahr 2009 wurden zusätzlich die Vegetationsindices VX 3, NDI 2, SR 1 sowie SR 2 berechnet (Tab. 92). Um diese neuen Indices mit den bereits Beschriebenen besser vergleichen zu können, wurden für diesen kürzeren Untersuchungszeitraum Regressionen zwischen der N-Aufnahme des Pflanzenbestandes und allen Indices kalkuliert. Es zeigte sich, dass sich die Ergebnisse der bereits behandelten Vegetationsindices des langen Untersuchungsintervalls grundsätzlich nicht von den Resultaten des kurzen Zeitraums unterschieden.

Zweizeilige Wintergerste

So bildeten die ab dem Versuchsjahr 2009 berechneten Indices VX 3, NDI 2 SR 1 sowie SR 2 bei zweizeiliger Wintergerste die N-Aufnahme zu Schossbeginn mit einer ähnlichen Güte ab wie der VX 1 ($R^2 = 0,62$) (Tab. 92). Die Aussagekraft des VX 2 erreichten sie jedoch zu diesem Zeitpunkt nicht. Bereits ab dem Zweiknotenstadium korrelierten diese vier neuen Indices mit R^2 -Werten zwischen 0,76 (SR 1) und 0,81 (VX 3) eng mit der N-Aufnahme und damit auf einem ähnlichen Niveau wie die Indices VX 2 und IRG. Die hohe Güte der N-Schätzung dieser neu in die Untersuchung aufgenommenen Vegetationsindices hielt bis BBCH 49 an, weshalb die N-Aufnahme zu diesem Zeitpunkt etwas besser mit diesen neuen Indices abgebildet werden konnte als über den VX 2 ($R^2 = 0,65$), den IRG ($R^2 = 0,74$) oder den VX 1 ($R^2 = 0,75$). Den meisten Indices gemein war die gegenüber dem vorherigen Termin reduzierte Fähigkeit zur Abbildung der N-Aufnahme zum Zeitpunkt der Vollblüte. Wie aus dem Vergleich der R^2 -Werte der linearen und quadratischen Regressionsfunktion hervorgeht, zeigten sich die Indices VX 3, NDI 2, SR 1 sowie SR 2 über die gesamte Vegetation hinweg als deutlich weniger anfällig gegenüber dem Sättigungseffekt. Vor allem zu BBCH 49 erwiesen sich der VX 3 und der SR 2 als sehr stabile Indices zum Abschätzen der N-Aufnahme, während der NDVI, der VX 1 und der VX 2 deutliche Sättigungseffekte aufwiesen.

Tab. 92: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

BBCH	Gleichung	VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
30	lin.	0,62	0,73	0,62	0,58	0,72	0,69	0,63	0,39	0,65	0,64	0,66
	quad.	0,64	0,74	0,62	0,69	0,72	0,69	0,65	0,42	0,66	0,66	0,66
32	lin.	0,72	0,78	0,81	0,54	0,75	0,80	0,66	0,40	0,77	0,76	0,79
	quad.	0,82	0,84	0,86	0,70	0,75	0,82	0,75	0,44	0,84	0,84	0,84
49	lin.	0,75	0,65	0,81	0,48	0,55	0,74	0,73	0,41	0,79	0,77	0,82
	quad.	0,86	0,82	0,86	0,75	0,59	0,80	0,86	0,44	0,88	0,88	0,88
65	lin.	0,66	0,60	0,71	0,38	0,58	0,67	0,62	0,38	0,68	0,67	0,70
	quad.	0,78	0,72	0,78	0,57	0,60	0,72	0,75	0,48	0,78	0,78	0,77

Mehrzeilige Wintergerste

Bei mehrzeiliger Wintergerste konnten in diesem Versuchszeitraum bereits ab BBCH 30 hohe Korrelationen zwischen den Indices VX 3, NDI 2, SR 1 sowie SR 2 und der N-Aufnahme der

Pflanzen festgestellt werden, die etwa die Güte des VX 2 erreichten ($R^2 = 0,73$) (Tab. 93). Ab dem Entwicklungsstadium BBCH 49 waren vor allem der VX 3 ($R^2 = 0,78$) und der SR 2 ($R^2 = 0,76$) den übrigen Indices überlegen. NDVI und SAVI waren zu diesem Zeitpunkt nicht in der Lage die N-Aufnahme mit einer ausreichenden Güte abzubilden. Bis zur Blüte sanken die Bestimmtheitsmaße aller Indices etwas ab, wobei der IRG, der VX 3 und der SR 2 noch den besten Wert erreichte ($R^2 = 0,69$). Ähnlich wie bei der zweizeiligen Gerste wies der NDVI über die gesamte Vegetation den stärksten Sättigungseffekt auf. Ab BBCH 49 war vor allem beim VX 1, VX 2 und IR 1 ein deutlicher Sättigungseffekt nachzuweisen, wie aus dem Vergleich der R^2 -Werte der linearen und quadratischen Regressionsfunktion hervorgeht. Am stabilsten erwiesen sich der VX 3 und der SR 2.

Tab. 93: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

BBCH	Gleichung	VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
30	lin.	0,66	0,73	0,66	0,65	0,71	0,74	0,70	0,38	0,70	0,70	0,71
	quadr.	0,67	0,73	0,66	0,72	0,71	0,74	0,71	0,43	0,70	0,70	0,71
32	lin.	0,75	0,80	0,82	0,56	0,75	0,84	0,76	0,25	0,81	0,80	0,82
	quadr.	0,81	0,83	0,84	0,69	0,75	0,86	0,81	0,28	0,84	0,84	0,84
49	lin.	0,71	0,69	0,78	0,38	0,63	0,77	0,66	0,20	0,74	0,72	0,76
	quadr.	0,82	0,85	0,86	0,54	0,68	0,84	0,81	0,20	0,85	0,84	0,85
65	lin.	0,64	0,65	0,69	0,42	0,67	0,69	0,62	0,30	0,66	0,65	0,69
	quadr.	0,72	0,74	0,75	0,58	0,71	0,76	0,72	0,35	0,75	0,74	0,75

4.2.4.4 Abbildung der Biomasse mit Vegetationsindices im Zeitraum 2009 bis 2014

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Regressionen zwischen den Vegetationsindices und dem Biomasse-Aufwuchs der zwei- und mehrzeiligen Wintergerste dargestellt. Aufgrund der geringen Unterschiede der Ergebnisse aus den Regressionen zwischen den Messwerten der Indices und der N-Aufnahme zwischen dem langen und kurzen Untersuchungszeitraum wird hierbei nur auf den Zeitraum ab 2009 eingegangen.

Zweizeilige Wintergerste

Im Vergleich zur N-Aufnahme konnten die Indices den TM-Aufwuchs wesentlich schlechter abbilden (Tab. 94). Die R^2 -Werte lagen bei zweizeiliger Wintergerste zwischen 0,19 (SAVI) und maximal 0,37 (IRR). Neben dem SAVI zeigten zu diesem Zeitpunkt der VX 1 und der VX 3 Schwächen bei der Detektion der oberirdischen Biomasse. Zu BBCH 32 korrelierten die Messwerte des VX 2 eng mit dem TM-Aufwuchs ($R^2 = 0,60$). Ähnlich genau erwiesen sich der VX 1, der IRG, sowie der NDI 2, der SR 1 und der SR 2. Die höchste Präzision wurde beim VX 3 nachgewiesen ($R^2 = 0,68$). Dieses Niveau konnte keiner der betrachteten Indices halten: Zum Grannenspitzen sanken die R^2 -Werte ab. Zu diesem Entwicklungsstadium erreichte der VX 3 das beste R^2 mit 0,58. Die Indices VX 1, IR 1, NDI 2, SR 1 und SR 2 hatten eine vergleichbare Messqualität. Zur Hauptblüte verschlechterte sich die Messgenauigkeit erneut. So wurden R^2 -Werte von 0,31 beim VX 2 und von 0,41 beim NDVI berechnet. Etwas genauer schätzten die übrigen Vegetationsindices die Biomasse ab.

Je mehr oberirdische Biomasse gebildet wurde, desto stärker war der Sättigungseffekt beim NDVI, wie aus dem Vergleich der R^2 -Werte der linearen und quadratischen Regressionsgleichung hervorgeht. Zum Grannenspitzen lag das Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsgleichung bei 0,29, das der quadratischen Gleichung bei 0,52. Alle übrigen Indices blieben bis zum Zweiknotenstadium vom Biomassezuwachs weitgehend unbeeinflusst und zeigten kaum Sättigung. Bis zum Grannenspitzen änderte sich dies vor allem bei den Indices VX 1, VX 2, IR 1 und IRR.

Tab. 94: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen dem TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

BBCH	Gleichung	VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
30	lin.	0,25	0,35	0,23	0,36	0,37	0,31	0,29	0,19	0,27	0,27	0,27
	quad.	0,26	0,36	0,26	0,38	0,38	0,32	0,29	0,19	0,28	0,28	0,28
32	lin.	0,59	0,60	0,68	0,43	0,57	0,62	0,53	0,36	0,63	0,62	0,64
	quad.	0,61	0,60	0,68	0,47	0,57	0,62	0,54	0,37	0,64	0,63	0,64
49	lin.	0,53	0,34	0,58	0,29	0,22	0,42	0,47	0,20	0,55	0,53	0,56
	quad.	0,64	0,51	0,65	0,52	0,29	0,50	0,58	0,23	0,63	0,63	0,62
65	lin.	0,45	0,41	0,47	0,31	0,45	0,47	0,41	0,37	0,45	0,45	0,46
	quad.	0,55	0,49	0,53	0,46	0,45	0,50	0,50	0,43	0,52	0,54	0,51

Mehrzeilige Wintergerste

Bei der mehrzeiligen Wintergerste lag zu BBCH 30 die Messpräzision etwas höher als bei der zweizeiligen Wintergerste (Tab. 95). Das Bestimmtheitsmaß aus der linearen Regression zwischen dem VX 2 und dem TM-Aufwuchs erreichte 0,44. Ein ähnliches, wenngleich geringeres Niveau war bei den Vegetationsindices VX 3, NDVI, IRG, NDI 2, SR 1 und SR 2 zu beobachten. Mit dem Biomassezuwachs im Verlauf der Vegetation erhöhte sich das Bestimmtheitsmaß vor allem beim VX 3, der zum Zweiknotenstadium ein R^2 von 0,69 erreichte. Der NDVI, der IRR und der SAVI wiesen dagegen zu diesem Zeitpunkt R^2 -Werte von 0,18 (SAVI) bis 0,51 (IRR) auf. Dieses Niveau hielten beinahe alle Indices bis BBCH 49. Nur beim NDVI verschlechterte sich das R^2 auf 0,32. Mit Beginn der Hauptblüte verringerten sich die Werte der Bestimmtheitsmaße aller Indices.

Als durchgehend anfällig für den Sättigungseffekt erwies sich auch bei mehrzeiliger Gerste der NDVI. Bei allen übrigen Indices zeigt sich diese Eigenschaft bis BBCH 49 nicht, wobei anschließend besonders der VX 2 und der IR 1 zum Grannenspitzen zur Sättigung und damit unscharfen Trennung verschiedener Biomasseaufwüchse neigten.

Tab. 95: Bestimmtheitsmaße der linearen (lin.) und quadratischen (quad.) Regressionsgleichung zwischen dem TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices zu unterschiedlichen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

BBCH	Gleichung	VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
30	lin.	0,37	0,44	0,41	0,45	0,38	0,40	0,40	0,16	0,42	0,42	0,42
	quad.	0,37	0,44	0,41	0,48	0,38	0,40	0,40	0,18	0,42	0,42	0,42
32	lin.	0,63	0,62	0,70	0,43	0,51	0,64	0,60	0,18	0,67	0,66	0,67
	quad.	0,65	0,62	0,70	0,49	0,51	0,65	0,61	0,19	0,67	0,67	0,67
49	lin.	0,63	0,58	0,70	0,32	0,48	0,66	0,57	0,14	0,65	0,63	0,68
	quad.	0,70	0,67	0,74	0,46	0,52	0,71	0,66	0,14	0,71	0,70	0,72
65	lin.	0,59	0,57	0,61	0,41	0,64	0,62	0,56	0,29	0,59	0,59	0,60
	quad.	0,63	0,60	0,64	0,51	0,64	0,64	0,61	0,32	0,63	0,63	0,63

4.2.5 Auswertung des Sortenversuchs Wintergerste

Die Auswertung des Sortenversuchs von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste am Standort Dürnast bezieht sich auf die Jahre 2010 bis 2012. Neben der Untersuchung des Biomasseaufwuchses und der N-Aufnahme wurden Spektralmessungen in diesen Versuchen durchgeführt,

um den Sorteneinfluss auf verschiedene Vegetationsindices prüfen zu können. Für den Termin BBCH 39 standen bei beiden Sortentypen nur einjährige Daten aus dem Jahr 2011 zur Verfügung.

Über den gesamten Untersuchungszeitraum von 2010 bis 2012 wurde bis auf BBCH 32 ein signifikanter bis höchstsignifikanter Unterschied im Biomasseaufwuchs und der N-Aufnahme zwischen zwei- und mehrzeiligen Gersten festgestellt (Tab. 96 & Tab. 97). Aus diesem Grund wurden diese Sortentypen getrennt statistisch analysiert. Für die weitere detailliertere Auswertung dieser beiden Parameter wurde, bedingt durch den Sortenwechsel, das Intervall 2010 bis 2012 ausgewertet.

Tab. 96: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable N-Aufnahme zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Faktoren Jahr, Sortentyp und N-Stufe (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Faktor	BBCH				
	30	32	39	49	65
Jahr	44,2***	44,1***		0,2	59,9***
Sortentyp	10,1**	0,7	21,7***	11,7***	18,2***
N-Stufe	12,7***	59,8***	48,2***	166,2***	186,9***
Jahr*Sortentyp	0,2	0,0		2,8	11,2***
Jahr*N-Stufe	1,8	0,6		0,0	10,6***
Sortentyp*N-Stufe	1,2	0,1	1,4	1,8	3,7

Tab. 97: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable TM-Aufwuchs zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Faktoren Jahr, Sortentyp und N-Stufe (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Faktor	BBCH				
	30	32	39	49	65
Jahr	44,5***	33,3***		144,6***	41,1***
Sortentyp	12,2***	0,1	6,3*	9,3**	11,5***
N-Stufe	2,9	8,3**	9,8**	29,7***	67,0***
Jahr*Sortentyp	0,0	0,3		4,3*	0,4
Jahr*N-Stufe	0,1	0,0		1,3	2,4
Sortentyp*N-Stufe	0,5	0,9	0,1	1,0	1,3

4.2.5.1 TM-Aufwuchs in Abhängigkeit der Sortenwahl

Im Versuchszeitraum 2010 bis 2012 reagierten beide Sortentypen über die gesamte Vegetation hinweg höchstsignifikant mit dem TM-Aufwuchs auf den Faktor Jahr (Tab. 98 & Tab. 99). Die differenzierte N-Düngung führte ab dem Zweiknotenstadium (zweizeilige Sorten) bzw. dem Fahnenblattstadium (mehrzeilige Sorten) zu statistisch gesicherten Unterschieden in der Bildung oberirdischer Biomasse.

Tab. 98: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable TM-Aufwuchs von zweizeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Hauptfaktoren Jahr, Sorte und N-Stufe (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Faktor	BBCH				
	30	32	39	49	65
Jahr	21,2***	17,2***		54,6***	26,3***
Sorte	0,3	0,4	0,5	1,2	0,5
N-Stufe	0,6	6,5*	7,3*	22,9***	27,1***
Jahr*Sorte	0,2	0,4		0,8	0,9
Jahr*N-Stufe	0,2	0,2		0,8	0,3
Sorte*N-Stufe	0,7	0,8	0,7	0,2	0,3

Tab. 99: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Hauptfaktoren Jahr, Sorte und N-Stufe (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Faktor	BBCH				
	30	32	39	49	65
Jahr	26,9***	18,2***		89,9***	19,7***
Sorte	3,7**	4,2**	3,1*	2,4	2,1
N-Stufe	3,8	2,8	4,5*	9,0**	49,4***
Jahr*Sorte	3,7**	1,8		0,1	4,6***
Jahr*N-Stufe	1,1	0,5		0,5	5,3**
Sorte*N-Stufe	1,0	0,4	0,8	0,7	0,5

Bei den zweizeiligen Sorten wurden zu keinem Entwicklungsstadium signifikante Unterschiede im TM-Aufwuchs zwischen den Sorten festgestellt (Tab. 100). Zu BBCH 30 lagen die oberirdischen TM-Aufwüchse zwischen 14,8 dt ha⁻¹ (Finesse) und 16,7 dt ha⁻¹ (Duet). Bis

zur Hauptblüte verfünffachte sich die oberirdische Biomasse, so dass bei Duet und Manureva maximal 84,5 dt ha⁻¹ TM erreicht wurden.

Tab. 100: Mittlerer TM-Aufwuchs [dt ha⁻¹] von zweizeiliger Wintergerste im Verlauf der Vegetation für verschiedene Sorten (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Sorte	BBCH				
	30	32	39	49	65
Duet	16,7 a	15,8 a	32,7 a	43,4 a	84,5 a
Finesse	14,8 a	16,9 a	31,2 a	46,3 a	80,8 a
Manureva	15,5 a	17,6 a	30,6 a	48,9 a	84,5 a
Metaxa	15,6 a	17,8 a	32,4 a	49,4 a	80,4 a
Reni	15,7 a	17,9 a	29,8 a	47,0 a	82,2 a

Bei der mehrzeiligen Gerste unterschieden sich die Biomasseaufwüchse der einzelnen Sorten vom Messbeginn bis BBCH 39 signifikant voneinander (Tab. 101). Zu Schossbeginn bildete die Sorte Merlot am wenigsten Biomasse (15,9 dt ha⁻¹ TM), während Zzoom (21,8 dt ha⁻¹ TM) die höchste Aufwuchsleistung hatte. Bis zum vollständigen Erscheinen des Fahnenblattes verdoppelten die Sorten nahezu ihre oberirdische Biomasse. Den geringsten Biomasseaufwuchs von 31,2 dt ha⁻¹ TM wies die Sorte Yokohama auf. Dieser wurde nur von der Sorte Zzoom signifikant um 8,2 dt ha⁻¹ TM übertroffen. Die hohen Biomasseaufwüchse bei Zzoom setzten sich bis zu Hauptblüte fort, allerdings waren zu BBCH 49 und BBCH 65 die Unterschiede zu den anderen Sorten statistisch nicht mehr zu trennen. Mittelwertvergleiche zu Schossbeginn und zur Hauptblüte waren aufgrund der hohen F-Werte der signifikanten Wechselwirkung zwischen den Faktoren Jahr und Sorte nicht möglich.

Tab. 101: Mittlerer TM-Aufwuchs [dt ha⁻¹] von mehrzeiliger Wintergerste im Verlauf der Vegetation für verschiedene Sorten (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Sorte	BBCH				
	30	32	39	49	65
Fridericus	17,8	16,1 ab	34,8 ab	52,3 a	90,9
Highlight	18,0	14,6 a	33,8 ab	52,2 a	86,7
Merlot	15,9	18,5 ab	32,3 ab	49,6 a	89,9
Yokohama	19,2	15,1 a	31,2 a	46,4 a	83,1
Zzoom	21,8	19,5 b	39,4 b	56,5 a	93,6

4.2.5.2 N-Aufnahme in Abhängigkeit der Sortenwahl

Die N-Aufnahme beider Sortentypen unterlag beinahe über die gesamte Vegetation einem deutlichen Jahreseinfluss, der vor allem durch die Witterung und die Standortwahl erklärt werden kann (Tab. 102 & Tab. 103). Daneben reagierte die N-Aufnahme bei mehrzeiliger Gerste über die gesamte Vegetation und bei zweizeiliger Gerste ab dem Zweiknotenstadium höchstsignifikant auf eine differenzierte N-Düngung. Über die gesamte Vegetationsperiode hinweg war über die Varianzanalyse bei beiden Sortentypen kein Sortenunterschied feststellbar.

Tab. 102: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Hauptfaktoren Jahr, Sorte und N-Stufe (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Faktor	BBCH				
	30	32	39	49	65
Jahr	18,1***	20,6***		0,7	11,7***
Sorte	1,3	0,8	0,4	0,8	2,2
N-Stufe	3,0	29,7***	26,5***	100,5***	83,6***
Jahr*Sorte	0,6	0,6		1,6	1,6
Jahr*N-Stufe	0,0	1,0		0,0	2,2
Sorte*N-Stufe	0,4	0,6	0,6	0,6	0,3

Tab. 103: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängige Variable N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste zu verschiedenen Entwicklungsstadien mit den Hauptfaktoren Jahr, Sorte und N-Stufe (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Faktor	BBCH				
	30	32	39	49	65
Jahr	25,2***	23,6***		2,0	67,4***
Sorte	2,3	2,3	1,9	0,6	1,3
N-Stufe	10,9**	30,0***	27,4***	62,6***	133,3***
Jahr*Sorte	1,7	1,6		0,1	4,7***
Jahr*N-Stufe	2,7	0,0		0,1	11,6***
Sorte*N-Stufe	1,1	0,6	0,7	0,9	0,2

Bei zweizeiliger Gerste nahmen die Sorten zu Schossbeginn zwischen 35,7 kg ha⁻¹ N (Manureva) und 51,4 kg ha⁻¹ N (Metaxa) auf (Tab. 104). Bis zur Hauptblüte stieg die N-Aufnahme auf maximal 176,3 kg ha⁻¹ (Duet) an, was einer Vervierfachung der N-Aufnahme im Vergleich zum Messbeginn entspricht.

Tab. 104: Mittlere N-Aufnahme [kg ha⁻¹] von zweizeiliger Wintergerste im Verlauf der Vegetation für verschiedene Sorten (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Sorte	BBCH				
	30	32	39	49	65
Duet	44,1 a	55,4 a	63,6 a	108,7 a	176,3 a
Finesse	45,5 a	60,4 a	63,0 a	100,9 a	153,2 a
Manureva	35,7 a	60,5 a	59,9 a	108,5 a	175,2 a
Metaxa	51,4 a	62,9 a	60,0 a	110,4 a	161,7 a
Reni	51,1 a	65,2 a	60,4 a	101,2 a	172,3 a

Zu Schossbeginn nahmen die mehrzeiligen Sorten zwischen 46,2 kg ha⁻¹ N (Merlot) und 65,3 kg ha⁻¹ N (Zzoom) auf (Tab. 105). Bis zur Hauptblüte wurden in der oberirdischen Biomasse maximal 197,5 kg ha⁻¹ N (Merlot) gemessen. Zu BBCH 65 wurde beim mehrzeiligen Sortentyp eine hochsignifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Jahr und Sorte gefunden. Der F-Wert dieser Interaktion war um mehr als das Dreifache höher als der des Faktors Sorte. Aus diesem Grund konnte ein Mittelwertvergleich nicht durchgeführt werden.

Tab. 105: Mittlere N-Aufnahme [kg ha⁻¹] von mehrzeiliger Wintergerste im Verlauf der Vegetation für verschiedene Sorten (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Sorte	BBCH				
	30	32	39	49	65
Fridericus	56,3 a	57,3 a	70,5 a	113,5 a	191,1
Highlight	54,4 a	52,8 a	73,0 a	120,6 a	187,4
Merlot	46,2 a	64,1 a	65,7 a	114,0 a	197,5
Yokohama	57,9 a	54,1 a	73,1 a	113,1 a	175,1
Zzoom	65,3 a	63,6 a	82,0 a	120,9 a	188,1

4.2.5.3 Abhängigkeit der Vegetationsindices von der Sortenwahl

Über eine Varianzanalyse mit den als zufällig angenommenen Faktoren Jahr und Wiederholung wurde der Effekt der Faktoren Termin, N-Stufe und Sortentyp auf verschiedene Vegeta-

tionsindices für den Zeitraum 2010 bis 2012 untersucht (Tab. 106). Da der SAVI, wie in Kapitel 4.2.4 dargestellt, über die gesamte Vegetation zur Abschätzung der N-Aufnahme ungeeignet war, wurde auf diesen Index bei der weiteren Auswertung verzichtet. Der Termin und die differenzierte N-Düngung erwiesen sich als höchst signifikant im Hinblick auf die Messwerte sämtlicher untersuchter Vegetationsindices. Ebenso unterschieden sich die Messwerte aller Indices zwischen zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste. Aus diesem Grund wurden die weiteren Auswertungen getrennt nach zweizeiligen und mehrzeiligen Sorten zu den einzelnen Entwicklungsstadien durchgeführt.

Tab. 106: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für verschiedene Vegetationsindices als abhängige Variablen mit den Faktoren Termin, Sortentyp und N-Stufe (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Faktor	VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1
Termin	313,2***	221,8***	364,8***	100,1***	137,1***	214,8***	229,1***
Sortentyp	29,1***	56,3***	25,0***	33,6***	49,1***	47,2***	51,1***
N-Stufe	356,1***	339,1***	409,2***	125,5***	253,0***	308,8***	356,3***
Termin*Sortentyp	0,4	2,2	0,6	2,2	4,3**	3,5**	1,3
Termin*N-Stufe	5,2***	5,4***	11,9***	0,1	8,7***	7,1***	5,7***
Sortentyp*N-Stufe	0,7	1,0	1,3	0,5	5,2*	2,9	0,8

Faktor	NDI 2	SR 1	SR 2
Termin	320,0***	320,8***	326,5***
Sortentyp	33,7***	34,0***	35,9***
N-Stufe	399,4***	382,0***	426,4***
Termin*Sortentyp	0,6	0,5	0,8
Termin*N-Stufe	9,3***	7,2***	12,7***
Sortentyp*N-Stufe	1,0	0,6	1,6

Mehrzeilige Wintergerste

In diesem mehrjährigen Betrachtungszeitraum von 2010 bis 2012 reagierten bei mehrzeiliger Wintergerste nahezu alle in diese Auswertung mit einbezogenen Vegetationsindices zu jedem Entwicklungsstadium signifikant (IR 1) bzw. höchstsignifikant auf den Einfluss des Faktors Jahr (Tab. 107 & Tab. 108). Auf unterschiedliche N-Aufnahmeraten reagierten die Vegetationsindices deutlich mit differenzierten Messwerten. Ein Sorteneffekt war mit Ausnahme des Index NDVI bei allen Indices statistisch zur Hauptblüte nachzuweisen. Zum Zweiknotensta-

dium unterlagen nur der VX 1 und der VX 3 keinem Sorteneinfluss. Als besonders anfällig gegenüber wechselnden Sorteneigenschaften erwies sich der IRR, der bereits zu Schossbeginn auf den Sortenwechsel statistisch nachweisbar unterschiedliche Messwerte lieferte. Allerdings war die Wirkung der Sorte dem Effekt der Kovariaten N-Aufnahme unterlegen, wie aus den Quadratsummen dieser beiden Größen hervorgeht. Bei den Indices IRR und NDVI erreichten die SSQ-Werte zum Zweiknotenstadium 11% bzw. 20% des SSQ-Wertes der Kovariaten N-Aufnahme. Bei den weiteren untersuchten Vegetationsindices lag die Wirkung der Sortenwahl zum selben Messtermin zwischen 6% (VX 3) und 7% (VX 2) des Effekts der N-Aufnahme. In der Hauptblüte war die Wirkung der Sorten nur bei den Indices VX 2 und IRG stärker als der Effekt der Kovariaten. Bei den übrigen Indices erreichte die Quadratsumme des Faktors Sorte zu BBCH 65 zwischen 11% (IRR) und 72% (VX 1) der SSQ-Werte der Kovariaten.

Zweizeilige Wintergerste

Wie bei mehrzeiligen Sorten beeinflusste bei den zweizeiligen Sorten neben der Kovariaten N-Aufnahme der Faktor Jahr die Messwerte der Vegetationsindices deutlich, wobei beim VX 1 zu Schossbeginn kein Jahreseffekt nachweisbar war (Tab. A 13 & Tab. A 14). Ein Sorteneffekt auf die Messungen war dagegen beim zweizeiligen Sortentyp nur bei wenigen Vegetationsindices zu finden. Über die Kovarianzanalyse konnte beim NDVI und beim IRR ab dem Grannenspitzen und beim VX 3 sowie beim SR 2 zu BBCH 65 ein Einfluss der Sortenwahl auf die Messwerte dieser vier Indices statistisch abgesichert werden. Im Vergleich zur Kovariaten N-Aufnahme war dieser Sorteneinfluss allerdings vernachlässigbar gering, wie der Vergleich der SSQ-Werte zeigt.

Tab. 107: SSQ-Werte der Kovarianzanalyse für den VX 1, VX 2, VX 3, NDVI, IRR und IRG bei der mehrzeiligen Wintergerste mit den Faktoren Sorte und Jahr sowie der Kovariaten N-Aufnahme, aufgeteilt nach BBCH-Stadien (Sortenversuch Wintergerste, Dürmast, 2010 bis 2012).

	VX 1					VX 2				
	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
BBCH	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
Kovariate N-Aufnahme	100,3***	196,4***	37,9***	119,5***	114,0***	2,0***	2,1***	0,5***	1,2***	0,7***
Faktor Sorte	3,4	12,8	4,8	11,1	81,6***	0,1	0,1*	0,1	0,1	0,9***
Jahr	293,2***	27,3***		152,0***	135,7***	1,5***	0,4***		2,8***	3,5***
VX 3										
						NDVI				
BBCH	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
Kovariate N-Aufnahme	0,006***	0,007***	0,001***	0,006***	0,008***	0,110***	0,032***	0,009***	0,009***	0,012***
Faktor Sorte	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003***	0,01	0,006***	0,001	0,000	0,002
Jahr	0,011***	0,001***		0,005***	0,005***	0,071***	0,005***		0,035***	0,111***
IRR										
						IRG				
BBCH	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
Kovariate N-Aufnahme	1565,1***	2040,8***	706,1***	1113,2***	2535,1***	50,4***	120,8***	32,7***	78,8***	73,5***
Faktor Sorte	144,4*	217,1**	54,3	93,1	275,4*	2,8	8,0*	3,4	8,7	89,1***
Jahr	545,8***	176,3***		4046,6***	10854,1***	86,9***	11,4***		129,3***	266,5***

Tab. 108: SSQ-Werte der Kovarianzanalyse für den IR 1, NDI 2, SR 1 und SR 2 bei der mehrzeiligen Wintergerste mit den Faktoren Sorte und Jahr sowie der Kovariaten N-Aufnahme, aufgeteilt nach BBCH-Stadien (Sortenversuch Wintergerste, Dürmast, 2010 bis 2012).

	IR 1					NDI 2				
	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
BBCH										
Kovariate N-Aufnahme	0,120***	0,121***	0,028***	0,068***	0,118***	0,027***	0,032***	0,006***	0,022***	0,025***
Faktor Sorte	0,005	0,008*	0,003	0,005	0,038**	0,001	0,002*	0,001	0,002	0,013***
Jahr	0,118***	0,015***		0,135***	0,013*	0,038***	0,004***		0,029***	0,028***

	SR 1					SR 2				
	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
BBCH										
Kovariate N-Aufnahme	0,075***	0,078***	0,016***	0,048***	0,046***	0,16***	0,23***	0,05***	0,18***	0,23***
Faktor Sorte	0,003	0,005*	0,002	0,003	0,021***	0,01	0,01*	0,000	0,01	0,10***
Jahr	0,107***	0,010***		0,064***	0,057***	0,22***	0,02***		0,24***	0,22***

4.2.6 Schnittmethode zum Abschätzen der N-Aufnahme von Wintergerste

Neben der Messung der N-Aufnahme über Sensormessungen stellt die Schnittmethode eine weitere Möglichkeit dar, die N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste abzuschätzen. Regressionsanalysen zeigten für beide Sortentypen einen engen Zusammenhang zwischen dem Frischmasseaufwuchs [kg m^{-2}] und der N-Aufnahme [kg ha^{-1}] (Abb. 32). Um eine möglichst präzise Abschätzung zu erreichen, wurden die Regressionen für die Einzeltermine gerechnet, wie beispielhaft der Abb. 32 entnommen werden kann. Sowohl für zwei- als auch für mehrzeilige Wintergerstensorten wurde eine Veränderung der Steigung sowie des Y-Achsenabschnittes der Regressionsgeraden im Vegetationsverlauf festgestellt (Tab. 109).

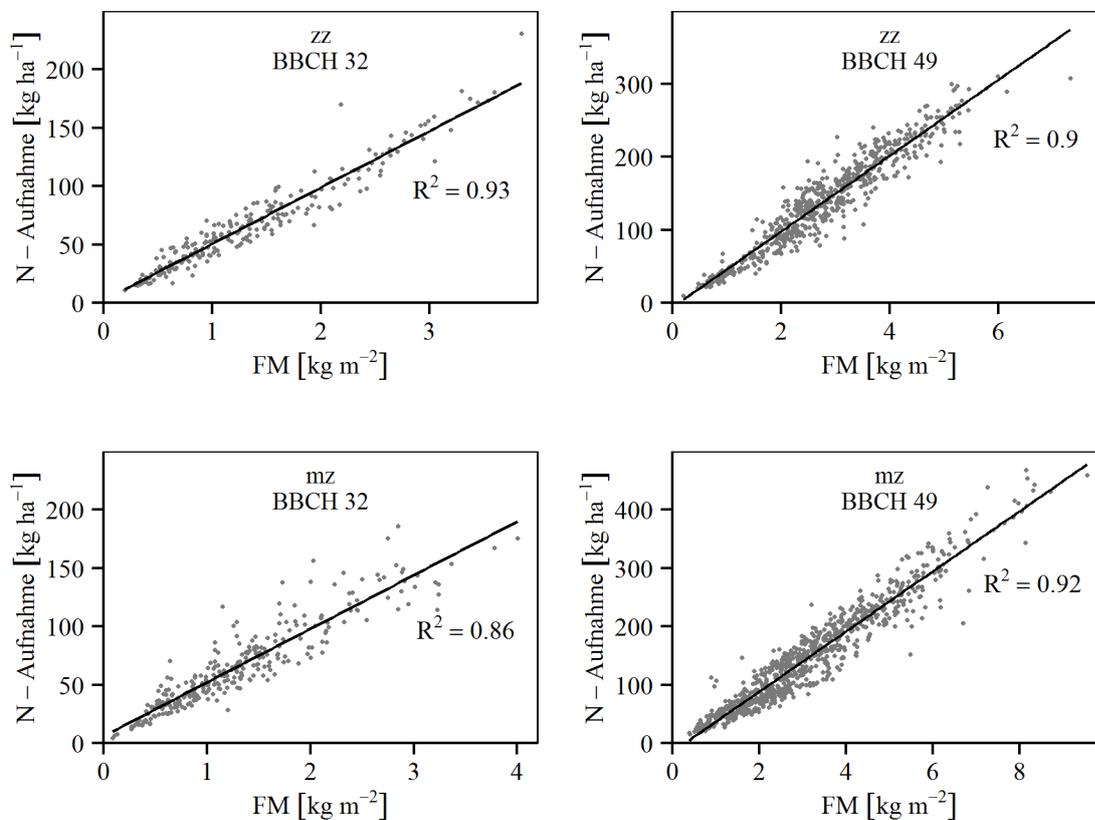


Abb. 32: Regressionen zwischen dem Frischmasseaufwuchs und der N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste für BBCH 32 und BBCH 49 (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013, N-Steigerungsversuch zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013).

Beim zweizeiligen Sortentyp korrelierte der Frischmasseaufwuchs zu Schossbeginn eng mit der N-Aufnahme ($R^2 = 0,81$). Im weiteren Verlauf erhöhte sich dieser Wert noch weiter, bevor das R^2 in der Hauptblüte wieder abnahm ($0,75$). Ähnlich hoch korrelierten der Frischmasseaufwuchs und die N-Aufnahme des mehrzeiligen Sortentyps miteinander.

Tab. 109: Bestimmtheitsmaße sowie lineare Schätzgleichungen aus der Regressionsanalyse zwischen dem Frischmasseaufwuchs und der N-Aufnahme von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013, N-Steigerungsversuch zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013).

BBCH	zweizeilig		mehrzeilig	
	R ²	Gleichung	R ²	Gleichung
30	0,81	$NA_{akt} = 0,69 \cdot FM + 12,8$	0,71	$NA_{akt} = 0,58 \cdot FM + 25,3$
32	0,86	$NA_{akt} = 0,89 \cdot FM + 1,3$	0,89	$NA_{akt} = 0,82 \cdot FM + 18,0$
39	0,96	$NA_{akt} = 1,59 \cdot FM - 20,5$	0,93	$NA_{akt} = 1,27 \cdot FM + 3,8$
49	0,88	$NA_{akt} = 0,87 \cdot FM - 15,3$	0,86	$NA_{akt} = 1,00 \cdot FM - 2,5$
65	0,75	$NA_{akt} = 0,59 \cdot FM + 58,8$	0,72	$NA_{akt} = 0,54 \cdot FM + 74,2$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
NA_{akt}	kg ha ⁻¹	aktuelle N-Aufnahme zum jeweiligen Schnitzeitpunkt
FM	kg m ⁻²	oberirdischer Frischmasseaufwuchs

Um herauszufinden, ob über die Regressionsgleichungen die N-Aufnahme des Pflanzenbestandes geschätzt werden kann, wurden diese anhand eines unabhängigen Datensatzes überprüft. Dazu wurde der Sortenversuch Wintergerste verwendet, indem der Frischmasseaufwuchs je Quadratmeter des Sortenversuchs in die Schätzgleichungen eingesetzt wurde. Die Präzision der Schätzung wurde anhand von Regressionsanalysen zwischen der geschätzten und tatsächlich im Versuch ermittelten N-Aufnahme festgestellt. Über dieses Verfahren wurde die gute Präzision dieses Vorgehens zur Bestimmung der N-Aufnahme bewiesen werden. Abb. 33 zeigt die Regression beider Größen für zwei- und mehrzeilige Gerste zu den Terminen BBCH 30 und BBCH 49. Weitere Ergebnisse sind in Tab. 110 einzusehen.

Zu Schossbeginn ergab sich aus der Regression zwischen gemessener und geschätzter N-Aufnahme ein R²-Wert von 0,81. Dieses stieg auf maximal 0,96 zu BBCH 39 an. Mit Eintritt in die Hauptblüte des Gerstenbestandes reduzierte sich dieser Wert. Etwas ungenauer war die Abschätzung bei der mehrzeiligen Gerste zu BBCH 30. Hier wurde ein Bestimmtheitsmaß von 0,71 gefunden. Die Schätzgleichungen zu späteren Terminen erreichten dagegen wieder ein mit dem zweizeiligen Sortentyp vergleichbares Niveau.

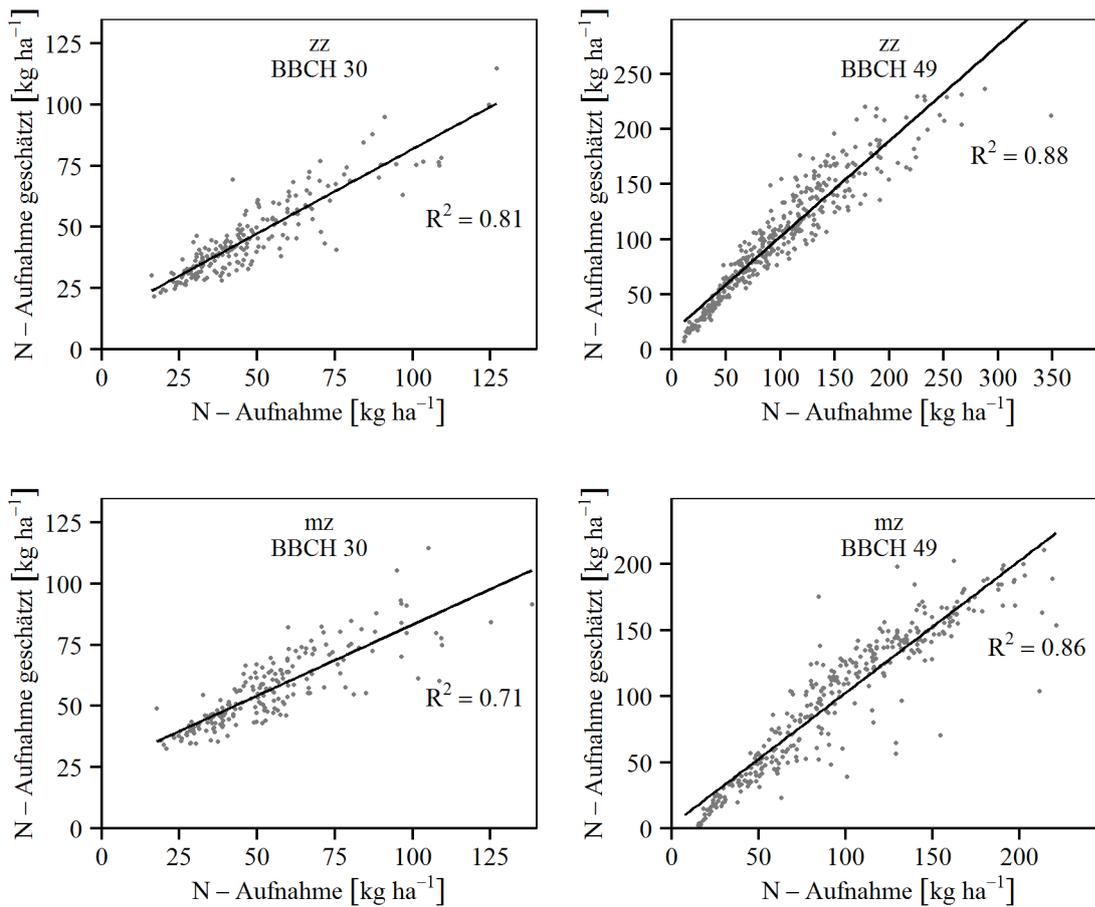


Abb. 33: Regressionsanalysen zwischen gemessener und geschätzter N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste zu BBCH 30 und BBCH 49 (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013).

Tab. 110: Bestimmtheitsmaße der Regression zwischen gemessener und geschätzter N-Aufnahme von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste sowie die durchschnittliche Abweichung und Standardabweichung der geschätzten N-Aufnahme von der gemessenen N-Aufnahme (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013).

BBCH	zweizeilig			mehrzeilig		
	R ²	Abweichung [kg ha ⁻¹]	Standard- abweichung	R ²	Abweichung [kg ha ⁻¹]	Standard- abweichung
30	0,81	1,5	± 11,4	0,71	-2,9	± 12,1
32	0,86	5,6	± 11,7	0,89	-5,9	± 12,2
39	0,96	-2,8	± 15,1	0,93	-16,4	± 11,5
49	0,88	-2,3	± 19,3	0,86	-2,7	± 19,6
65	0,75	4,3	± 43,1	0,72	-2,0	± 43,7

Die hohe Genauigkeit der Schätzgleichungen spiegelte sich in der mittleren Differenz zwischen gemessener und geschätzter N-Aufnahme sowie der Standardabweichung wider (Tab. 110). Die N-Aufnahme der zweizeiligen Sorten wurde zu BBCH 30, BBCH 32 und der Hauptblüte leicht unterschätzt, während dieser Parameter zu den Entwicklungsstadien Fah-

nenblatt und Grannenspitzen durchschnittlich etwas überschätzt wurde. Die Gleichungen der mehrzeiligen Wintergerste überschätzten die N-Aufnahme durchgehend, wobei vor allem zu BBCH 39 durchschnittlich $16,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ mehr prognostiziert wurden, als tatsächlich vom Bestand aufgenommen worden waren. Wie die Standardabweichung bei beiden Sortentypen zu BBCH 65 zeigt, streuen die Schätzwerte zu diesem Termin deutlich um den Mittelwert.

4.2.7 Entwicklung eines Düngesystems für Wintergerste

Das Düngesystem Wintergerste besteht aus dem Messalgorithmus, mit dem die N-Aufnahme des Gerstenbestandes über Sensormessungen während der Überfahrt abgeschätzt wird und den zur Kalkulation der benötigten N-Düngermenge erforderlichen N-Aufnahmekurven sowie dem Korrekturfaktor DIMA. Die Herleitung der Messalgorithmen sowie der optimalen N-Aufnahmekurven und der Korrekturfaktoren DIMA werden in diesem Abschnitt näher erläutert.

4.2.7.1 Messalgorithmen

Für die Kalkulation der benötigten N-Düngermenge ist eine möglichst präzise Schätzung der N-Aufnahme im Gerstenbestand nötig. Wie in den vorausgehenden Kapiteln herausgearbeitet wurde, waren über den langen Untersuchungszeitraum vor allem der VX 2 und in etwas etwas geringerem Maße der VX 1 und der IRG in der Lage die N-Aufnahme präzise und ohne Sorteneffekt zu schätzen. Deswegen wurden Messalgorithmen für diese drei Indices entwickelt. Der VX 3 konnte die N-Aufnahme ebenfalls gut abbilden, wurde für die Ableitung der Messalgorithmen aber nicht berücksichtigt, da dieser Index erst ab 2009 getestet wurde. Mit den kalkulierten Messalgorithmen ist es möglich die N-Aufnahme im Pflanzenbestand von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste entwicklungsunabhängig zu bestimmen. In die Auswertungen gingen sämtliche Daten aus den N-Steigerungsversuchen von 2002 bis 2013 in Dürnast und von 2012 bis 2014 in Roggenstein ein.

Zur Bildung des Messalgorithmus für den VX 2 wurden zunächst Regressionsgleichungen zwischen den Messwerten dieses Index und der N-Aufnahme getrennt nach den Messterminen kalkuliert¹⁶. Wie zu erkennen ist, erhöhte sich bei beiden Sortentypen im Verlauf der Vegetation die Steigung (a-Wert) der Regressionsgeraden, während sich gleichzeitig der Y-

¹⁶ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Angabe der a- und b-Werte der Regressionsgeraden bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste sowie auf die Beschriftung der X- und Y-Achsen in Abb. 34 verzichtet.

Achsenabschnitt (b-Wert) nach unten verschob (Abb. 34). Die Bestimmtheitsmaße der Regressionsanalyse bei zweizeiliger Wintergerste erreichten den höchsten Wert zu BBCH 30 ($R^2 = 0,76$) und fielen dann auf 0,66 zur Hauptblüte ab (Tab. 111). Etwas geringer waren die R^2 -Werte beim mehrzeiligen Sortentyp.

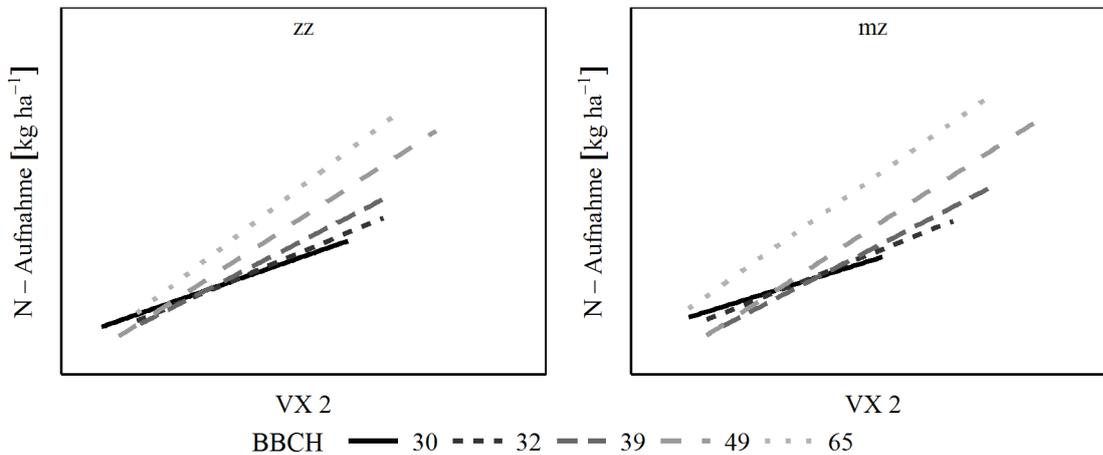


Abb. 34: Regression zwischen dem Vegetationsindex VX 2 und der N-Aufnahme von zweizeiliger (links) und mehrzeiliger (rechts) Wintergerste zu verschiedenen Terminen (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

Tab. 111: Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichungen zwischen den Messwerten von VX 1, VX 2 und IRG und der N-Aufnahme zu unterschiedlichen Terminen für zwei- und mehrzeilige Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

BBCH	zweizeilig			mehrzeilig		
	VX 1	VX 2	IRG	VX 1	VX 2	IRG
30	0,46	0,76	0,71	0,50	0,70	0,65
32	0,62	0,76	0,72	0,70	0,75	0,76
39	0,81	0,75	0,77	0,75	0,68	0,70
49	0,77	0,71	0,78	0,73	0,70	0,78
65	0,61	0,66	0,70	0,59	0,65	0,69

Die R^2 -Werte des Vegetationsindex VX 1 waren besonders zu den früheren Messterminen geringer als beim VX 2 (Tab. 112). Weiterhin veränderten sich beim VX 1 bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste der a- und b-Wert der Regressionsgleichung. Im Vegetationsverlauf erhöhte sich die Steigung von zweizeiliger Wintergerste bis zur Hauptblüte. Beim mehrzeiligen Sortentyp wurde die stärkste Steigung sowie der maximale b-Wert zum Grannenspit-

zen gemessen. Beim IRG korrelierten N-Aufnahme und Messwert ähnlich gut wie beim VX 2. Eine dem VX 2 ähnliche Reaktion wurde bei den Gleichungsparametern des IRG beobachtet.

Das eben beschriebene Verhalten während der Vegetation von Steigung und Y-Achsenabschnitt wurde für alle drei Vegetationsindices bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste auch in der Analyse der Einzeljahre wiedergefunden (Tab. A 15 bis Tab. A 17). Wie der Ausschnitt des Versuchsjahres 2014 zeigt, nahm mit jedem Messtermin die Steigung der Regressionsgeraden bei den Indices VX 1, VX 2 sowie IRG unabhängig vom Sortentyp stetig zu, während sich gleichzeitig der Y-Achsenabschnitt verschob (Tab. 112). Der Vergleich der Einzelwerte der Parameter zu bestimmten Messterminen allerdings zeigt auch, dass sich die Parameter der Regressionsgleichung trotz gleicher Messtermine in jedem Jahr unterschieden (Tab. A 15 bis Tab. A 17). Eine Analyse der Einzeljahre führte mitunter auch zu einer besseren Korrelation zwischen den Vegetationsindices und der terminspezifischen N-Aufnahme (Tab. 112, Tab. A 15 bis Tab. A 17).

Tab. 112: Bestimmtheitsmaße, Steigung (a-Wert) und Y-Achsenabschnitt (b-Wert) der Regressionsgleichungen zwischen den Messwerten von VX 1, VX 2 und IRG und der N-Aufnahme zu unterschiedlichen Terminen für zwei- und mehrzeilige Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2014).

Index	BBCH	R ²	zweizeilig		mehrzeilig		
			a-Wert	b-Wert	R ²	a-Wert	b-Wert
VX 1	30	0,82	601,6	-36,1	0,83	657,6	-39,5
	32	0,81	582,8	-35,0	0,89	593,5	-35,6
	39	0,83	984,8	-59,4	0,86	1041,7	-62,9
	49	0,81	1263,3	-76,2	0,84	1177,7	-71,1
	65	0,76	1440,9	-86,9	0,76	1471,0	-88,9
VX 2	30	0,80	18,7	-69,3	0,86	20,3	-82,1
	32	0,85	16,6	-60,3	0,91	16,8	-63,8
	39	0,78	26,8	-126,8	0,82	27,6	-135,4
	49	0,74	36,6	-178,1	0,84	31,4	-158,7
	65	0,69	44,0	-213,7	0,69	44,2	-228,7
IRG	30	0,80	14,6	-23,3	0,87	16,2	-34,6
	32	0,87	13,3	-17,8	0,91	13,0	-18,6
	39	0,80	18,8	-57,7	0,86	18,0	-57,2
	49	0,84	26,0	-84,9	0,90	18,8	-49,0
	65	0,77	27,1	-89,3	0,79	25,0	-93,8

Um die Abhängigkeit der Parameter von der N-Aufnahme und damit der Pflanzenentwicklung darstellen zu können, wurden die Steigungen und Achsenabschnitte der Regressionsgeraden der Einzeltermine und -jahre sowie aller Standorte in Beziehung zur durchschnittlichen N-Aufnahme des jeweiligen Messtermins gesetzt. Dabei zeigte sich ein enger, linearer Zusammenhang zwischen der mittleren N-Aufnahme und dem a-Wert bzw. b-Wert (Abb. 35). Mit steigenden N-Aufnahmeraten des Pflanzenbestandes verstärkte sich die Steigung bzw. verschob sich der Achsenabschnitt der Regressionsgleichung nach unten.

Für den Vegetationsindex VX 2 verursachte die N-Aufnahme bei zweizeiliger Wintergerste 90% der Variabilität der a-Werte und 86% der Variabilität der b-Werte der Regressionsgleichungen. Bei mehrzeiliger Wintergerste waren die Bestimmtheitsmaße für die Steigung ($R^2 = 0,82$) und den Y-Achsenabschnitt ($R^2 = 0,75$) etwas geringer¹⁷. Diese Regressionsgleichungen werden als Messalgorithmen bezeichnet, da mit deren Hilfe die Parameter der Schätzgleichung für die aktuelle N-Aufnahme im Pflanzenbestand in Abhängigkeit der Soll-N-Aufnahme abgeschätzt werden. Dieses Verfahren zur Messung der N-Aufnahme wird im nachfolgenden Abschnitt 4.2.7.2 näher erläutert.

¹⁷ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Angabe der a- und b-Werte der Messalgorithmen für den VX 1, den VX 2 und den IRG sowie auf die Beschriftung der Y-Achsen in Abb. 35 bis Abb. 37 verzichtet.

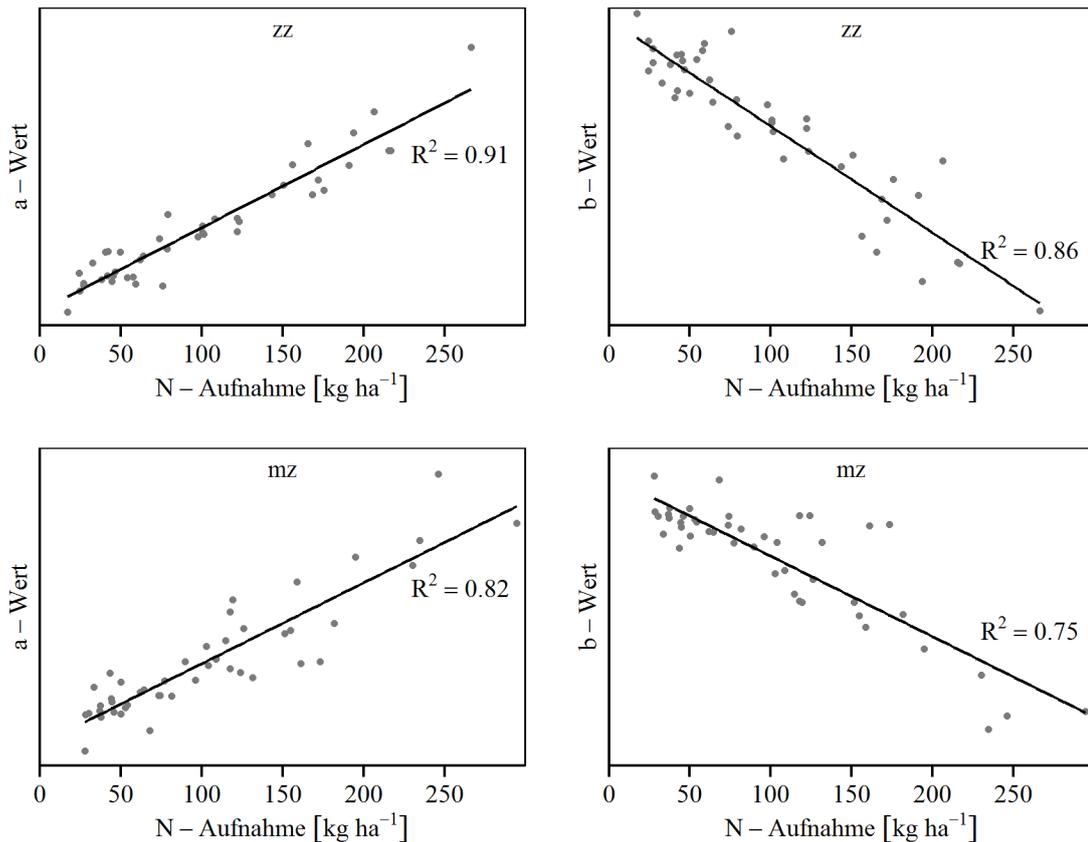


Abb. 35: Regression von Parametern der linearen Regressionsgleichungen zwischen VX 2 und N-Aufnahme zur durchschnittlichen N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

Mit den Parametern der linearen Regressionsgleichung zwischen dem VX 1 bzw. dem IRG und der N-Aufnahme wurde ähnlich verfahren, um auch Messalgorithmen für diese Indices zu erhalten. Die Bestimmtheitsmaße des VX 1 lagen leicht unter denen des VX 2 (Abb. 36). Ein anderes Ergebnis brachte die Regressionsanalyse zwischen den a- und b-Werten des IRG und der durchschnittlichen N-Aufnahme (Abb. 37). Während von der Variabilität der Steigung 73% (zweizeilige Gerste) bzw. 63% (mehrzeilige Gerste) durch die N-Aufnahme erklärt werden konnten, lagen die R²-Werte beim Y-Achsenabschnitt lediglich bei 0,24 (mehrzeilige Gerste) bzw. 0,35 (zweizeilige Gerste). Da eine möglichst genaue Abschätzung der Parameter nötig ist, kann die die N-Aufnahme mit dem IRG nicht kalkuliert werden. Aus diesem Grund wurde dieser Vegetationsindex für die Schätzung der N-Aufnahme ausgeschlossen.

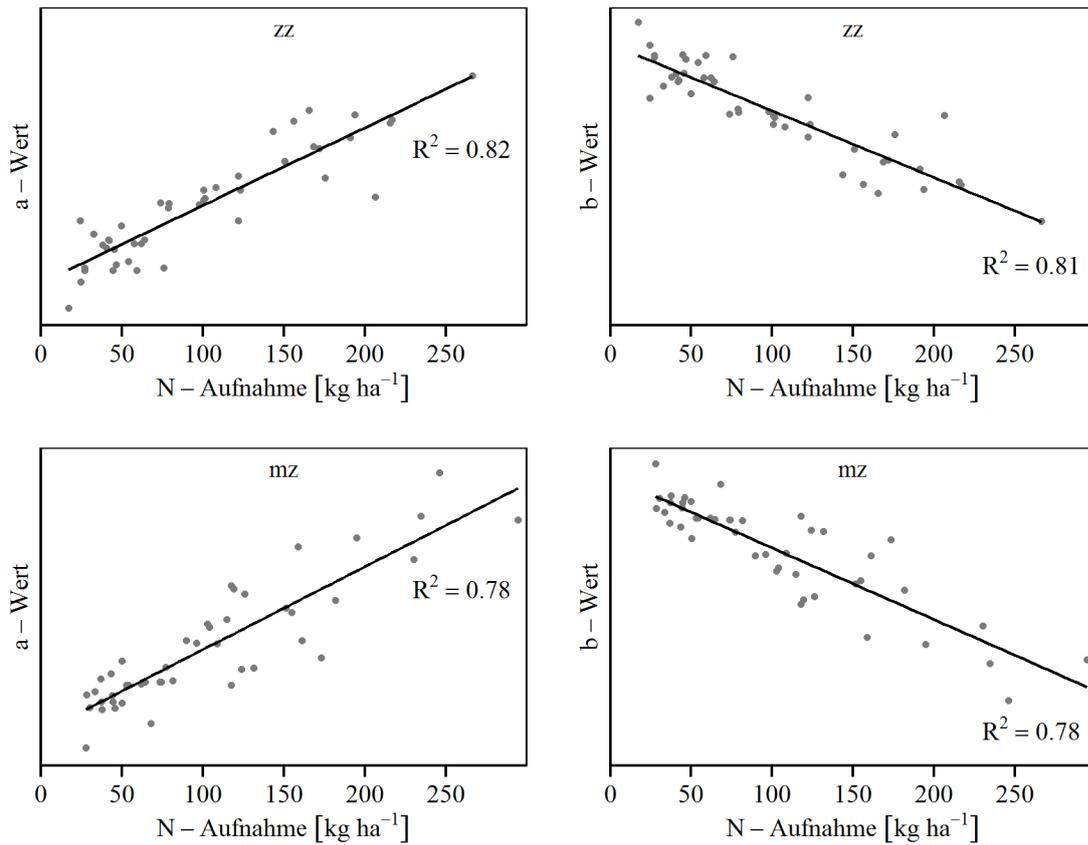


Abb. 36: Regression von Parametern der linearen Regressionsgleichungen zwischen VX 1 und N-Aufnahme zur durchschnittlichen N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

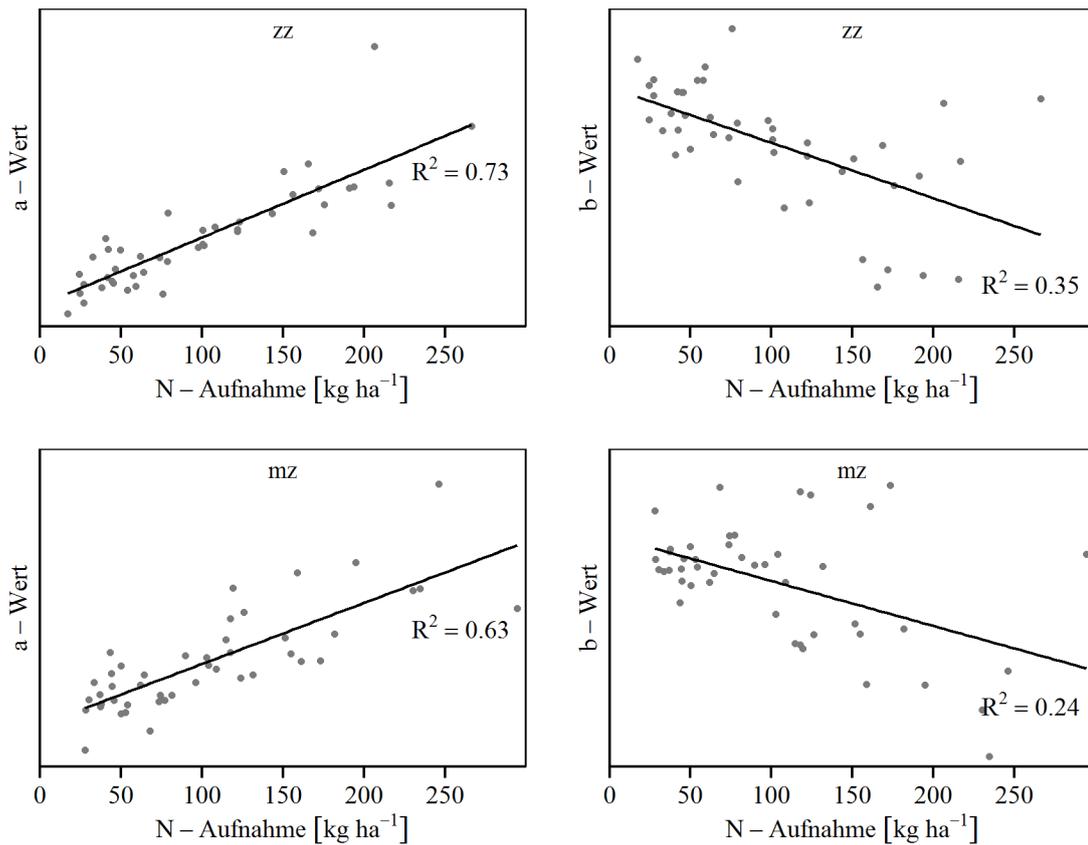


Abb. 37: Regression von Parametern der linearen Regressionsgleichungen zwischen IRG und N-Aufnahme zur durchschnittlichen N-Aufnahme von zweizeiliger (oben) und mehrzeiliger (unten) Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

4.2.7.2 Sensorgestützte Schätzung der N-Aufnahme im Gerstenbestand

Das Verfahren zur Abschätzung der N-Aufnahme wird beispielhaft für den Vegetationsindex VX 2 in zweizeiliger Wintergerste dargestellt. Für andere Sortentypen und den VX 1 ist das Verfahren identisch.

Über die im nachfolgenden Abschnitt näher beschriebene standort- und entwicklungspezifische Soll-N-Aufnahme (NA_{Soll}) sowie die Regressionsgleichungen der a- und b-Werte werden die Parameter der Schätzgleichung zur Kalkulation der N-Aufnahme berechnet (Gleichung 28 und Gleichung 29). Über diese beiden Parameter erfolgt die Bildung der Schätzgleichung. Mit deren Hilfe wird die aktuelle N-Aufnahme (NA_{akt}) im Gerstenbestand abgeschätzt, indem der Messwert des verwendeten Index eingesetzt wird (Gleichung 30).

$$(28) \quad a_{SG} = a_{Alg\ a} \cdot NA_{Soll} + b_{Alg\ a}$$

$$(29) \quad b_{SG} = a_{Alg\ b} \cdot NA_{Soll} - b_{Alg\ b}$$

$$(30) \quad NA_{akt} = a_{SG} \cdot VX^2 + b_{SG}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a_{Alg\ a}$	-	Steigung der Regressionsgeraden des Messalgorithmus a
$b_{Alg\ a}$	-	Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden des Messalgorithmus a
$a_{Alg\ b}$	-	Steigung der Regressionsgeraden des Messalgorithmus b
$b_{Alg\ b}$	-	Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden des Messalgorithmus b
a_{SG}	-	Steigung der Schätzgleichung
b_{SG}	-	Y-Achsenabschnitt der Schätzgleichung
NA_{Soll}	kg ha ⁻¹	standortspezifische Soll-N-Aufnahme zum Düngetermin
NA_{akt}	kg ha ⁻¹	aktuelle N-Aufnahme

4.2.7.3 Entwicklung der standortabhängigen, optimalen N-Aufnahmekurven

Die N-Aufnahmekurven bilden die Basis für die Berechnung der benötigten N-Düngermenge. Grundlage für die N-Aufnahmekurven waren die langjährigen N-Steigerungsversuche von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste an den Versuchsstationen Dürnast und Roggenstein. Aus den Bestimmtheitsmaßen der quadratischen Regressionsgleichungen geht hervor, dass ein teilweise enger Bezug zwischen der N-Aufnahme zu einem Entwicklungsstadium und dem erreichten Kornertrag besteht (Tab. A 18 & Tab. A 19). Beispielhaft dafür stehen die Zahlen der zweizeiligen Gerste aus dem Jahr 2013 am Standort Roggenstein (Tab. 113). Während zum Schossbeginn 85% der Variabilität des Kornertrags durch die N-Aufnahme erklärt werden konnten, so korrelierten diese beiden Größen zu BBCH 32 noch enger ($R^2 = 0,91$). Zu den folgenden Terminen waren die R^2 -Werte etwas kleiner.

In den übrigen Jahren wurden meist vergleichbar hohe Bestimmtheitsmaße der Regression zwischen N-Aufnahme, dem Termin und dem Kornertrag erreicht (Tab. A 18). Lediglich in den Jahren 2002 und 2004 zu den sehr frühen Entwicklungsstadien sowie 2008 zu BBCH 49 und BBCH 92 korrelierten die beiden Faktoren N-Aufnahme und Kornertrag schwach miteinander.

Tab. 113: Bestimmtheitsmaße und quadratische Regressionsgleichung zwischen der terminspezifischen N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste und dem Kornertrag (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2013).

BBCH	R ²	Gleichung
30	0,85	$KE = -0,0046 \cdot NA_{Ter}^2 + 1,38 \cdot NA_{Ter} - 8,8$
32	0,91	$KE = -0,0036 \cdot NA_{Ter}^2 + 1,28 \cdot NA_{Ter} - 22,8$
49	0,81	$KE = -0,002 \cdot NA_{Ter}^2 + 0,91 \cdot NA_{Ter} - 13,9$
65	0,78	$KE = -0,0006 \cdot NA_{Ter}^2 + 0,44 \cdot NA_{Ter} - 12,3$
92	0,91	$KE = -0,0012 \cdot NA_{Ter}^2 + 0,70 \cdot NA_{Ter} - 1,8$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
KE	dt ha ⁻¹	Kornertrag
NA _{Ter}	kg ha ⁻¹	terminspezifische N-Aufnahme

Die Werte der mehrzeiligen Wintergerste lagen im Versuchsjahr 2013 (Tab. A 20) sowie in allen übrigen Einzeljahren auf einem ähnlichem Niveau wie die der zweizeiligen Wintergerste (Tab. A 19). In den Versuchsjahren 2002 und 2004 korrelierten N-Aufnahme und Kornertrag bei mehrzeiliger Gerste an beiden Standorten sehr gut miteinander, während am Standort Dürnast 2009 und 2012 der Kornertrag über die N-Aufnahme sehr unsicher abgeschätzt werden konnte.

Da nicht für jedes Ertragsniveau von 50 dt ha⁻¹ bis 100 dt ha⁻¹ Versuchsdaten zur Verfügung standen, erfolgte die Ableitung der stadiumspezifischen N-Aufnahmen (NA_{Ter}) für die standortabhängige Ertragserwartung anhand der quadratischen Regressionsgleichungen, die für jedes Jahr einzelterminlich berechnet wurden. Dazu war es nötig, die quadratische Regressionsgleichung (Gleichung 31) umzuformen. Als Beispiel sei die des Jahres 2013 zu BBCH 32 am Standort Roggenstein aufgeführt (Tab. 113). Durch die Umformung entstand die Möglichkeit, die standortangepasste N-Aufnahme (NAKE_{Ter}) in Abhängigkeit des standortspezifischen Kornertrages (KE_{Ort}) zu diesem Termin zu berechnen (Gleichung 32).

$$(31) \quad f(x_{32}) = -0,0036 \cdot NA_{Ter}^2 + 1,28 \cdot NA_{Ter} - 22,8$$

$$(32) \quad NAKE_{Ter} = \frac{-1,28 + (1,28^2 - 4 \cdot -0,0036 \cdot (22,8 - KE_{Ort}))^{0,5}}{2 \cdot -0,0036}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$f(x_{32})$	-	Funktion von x zum Termin BBCH 32
NA_{Ter}	kg ha ⁻¹	stadiumspezifische N-Aufnahme
$NAKE_{Ter}$	kg ha ⁻¹	standortangepasste N-Aufnahme
KE_{Ort}	dt ha ⁻¹	standortspezifischer Kornertrag

Dieses Verfahren wurde für jede der in den Einzeljahren zu den verschiedenen Messterminen erstellten Regressionsgleichungen angewendet. Die Einzelwerte beider Sortentypen, die sich aus dem Rechenverfahren ergaben, wurden gemittelt und daraus die ertragsspezifischen N-Aufnahmekurven gebildet. In Tab. 114 sind solche N-Aufnahmewerte am Beispiel eines 80 dt ha⁻¹ Schlags dargestellt (NA orig.). Als durchschnittlicher Proteingehalt von Wintergerste wurden 12,5% angenommen. Um die N-Aufnahmekurven daran anzupassen, wurden die N-Aufnahmen der einzelnen Termine zunächst als Relativwerte zum Referenztermin BBCH 92 dargestellt (NA rel.), wie beispielhaft in Tab. 114 nachzuvollziehen ist.

Tab. 114: Terminspezifische originale (NA orig.) und relative (NA rel.) N-Aufnahmewerte sowie angepasste N-Aufnahmen (NA neu) für zwei- und mehrzeilige Wintergerste bei einer Ertragserswartung von 80 dt ha⁻¹.

BBCH	zweizeilig			mehrzeilig		
	NA orig. [kg ha ⁻¹]	NA rel. [%]	NA neu [kg ha ⁻¹]	NA orig. [kg ha ⁻¹]	NA rel. [%]	NA neu [kg ha ⁻¹]
30	49,8	28,0	50,7	45,9	26,5	45,3
31	63,3	35,5	64,5	54,7	31,6	54,0
32	73,8	41,5	75,3	61,5	35,6	60,7
39	104,8	58,9	106,9	88,5	51,2	87,4
49	127,0	71,4	129,6	107,8	62,4	106,4
65	174,7	98,1	178,2	158,4	91,7	156,3
92	178,0	100,0	181,5	172,8	100,0	170,5

Die an den Proteingehalt angepassten Gesamt-N-Aufnahmen wurden über das aus sämtlichen Versuchen abgeleitete Korn-Stroh-Verhältnis, den N-Gehalt im Stroh, den Proteingehalt und den Kornertrag kalkuliert (Tab. 115 & Gleichung 33). Multipliziert mit den Relativwerten

ergaben sich die optimierten N-Aufnahmekurven (NA neu), wie beispielhaft in der Tab. 114 berechnet.

Tab. 115: Durchschnittlicher N-Gehalt im Stroh und mittleres Korn-Strohverhältnis von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste auf HE- und NE-Standorten (N-Steigerungsversuch HE und NE zwei- und mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zwei-zeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

Sortentyp	Standort	N-Gehalt [%]	Korn-Stroh Verhältnis
zz	HE	0,64	1,01
	NE	0,63	1,26
mz	HE	0,58	1,21
	NE	0,86	1,08

$$(33) \quad NA_{\text{Ges}} = KE_{\text{Ort}} \cdot 0,86 \cdot \frac{12,5}{6,25} + \left(KE_{\text{Ort}} \cdot \frac{0,86}{KS} \right) \cdot NG_{\text{Stroh}}$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
NA_{Ges}	kg ha^{-1}	Gesamt-N-Aufnahme
KE_{Ort}	dt ha^{-1}	standortspezifischer Kornertrag
KS	-	Korn-Stroh Verhältnis
NG_{Stroh}	%	N-Gehalt im Stroh

Weitere standortspezifische N-Aufnahmekurven wurden sowohl für zwei- als auch für mehrzeilige Wintergerste nach dem beschriebenen Vorgehen kalkuliert¹⁸ (Abb. 38).

Die Werte für das Entwicklungsstadium BBCH 31 wurden bei beiden Sortentypen interpoliert, indem die Differenz der N-Aufnahmen zu BBCH 30 und BBCH 32 durch diejenige Anzahl an Vegetationstagen dividiert wurde, die die Pflanzen zur Entwicklung zwischen dem Schossbeginn und dem Zweiknotenstadium benötigten. Diese Zahl multipliziert mit der Anzahl an Tagen, die zwischen BBCH 30 und BBCH 31 liegen, ergibt die zusätzliche Menge N, die seit Schossbeginn von den Pflanzen aufgenommen wurde. Da nur wenige Werte für BBCH 39 vorlagen wurde hier ebenfalls nach dem bereits beschriebenen Verfahren interpo-

¹⁸ Aus patentrechtlichen Gründen wurde auf die Beschriftung der Y-Achse in Abb. 38 verzichtet.

liert. Die Daten für die Zeit zwischen den Entwicklungsstadien entstammen langjährigen Aufzeichnungen (Tab. A 21).

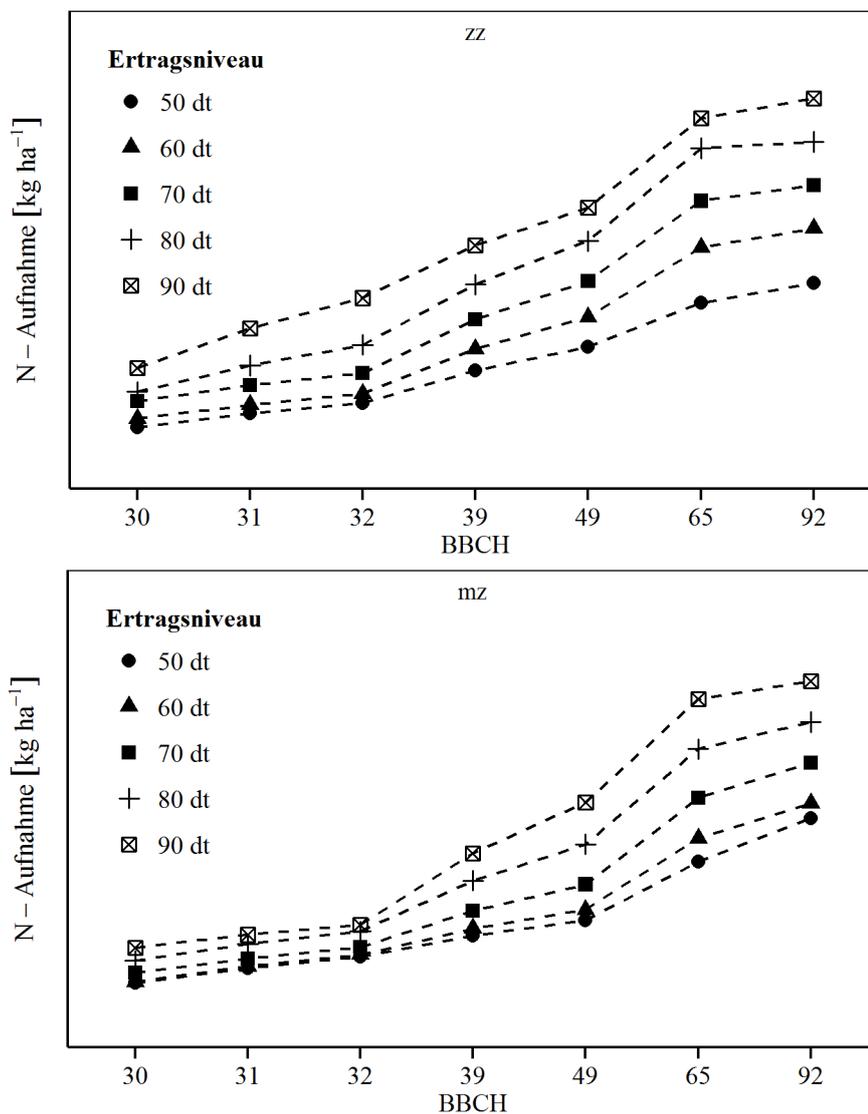


Abb. 38: N-Aufnahmekurven für zweizeilige (oben) und mehrzeilige (unten) Wintergerste für verschiedene Ertragsniveaus.

4.2.7.4 Entwicklung des Faktors DIMA

Im Düngesystem Weizen ist der Faktor DIMA enthalten (MAIDL, 2011^A, MAIDL 2011^B). Diese Größe fasst die Wirkungsdauer des Mineraldünger-N, die prozentuale Menge an im Boden immobilisierten N, die Mineralisierungsrate des im Bodenpool gebundenen N und die Ausnutzungsrate des N-Düngers zusammen. Über diesen Faktor wird somit die kalkulierte N-Düngermenge optimal an die Standortbedingungen und die Nährstoffaufnahme der Pflanzen angepasst. Für das Düngesystem bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste wurde dieser Faktor DIMA berechnet, in den die langjährigen N-Steigerungsversuche in Dürnast (2002 bis 2013) und Roggenstein (2012 bis 2014) eingingen. Für die Ableitung dieser Rechengröße wurden

die N-Aufnahmen der verschiedenen N-Stufen der Einzeljahre zu jedem Beprobungstermin verwendet. Die Differenz zwischen den N-Aufnahmewerten der Einzeltermine wurde durch die vorangegangene N-Düngermenge dividiert. Über alle Jahre gemittelt ergab sich ein sor-tenabhängiger Faktor für drei Entwicklungsintervalle¹⁹.

4.2.7.5 Berechnungsschema zur Kalkulation der benötigten N-Düngermenge

Zur Berechnung der auszubringenden N-Düngermenge wird die Differenz zwischen der standortspezifischen Soll-N-Aufnahme zum Düngetermin und der für diesen Teilschlag optimalen Soll-N-Aufnahme bis zum nächsten Düngetermin für den für diesen Standort erwarteten Kornertrag kalkuliert (Abb. 39). Diese Menge wird korrigiert um die Differenz zwischen der tatsächlichen, aktuellen N-Aufnahme und der NA_{Soll} zum Düngetermin. Haben die Pflanzen weniger N aufgenommen als für das angenommene Ertragspotential nötig ist, so erhöht sich die N-Düngermenge um diesen Betrag. Wird dagegen zu viel N in der oberirdischen Biomasse der Pflanzen gefunden, so reduzierte sich die gesamte N-Menge um diese kalkulierte N-Menge.

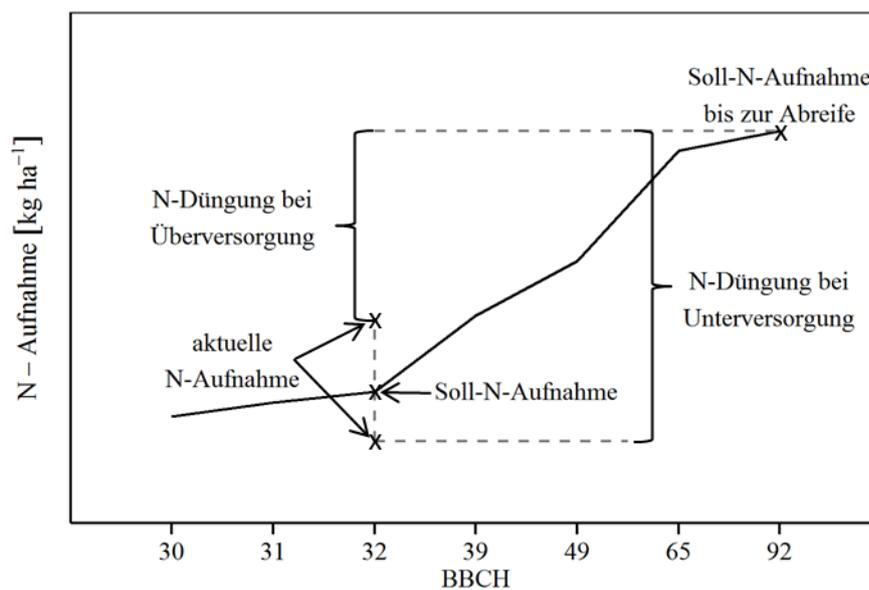


Abb. 39: Schema zur Berechnung der benötigten N-Düngermenge in Wintergerste²⁰ (verändert nach MAIDL, 2011^A, MAIDL 2011^B).

Somit ergibt sich für die Berechnung der N-Düngermenge folgende Formel (Gleichung 34):

¹⁹ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurden die Werte für den Faktor DIMA bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste nicht dargestellt.

²⁰ Aufgrund patentrechtlicher Bestimmungen wurde auf die Beschriftung der Y-Achse in Abb. 39 verzichtet.

$$(34) \quad ND_{\text{opt}} = NA_{\text{nD}} - NA_{\text{Soll}} + (NA_{\text{Soll}} - NA_{\text{akt}}) \cdot DIMA$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ND_{opt}	kg ha^{-1}	benötigte, optimale N-Düngermenge
NA_{nD}	kg ha^{-1}	standortspezifische Soll-N-Aufnahme bis zum nächsten Düngetermin
NA_{Soll}	kg ha^{-1}	standortspezifische Soll-N-Aufnahme zum Düngetermin
NA_{akt}	kg ha^{-1}	aktuelle N-Aufnahme
DIMA	-	Faktor DIMA

4.2.8 Streifenversuch Wintergerste

Im Jahr 2013 wurde das für Wintergerste entwickelte Düngesystem Online + Mapping in einem Streifenversuch unter Praxisbedingungen auf einem heterogenen Schlag der Versuchstation Roggenstein getestet. Als Vergleichsverfahren dienten die Variante Mapping sowie eine Variante DSN, die nach den Empfehlungen des DSN schlageinheitlich gedüngt wurde.

Je mehr auf die Ertragsfähigkeit des Teilschlags und die aktuelle Pflanzenentwicklung eingegangen wurde, desto weniger N wurde durchschnittlich appliziert (Tab. 116). So sank die applizierte N-Menge von $190,0 \text{ kg ha}^{-1}$ (DSN) auf $166,7 \text{ kg ha}^{-1}$ (Mapping) bzw. $140,1 \text{ kg ha}^{-1}$ in dem Verfahren Online + Mapping ab.

Tab. 116: Mittelwerte für die applizierte N-Düngermenge, Kornertrag, Proteingehalt sowie die NKfL unterschiedlicher Düngeverfahren (Streifenversuch mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2013).

Düngerverfahren	N-Düngermenge [kg ha^{-1}]	Kornertrag [dt ha^{-1}]	Proteingehalt [%]	NKfL [€ ha^{-1}]
DSN	190,0 a	75,9 a	13,2 a	1452,8 a
Mapping	166,7 b	77,1 a	12,9 b	1501,5 ab
Online + Mapping	140,1 c	76,6 a	12,1 c	1515,9 b

Trotz geringerer N-Düngermengen unterschied sich die Kornerträge der Varianten Mapping und Online + Mapping kaum von dem der Variante DSN ($75,9 \text{ dt ha}^{-1}$). Tendenziell allerdings reagierte die mehrzeilige Meridian mit leichten Ertragszuwächsen, wenn die Standortheterogenität (Mapping) sowie die Pflanzenentwicklung (Online + Mapping) in der Kalkulation des N-Bedarfs berücksichtigt wurden.

Bedingt durch die hohe N-Düngermenge erreichte die nach DSN gedüngte Variante eine Proteinkonzentration von 13,2% im Korn. Den angestrebten Wert von 12,5% erreichten auch die

beiden anderen Varianten nicht. Während die Proteinkonzentration in den nach dem Verfahren Mapping gedüngten Parzellen 0,4% (absolut) über dem Sollwert lagen, unterschritten das System Online + Mapping diesen Schwellenwert um denselben Betrag.

Die alleinige Anpassung der N-Düngermenge an die verschiedenen Ertragszonen im Schlag brachten einen ökonomischen Vorteil von 48,7 € ha⁻¹ gegenüber einer schlageinheitlichen N-Düngung. Wurde darüber hinaus noch zusätzlich die aktuelle Pflanzenentwicklung mit Hilfe eines Sensors (Online + Mapping) berücksichtigt, so erhöhte dieses Verfahren die Wirtschaftlichkeit um weitere 14,4 € ha⁻¹.

Tab. 117: Mittelwerte für den N-Entzug über das Korn, den N-Saldo sowie die N-Effizienz unterschiedlicher Düngerverfahren (Streifenversuch mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2013).

Düngerverfahren	N-Entzug [kg ha ⁻¹]	N-Saldo [kg ha ⁻¹]	N-Effizienz [kg kg ⁻¹]
DSN	139,1 a	50,9 a	39,9 a
Mapping	138,0 ab	30,2 b	46,3 b
Online + Mapping	128,0 b	12,7 c	55,3 c

Die in der Variante DSN höheren Proteingehalte im Korn verursachten bei ansonsten identischen Kornerträgen einen deutlich höheren N-Entzug über das Korn (139,1 kg ha⁻¹) als die Variante Online + Mapping (128,0 kg ha⁻¹) (Tab. 117). Trotz des hohen N-Entzugs über das Korn wurde beim schlageinheitlichen Düngerverfahren DSN der höchste N-Saldo berechnet (50,9 kg ha⁻¹). Deutlich besser schnitt das in diesem Projekt entwickelte Verfahren Online + Mapping ab. Damit war eine beinahe ausgeglichene N-Düngung möglich. Ohne Berücksichtigung der aktuellen N-Aufnahme des Pflanzenbestandes (Mapping) erhöhte sich der N-Saldo etwas (30,2 kg ha⁻¹). Nach dem Ertragsniveau aufgetragen, applizierte das Verfahren Online + Mapping N-Dünger durchgehend den sehr ausgewogen (Abb. 40). Ohne Berücksichtigung der N-Aufnahme in der N-Düngerberechnung erhöhte sich der N-Saldo im Verfahren Mapping auf 23,8 kg ha⁻¹ (90 dt ha⁻¹) bis 39,4 kg ha⁻¹ (70 dt ha⁻¹). Dagegen erwies sich eine schlageinheitliche N-Düngung ohne Berücksichtigung der Ertragszonen als deutlich negativ. Auf dem schwächeren Teilschlag (70 dt ha⁻¹) betrug der N-Saldo durchschnittlich 61,7 kg ha⁻¹.

Wie der N-Saldo bereits andeutet, war die N-Effizienz im Verfahren Online + Mapping am besten. In dieser Variante wurden pro kg Mineraldünger-N 55,3 kg Korn produziert. Die höhere N-Düngermenge im Verfahren Mapping reduzierte die N-Effizienz auf 46,3 kg kg⁻¹. Die hohe N-Düngung ohne Berücksichtigung der Ertragszonen und des Pflanzenwachstums der

Variante DSN führte zu einer nochmals schlechteren Ausnutzung des Mineraldünger-N ($39,9 \text{ kg kg}^{-1}$).

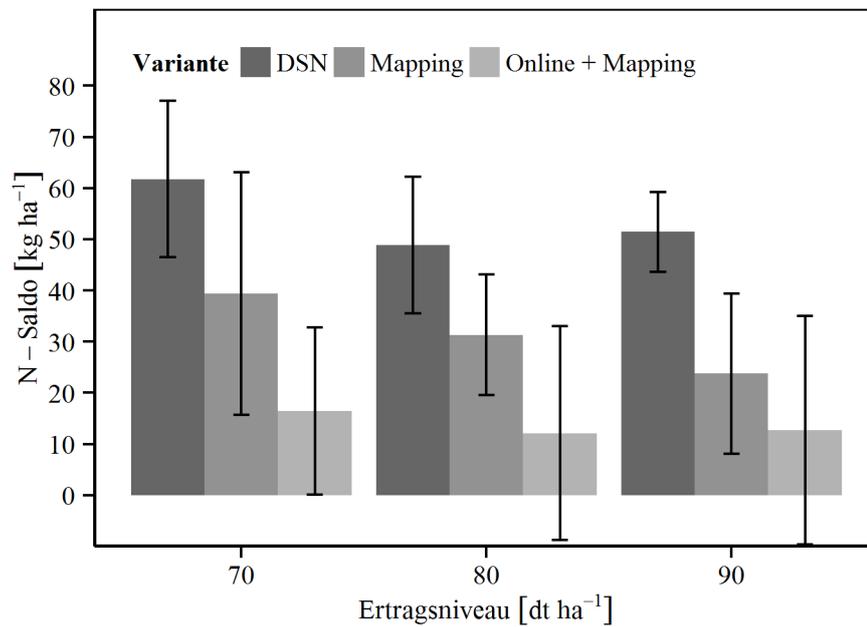


Abb. 40: Mittlerer N-Saldo der Düngerverfahren DSN, Mapping und Online + Mapping für unterschiedliche Ertragsniveaus (Streifenversuch mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2013).

5 Diskussion

5.1 Düngesystem Winterraps

Das Düngesystem für Winterraps besteht aus zwei Komponenten:

- der reflexionsbasierten Bestimmung der Pflanzenentwicklung mit Sensoren unter Verwendung von Vegetationsindices,
- dem Düngelgorithmus, mit dem ausgehend von der Entwicklung des Pflanzenbestandes und des Ertragspotentials des Standortes eine N-Düngeempfehlung abgeleitet wird.

5.1.1 Vegetationsindices für Winterraps

Dikotyle und monokotyle Kulturpflanzen unterscheiden sich hinsichtlich der Blattform, der Blattstruktur sowie der Blattdicke, was zu veränderten Reflexionssignaturen führt (GAUSMANN & ALLEN, 1973, TERASHIMA & SAEKI, 1983, SLATON et al., 2001, BUSCHMANN, 2007, CROFT et al., 2014). Darüber hinaus beeinflusst der Bestandesaufbau und die Architektur der Pflanzen die Rückstrahlung.

Um zu prüfen, welche Indices sich am besten dazu eignen die Parameter N-Aufnahme und TM-Aufwuchs der dikotylen Pflanze Winterraps zu bestimmen, wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Dazu wurden bekannte Indices, wie der NDVI, der IRR sowie der IRG, oder auch neuere aus der Literatur, wie der NDI 2, der SR 1 und der SR 2 (MÜLLER et al., 2008), die speziell an Raps getestet wurden, in die Analysen aufgenommen.

Die Vegetationsindices korrelierten in den Einzeljahren eng mit der N-Aufnahme. Unterschiede zwischen den einzelnen Indices traten kaum auf. Mit der Zusammenfassung der Jahre verschlechterten auch die Bestimmtheitsmaße deutlich. Mögliche Ursachen sind die nicht exakte Einhaltung des Schnitzeitpunktes im Herbst und damit leicht unterschiedliche Biomasseaufwüchse und Bodenbedeckungsgrade. Zudem wechselten die Versuchsflächen jährlich und somit die Bodenart und mit ihnen die Bodenfarbe, die Bodenfeuchte und die Oberflächenstruktur des Bodens und damit die Reflexion, wie verschiedene Studien zeigten (DAUGHTRY et al., 2000, WEIDONG et al., 2002, DARVISHZADEH et al., 2008, CROFT et al., 2012). Ebenso beeinflussen nach PINTER (1986) und MADEIRA et al. (2001) Blattfeuchte und Tau im Herbst die Reflexionsmessungen vor allem im rotwelligen Spektrum. Ergänzend seien noch ein Einfluss des Sonnenstandes, sich gegenseitig beschattende Blätter in dichten Bestän-

den und die Saatrichtung bei unvollständiger Bodenbedeckung auf die Reflexionsmessung genannt (RANSON et al., 1985, SHIBAYAMA & WIEGAND, 1985, PINTER et al., 1987, FITZGERALD et al., 2005, JIA et al., 2013).

Gegenüber all diesen Jahreseffekten erwies sich der Vegetationsindex VX 2 am stabilsten. Im Herbst lag dessen Bestimmtheitsmaß (0,77) deutlich über den R²-Werten der Indices VX 1, NDVI, IRR und IRG, bei denen nach der linearen Regressionsgleichung ein maximales Bestimmtheitsmaß von 0,66 erreicht wurde. Damit verhielten sich die Indices NDVI, IRR und IRG gegensätzlich zu den Aussagen von MÜLLER et al. (2008), laut denen enge bis sehr enge Korrelationen zwischen diesen Indices und der N-Aufnahme von Winterraps bestanden. Gleichzeitig ist zu erwähnen, dass sich der Index NDI 2 und die beiden Simple Ratios SR 1 und SR 2, die bei MÜLLER et al. (2008) dem NDVI sowie dem IRR und dem IRG in ihrer Fähigkeit die N-Aufnahme abzubilden glichen. In den eigenen Untersuchungen waren die Indices NDI 2, SR 1 und SR 2 dem VX 2 zwar unterlegen, den übrigen Indices aber vor allem zu späteren Messterminen überlegen. Damit zeigt sich auch für Winterraps, wie ERDLE et al. (2011) an Weizen und CLEVERS & GITELSON (2013) an verschiedenen ein- und zweikeimblättrigen Pflanzen herausfanden, dass eine Kombination aus Wellenlängen des nahinfraroten Wellenlängenspektrums, wie beim NDI 2 und der SR 1, die N-Aufnahme besser abbilden kann als eine Verwendung von Wellenlängen aus dem roten Reflexionsspektrum. Dazu vergleichbare Aussagen machten TARPLEY et al. (2000), die ebenfalls mit Wellenlängenkombinationen des NIR-Spektrums die N-Konzentration in Baumwolle am besten abbilden konnten.

Ein weiterer möglicher Grund, warum Indices wie der NDVI, der SAVI und der IRR schlechter abschneiden, ist bei LICHTENTHALER et al. (1996) aufgeführt. Die Autoren bemängelten in ihrer Studie die geringe Sensitivität des NDVI auf den Chlorophyllgehalt, was sie auf die Verwendung von roten Wellenlängen ($\lambda = 680 \text{ nm}$) zurückführten. Den Aussagen der Studie zufolge reagierte die Reflexion bei diesen Wellenlängen kaum auf Änderungen des Chlorophyllgehalts. Da die Vegetationsindices NDVI, SAVI und IRR auf Wellenlängen in genau diesem Bereich aufbauen und die Chlorophylldichte eng mit der N-Versorgung korreliert (YODER & PETTYGREW-CROSBY, 1995, SCHLEMMER et al., 2013), liegt die Vermutung nahe, dass aus diesem Grund die N-Aufnahme über diese Indices weniger genau abgebildet werden kann.

Bei allen untersuchten Vegetationsindices fiel zu VB ein deutlicher Rückgang der R²-Werte im Zeitraum 2012 bis 2014 im Vergleich zu den Herbstmessungen auf. Grund dafür dürfte eigenen Untersuchungen sowie Ergebnissen von GABRIELLE et al. (1998^A) und JUSTES et al.

(2000) zufolge sein, dass die Rapspflanzen, je nach Kälteeinwirkung und N-Versorgung, Teile oder die Gesamtheit ihrer vor dem Winter gebildeten Blätter verlieren. Durch Blattverlust verursachte geringe Bodendeckungsgrade erhöhen demnach den negativen Effekt der Bodenreflexion, die durch die Bodenart, die Bodenfeuchte und die Bodenoberfläche bestimmt wird (NAGLER et al., 2000, WEIDONG et al., 2002, DARVISHZADEH et al., 2008, CROFT et al., 2012). Gleichzeitig beeinflussen auf dem Boden verbleibende Pflanzenreste und vergilbte Blätter die Reflexionsmessungen. Diese These wird von den Publikationen von TIAN et al. (2014) betreffend Reis sowie DAUGHTRY et al. (2006) und ZHAO et al. (2012) betreffend Mais, Soja und Weizen unterstützt.

Trotz des Pflanzenwachstums nach Vegetationsbeginn war, mit einer Einschränkung zu BBCH 30 beim Vegetationsindex VX 2, mit den meisten Indices keine sichere Bestimmung der N-Aufnahme zu den Messterminen im Frühjahr möglich. Mit den Ergebnissen von GOMBERT et al. (2010) sowie PAPANTONIOU et al. (2013), nach denen Raps vor dem Längenwachstum vor allem aus Blättern besteht und die morphologischen Änderungen des Streckungswachstums mit einem hohen Stängelanteil sowie dem Ansetzen der Blütenknospen einhergehen, lässt sich die Verschlechterung der Beziehung zwischen der N-Aufnahme und den Messwerten aller Indices durch eine Veränderung im Reflexionsverhalten erklären. Diese Annahme können MOGENSEN et al. (1996) sowie ZHANG & HE (2013) bestätigen, die bei Raps aufgrund der strukturellen Änderungen nach der Rapsblüte einen Rückgang der Pflanzenreflexion feststellten. Ähnliche Ergebnisse publizierten HABOUDANE et al. (2004) und PIMSTEIN et al. (2009), die bei Weizen mit dem Eintreten vom vegetativen in das generative Wachstum eine Veränderung der Reflexionssignatur vor allem im rotwelligen Bereich fanden. Gleichzeitig fanden STEFANOWSKA et al. (1999) heraus, dass die Blattstruktur von Winterraps im Verlauf der Vegetation variiert, was zu einer veränderten Lichtreflexion aufgrund einer unterschiedlichen Absorption führen könnte. Dass die Bestimmtheitsmaße auch in anderen di- und monokotylen Pflanzenarten nicht dauerhaft hoch bleiben, beschrieben SCHÄCHTL (2004) und SCHMID (2006) für Kartoffeln, Mais sowie Weizen für verschiedene Indices wie den NDVI, den IRR, den IRG und den IR 1. Bei diesen Studien trat der Rückgang der Messpräzision allerdings erst um den Zeitraum vor Blühbeginn ein.

Neben der präzisen Abbildung der N-Aufnahme sollen Vegetationsindices über einen weiten N-Aufnahmebereich frei von einem Sättigungseffekt sein, um eine scharfe Trennung der N-Aufnahmeraten gewährleisten zu können. Dabei erwies sich der NDVI in den eigenen Auswertungen bereits bei N-Aufnahmewerten ab 40 kg ha^{-1} im Herbst als ungeeignet, höhere N-

Aufnahmeraten sicher bestimmen zu können. Ähnliche Beobachtungen machten SCHMID (2006) und LI et al. (2014^B) in Weizen und Mais, bei denen eine kurvenlineare Beziehung dieses Index zur N-Aufnahme von Weizen bzw. Mais gefunden wurde. Dies deckt sich wiederum mit den Studien verschiedener Autoren (SCOTFORD & MILLER, 2004^A, HOUBORG & BOEGH, 2008, HERRMANN et al., 2011, VIÑA et al., 2011), die eine Stagnation der Messwerte des NDVI bei einem Anstieg des eng mit der N-Aufnahme verbundenen Blattflächenindex beschrieben.

Der Vergleich der R²-Werte der linearen und quadratischen Regressionsgleichung zeigte, dass ab BBCH 50 bis auf die Indices VX 3 und NDI 2 alle weiteren Vegetationsindices bei höheren N-Aufnahmewerten diesem Sättigungseffekt unterlagen. ERDLE et al. (2011) machen für den Sättigungseffekt das rote Reflexionsspektrum verantwortlich, das in die Berechnung des IRR eingeht. Andererseits dürfte dann bei Indices wie dem IRG mit einer Kombination aus infrarotem und grünem Licht und dem infrarotbasierten Index IR 1 sowie der SR 1 und der SR 2 kein solcher Effekt auftreten. Ursache für die sichtbare Sättigung ist bei diesen Indices wahrscheinlich das Blätterdach dichter Pflanzenbestände, so dass die Reflexion der unteren Blätter nicht mehr erfasst wird, sondern nur noch die Rückstrahlung der oberen Blattetagen, wie auch SCOTFORD & MILLER (2004^A) bei ihren Messungen mit dem NDVI in Winterweizen vermuteten.

Ein Sorteneffekt, der sich aufgrund differenzierter morphologischer Merkmale wie der Blattohaltung und der Blattgröße auf die Reflexionsmessungen und damit die Indices auswirkt (HANSEN & SCHJOERRING et al., 2003, NGUYEN & LEE, 2006, LI et al., 2014^A), konnte in den langjährigen Sortenversuchen über die gesamte Vegetation hinweg statistisch nicht nachgewiesen werden. Da auch die N-Aufnahmen und TM-Aufwüchse der verschiedenen Rapsorten keine statistisch signifikanten Unterschiede erkennen ließen, kann davon ausgegangen werden, dass auch kein morphologischer Einfluss auf die Reflexionsmessungen und damit die Vegetationsindices vorlag.

Vergleichbar zur N-Aufnahme korrelierten die Messwerte der Indices mit dem TM-Aufwuchs in den Einzeljahren im Herbst sehr gut miteinander. Dies beweisen die maximalen R²-Werte der quadratischen Regressionen, die zwischen 0,87 (VX 1) und 0,91 (IRG) lagen. Wurden die Einzeljahre zusammengefasst ausgewertet bot sich allerdings ein anderes Bild, da nur noch der Vegetationsindex IRG eng mit dem TM-Aufwuchs im Herbst korrelierte. Alle übrigen Vegetationsindices waren für die Abschätzung weniger geeignet. Analog zu den R²-Werten der N-Aufnahme waren die Bestimmtheitsmaße zu den Messterminen im Frühjahr bei allen

Indices für eine präzise Erfassung des oberirdischen Biomasseaufwuchses zu gering. Damit verhielten sich die R^2 -Werte des IRR und IRG ähnlich zu den von MISTELE & SCHMIDHALTER (2008) veröffentlichten Werten, die bei Mais zu frühen Entwicklungsstadien eine starke Beziehung dieser Indices zum TM-Aufwuchs fanden, die mit den späteren Messungen abnahm. Allerdings konnten die hohen R^2 -Werte der linearen Regression, die MÜLLER et al. (2008) in Raps sowie SCHÄCHTL (2004) und SCHMID (2006) in verschiedenen Getreidearten und Blattfrüchten für die Beziehung zwischen den Messwerten des NDVI, des IRR sowie des IRG und dem TM-Aufwuchs fanden, in den eigenen Untersuchungen nicht bestätigt werden.

Zusammengefasst erwies sich der VX 2 von allen untersuchten Indices als derjenige Vegetationsindex, der sich am besten zum Abschätzen der N-Aufnahme im Herbst eignet. Darüber hinaus ist dieser Index frei von Sorteneinflüssen und einem Sättigungseffekt, so dass auch Rapsbestände mit hohen N-Aufnahmewerten sicher über diesen Vegetationsindex abgebildet werden können. Der NDVI dagegen war unter anderem wegen des ausgeprägten Sättigungseffekts für die Verwendung im Düngesystem zur Abschätzung der N-Aufnahme nicht geeignet.

Somit muss die **Arbeitshypothese 2** für die Bestimmung der N-Aufnahme abgelehnt werden, da sowohl der NDVI als auch der IRR und IRG die N-Aufnahme zum Abschätzen der N-Aufnahme weniger gut geeignet sind als der VX 2. Angenommen werden kann dagegen die **Arbeitshypothese 2** für die Aussage, dass diese Indices frei vom Sorteneinfluss sind. Ebenfalls abgelehnt werden muss die Hypothese für den NDVI und den IRR, dass eine Erfassung der Biomasse möglich ist, da nur eine geringe Korrelation zwischen dem NDVI bzw. dem IRR und dem Biomasseaufwuchs während der gesamten Vegetation bestand. Für den IRG traf diese Arbeitshypothese nur für die Herbstmessungen zu, da dieser Vegetationsindex zu späteren Messterminen nur noch gering mit dem Biomasseaufwuchs korrelierte.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass eine präzise Abschätzung der N-Aufnahme nur gelingt, wenn auch die Messwerte des Vegetationsindex höchst genau bestimmt werden und diese nur einer geringen Streuung unterliegen. Eine Abweichung von mehr als 5% führt zu einer Differenz in der N-Aufnahme von 20 kg ha^{-1} . Werte darüber können nicht toleriert werden, da sonst der Vorteil einer effizienteren N-Verwertung beim Einsatz dieses Düngesystems nicht mehr gegeben wäre.

5.1.2 Düngesystem Winterraps – Berechnung der N-Düngermenge im Frühjahr

Die Ergebnisse der Reflexionsversuche zeigen, dass eine Abschätzung der N-Aufnahme im Frühjahr aufgrund der geringen R^2 -Werte mit großer Unsicherheit verbunden ist, so dass eine Messung mit ausreichender Präzision nur gegen Ende der Vegetationsperiode im Herbst möglich ist.

Für die Bemessung der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr in Winterraps nannten ENGSTRÖM et al. (2014) unter anderem die N-Aufnahme im Herbst und die Ertrags Erwartung des Standortes. Bereits HENKE (2009) untersuchte den Zusammenhang zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr und fand eine enge Beziehung zwischen diesen beiden Faktoren. Weitere Studien, wie die von SCHLIEPHAKE (2011) und ENGSTRÖM et al. (2012), fanden R^2 -Werte bis zu 0,84. In den eigenen Regressionsanalysen, in denen die Daten mehrerer Standorte und Jahre zusammengefasst wurden, konnten durch die N-Aufnahme im Herbst 49% der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr erklärt werden. Alle Studien zeigten übereinstimmend eine negative Beziehung dieser beiden Größen zueinander, wobei die Steigung grundsätzlich kleiner 1 war. Dies bedeutet, dass nicht die vollständige im Herbst aufgenommene N-Menge anrechenbar ist. Analog zur Aussage von HENKE (2009) zeigten die eigenen Versuche, dass über die N-Aufnahme im Frühjahr weder zu VB noch zu BBCH 30 eine sichere Ableitung der benötigten N-Düngermenge im Frühjahr möglich ist. Ursache für die geringe Beziehung der N-Aufnahme im Frühjahr zur optimalen N-Düngermenge ist wohl, dass die Komponenten für die Ertragsstruktur vor allem im Herbst angelegt werden (SCOTT et al., 1973, MENDHAM & SCOTT, 1975, SCHRÖDER & MAKOWSKI, 1996) und damit zu späteren Terminen durch Einzelgaben nicht beeinflusst und korrigiert werden können.

Wie die Auswertungen des N-Steigerungsversuchs in Roggenstein zeigen, wurden die Kornerträge durch die N-Düngung von 21,8 dt ha⁻¹ auf maximal 56,2 dt ha⁻¹ erhöht. Damit decken sich die Ergebnisse mit verschiedenen Studien, die unter vergleichbaren klimatischen Bedingungen die Auswirkung einer N-Düngung auf die Ertragsbildung von Winterraps untersuchten (SCHJOERRING et al., 1995, WIESLER et al., 2001, RATHKE et al., 2005, SIELING et al., 2006, SCHULTE AUF´M ERLEY et al., 2011, ZAJAC et al., 2011, ULAS et al., 2013). Allerdings nimmt der Ertragszuwachs mit steigender N-Düngermenge ab. Um 85% des Maximalertrags zu erzielen, reichten in den eigenen Versuchen 120 kg ha⁻¹ Mineraldünger-N aus. Mit 180 kg ha⁻¹ Gesamt-N-Düngermenge wurden bereits 95% des Maximalertrags erzielt. Ein breites Düngeoptimum bei Raps wurde bei RATHKE et al. (2005) beobachtet. Auf ertragrei-

chen Standorten des mitteldeutschen Trockengebiets genügten den Autoren zufolge bereits $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ zur Realisierung von 95% des Ertragsmaximums.

Dieses breite Düngesoptimum sollte im entwickelten Düngesystem genutzt werden, um eine hohe N-Effizienz und eine Einsparung von N-Dünger zu erreichen. Dazu wurde ein Ertragsrückgang von 1% akzeptiert, was zu einer gleichzeitigen N-Einsparung von durchschnittlich knapp 30 kg ha^{-1} führte. Dieses Vorgehen hatte eine Verschiebung der Regressionsgeraden zur Folge, die aus der Korrelation zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr kalkuliert wurde. Diese Regressionsgerade entspricht dem Durchschnittsertrag am Standort Roggenstein mit $53,5 \text{ dt ha}^{-1}$ und bildet damit die Referenzgerade für die weiteren Anpassungen des Düngesystems.

Wie die eigenen Versuche zeigten, begegnete Raps schlechteren Bodenqualitäten mit einem deutlichen Ertragsrückgang um 26%. Ähnlich deutlich reagierte Raps auf schlechteren Teilschlägen bei MÜLLER et al. (2005), die einen Ertragsrückgang von bis zu 34% beschrieben, und SCHLIEPHAKE (2011), der Rapsrerträge auf verschiedenen Standorten untersuchte. Ebenso variierten bei Gerste (JAMES & GODWIN, 2003), Weizen (LAWES et al., 2009, JOHNEN et al., 2014) sowie Mais (LIEBLER, 2003) und Kartoffeln (SCHÄCHTL, 2004) die Kornerträge in Abhängigkeit der Standortbedingungen.

Somit ist es nötig, wie auch ENGSTRÖM et al. (2014) fordern, den N-Düngebedarf von Winteraps an den Kornertrag anzupassen, um die N-Überschüsse im Rapsanbau reduzieren zu können. Einige Länder (Bayern, Baden-Württemberg, Sachsen, Frankreich), wie in Kapitel 2.8.3 näher beschrieben, richten bereits ihre Düngeempfehlungen unter anderem nach dem erwartbaren Kornertrag aus.

Dazu wird in Baden-Württemberg für die Düngerkalkulation der N-Entzug der Gesamtpflanze in Abhängigkeit des Kornertrags kalkuliert (GRIMM, 2010, SCHNEIDER-GÖTZ ET AL., 2010, LTZ, 2013). Dieses Vorgehen diene als Beispiel für die Anpassung der Regressionsgeraden an verschiedene Ertragsniveaus, da aus den eigenen Versuchen nicht ausreichend Daten für das realistische Ertragsbildungsvermögen von Raps zwischen 20 dt ha^{-1} bis 60 dt ha^{-1} zur Verfügung standen. Somit wurde mit einem N-Entzug von $3,03 \text{ kg je dt Kornertrag}$ kalkuliert. Da die Verwertung des Mineraldünger-N auf NE-Standorten deutlich geringer ist und somit entsprechend mehr gedüngt werden muss, um Ertragsverluste zu vermeiden, durfte die Gerade nicht vollständig um diesen Betrag verschoben werden. Bei der Kalkulation der N-Düngermenge auf einem ertragsschwachen Teilschlag verschiebt sich also die Regressionsge-

rade nicht vollständig um die Differenz des N-Entzugs über das Korn. Die von der Referenzgeraden zu subtrahierende N-Menge wird um einen Faktor verringert, so dass mehr Mineraldünger-N appliziert wird. Dafür wurde als Korrekturfaktor die prozentuale N-Verwertung verwendet, die aus den langjährigen Versuchsdaten abgeleitet wurde. Somit wird ein Rückgang der N-Verwertung um 1,3% je Dezitonne verringertem Kornertrag berücksichtigt, womit die N-Düngermenge höher ist als der tatsächliche Bedarf. Nachteil dieses Verfahrens ist selbstverständlich, dass somit die N-Düngung nicht vollständig ausgeglichen erfolgen kann, sondern positive N-Salden akzeptiert werden müssen.

5.1.3 Dünagesystem Winterraps – N-Verteilung

Wie die eigenen Ergebnisse sowie die Studien von SCHJOERRING et al. (2005), RATHKE et al. (2005), BARLÓG & GRZEBISZ (2004^A), ULAS et al. (2013) zeigen, beeinflusst die N-Düngermenge die Ertragsbildung. Neben der N-Menge ist aber auch die richtige Verteilung dieses Nährstoffs für eine möglichst gute Ausnutzung des Mineraldünger-N und damit für die Reduzierung der N-Salden wichtig. Wie die Ergebnisse von CHEEMA et al. (2010) bestätigen, bilden Pflanzen bei einer Aufteilung der N-Düngergaben mehr Kornertrag. Die eigenen Auswertungen der langjährigen Versuchsdaten zeigten, dass dabei auch darauf zu achten ist, in welchem Verhältnis die N-Gaben appliziert werden. Im N-Steigerungsversuch Roggenstein erzielten diejenigen Varianten höhere Kornerträge, in denen zu Vegetationsbeginn ein Drittel und zu Schossbeginn zwei Drittel der Gesamtdüngermenge gestreut wurde. Diese Beobachtung bestätigen die Ergebnisse von BEHRENS et al. (2001), die mit geringeren Gesamt-N-Düngermengen hohe Kornerträge bei einer geringeren Düngung zu Vegetationsbeginn und einer kräftigen zweiten N-Düngergabe erzielten. Bei WRIGHT et al. (1988) führte diese Art der Düngeverteilung bei ausreichender Wasserversorgung gegenüber der gleichmäßigen Düngeverteilung ebenfalls zu Ertragszuwächsen.

Außerdem bewiesen die Auswertungen der N-Steigerungsversuche, dass die N-Düngergaben nicht zu spät in der Vegetationsperiode gegeben werden sollten. So führte eine späte N-Düngergabe zu BBCH 50 zu einem deutlichen Ertragsrückgang gegenüber früheren Düngeterminen. CHEEMA et al. (2010) sowie BARLÓG & GRZEBISZ (2004^A) können diese Beobachtungen bestätigen. In deren Studien wurden an den jeweiligen Standort angepasste N-Düngergaben mit einer zusätzlichen späten N-Düngergabe verglichen, die ebenfalls deutliche Ertragsrückgänge verursachte. Die Verteilung der N-Düngermenge im Frühjahr darf aber nicht schematisch erfolgen, sondern muss an die Winterwitterung und die damit verbundenen

Blatt- und Pflanzenverluste angepasst werden, wie die Auswertung der eigenen Versuche belegt. Um die Regeneration nach hohen Blattverlusten im Winter zu fördern und möglichst schnell den nach HABEKOTTÉ (1997) für hohe Kornerträge benötigten Blattflächenindex von mindestens 3 zu erreichen, muss die N-Düngung zu VB betont werden. Wie BEHRENS et al. (2001) herausfanden und auch die eigenen Ergebnisse bestätigen, wird durch diese Maßnahme die Biomasseproduktion angeregt sowie durch hohe N-Gaben zu VB vor allem die Schotenzahl und die Verzweigungsleistung gefördert. In einem frühbetonten N-Düngeregime bilden Rapspflanzen mehr und vor allem größere Laubblätter, mit denen mehr Licht absorbiert werden kann (WRIGHT et al., 1988). Allerdings förderte diesen Autoren zufolge eine geringe Startgabe mit einer kräftigen Folgedüngung die Schotenzahl. Nach milden Wintern war es den eigenen Ergebnissen zufolge besser, wenig bis (in Extremfällen) gar keine N-Düngung zu Vegetationsbeginn durchzuführen, um eine zu starke Biomasseproduktion und damit eine Nährstoffkonkurrenz zwischen den Pflanzenorganen sowie den Einzelpflanzen zu vermeiden. Zu viel Blattfläche bringt keine Mehrerträge, wie HABEKOTTÉ (1997) feststellte.

Die N-Verteilung und Terminierung wirken sich neben dem Ertrag auch auf die Qualität der Rapskörner aus. Übereinstimmend mit Resultaten von RATHKE & SCHUSTER (2001), RATHKE et al. (2005) sowie GRANT et al. (2011) reduzierte eine steigende N-Düngung den Ölgehalt auf minimal 44,8%. TAYLOR et al. (1991) fanden allerdings unter Beregnung heraus, dass eine hohe zweite N-Düngergabe zu Schossbeginn die Ölkonzentration im Korn in Einzeljahren um bis zu 2,9% (absolut) gegenüber einer einmaligen N-Applikation verringern kann. Dies bestätigten die eigenen Versuche nicht. Der Effekt zwischen einer frühbetonten und spätbetonten N-Düngergabe auf den Ölgehalt war mit 0,1% (absolut) vergleichsweise gering. Zu späte N-Düngergaben nach BBCH 50 ließen den Ölgehalt merklich absinken, was sich mit den Ergebnissen von BARLÓG & GRZEBISZ (2004^A) deckt. Ursache für den Rückgang ist die negative Korrelation zwischen Öl- und Proteingehalt (RATHKE et al., 2005), weil durch späte Applikationen von N-Dünger die Bildung von Protein gefördert und somit die Ölkonzentration verringert wird. Diesen Zusammenhang bestätigen die eigenen Ergebnisse (Tab. 39 & Tab. 42).

Neben dem Kornertrag beeinflussen die Menge und die Verteilung des N-Düngers die Biomassebildung sowie die N-Aufnahme des Rapsbestandes. Analog zu LELEU et al. (2000) förderte eine N-Düngung die Biomasseproduktion von Raps. Dementsprechend wurde je nach Düngung im Herbst ein TM-Aufwuchs zwischen 15,8 dt ha⁻¹ und 23,2 dt ha⁻¹ erzielt, was den Ergebnissen von BARRACLOUGH (1989) entspricht. Eine vergleichbare Aussage machte SCHLIEPHAKE (2011), der den Frischmasseaufwuchs unterschiedlich gedüngter Rapsbestände

untersuchte. Dagegen berichten COLNENNE et al. (2002) von TM-Aufwüchsen von bis zu 45 dt ha⁻¹ vor dem Winter. Allerdings sind solche, infolge guter N-Versorgung, biomassereichen Pflanzenbestände anfällig gegenüber kaltem Winterwetter. Wie die eigenen Versuche und die Ergebnisse von GABRIELLE et al. (1998^A) und JUSTES et al. (2000) bestätigen, verlieren vor allem blattreiche Bestände Biomasse. DEJOUX et al. (1999), AUBERTOT et al. (2004) und BEHRENS & DIEPENBROCK (2006) merkten in ihren Veröffentlichungen jedoch an, dass neben der N-Versorgung auch die Temperatur im Winter eine wichtige Rolle bei den Blattverlusten spielt. In kalten Wintern werden mehr Blätter abgeworfen werden als in milden Wintern. In extrem milden Wintern kann, wie die eigenen Daten aus den Jahren 2013 und 2014 zeigen, sogar ein Biomassezuwachs erfolgen.

Nach dem Winter wurden deutliche Zuwachsraten beim TM-Aufwuchs von Raps erst mit dem Eintritt in das Längenwachstum registriert. In Abhängigkeit des Standortes und der N-Versorgung im Frühjahr wurden in den eigenen Versuchen bis zur Blüte täglich zwischen 0,6 dt ha⁻¹ TM und 1,5 dt ha⁻¹ TM gebildet. Vergleichbare Werte für die tägliche Wachstumsrate in diesem Zeitraum fanden BARRACLOUGH (1989) und PAPANTONIOU et al. (2013). Bis BBCH 85 wurden so in den eigenen Versuchen 80,1 dt ha⁻¹ TM in den ungedüngten und 160 kg dt ha⁻¹ TM in den hochgedüngten Varianten erreicht. Weit mehr oberirdische Biomasse wurde dagegen bei BEHRENS et al. (2006) bei annähernd gleicher N-Düngermenge ermittelt.

Die N-Aufnahme ist das Produkt aus dem TM-Aufwuchs und dem N-Gehalt der oberirdischen Biomasse. Infolge des durch die Höhe der N-Düngung stark beeinflussten N-Gehalts (COLNENNE et al., 1998, BARŁÓG & GRZEBISZ, 2004^B, SELEIMANN et al., 2013) differenzierten die N-Stufen diesbezüglich deutlich stärker als beim TM-Aufwuchs. So wurde durch eine N-Applikation die N-Aufnahme im Herbst gegenüber einer ungedüngten Variante mehr als verdoppelt (69,0 kg ha⁻¹). Diese N-Aufnahmen schwanken allerdings je nach Jahr und Standort und können Werte weit über 100 kg ha⁻¹ erreichen (DEJOUX et al., 1999, HENKE et al., 2009, SCHLIEPHAKE, 2011). Solch hohe vorwinterliche N-Aufnahmen begünstigen N-Verluste nach strengen Wintern, wie DEJOUX et al. (2000) und die eigenen Untersuchungen bestätigen können, weshalb übermäßig stark mit N-Dünger versorgte Bestände vor Eintritt in die Vegetationsruhe nicht sinnvoll sind.

Nach Vegetationsbeginn war die N-Aufnahme bis Schossbeginn recht gering und erreichte eigenen Berechnungen zufolge bis zu 1,1 kg ha⁻¹ d⁻¹. Analog zu BARRACLOUGH (1989) begannen die Rapspflanzen erst mit Beginn des Längenwachstums deutlich mehr N aufzuneh-

men. Bis zur Blüte betrug die N-Aufnahme $4,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Die schlechteren Wuchsbedingungen aufgrund des geringeren Wasser- und Nährstoffspeichervermögens (LIEBLER, 2003, SCHÄCHTL, 2004, LAWES et al., 2009, MOELLER et al., 2009) auf dem NE-Standort ließen allerdings nur N-Aufnahmen bis $3,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ zu. Vergleichbare Werte wurden bei BARRACLOUGH (1989), SCHJOERRING et al. (1995) und BARLÓG & GRZEBISZ (2004^B) gefunden. Bis BBCH 85 stieg die N-Aufnahme der Rapspflanzen nur noch gering an, da die Rapspflanzen ab der Blüte mit der Verlagerung des N aus den Blättern in die generativen Organe beginnen (GOMBERT et al., 2010, PAPANTONIOU et al., 2013). Maximal wurden so je nach Düngestufe N-Aufnahmewerte bis $265,1 \text{ kg ha}^{-1}$ erreicht. Damit zeigt sich, dass übermäßig hohe N-Düngergaben von den Pflanzen während der etwa 20-tägigen Phase zwischen Vegetationsbeginn und Schossbeginn nicht aufgenommen werden können und der N-Dünger erst ab Schossbeginn aufgrund der hohen N-Aufnahmeraten sicher verwertet werden kann. Bei hohen N-Düngergaben zu Vegetationsbeginn erhöht sich damit das Risiko der N-Verluste durch Auswaschung vor allem auf sandigeren Böden. Damit macht auch die Strategie der verhaltenen Startgabe mit einer kräftigen Abschlussgabe zu BBCH 30 Sinn, da ab diesem Termin der meiste N-Bedarf durch das folgende starke Pflanzenwachstum besteht und die Pflanzen somit nicht auf Vorrat, sondern nach Bedarf versorgt werden.

Zusammenfassend ist es also sinnvoll, eine mäßige N-Düngergabe im Herbst zu applizieren und nach einer eher verhaltenen Startgabe zu Vegetationsbeginn eine kräftige Abschlussgabe zu BBCH 30 folgen zu lassen. Spätere N-Düngergaben nach BBCH 30 wurden schlechter verwertet. Auch sollte für eine optimale Ausnutzung des Mineraldünger-N die Pflanzenentwicklung nach dem Winter beachtet werden, da nach hohen Auswinterungsverlusten eine kräftige Startgabe vorteilhaft ist.

Je höher die Kornerträge bei Raps sind, desto mehr N wird entzogen. Die eigenen Ergebnisse wiesen einen Anstieg des N-Entzugs über das Korn von $3,03 \text{ kg ha}^{-1}$ pro zusätzlich gebildeter dt Korn nach. Mit deutlich höheren Werten kalkuliert die LfL ($3,35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N je dt Korn}$) (WENDLAND et al., 2012).

Da sich die Kornerträge nicht linear mit den N-Düngermengen erhöhten, sondern einer quadratischen Funktion folgten, stiegen die N-Salden mit wachsender N-Düngermenge deutlich an. So wurden in den eigenen Rapsversuchen bei hohen N-Düngermengen N-Salden über 60 kg ha^{-1} erreicht. Hohe N-Salden bei Raps fanden auch BEHRENS et al. (2001) und SIELING & KAGE (2006). Vor allem eine Herbstdüngung erhöhte die N-Salden deutlich. Bei gleicher Gesamt-N-Düngermenge im Frühjahr stieg bei einer N-Düngung von 40 kg ha^{-1} im Herbst der

N-Saldo um $30,4 \text{ kg ha}^{-1}$. Diese Herbstdüngung hatte einen Ertragseffekt, da durch ein höheres N-Angebot mehr Blätter gebildet werden und sich damit die Anzahl der in den Blattachsen angelegten Verzweigungen erhöht mit der negativen Folge der schlechteren N-Effizienz (SCOTT et al., 1975, MENDHAM & SCOTT, 1975, SCHRÖDER & MAKOWSKI, 1996). So reduzierte eine Herbst-N-Düngung die N-Effizienz deutlich auf 25 kg kg^{-1} . Vergleichbare Ergebnisse schildern HOCKING et al. (1997) und BARLÓG & GRZEBISZ (2004^B), bei denen die agronomische Effizienz mit steigenden N-Düngergaben abnahm. Auf den N-Saldo hatte eine spätbetonte N-Verteilung eine absenkende Wirkung. Ursache dafür ist ein höherer N-Entzug dieser Düngerverteilung aufgrund der im Versuch ermittelten höheren Kornerträge in Kombination mit etwas höheren Proteinkonzentrationen im Korn.

Über die Kapitel 5.1.2 und 5.1.3 zusammengefasst, kann die **Arbeitshypothese 1** vollständig angenommen werden, da die Auswertungen den Einfluss von der N-Menge und N-Verteilung auf die Ertragsbildung, der N-Aufnahme sowie der Biomassebildung bestätigen. Gleichzeitig kann über eine angepasste Verteilung die N-Effizienz erhöht werden. Darüber hinaus ist die **Arbeitshypothese 3** zu bestätigen, da durch die Analyse langjähriger Versuchsdaten ein sensorgestütztes, standortabhängiges Düngesystem entwickelt werden konnte.

5.1.4 Streifenversuch Winterraps

Das für Winterraps entwickelte, sensorbasierte N-Düngesystem wurde im Versuchsjahr 2012/2013 in einem Streifenversuch am Standort Roggenstein getestet. Als Vergleichsvarianten dienten eine auf Ertragskarten basierende Variante (Mapping) sowie eine nach dem Düngegeratungssystem Stickstoff (DSN) schlageinheitlich gedüngte Variante. Dieser einjährige Versuch zeigte sehr deutlich, dass durch eine Berücksichtigung von Ertragszonen eine im Mittel ausgeglichene N-Bilanz erreicht werden kann. Über dieses sensorgestützte Düngeverfahren konnte der durchschnittliche N-Saldo um mehr als 50 kg ha^{-1} gegenüber der schlageinheitlichen N-Düngung reduziert werden. Auch die alleinige Berücksichtigung der Ertragszonen verringerte den N-Saldo deutlich.

Wie in den N-Steigerungsversuchen beobachtet und von RATHKE & SCHUSTER (2001), RATHKE et al. (2005) sowie GRANT et al. (2011) beschrieben, stieg die Ölkonzentration mit reduzierter N-Düngermenge an. Auf den Kornertrag und die damit verbundene NKfL wirkte sich die geringere N-Düngung allerdings deutlich negativ aus. Gegenüber der schlageinheitlich gedüngten Variante DSN ging in der Variante Online + Mapping der Kornertrag um $5,2 \text{ dt ha}^{-1}$ zurück und die monetäre Leistung dieses Verfahrens verminderte sich um

161,3 € ha⁻¹. Deutlich geringere Ertragsleistungen gegenüber dem DSN waren vor allem in den ertragsschwächeren Feldstücken festzustellen, in denen 10,4 dt ha⁻¹ weniger Kornertrag erzielt wurden als in der DSN-Variante.

Die durch die N-Düngung hervorgerufenen Ertragsunterschiede dürften mit dem Jahreseffekt zu begründen sein, da in dem Versuchsjahr 2013 die Wasserversorgung in den Monaten Mai und Juni überdurchschnittlich hoch war. Somit war es in der für die Ertragsbildung wichtigen Phase offenbar durch das hohe Wasserangebot möglich, mit einer ausreichend hohen N-Düngergabe einen ähnlich hohen Kornertrag wie in dem HE-Bereich zu erzielen. Diese Theorie wird unterstützt von TAYLOR et al. (2003), JAMES & GODWIN (2003), SCHÄCHTL (2004), JOHNEN et al. (2014), bei denen sich die Kornerträge zwischen dem HE- und dem NE-Standort verschiedener Getreidearten bei ausreichender Wasserversorgung anpassten und teilweise sogar höhere Kornerträge erzielten. In Trockenjahren ist hingegen eine deutlich stärkere Ertragsdifferenzierung zwischen unterschiedlichen Bodenqualitäten zu erwarten (LAWES et al., 2009, MOELLER et al., 2009). Vergleichbares beschrieben LAMB et al. (1997), bei denen auf Teilflächen die Maiserträge stark in Abhängigkeit des Jahres aufgrund der unterschiedlichen Bodentextur schwankten.

Neben der falschen Ertragserwartung auf den Teilschlägen dürfte eine weitere mögliche Ursache für den Ertragsrückgang, vor allem auf den NE-Standorten, der akzeptierte Ertragsrückgang von 1% mit der daraus resultierenden Einsparung an Mineraldünger-N sein. Hier müsste in weiteren Versuchen abgeklärt werden, ob es vor allem auf Flächen mit geringerer Ertragsfähigkeit nicht besser wäre, die N-Düngermengen dadurch zu erhöhen, dass kein Ertragsverlust akzeptiert wird.

Ausgehend von den Ergebnissen des Streifenversuchs sollten Ertragszonen nicht als statisch sondern als variabel angesehen werden. Dies bedeutet, dass die N-Düngermenge bei gesteigerter (jahres- und witterungsspezifischer) Ertragserwartung entsprechend über das Düngesystem angepasst werden muss. Wäre in diesem Versuch die Ertragserwartung auf den 30 dt ha⁻¹ Teilstücken auf die in diesem Jahr realistischen 50 dt ha⁻¹ angehoben worden, wäre dieser Ertragsrückgang nicht aufgetreten. Andererseits ist aus den Ergebnissen auch zu schlussfolgern, dass in durchschnittlichen bzw. eher trockenen Jahren und damit bei deutlich geringeren Kornerträgen auf dem NE-Standort die N-Düngermenge in der Variante DSN deutlich zu hoch gewesen wäre, mit den damit verbunden hohen positiven N-Salden, während die nach dem Verfahren Online + Mapping versorgten Varianten einen ausgeglichenen N-Saldo erwarten ließen. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Einteilung der Ertragszonen auf einer Ein-

schätzung anhand der nFK beruhte. Würden in den folgenden Jahren Ertragskarten durch reell gemessene Druschkarten erstellt, so könnten Ertragszonen sicherer bestimmt und damit die N-Düngermenge besser kalkuliert werden. Das hätte zur Folge, dass keine bzw. nur geringe Ertragsverluste bei einer witterungsbedingten Änderung der Ertragserswartung zu verzeichnen wären.

Trotz der geringen N-Düngermengen auf dem NE-Standort produzierte Winterraps $13,2 \text{ dt ha}^{-1}$ mehr Kornertrag als auf dieser Teilfläche nach der Einteilung der Ertragszonen erwartet wurde, da Raps durch sein hohes N-Aneignungsvermögen eine große Menge des aus dem Bodenpool mineralisierten N entziehen konnte, wie die negativen N-Salden beweisen. Ein weiterer Grund für die hohen Kornerträge bei gleichzeitig geringer N-Düngung dürfte auch die von SCHJOERRING et al. (1995), GOMBERT et al. (2010) und PAPANTONIOU et al. (2013) beschriebene Fähigkeit von Raps sein, den N aus den Blättern, dem Stängel und der Wurzel in die generativen Organe zu verlagern. Der berechnete N-Saldo der Variante Online + Mapping betrug auf dem NE-Standort $-30,6 \text{ kg ha}^{-1}$. Ebenso wie hohe positive N-Salden sind negative N-Salden aus pflanzenbaulicher Sicht auf Dauer nicht anzustreben, da eine Abreicherung des N-Bodenvorrates und damit eine Reduzierung der Ertragsfähigkeit des Standortes die Folge wäre (KÜSTERMANN et al., 2010).

Die einjährigen Ergebnisse des Streifenversuchs zeigen das N-reduzierende Potential des Düngesystems unter Beibehaltung der Qualitätseigenschaften von Winterraps. Die **Arbeitshypothese 4** kann allerdings nur zum Teil bestätigt werden. Es war zwar eine deutliche Reduktion der N-Düngermenge in Abhängigkeit des Standorts bei einer gleichzeitig hohen N-Effizienz ohne Qualitätsverluste zu erkennen, allerdings mussten deutliche Ertragsverluste hingenommen werden, was zu einer Ablehnung **Arbeitshypothese 4** für diesen Teil führt.

Um die Ergebnisse weiter absichern und Korrekturen am Düngesystem vornehmen zu können, müssten weitere Versuche auf Standorten unterschiedlicher Ertragsfähigkeit durchgeführt werden. Allerdings sollte die Abgrenzung der Ertragszonen bei Raps nicht, wie in diesem Versuch, in 10 dt ha^{-1} Intervallen geschehen, sondern eher in 5 dt ha^{-1} -Schritten.

5.1.5 Einordnung des Düngesystems für Winterraps

Das Düngesystem für Winterraps basiert auf einer Messung der N-Aufnahme gegen Ende der Vegetationsperiode vor dem Winter. Daraus wird der N-Düngerbedarf für die N-Düngung im Frühjahr berechnet. Ähnlich kann mit dem YARA N-Sensor vorgegangen werden, indem be-

reits im Herbst eine Streukarte für die Startgabe zu Vegetationsbeginn erstellt wird. Allerdings können laut Hersteller (WRÓBEL, 2014, AGRICON, 2014^B) über dieses System auch beide Frühjahrsapplikationen anhand der Messung der N-Aufnahme durchgeführt werden. Dies ließ sich mit den eigenen Messungen nicht bestätigen. Dort war kein Vegetationsindex eng mit der N-Aufnahme – weder zu Vegetationsbeginn noch zu BBCH 30 – korreliert. Auch war in den eigenen Studien kein Zusammenhang zwischen den einzelnen N-Düngergaben im Frühjahr und dem Korntrug zu erkennen, so dass aus diesem Grund auf eine Bestimmung der N-Düngermenge durch die Messung der Pflanzenreflexion im Frühjahr im eigenen Düngesystem verzichtet wurde.

Um den Mineraldünger-N möglichst effizient einsetzen zu können, wird die N-Düngermenge nach dem Ansatz Online + Mapping in Abhängigkeit des realisierbaren Korntrags kalkuliert, wobei die standortabhängige N-Verwertung berücksichtigt wird, um unnötige Ertragsverluste zu vermeiden. Im Unterschied zum Onlineverfahren wird somit auf HE-Standorten mehr N-Dünger appliziert als auf NE-Standorten. Darüber hinaus wird die N-Düngermenge im Frühjahr in Abhängigkeit der Auswinterung variabel verteilt, ohne die Gesamtmenge zu verändern. Das Düngesystem von YARA berücksichtigt darüber hinaus das N-Nachlieferungspotential des Bodens bei der N-Düngung (WRÓBEL, 2014, AGRICON, 2014^B). Auf dieses kann nach eigener Einschätzung allerdings verzichtet werden, da die N-Versorgung aus dem Bodenpool über die Herbstmessung zum Teil erfasst ist. Darüber hinaus erfolgt die N-Düngung bei Raps vergleichsweise früh, so dass auf eine spätere N-Mineralisierung nicht mehr eingegangen werden kann. Ein pauschaler Faktor dagegen sollte eher abgelehnt werden, da die N-Mineralisierung vor allem von der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte beeinflusst wird.

Die N-Düngeempfehlungen von Frankreich sowie der Bundesländer Schleswig-Holstein und Sachsen verwenden wie das Düngesystem für Winterraps die N-Aufnahme im Herbst für die Kalkulation der N-Düngermenge im Frühjahr (HEBINGER, 2005, SAUERMAN et al., 2009, SIELING et al., 2009, HEBINGER, 2009, FÖRSTER, 2013, CETIOM, 2014, SCHLIEPHAKE ET AL., 2014). Dazu müssen Pflanzenproben über den Rapsschlag verteilt geschnitten und gewogen werden. Dieses Verfahren ist folglich eine Näherung (Schätzverfahren), während die N-Aufnahme von Raps über den Sensor ganzflächig erfasst wird. Mit der Hinterlegung einer Ertragskarte wird daraus eine teilflächenspezifische N-Empfehlung kalkuliert. Auch das französische Modell passt die Verteilung des Mineraldünger-N an die Bestandesentwicklung an, während beim BEFU in Sachsen (FÖRSTER, 2013, SCHLIEPHAKE ET AL., 2014) auf eine geringe

Startgabe eine betonte N-Applikation zu Schossbeginn erfolgt. In den übrigen Düngeempfehlungen der Länder wie Bayern, Baden-Württemberg oder Nordrhein-Westfalen ist eher eine frühbetonte N-Düngung angegeben (GRIMM, 2010, SCHNEIDER-GÖTZ ET AL., 2010, LTZ, 2013, LfL, 2014, LWK-NRW, 2014^A, LWK-NRW, 2014^B). In den meisten Empfehlungen der Länder wird auf die Pflanzenentwicklung nach dem Winter eingegangen, allerdings wird dabei nur die N-Menge geregelt, nicht aber die Verteilung, die im Dünagesystem Online + Mapping für Winterraps berücksichtigt wird. Ebenfalls auffallend ist die geringe Anpassung der N-Düngermenge an Kornerträge. Bis auf die Empfehlungen aus Baden-Württemberg und Sachsen sind die N-Düngeralkulationen über einen weiten Ertragsbereich ähnlich oder es wird, wie in Schleswig-Holstein, von einem standortunabhängigen, immer gleichen N-Düngerbedarf ausgegangen. Dieses Vorgehen kann auf ertragsschwächeren Standorten zu deutlichen N-Überhängen führen, wie bereits SIELING & KAGE (2006) beschrieben. Allerdings ist es auch nicht richtig, die N-Düngermenge allein in Abhängigkeit des Ertragspotentials zu regulieren. Die eigenen Versuche zeigen nämlich, dass die N-Verwertung auf NE-Standorten abnimmt. Aus diesem Grund wurde die N-Verwertung im Dünagesystem für Winterraps bei der Kalkulation der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr berücksichtigt, was die N-Düngermengen etwas erhöht. Weitere Versuche müssten jedoch klären, ob die N-Verwertung auf jedem Standort vergleichbar ist, oder ob diese Größe noch weitere Anpassungen benötigt.

Im Unterschied zum N-Dünagesystem für Winterraps werden bei den Düngeempfehlungen der Länder noch weitere Faktoren bei der Kalkulation des N-Bedarfs, wie die N-Nachlieferung aus dem Boden, die Erntereste der Vorfrucht oder der N_{\min} im Frühjahr, angerechnet. Auch die Vorfruchtwirkung und der Standorteinfluss werden in diesen Kalkulationsverfahren aufgenommen. Durch die Erfassung der N-Aufnahme im Herbst im Dünagesystem fließen ebenfalls Faktoren wie die Vorfruchtwirkung, der Verbleib von Ernteresten auf dem Feld und der Standorteinfluss in die Berechnung der optimalen N-Düngermenge im Frühjahr ein. Die N-Mineralisierung aus dem Boden wird im Dünagesystem für Winterraps allerdings nicht erfasst.

5.2 Dünagesystem Wintergerste

Das Dünagesystem für Wintergerste besteht aus einem Messalgorithmus zum Abschätzen der N-Aufnahme der Pflanzenbestände, den optimalen, standortspezifischen N-Aufnahmekurven sowie einem Korrekturfaktor DIMA. Dieses Dünagesystem beruht auf dem gleichen methodischen Ansatz wie das Dünagesystem für Winterweizen (MAIDL, 2011^A, MAIDL, 2011^B), das im Sensorsystem ISARIA der Firma Fritzmeier praktische Anwendung findet. Für zwei- und

mehrzeilige Wintergerste werden auf Grundlage der feldexperimentellen Ergebnisse unterschiedliche Algorithmen und N-Aufnahmekurven verwendet.

5.2.1 Vegetationsindices für Wintergerste

Auf die Messwerte der Indices hat der Sortentyp Einfluss, was an der unterschiedlichen Biomassebildung und an dem unterschiedlichen Pflanzenhabitus liegt. Mehrzeilige Wintergerste bildet längere Pflanzen sowie eine größere Ähre als zweizeilige Gerste (LE GOUIS et al., 1992). Innerhalb der Sortentypen unterschieden sich zweizeilige Wintergerstensorten nach Auswertung des mehrjährigen Sortenversuchs hinsichtlich ihres Biomasseaufwuchses nicht voneinander, während die Sorten von mehrzeiliger Wintergerste zu Beginn des Längenwachstums deutlich differenzierten. Ähnliches beschrieben GRANT et al. (1991^A), DORDAS (2012) und ZHAO et al. (2014), indem Sorten eines Sortentyps während des Wachstums unterschiedliche Biomasseaufwüchse produzieren. Dagegen war in den eigenen Untersuchungen bei beiden Sortentypen kein Effekt der Sortenwahl auf die N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse festzustellen. Trotzdem konnte über eine Kovarianzanalyse bei einigen Indices eine signifikante, aber vernachlässigbar geringe Reaktion auf den Sortenwechsel nachgewiesen werden. Dies überrascht vor allem für zweizeilige Gerste, da sich deren Sorten weder in der TM-Bildung noch in der N-Aufnahme unterschieden. Hier sind vermutlich verschiedene phänotypische Merkmale wie die Blatthaltung oder Blattgröße für veränderte Reflexionsmessungen verantwortlich, was HANSEN & SCHJOERRING (2003), NGUYEN & LEE (2006), LI et al. (2014^A) mit ihren Untersuchungen in Weizen und Reis bestätigen können. Bei den mehrzeiligen Sorten ist vermutlich der unterschiedliche TM-Aufwuchs vor allem in den früheren Entwicklungsstadien für den Sorteneinfluss verantwortlich, da der Bodeneinfluss in dünneren Beständen stärker ist als in dichteren Pflanzenbeständen (SCOTFORD & MILLER, 2004^B, YAO et al., 2014, TIAN et al., 2014). Dadurch kann sich die Reflexionssignatur verändern. Bei den späteren Messungen zu BBCH 65 ist der Effekt des Sortentyps durch eine mögliche unterschiedlich schnelle Entwicklung der Pflanzen sowie eine unterschiedliche Größe der Ähren erklärbar.

Für jedes Einzeljahr und jeden Messtermin wurden für die verschiedenen Indices Regressionsanalysen zwischen den Messwerten der Vegetationsindices und der N-Aufnahme in beiden Sortentypen durchgeführt. Die Ergebnisse der zwei- und mehrzeiligen Sorten ähnelten sich so sehr, dass sie im Folgenden nicht immer getrennt voneinander diskutiert werden. Bei beiden Sortentypen korrelierten die Faktoren N-Aufnahme und Vegetationsindex eng miteinander,

wie die Bestimmtheitsmaße der quadratischen Regression (R^2 bis 0,96) zeigen. Gleichzeitig unterschieden sich die Indices nur geringfügig in ihrer Messgenauigkeit. Die Höhe der R^2 -Werte veränderte sich im Verlauf der Vegetation kaum. Mit der Zusammenfassung der Messjahre und der verschiedenen Standorte gingen die Bestimmtheitsmaße bei allen Indices und Sortentypen zurück. Besonders betroffen waren davon die Indices NDVI, SAVI, IR 1 und VX 1 zu BBCH 30. Der Rückgang der Genauigkeit kann darin liegen, dass die Messtermine bedingt durch die Witterung und das Pflanzenwachstum in keinem Jahr identisch einzuhalten waren. Da, wie in Kapitel 4.2.3 dargestellt, die Indices auf die N-Aufnahme der Pflanzen mit deutlichen Veränderungen der Messwerte im Vegetationsverlauf reagierten, erhöht sich die Streuung der Einzelwerte und verringert somit die Bestimmtheitsmaße. Darüber hinaus wurden die Gerstenversuche auf jährlich wechselnden Schlägen der Versuchsstationen angelegt. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, unterschieden sich die Versuchsflächen hinsichtlich der Bodenart und aufgrund unterschiedlicher Humusgehalte auch in ihrer Farbe sowie der Oberflächenstruktur des Bodens. Weiterhin veränderte sich die Bodenfarbe mit unterschiedlicher Bodenfeuchte. Damit führten wechselnde Bodeneigenschaften vor allem in Beständen mit geringer Bodenbedeckung zu einer Veränderung der Reflexion, wie DAUGHTRY et al. (2000), WEIDONG et al. (2002), DARVISHZADEH et al. (2008) und CROFT et al. (2012) herausfanden.

Anders als von REUSCH (1997), SCHÄCHTL (2004) und SCHMID (2006) in Winterweizen und Wintergerste untersucht, war es mit dem Vegetationsindex IR 1 über die gesamte Vegetation kaum möglich, die N-Aufnahme beider Wintergerstensortentypen sicher abzuschätzen. Eine mögliche Ursache für das ebenfalls schlechte Abschneiden des NDVI und SAVI kann an der verwendeten roten Wellenlänge liegen, da die Reflexion in diesem Bereich des zurückgestrahlten Lichts wenig auf Änderungen des Chlorophyllgehalts und damit der N-Aufnahme reagiert (LICHTENTHALER et al., 1996). Allerdings wurde der SAVI nach den Studien von HUETE (1988) und BAUSCH (1993) dazu entwickelt, den Bodeneinfluss auf die Reflexionsmessungen zu minimieren. Wie die eigenen Messungen zu den frühen Terminen zeigen, konnte dies mit dem SAVI nicht erreicht werden, da dieser Index nur geringfügig mit der N-Aufnahme zu BBCH 30 und zu allen weiteren Terminen korrelierte.

Ähnlich zum NDVI war der Index VX 1 zu Schossbeginn zum Abschätzen der N-Aufnahme in zwei- und mehrzeiliger Wintergerste bedingt geeignet. Im Verlauf der Vegetation jedoch verbesserte sich die Präzision dieses Index, bis sie zur Blüte wieder abfiel. Der Index IRR war vor allem bei der zweizeiligen Wintergerste zu den frühen Entwicklungsstadien in der Lage, die N-Aufnahme abzubilden, wobei diese Genauigkeit deutlich bis zur Blüte abnahm. Ursa-

che dafür ist vermutlich die rote Wellenlänge im Nenner dieses Index. JACKSON & PINTER (1986) gaben in ihrer Studie als Grund für die Veränderung der Messwerte eine veränderte Blattstellung der Weizenpflanzen an, die die Rückstrahlung im rotwelligen Bereich beeinflusst. Gleichzeitig veränderte sich in den Studien von HABOUDANE et al. (2004) und von PIMSTEIN et al. (2009) bei Weizen die Rückstrahlung mit Beginn des Ährenschiebens. Somit beeinflusste vermutlich der größer werdende Stängelanteil ab dem Grannenspitzen die Reflexion, was als Ursache für den Rückgang der Bestimmtheitsmaße angenommen werden kann.

Von den in dieser Arbeit untersuchten Vegetationsindices eignete sich der Vegetationsindex VX 2 vor allem in der Schossphase am besten zum Abschätzen der N-Aufnahme bei beiden Sortentypen aufgrund des hohen R^2 von 0,76 (lineare Regression). Ab BBCH 49 nahmen die R^2 -Werte etwas ab. Demgegenüber korrelierten der VX 3 sowie der NDI 2 und die Simple Ratio SR 1 sowie SR 2 bei mehrzeiliger Wintergerste über die gesamte Vegetationszeit hinweg und bei zweizeiliger Wintergerste ab BBCH 32 bis BBCH 49 eng mit der N-Aufnahme. Damit ist bewiesen, dass mit diesen Indices nicht nur die N-Aufnahme von Raps (MÜLLER et al., 2008) gut gemessen werden kann, sondern auch die von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste. Vergleichbare Ergebnisse schilderten STRENNER & MAIDL (2011) bei Sommerweizen, bei denen die Simple Ratio SR 2 und der Index NDI 2 während der gesamten Vegetationszeit eng mit der N-Aufnahme korrelierten. Auch bei der Wintergerste bestätigten sich die Studien von SCHJOERRING et al. (2003), ERDLE et al. (2011) und CLEVERS & GITELSON (2013), nach denen Kombinationen aus eng nebeneinander liegenden Wellenlängen des NIR-Spektrums die N-Aufnahme von Winterweizen am besten abbilden können. Der IRG korrelierte in der eigenen Studie sowie in den Untersuchungen von SCHÄCHTL (2004) und SCHMID (2006) vergleichbar stark mit der N-Aufnahme wie der VX 2, wobei bei diesem Index die Messpräzision länger erhalten blieb als beim VX 2. Als problematisch ist beim IRG allerdings dessen Abhängigkeit vom Sonnenstand einzuschätzen (TAKEBE et al., 2000). Bei beiden Sortentypen war, mit Ausnahme der Messungen der Indices NDVI, IRR und SAVI bei mehrzeiliger Gerste, ein Rückgang der Messgenauigkeit zu BBCH 65 zu beobachten. Die Ursache dafür dürfte die veränderte Bestandesarchitektur durch das Erscheinen der begrannten Ähren sein (MOHD NOOR, 2003, HABOUDANE et al., 2004, PIMSTEIN et al., 2009).

Um die N-Aufnahme über einen weiten Messbereich möglichst präzise abbilden zu können, müssen die Vegetationsindices frei vom Sättigungseffekt sein. Dabei erwies sich vor allem der NDVI unabhängig vom Sortentyp als sehr anfällig, da bei N-Aufnahmen über 30 kg ha^{-1} zum Zweiknotenstadium keine sichere Trennung möglich war. Dieser Effekt verstärkte sich

im Verlauf der Vegetation, was die Studien von MOHD NOOR (2003), SCHMID (2006) sowie LI et al. (2008) in Winterweizen und Wintergerste bestätigen. ERDLE et al. (2011) zufolge sollte dieser Index besser zu frühen Entwicklungsstadien der Pflanzen eingesetzt werden. Allerdings trat der Sättigungseffekt in den eigenen Versuchen bereits zu Schossbeginn auf, weshalb der NDVI für die Messung der N-Aufnahme in einem Düngesystem wenig geeignet erscheint. Der Sättigungseffekt trat bei anderen Indices zu früheren Entwicklungsstadien kaum wahrnehmbar auf, wie der Vergleich der R^2 -Werte zwischen linearer und quadratischer Regressionsgleichung zeigt. Erst zum Grannenspitzen konnte dieser Effekt besonders bei den Indices VX 1, VX 2, NDI 2, SR 1 und SR 2 beobachtet werden. Bei Messungen zur Blüte hat allerdings diese Eigenschaft keine Auswirkung für die Schätzung der N-Aufnahme im Düngesystem, da die N-Düngung zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen sein sollte. Für das Auftreten des Sättigungseffekts dürfte vor allem das dichte Blätterdach von Pflanzenbeständen verantwortlich sein, da die Reflexion der unteren Blätter vom Sensor nicht erfasst wird bzw. die oberliegenden Blätter nicht durchdringt und somit nur die obersten Blattetagen zur Reflexion beitragen (SCOTFORD & MILLER, 2004^A).

Aus den Ergebnissen geht damit hervor, dass es für eine optimierte Abschätzung der N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse von Vorteil ist, die Indices in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums einzusetzen. Dies macht eine multispektrale Reflexionsmessung nötig. Durch dieses Verfahren kann die Berechnung der N-Düngermenge in Abhängigkeit der N-Aufnahme weiter präzisiert und so effizienter gestaltet werden. Deshalb sollten vor allem Indices wie der VX 1, der VX 2, der VX 3, die Simple Ratio SR 1 und SR 2 und der NDI 2 verwendet werden, während besonders der NDVI aufgrund des ausgeprägten Sättigungseffekts während der Hauptwachstumsphase für die Verwendung bei Wintergerste eher ungeeignet ist. Allerdings ist auch bei Wintergerste darauf zu achten, dass die Messwerte der Indices möglichst geringe Variationskoeffizienten aufweisen, da bereits kleine Abweichungen in den Messwerten zu einer fehlerhaften Schätzung der N-Aufnahme führen, was die Kalkulation der N-Düngermenge verfälscht.

Wie die N-Aufnahme korrelierte auch der TM-Aufwuchs beider Sortentypen der Einzeljahre eng mit den Messwerten der Vegetationsindices. In den quadratischen Regressionsanalysen wurden je nach Sortentyp Bestimmtheitsmaße zwischen 0,14 und 0,74 erreicht. Über alle Jahre zusammengefasst gingen die R^2 -Werte deutlich zurück. Vor allem zu BBCH 30 korrelierten die Messwerte sämtlicher Vegetationsindices bei beiden Sortentypen nur gering mit dem TM-Aufwuchs. Zu den späteren Terminen verbesserte sich die Messpräzision bei allen Vege-

tationsindices, wobei der VX 3 den TM-Aufwuchs von zweizeiliger und mehrzeiliger Wintergerste am besten abbildete. Weniger präzise waren die Indices NDVI, IRR, IRG und IR 1. Damit widersprechen die eigenen Ergebnisse zur Anwendbarkeit des NDVI den Resultaten von APARICIO et al. (2002) sowie VERHULST et al. (2011) bei Weizen, die eine enge, kurvenlineare Beziehung zwischen dem TM-Aufwuchs und dem NDVI fanden. Der Verlauf der R^2 -Werte war mit den Ergebnissen von SCHÄCHTL (2004) vergleichbar, bei dem sämtliche untersuchte Indices zu Schossbeginn nur eine geringe Korrelation zum TM-Aufwuchs von Winterweizen aufwiesen. Allerdings korrelierten die Vegetationsindices zu den weiteren Messterminen besser als in der eigenen Arbeit.

Die Auswertungen bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste zeigen somit, dass die **Arbeitshypothese 2** nur für den IRG angenommen werden kann, während der NDVI und auch der IRR die N-Aufnahme weniger präzise abbildeten. Mit dem Biomasseaufwuchs korrelierten die Messwerte des NDVI, des IRR und des IRG nicht besser als die übrigen Vegetationsindices, darüber hinaus waren die Bestimmtheitsmaße für eine sichere Bestimmung des TM-Aufwuchses gering, weshalb auch dieser Teil der **Arbeitshypothese 2** verworfen werden muss. Da der zu einigen Messterminen auftretende Sorteneinfluss gering war, kann die Arbeitshypothese 2 im Hinblick darauf wohl angenommen werden.

5.2.2 Herleitung des Düngesystems für zwei- und mehrzeilige Wintergerste

Da die N-Aufnahme ein Produkt aus dem oberirdischen TM-Aufwuchs und dem N-Gehalt ist, soll die Biomassebildung zur besseren Verständlichkeit des Verlaufs der N-Aufnahme nachfolgend dargestellt werden. Aufgrund der stärkeren Bestockungsleistung von zweizeiliger Wintergerste (GARCÍA DEL MORAL et al., 2003) bildete diese zu Schossbeginn etwas mehr Biomasse als mehrzeilige Gerste. Von Beginn der Schossphase bis BBCH 49 bildete die mehrzeilige Sorte Meridian bei guter N-Versorgung täglich $1,7 \text{ dt ha}^{-1}$ TM, die zweizeilige Sorte $1,6 \text{ dt ha}^{-1}$. Zwischen dem Zweiknotenstadium und Grannenspitzen allerdings war der Biomassezuwachs von mehrzeiliger Wintergerste deutlich höher als bei der zweizeiligen Gerste. Die Biomasseproduktion ging bis zur Ernte weiter, wobei die mehrzeilige Gerste wohl auch aufgrund größerer und damit schwererer Ähren (LE GOUIS, 1992) mehr oberirdische Trockenmasse aufwies als zweizeilige. Damit entsprechen die eigenen Ergebnisse den Studien von CARRECK & CHRISTIAN (1991) und ELLEN (1993), in denen bis zur Ernte ein Biomassezuwachs verzeichnet wurde. Andererseits kann die Aussage von DELOGU et al. (1998) und MANDERSCHIED et al. (2009), wonach bis Ende der Milchreife ein TM-Zuwachs festzu-

stellen war und an den sich hieran ein wohl durch Blattverlust verursachter leichter Rückgang anschloss, nicht überprüft werden, da keine Messungen zwischen Blüte und Ernte durchgeführt wurden.

N-Mangel führt zu einer deutlich verringerten TM-Produktion, da sowohl weniger Seitentriebe gebildet als auch mehr Triebe aufgrund von Nährstoffmangel reduziert werden (ELLEN, 1993, DELOGU et al., 1998, PRYSTUPA et al., 2003, MORELL et al., 2011). Gleichzeitig sind bei N-Mangel die Körner kleiner, da sich durch die ungenügende N-Versorgung die Blattlebensdauer und damit die Assimilateinlagerung verkürzt (MARINACCIO et al., 2015). So wurden bei zwei- und mehrzeiligen Sorten in den Parzellen ohne N-Düngung zwischen 40% und 50% des TM-Aufwuchses von Pflanzen mit ausreichender N-Versorgung erreicht. In Versuchen von GRANT et al. (1991^A), MARSHALL & ELLIS (1998), MANDERSCHEID et al., 2009 und DORDAS (2012) erreichten ungedüngte Pflanzenbestände teilweise nur ein Viertel des Biomasseaufwuchses von gedüngten Varianten.

Abweichend von den Untersuchungsergebnissen bei ZHAO et al. (2014), bei denen erst ab 200 kg ha⁻¹ N-Düngung keine Unterschiede im TM-Aufwuchs auftraten, wurden in den eigenen Versuchen bereits ab 140 kg ha⁻¹ N-Düngung keine signifikanten Unterschiede mehr im TM-Aufwuchs beobachtet. Hauptursache dafür dürfte die hohe Startgabe mit Folgedüngung sein, da diese die Bestockung fördert und die Triebreduktion verhindert und somit die Biomasseproduktion angleicht. Spätere N-Düngergaben besitzen dagegen vor allem eine Wirkung auf den Kornertrag und die Korninhaltsstoffe, wie STICKSEL et al. (2000) bei Winterweizen und CARRECK & CHRISTIAN (1991) sowie PETTERSON & ECKERSTEN (2007) bei Gerste nachwiesen.

Der TM-Aufwuchs wurde vom standortspezifischen Ertragspotential (HE- und NE-Standort) stark beeinflusst. Während zu Schossbeginn geringe Unterschiede im oberirdischen Biomasseaufwuchs festgestellt wurden, vergrößerte sich die Differenz immer mehr, bis der Biomasseaufwuchs zur Ernte des HE-Standorts um 34,5 dt ha⁻¹ (mehrzeilig) bzw. um 23,5 dt ha⁻¹ (zweizeilig) höher war als auf dem NE-Standort. LE GOUIS (1992) und DORDAS (2012) zufolge machen die Ähren einen großen Teil des Gesamtgewichts der Pflanzen aus, weshalb die Ursache für den differenzierten Biomasseaufwuchs vor allem in unterschiedlich großen Ähren zu finden ist, da die Gerstenpflanzen auf dem HE-Standort wegen der besseren Nährstoffversorgung wohl größere Ähren bilden als auf dem NE-Standort. Weiterhin ist als Grund für die geringere Biomassebildung die Studie von DE SAN CELEDONIO et al. (2014) heranzuziehen. Den Autoren zufolge verursacht Wassermangel in der Zeit vom Schossen bis zur Blüte den

größten Biomasserückgang. Gleichzeitig reduzieren die Pflanzen auch die Kornzahl je Ähre, was sowohl die kleineren Ähren als auch das TKG erklären würde.

Entscheidend für die Entwicklung eines Düngesystems für Wintergerste ist die Tatsache, dass sich bei hoher N-Düngermenge trotz eines ähnlichen TM-Aufwuchses die N-Aufnahme differenziert gedüngter N-Stufen deutlich unterschied. Ursache dafür ist offenbar, dass höhere N-Düngermengen ab dem Zweiknotenstadium die N-Konzentration in der Biomasse steigern, wie die Ergebnisse von GRANT et al. (1991^B), DORDAS (2012) sowie ZHAO et al. (2014) bestätigen. Zugleich verändern spätere N-Düngergaben den TM-Aufwuchs nur noch geringfügig. Somit ist die N-Aufnahme bei gleichem TM-Aufwuchs in denjenigen Varianten höher, die höhere N-Konzentrationen aufweisen. Aus diesem Grund ist die N-Aufnahme auch der bessere Parameter zum Abschätzen des Ernährungszustandes der Pflanzen, um eine Düngeempfehlung zu kalkulieren.

Für zwei- und mehrzeilige Wintergerste wurde somit ein Düngesystem vergleichbar zum Düngesystem Winterweizen (MAIDL, 2011^A, MAIDL, 2011^B) entwickelt, das die standort- und jahresspezifischen Schwankungen der Pflanzenentwicklung anhand ertragsangepasster, teilflächenspezifischer optimaler N-Aufnahmekurven berücksichtigt.

Grundlage für eine ertragsangepasste N-Düngung in Abhängigkeit von der N-Aufnahme ist eine enge Korrelation zwischen dem Kornertrag und der N-Aufnahme. Zu jedem Messtermin konnte eine enge Beziehung zwischen der entwicklungspezifischen N-Aufnahme und dem Kornertrag nachgewiesen werden. Die Basis des N-Düngesystems Wintergerste stellen die N-Aufnahmekurven dar, die zum Abschätzen der N-Aufnahme und damit zur Berechnung der N-Düngermenge benötigt werden.

Die N-Aufnahmekurven wurden zunächst aus den eigenen dreijährigen Versuchsdaten berechnet. Diese Auswertungen zeigten bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste zu den frühen Entwicklungsstadien einen dem Winterweizen ähnlichen verhaltenen Verlauf der N-Aufnahme. Zum ersten Messtermin BBCH 30 wurde in den hoch gedüngten Varianten eine N-Aufnahme in zweizeiliger Wintergerste von bis zu 68,9 kg ha⁻¹ ermittelt, womit sich die Aussagen von CARRECK & CHRISTIAN (1991) bestätigten, die bereits zu Vegetationsbeginn sehr hohe N-Aufnahmen nach einem milden Winter in Gerste feststellten. Gleichzeitig waren die Winter 2012/2013 und vor allem 2013/2014 in der Versuchsstation Roggenstein sehr mild, was zu hohen Mineralisationsraten im Boden und damit hohen N-Aufnahmen führte.

Weiterhin zeigten die eigenen Analysen analog zu MAIDL et al. (1996) eine tendenziell höhere N-Aufnahme von zweizeiliger gegenüber mehrzeiliger Wintergerste zu den frühen Entwicklungsstadien. Allerdings holte der mehrzeilige Sortentyp diesen Rückstand schnell auf. Im Zuge des Längenwachstums ab dem Zweiknotenstadium nahm die zweizeilige Wintergerste bis zur Blüte täglich $4,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ auf, während die mehrzeilige Wintergerste deutlich höhere tägliche Zuwachsraten von bis zu $5,1 \text{ kg ha}^{-1}$ aufwies. Damit wurde die von CARRECK & CHRISTIAN (1991) publizierte tägliche N-Aufnahmerate von $1,7 \text{ kg ha}^{-1}$ deutlich übertroffen. Zur Blüte wurde somit in der mehrzeiligen Sorte Meridian mehr N in der oberirdischen Biomasse gefunden ($270,1 \text{ kg ha}^{-1}$) als bei der zweizeiligen Sorte ($255,5 \text{ kg ha}^{-1}$). Mit Eintritt in die Blüte ist die N-Aufnahme bei Wintergerste allerdings nicht beendet. DELOGU et al. (1998), MAIDL et al. (1996) und ANGÁS et al. (2006) fanden bei beiden Sortentypen einen leichten Anstieg des in der Biomasse gespeicherten N bis Ende der Milchreife. Übereinstimmend mit MAIDL et al. (1996), MARSHALL & ELLIS (1998) sowie ANGÁS et al. (2006) wurde ein Rückgang der N-Aufnahme beobachtet, der den Autoren zufolge bis zu 85 kg ha^{-1} betragen kann. In der eigenen Studie reduzierte sich die N-Aufnahme bis zur Ernte um $19,7 \text{ kg ha}^{-1}$ (mehrzeilig) bzw. $17,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (zweizeilig) gegenüber der N-Aufnahme zur Blüte. Damit lag die durchschnittliche N-Aufnahme in der gesamten oberirdischen Biomasse zur Ernte von mehrzeiliger Gerste mit $251,0 \text{ kg ha}^{-1}$ über der von zweizeiliger Gerste ($238,3 \text{ kg ha}^{-1}$), was die Studien von CARRECK & CHRISTIAN (1991), MAIDL et al. (1996), MARSHALL & ELLIS (1998) sowie ANGÁS et al. (2006) an beiden Sortentypen betätigen.

In den eigenen Auswertungen zeigte sich, analog zu den Ergebnissen von DELOGU et al. (1998), dass mit steigendem N-Angebot auch die Menge des in der oberirdischen Biomasse gespeicherten N stieg. Dabei hatte die Verteilung der gesamten N-Düngermenge nur einen geringen Einfluss auf die N-Aufnahme zur Ernte, da die Pflanzen bei frühbetonten Gaben mehr Biomasse als bei spätbetonten Gaben bilden. Spätbetonte N-Düngergaben erhöhen allerdings die N-Konzentration.

Ebenfalls zeigten die eigenen Untersuchungen einen deutlichen Einfluss der Standortgüte auf die N-Aufnahme beider Sortentypen. Sowohl bei zwei- als auch bei mehrzeiliger Wintergerste war die N-Aufnahme auf dem NE-Standort geringer. Vergleichbare Ergebnisse publizierten LIEBLER (2003) sowie SCHÄCHTL (2004) bei Winterweizen auf unterschiedlichen Standorten. Ursache dafür sind die schlechteren Wachstumsbedingungen durch eine schlechtere Nährstoffspeicherung und Nachlieferung aus dem Boden sowie eine mangelnde Wasserspeicherfä-

higkeit von Böden mit einem höheren Anteil an Grobporen (MAIDL et al., 1999, LAWES et al., 2009, MOELLER et al., 2009, KELLER et al., 2012, JOHNNEN et al., 2014).

Entscheidend für die Entwicklung eines teilflächenspezifischen Düngesystems ist ein differenzierter N-Bedarf bei unterschiedlicher Ertragsleistung der Standorte. So erwies sich neben dem Jahreseffekt besonders der Standort als einflussreicher Parameter bei der Ertragsbildung von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste. Die Kornerträge von Wintergerste reagierten mit Ertragsverlusten von 15% (zweizeilig) bzw. 31% (mehrzeilig), wenn ein Anbau auf einem ertragsschwächeren Schlag erfolgte. Damit folgen die eigenen Ergebnisse GRANT et al. (1991^A), DELOGU et al. (1998) und MARINACCIO et al. (2015). Die Ertragsunterschiede zwischen den Standorten können unter anderem mit den Resultaten von DE SAN CELEDONIO et al. (2014) begründet werden, wonach ein Wassermangel in der Zeit des Längenwachstums bis zur Blüte zu Ertragseinbußen von mehr als 40% führen kann. Ursache für den Ertragsrückgang ist dabei vor allem die reduzierte Kornzahl je Ähre, die bei Getreide vor allem zu Schossbeginn beeinflusst wird (BAETHGEN et al., 1995, Maidl et al., 1998), während das TKG durch die Konkurrenz der Pflanzen um den Nährstoff Wasser (PETTERSON & ECKERSTEN, 2007) bzw. durch eine verkürzte Lebensdauer (MARINACCIO et al., 2015) reduziert wird.

Für zwei- und mehrzeilige Sortentypen sind angepasste N-Düngesysteme erforderlich. Dies zeigen unter anderem die verschiedenen Ertragsleistungen. Wie bereits unterschiedliche Studien beschrieben (MAIDL et al., 1996, LE GOUIS et al., 1999, GARCÍA DEL MORAL et al., 2003, MARINACCIO et al., 2015), ist mehrzeilige Wintergerste dem zweizeiligen Sortentyp in der Ertragsleistung deutlich überlegen. Durchschnittlich erzielte die mehrzeilige Sorte Meridian in der eigenen Untersuchung 16% höhere Kornerträge auf dem HE-Standort, während der Mehrertrag auf dem NE-Standort nur 5% betrug. Als Grund dafür erwähnen LE GOUIS et al. (1999) die größere Anpassungsfähigkeit mehrzeiliger Sorten, da diese aufgrund der größeren Ähren die Kornzahl je Ähre sowie das TKG leichter regulieren können als zweizeilige Sorten. Außerdem erleichtern die größeren Ähren aufgrund ihrer sink-Eigenschaft die effiziente Nutzung von Nährstoffen (LE GOUIS, 1992), was auch STICKSEL et al. (2000) bei Winterweizen beschrieben.

Gleichzeitig unterschieden sich in den Versuchen die Sortentypen im N-Bedarf. Um den höchsten Kornertrag auf dem HE-Standort zu erzielen, waren bei der mehrzeiligen Sorte Meridian (Ertrag: 121,9 dt ha⁻¹) 200 kg ha⁻¹ Mineraldünger-N erforderlich, während die zweizeilige Sorte Sandra (Ertrag: 109,0 dt ha⁻¹) 30 kg ha⁻¹ mehr Mineraldünger-N benötigte. Damit decken sich die eigenen Ergebnisse mit MAIDL et al. (1996), ANGÁS et al. (2006) und HEU-

MANN et al. (2013). Der ertragssteigernde Effekt einer zusätzlichen N-Düngergabe nahm allerdings mit zunehmender Menge deutlich ab. Zu sehen ist das bei der zweizeiligen Sorte Sandra, die bei einer N-Düngermenge von 200 kg ha^{-1} 98% des Maximalertrags erzielte. Die Breite des Düngeroptimums zeigte sich darin, dass bereits mit 74% der maximalen N-Düngermenge bei der Sorte Sandra 93% und bei der Sorte Meridian knapp 98% des Maximalertrags erreicht wurden. Einen vergleichbaren Effekt beobachteten GRANT et al. (1991^A), LE GOUIS et al. (1999) sowie HEUMANN et al. (2013). Somit wird deutlich, dass ohne merklichen Ertragsverlust ein großes Reduktionspotential beim Einsatz von Mineraldünger-N besteht. Wintergerste sollte in Abhängigkeit der Ertragserwartung gedüngt werden. Dies zeigte sich auch auf dem NE-Standort, auf dem im Mittel dreier Versuchsjahre bei beiden Sortentypen 160 kg ha^{-1} N-Dünger ausreichten, um den Höchstertrag zu erzielen. Eine weitere Erhöhung der N-Düngermenge hatte auf diesem Standort wohl aufgrund eines mangelnden Wasserangebots keine Ertragssteigerung zur Folge, weshalb höhere N-Düngermengen in der landwirtschaftlichen Praxis nur monetäre Verluste verursachen würden.

Zu den besonders hohen Kornerträgen auf dem HE-Standort muss angemerkt werden, dass diese unter optimalen Versuchsbedingungen erzielt wurden. Es kann angenommen werden, dass der Randeffekt der Stirnseiten der Kerndruschparzellen die Kornerträge erhöhte, so dass für die landwirtschaftliche Praxis von geringeren Kornerträgen bei gleicher N-Düngermenge ausgegangen werden kann.

Mit der Höhe der N-Düngung stieg nicht nur der Kornertrag, sondern auch der Proteingehalt der Wintergerste an. Bei beiden Sortentypen erreichte die Proteinkonzentration Werte bis über 16,0%. Ohne N-Düngung lagen die Proteinwerte deutlich unter 10,0%. Damit bestätigen sich die Aussagen von GRANT et al. (1991^B) sowie PETERSON & ECKERSTEN (2007), dass der Proteingehalt ein Indikator für die N-Versorgung der Pflanzen ist. Sehr hohe Proteingehalte deuten demnach auf ein zu hohes bzw. falsch terminiertes N-Angebot hin, während niedrige Proteinwerte auf eine N-Unterversorgung schließen lassen. Abweichend von den Aussagen von MAIDL et al. (1996) und MARINACCIO et al. (2015), bei denen zweizeilige Wintergerste höhere Proteingehalte als mehrzeilige Wintergerste aufwies, waren die Werte beim mehrzeiligen Sortentyp absolut um durchschnittlich 0,3% bis 0,4% höher als bei zweizeiliger Wintergerste. Als möglicher Grund hierfür kann die größere Ähre genannt werden, die nach FISCHBECK et al. (1997) sowie STICKSEL et al. (2000) eine größere Nährstoffsénke darstellt und die Nährstoffe somit besser nutzt. Darüber hinaus wird die Proteinkonzentration bei Wintergerste, ähnlich wie bei Winterweizen, durch eine kräftige letzte N-Gabe erhöht, wie auch CARRECK &

CHRISTIAN (1991), FISCHBECK et al. (1997), STICKSEL et al. (2000) und PETERSON & ECKERSTEN (2007) beschrieben.

Um die N-Düngung so effizient wie möglich zu gestalten, ist nicht nur die Bemessung der N-Düngermenge, sondern auch deren Verteilung wichtig. Hierbei können vor allem für die N-Verteilung bei zweizeiliger Wintergerste die eigenen Ergebnisse die Aussagen von MAIDL et al. (1996) bestätigen. Demnach ist bei diesem Sortentyp wohl aufgrund der höheren Bestockungsleistung eine frühbetonte N-Düngung vorteilhaft. Darauf soll eine starke zweite Gabe zu BBCH 32 sowie eine Abschlussgabe zu BBCH 39 folgen, da diese nach MAIDL et al. (1998) bei Weizen sowie nach BAETHGEN et al. (1995) sowie PETERSON & ECKERSTEN (2007) bei Sommergerste, die Kornertragsbildung positiv beeinflussen. Bei mehrzeiliger Wintergerste wurde dagegen nur auf dem HE-Standort bei geringer N-Düngermenge tendenziell mehr Kornertrag produziert, wenn die Startgabe verhalten kalkuliert wurde. Sowohl bei höheren N-Mengen als auch auf dem NE-Standort war eine frühbetonte N-Düngung auch bei diesem Sortentyp von Vorteil, was den Resultaten von MAIDL et al. (1996) zumindest teilweise widerspricht.

Mit steigender N-Düngermenge sank die N-Effizienz bei zweizeiliger Gerste auf bis zu 47,4 kg Korn je kg Mineraldünger-N auf dem HE-Standort ab. Der höhere N-Entzug von mehrzeiliger Wintergerste bedingte eine bessere Verwertung des Mineraldünger-N. Hier wurden minimal 52,7 kg Korn je kg Mineraldünger-N produziert. Bedeutend niedrigere Werte beschrieben ANGÁS et al. (2006), vermutlich aufgrund der geringen Kornerträge in den ariden Gebieten Südeuropas. Vergleichbar mit den eigenen Ergebnissen waren die Aussagen von DELOGU et al. (1998), MENGEL et al. (2006) sowie MONTEMURRO et al. (2006), bei denen die agronomische N-Effizienz mit steigender N-Verfügbarkeit abnahm. Vor allem bei zweizeiliger Wintergerste wurde der N tendenziell besser verwertet, wenn die Startgabe betont wurde, da dadurch der Kornertrag und damit die N-Abfuhr erhöht wurden. Vergleichbar reagierte auch mehrzeilige Wintergerste.

Einhergehend mit dem Proteingehalt und dem Kornertrag stieg in den eigenen Auswertungen der N-Entzug über das Korn auf bis zu 209,5 kg ha⁻¹ (zweizeilig) bzw. 236,9 kg ha⁻¹ (mehrzeilig). Diese hohen N-Abfuhr über das Korn hatten negative N-Salden zur Folge. Vergleichbare Ergebnisse fanden MAIDL et al. (1996). Auf dem HE-Standort wurde bei zweizeiliger Wintergerste erst ab 200 kg ha⁻¹ Mineraldünger-N ein ausgeglichener N-Saldo erreicht. Demgegenüber wurde bei mehrzeiliger Wintergerste durchgehend keine ausgeglichene N-Bilanz erzielt. Dauerhafte negative N-Salden sind durch den langfristigen Verlust von Boden-

fruchtbarkeit allerdings nicht hinzunehmen (KÜSTERMANN et al., 2010) Die geringere Ertragsleistung des NE-Standortes führte dazu, dass hohe N-Düngermengen keine zusätzliche Ertragswirkung hatten und somit zu einem deutlich höheren N-Saldo von mehr als 40 kg ha^{-1} bei beiden Sortentypen führten. SIELING & KAGE (2006) fanden in ihrer Untersuchung bei ähnlichen N-Düngermengen auf Grund geringerer Kornerträge etwas höhere N-Salden.

Alle zuvor beschriebenen Erkenntnisse zur Reaktion der N-Aufnahme und des Kornertrags auf verschiedenen Standorten und N-Düngermengen sowie zu einer möglichst effizienten N-Düngung wurden bei der Entwicklung des N-Düngesystem für Wintergerste berücksichtigt. Um das Düngesystem auf eine breite Datenbasis zu stellen und möglichst viele ertragsangepasste N-Aufnahmekurven erstellen zu können, wurden neben eigenen Versuchsergebnissen auch Daten vorangegangener Versuche verwendet. Da nicht für jedes Ertragspotential Daten zur Verfügung standen, wurden fehlende N-Aufnahmekurven aus den bestehenden Versuchsdaten abgeleitet. Der Verlauf aller N-Aufnahmekurven für zwei- und mehrzeilige Sorten ist dem beschriebenen vergleichbar. Darüber hinaus muss erwähnt werden, dass hohe Proteingehalte bei Wintergerste kein Qualitätskriterium sind. Somit wurden die optimalen N-Aufnahmekurven auf einen Proteingehalt von 12,5% bei entsprechendem Kornertrag angepasst.

Die in den Parzellenversuchen gefundene sortenspezifisch optimale N-Verteilung wird über die N-Aufnahmekurven abgebildet sowie über die aus der N-Aufnahme und der N-Düngung abgeleiteten Korrekturfaktoren DIMA. Diese Faktoren berücksichtigen wie im Düngesystem für Winterweizen (MAIDL, 2011^A, MAIDL 2011^B) die Wirkungsdauer des N-Düngers, die N-Immobilisierung, die N-Mineralisierung aus dem Boden und die N-Ausnutzungsrate. Diese Prozesse sind allerdings einzeln kaum messbar, da sie sowohl parallel zueinander als auch abwechselnd ablaufen. Zudem unterliegen diese Abläufe im Boden einem großen Jahres- und Standorteffekt, so dass diese in Summe experimentell zum Korrekturfaktor DIMA abgeleitet wurden. Die derzeitig verfügbaren Werte sind allerdings an den Standorten Roggenstein und Dürnast abgeleitet worden. Deshalb müssen diese Faktoren auf unterschiedlichen Böden und unter anderen Klimabedingungen sowie auf Böden mit starker N-Mineralisation getestet werden. Unter Umständen ist eine weitere Anpassung an verschiedene Böden und Standortbedingungen nötig, was eine Ausarbeitung neuer DIMA Faktoren erforderlich macht.

5.2.3 Algorithmen zur Schätzung der N-Aufnahme von Wintergerste

Über die Algorithmen werden anhand der Soll-N-Aufnahme des jeweiligen Entwicklungsstadiums die Parameter der Schätzgleichung für den jeweiligen Vegetationsindex berechnet. Vergleichbar dazu erfolgt die Schätzung der N-Aufnahme bei Winterweizen (MAIDL, 2011^A, MAIDL, 2011^B), wofür SCHÄCHTL (2004) und SCHMID (2006) die wissenschaftlichen Grundlagen legten. Beide Autoren berichten von einer jahres- und standortunabhängigen, engen Beziehung zwischen der mittleren N-Aufnahme und den a- und b-Werten aus der linearen Regression zwischen der N-Aufnahme und dem Messwert des jeweiligen Vegetationsindex. Vergleichbares zeigten die eigenen Regressionsanalysen bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste, da sich die Parameter der linearen Regressionsgleichung zwischen der N-Aufnahme und dem Messwert eines Vegetationsindex im Verlauf der Vegetation veränderten. Als Ursache für die Variabilität der Gleichungsparameter kann bei allen Indices die Veränderung des Reflexionsverhaltens genannt werden (HABOUDANE et al., 2004, PIMSTEIN et al., 2009, MOHD NOOR, 2003), da sich im Verlauf der Vegetation das Erscheinungsbild der Pflanzen wandelt und so unterschiedliche Pflanzenteile an der Reflexion teilnehmen und diese beeinflussen. Zudem verändern sich in der Wachstumsphase die N-Aufnahme und der Biomasseaufwuchs. Außerdem können Entwicklungsstadien immer nur mäßig genau bestimmt werden, was letztlich in Kombination mit den vorgenannten Gründen dazu führt, dass die Parameter der linearen Regressionsgleichung abhängig vom Entwicklungsstadium sind. Um zu testen, wie hoch die Abhängigkeit der Parameter der Regressionsanalysen zwischen N-Aufnahme und den Messwerten des jeweiligen Vegetationsindex ist, wurden die a- und b-Werte dieser Regressionsgleichungen mit der durchschnittlichen N-Aufnahme korreliert.

Für die Indices VX 1 und VX 2 ergaben sich hohe Bestimmtheitsmaße. Somit kann mit diesen Regressionsgleichungen die N-Aufnahme unabhängig vom Entwicklungsstadium des Pflanzenbestandes geschätzt werden. Gleichzeitig müssen keine Schätzgleichungen für jedes einzelne Entwicklungsstadium berechnet werden. Beim Vegetationsindex IRG dagegen war die Beziehung zwischen dem Y-Achsenabschnitt und der durchschnittlichen N-Aufnahme sehr gering. Ursächlich für die unregelmäßigen Parameterwerte während der Vegetation könnten bei diesem Vegetationsindex Umwelteinflüsse sein. Darüber hinaus erwähnten TAKEBE et al. (2000) eine Abhängigkeit dieses Index vom Sonnenstand, was ebenfalls eine Ursache für die geringe Eignung dieses Index sein könnte, da die Messungen immer bei wechselnden Tageszeiten und damit Sonnenständen durchgeführt wurden.

Um die N-Aufnahme möglichst über einen weiten Zeitraum der Vegetation sicher abschätzen zu können, kann es von Vorteil sein, unterschiedliche Vegetationsindices zu nutzen. So bildete der Index VX 2 die N-Aufnahme während der Schossphase bis nach BBCH 39 bei beiden Sortentypen sicher ab. Zu späteren Entwicklungsstadien unterlag dieser Index allerdings einem Sättigungseffekt, was seine Eignung für einen Einsatz in späteren Entwicklungsstadien einschränkt. Am besten aller getesteten Indices eignete sich nach der Schossphase der VX 3 mit seiner geringen Anfälligkeit gegenüber dem Sättigungseffekt bei zwei- und mehrzeiliger Wintergerste. Allerdings wurde dieser Index, anders als der VX 2, erst ab 2009 berechnet. Somit sind zunächst weitere Reflexionsmessungen nötig, um die Messpräzision und Stabilität dieses Index nachzuweisen und daraus Schätzalgorithmen ableiten zu können. Der IRG war ebenfalls in der Lage, die N-Aufnahme über einen weiten Zeitraum ohne einen Sättigungseffekt und Sorteneinfluss abzubilden. Allerdings konnte für diesen Index bei beiden Sortentypen kein sicherer Schätzalgorithmus abgeleitet werden, da, wie bereits beschrieben, die Beziehung zwischen den Y-Achsenabschnitten und der durchschnittlichen N-Aufnahme sehr gering war.

Die **Arbeitshypothesen 1** und **3** können angenommen werden. Wie aus den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 hervorgeht, beeinflusste bei zwei- und mehrzeilige Sortentypen die zeitliche und mengenmäßige N-Verteilung den Kornertrag, die N-Aufnahme und den Biomasseaufwuchs ebenso wie die N-Effizienz. Gleichzeitig konnte ein standortangepasstes, sensorbasiertes Düngesystem mit Schätz- und Düngealgorithmen entwickelt werden.

5.2.4 Streifenversuch Wintergerste

Das für zwei- und mehrzeilige Wintergerste entwickelte sensorbasierte, teilflächenspezifische Düngesystem wurde im Versuchsjahr 2012/2013 in einem Streifenversuch am Standort Roggenstein auf einem heterogenen Betriebsschlag getestet. Da keine zweizeilige Sorte angebaut wurde, konnte nur das System für mehrzeilige Sorten getestet werden. Da sich die Systeme grundsätzlich nicht stark voneinander unterscheiden, können die Ergebnisse auf das System der zweizeiligen Sorten übertragen werden.

Als Vergleichsverfahren diente eine schlageinheitliche Variante (DSN), die nach der Empfehlung des Düngesberatungssystems Stickstoff der LfL gedüngt wurde sowie eine auf Ertragskarten basierende Variante (Mapping). Allein durch Berücksichtigung der Ertragszonen war es möglich, die N-Düngermenge um $23,0 \text{ kg ha}^{-1}$ zu reduzieren. Insgesamt war es möglich knapp 50 kg ha^{-1} Mineraldünger-N über dieses Verfahren einzusparen. Trotz der deutlichen

Reduktion von N-Dünger blieben die Kornerträge konstant bzw. erhöhten sich leicht. Damit bestätigt sich die Aussage von MAIDL et al. (1996), BAETHGEN et al. (1995) sowie PETERSON & ECKERSTEN (2007), dass sich eine angepasste Aufteilung der N-Düngermenge bei Sommer- und Wintergerste als N-effizient erweist. Darüber hinaus gründet ein gewisser Einsparungseffekt in dem breiten N-Düngeroptimum von Wintergerste. Bei dieser Kultur kann eine große Menge Mineraldünger-N eingespart werden ohne merklich Ertragsverluste hinnehmen zu müssen (HEUMANN et al., 2013). Der monetäre Vorteil des Verfahrens Online + Mapping zeigte sich besonders deutlich durch die N-Einsparung. Gegenüber der schlageinheitlichen Variante DSN stieg der Mehrerlös um $63,1 \text{ € ha}^{-1}$.

Dass mit einer an den Pflanzenbedarf angepassten N-Düngung N sehr effizient eingesetzt werden kann, zeigt die N-Effizienz von $55,3 \text{ kg kg}^{-1}$. Da das DSN, ohne auf den Sortentyp und den Bedarf einzugehen, eine hohe Startgabe mit einer geringen zweiten Gabe (BBCH 32) und einer erneut kräftigen Abschlussgabe (BBCH 39) kombiniert, produzierte die Gerste in dieser Variante nur $39,9 \text{ kg Korn je eingesetztem kg Mineraldünger-N}$. Damit wird die mehrzeilige Wintergerste im Verfahren DSN entgegen den Resultaten von MAIDL et al. (1996) gedüngt. Die Autoren empfehlen, wie auch die eigenen Parzellenversuche zeigen, für mehrzeilige Sorten eine schwache Startgabe zu Vegetationsbeginn gefolgt von einer kräftigen Abschlussdüngung.

Im Verfahren Online + Mapping wurde der angestrebte Proteingehalt von 12,5% knapp verfehlt, was auf eine zu geringe letzte N-Düngergabe schließen lässt, da neben der Höhe der N-Düngung auch die Terminierung den Proteingehalt im Korn beeinflusst, wie GRANT et al. (1991^B) sowie CARRECK & CHRISTIAN (1991) in Wintergerste und FISCHBECK et al. (1997) und STICKSEL et al. (2000) an Weizen herausfanden. So ist es auch zu erklären, dass in der Variante DSN sehr hohe Proteinwerte gemessen wurden, da die letzte N-Düngergabe mit 70 kg ha^{-1} sehr hoch war. Damit bewahrheitete sich auch die Aussage von GRANT et al. (1991^B) sowie PETERSON & ECKERSTEN (2007), dass der Proteingehalt ein Indikator für eine unausgewogene N-Düngung ist. Aufgrund der nicht angepassten N-Verteilung im Verfahren DSN konnte trotz hoher Proteingehalte nicht der vollständige Mineraldünger-N über das Korn abgefahren werden, woraus ein N-Saldo von durchschnittlich $53,5 \text{ kg ha}^{-1}$ resultierte. Demgegenüber bewies das Düngesystem Online + Mapping, dass, wie bereits erwähnt, eine standort- und pflanzenangepasste N-Düngung zu einer ausgewogenen und damit effizienten N-Düngung führt, ohne Ertrags- und Qualitätseinbußen hinnehmen zu müssen. Allerdings muss erwähnt werden, dass die Zonierung der Teilflächen von der Witterung abhängig ist. So teil-

ten JAMES & GODWIN (2003), TAYLOR et al. (2003) sowie JOHNEN et al. (2014) bei Weizen und Gerste mit, dass sich die Kornerträge zwischen HE- und NE-Standort bei feuchter Witterung einander annäherten. Für die Düngerberechnung bedeutet dies, dass bei zu erwartenden höheren Kornerträgen diese auch in die Düngekalkulation einfließen müssen.

Diese einjährigen Ergebnisse zeigen das Potential des Düngesystems für mehrzeilige Wintergerste deutlich. Über dieses Düngesystem war es möglich den N-Aufwand zu reduzieren ohne Ertrags- und Qualitätseinbußen hinnehmen zu müssen, weshalb die **Arbeitshypothese 4** für mehrzeilige Wintergerste vollständig angenommen werden kann.

Um die Aussagen bestätigen und unter Umständen das Düngesystem noch anpassen zu können, sollten solche Versuche auf mehreren Standorten für beide Sortentypen wiederholt werden. Allerdings ist dann darauf zu achten, dass auch Flächen mit intensiver organischer N-Düngung und damit einem hohen N-Nachlieferungspotential aufgenommen werden, da das Versuchsgut Roggenstein seit langer Zeit viehlos betrieben wird und somit nicht das vollständige Regelpotential der Düngesysteme überprüft werden konnte.

5.2.5 Einordnung des Düngesystems für Wintergerste

Der Vorteil des neu entwickelten Düngesystems für Wintergerste ist nicht nur die Berücksichtigung des unterschiedlichen N-Bedarfs von zwei- und mehrzeiliger Wintergerste, sondern vor allem auch die Integration der teilflächenspezifischen N-Düngung in ein Onlinemessverfahren, das die aktuelle Pflanzenernährung berücksichtigt. Somit wird die N-Düngermenge in Abhängigkeit der Ertragsfähigkeit des Standortes und der Pflanzenentwicklung kalkuliert. Bei den Onlineverfahren verschiedener Hersteller (YARA, Greenseeker, Fritzmeier) wird dagegen der N-Bedarf des Pflanzenbestandes ausschließlich anhand der Pflanzenentwicklung bemessen (AGRICON, 2014^A, BOSCH, 2011, LIMBRUNNER, 2014, YARA, 2014). Dies führt dazu, dass HE-Standorte, in denen der Pflanzenbestand aufgrund der besseren Nährstoffversorgung mehr N aufgenommen hat, weniger gedüngt werden als Teilflächen mit schlechterem Bewuchs. Dadurch kann eine Unter- oder Überversorgung der Pflanzenbestände auftreten. Um dies zu vermeiden, bietet die Firma Fritzmeier in ihrem Düngesystem das Verfahren Online + Mapping an (FRITZMEIER, 2015). Für das Düngesystem Wintergerste wurden ebenfalls ertragsabhängige optimale N-Aufnahmekurven entwickelt, um eine standortangepasste und ausgewogene N-Versorgung zu erzielen.

Für die Kalkulation der N-Düngermenge ist beim Online-Düngesystem von YARA eine Kalibration über eine Referenzfläche nötig (AGRICON, 2014^A, YARA, 2014), während bei dem Verfahren von Fritzmeier und von Greenseeker N-Düngerwerte vom Landwirt zugewiesen werden (BOSCH, 2011, LIMBRUNNER, 2014). Somit sind diese Verfahren ebenso fehlerbehaftet, da keine korrekte Aussage über den tatsächlichen Nährstoffstatus bzw. für diesen Standort nötigen Bedarf vorliegt. Hier wäre eine Ergänzung um die in Kapitel 4.2.6 vorgestellte Schnittmethode denkbar, anhand derer die benötigte N-Düngermenge kalkuliert wird. Somit würde zumindest der N-Bedarf präzisiert. Eine Kalibration ist dagegen beim Düngesystem für Wintergerste nicht nötig, da die Berechnung der N-Düngermenge auf den hinterlegten N-Aufnahmekurven basiert.

Wie die eigenen Ergebnisse zeigen, ist für die sichere Kalkulation des N-Bedarfs die Wahl des Vegetationsindex entscheidend. Deswegen wird für Wintergerste der VX 2 sowie für spätere Messungen der VX 3 und, aufgrund der Sättigung ab BBCH 49, eingeschränkt der VX 1 empfohlen, da diese Indices die N-Aufnahme gut abbilden und von Sorteneigenschaften nicht beeinflusst sind. Problematisch wird hier der im Greenseeker verwendete NDVI, da dieser Index dem Sättigungseffekt besonders stark unterliegt und somit eine angepasste N-Verteilung schwierig erscheint.

Die N-Düngeempfehlungen verschiedener Bundesländer wie Bayern, Baden-Württemberg und Sachsen (WENDLAND et al., 2012, FÖRSTER, 2013, LK SH, 2013, OBENAUF 2014) basieren auf der Ertragsleistung des Schlags. Auf Teilschläge wird dabei nicht eingegangen, so dass bei einer schlageinheitlichen N-Düngung Bereiche mit einer Über- bzw. Unterversorgung entstehen. Auch werden Faktoren wie die N-Nachlieferung aus dem Boden bei langjähriger organischer Düngung, die Wirkung von Vor- bzw. Zwischenfrüchten oder auch der Standort als feste Faktoren angerechnet. Allerdings sind die N-Nachlieferung aus dem Boden sowie die Wirkung von Vor- bzw. Zwischenfrüchten stark jahres- und witterungsabhängig. Diese Einflüsse auf das Pflanzenwachstum können bisher allerdings nur schwer präzise erfasst und bei der Düngung berücksichtigt werden. Solche Effekte werden dagegen im Düngesystem von Wintergerste über die Sensormessung der N-Aufnahme indirekt erfasst und in die aktuelle N-Düngeempfehlung einbezogen. Gleichzeitig werden über das Düngesystem die Ertragszonen innerhalb eines Schlags berücksichtigt und das Risiko einer Überdüngung oder Unterversorgung minimiert. Über das Kalkulationsverfahren wird darüber hinaus die optimale Verteilung der N-Düngermenge automatisch angepasst, so dass die Pflanzen den Stickstoff möglichst effizient nutzen können. Bei der Verteilung der N-Düngergaben widersprechen die

eigenen Ergebnisse, nach denen eine Betonung der frühen Gaben nötig ist, den Empfehlungen der Länder Bayern, Baden-Württemberg, Schleswig-Holstein, Sachsen und Nordrhein-Westfalen, die eher die zweite und dritte N-Gabe betonen, was letztlich zu einer größeren Ineffizienz der N-Düngung führen dürfte (SCHNEIDER-GÖTZ ET AL., 2010, WENDLAND ET AL., 2012, FÖRSTER, 2013, LK-SH, 2013, LTZ, 2013, LWK-NRW, 2014^A, LWK-NRW, 2014^B, OBENAUF, 2014).

Dieses neu entwickelte, sensorgestützte Düngesystem Online + Mapping bietet eine standort-spezifische N-Düngeempfehlung, die auf dem Ernährungszustand der Pflanzen basiert, was eine Steigerung der N-Effizienz sowie einen ausgeglichenen N-Saldo ohne Ertrags- und Qualitätseinbußen ermöglicht.

5.3 Ausblick

Für Winterraps sowie für zwei- und mehrzeilige Wintergerste wurden sensorgestützte N-Düngesysteme nach dem Verfahren Online + Mapping entwickelt. Um diese Systeme weiter zu verfeinern, sollten sowohl für Winterraps als auch für Wintergerste weitere Versuche an verschiedenen Standorten unterschiedlicher Ertragsfähigkeit durchgeführt werden. Dabei wäre es nötig, neben feuchten süddeutschen auch kontinentale sowie maritim geprägte Standorte unterschiedlicher Ertragsfähigkeit in die Untersuchungen aufzunehmen, damit die N-Düngesysteme auch in solchen Gegenden sichere Empfehlungen zur N-Düngermenge sowie zur N-Verteilung und Terminierung geben können. Da weder die Flächen in Roggenstein noch die Versuche in Düren eine organische N-Düngung erhielten, wäre es von Vorteil, auch Versuche in Regionen mit einem hohen Anfall organischer Dünger durchzuführen, um die DIMA Faktoren des Düngesystems Wintergerste sowie die Reaktion der Düngesysteme Winterraps und Wintergerste bei hohen N-Nachlieferungsraten aus dem Boden zu testen und somit auf solche Bedingungen besser zu kalibrieren.

Außerdem sollten weitere Reflexionsmessungen durchgeführt werden, um die Schätzgenauigkeit der Indices weiter zu verbessern oder auch um neue Indices zur Abschätzung der N-Aufnahme zu finden. Damit wäre es möglich, multispektrale Messungen durchzuführen und Indices in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums auszuwählen, um die N-Aufnahme möglichst genau schätzen zu können.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung sensorgestützter N-Düngesysteme für Winterraps (*Brassica napus* L.) und Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.), durch die eine fruchtarten-, standort- und ertragsspezifische Mineral-N-Düngung bei optimaler Ertragsbildung und Produktqualität erreicht werden soll. Diese Düngesysteme funktionieren nach dem Prinzip Online + Mapping. Dazu wird der Nährstoffzustand der Pflanzen über Reflexionsmessungen erfasst und in Kombination mit langjährigen Ertragskarten eine N-Düngeempfehlung abgegeben. Für die Erarbeitung der methodischen Grundlagen wurden 2012 bis 2014 N-Steigerungs- und Sortenversuche an mehreren Standorten durchgeführt. In den Feldexperimenten wurden Daten zur Ertragsbildung, zur N-Aufnahme sowie zum oberirdischen Biomasseaufwuchs erfasst. Ein wesentlicher Teil der Arbeit bestand in der Erfassung der Pflanzenreflexion und der Berechnung von Vegetationsindices zur Charakterisierung des N-Ernährungsstatus von Pflanzenbeständen. Um die Ergebnisse auf eine breitere experimentelle Grundlage zu stellen, wurde die Datenbasis um N-Steigerungs- und Sortenversuche aus früheren Jahren erweitert. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Winterraps

1. Die Rapspflanzen reagierten mit einer deutlichen Ertragssteigerung auf steigende N-Düngermengen. Um 85% des Maximalertrags zu erzielen, waren nur 54% der zum Maximalertrag führenden N-Düngermenge nötig. Hohe N-Düngergaben im Herbst hatten einen vernachlässigbaren Ertragseffekt, was einen höheren N-Saldo sowie eine abnehmende N-Effizienz zur Folge hatte. Eine Betonung der zweiten N-Gabe im Frühjahr förderte die Ertragsbildung und den Eiweißgehalt, während gleichzeitig der Ölgehalt abnahm. Die N-Verwertung war auf dem NE-Standort deutlich geringer als auf dem HE-Standort. Hier wurden niedrigere Kornerträge bei gleichzeitig höheren N-Salden erzielt.
2. Die Düngung im Herbst hatte Einfluss auf die Auswinterung. Die Auswinterungsverluste und damit die N-Verluste waren in den Varianten mit hoher N-Düngergabe im Herbst nach harten Wintern deutlich höher als nach milden Wintern. Steigende N-Mengen führten in den Rapsversuchen zu einer höheren Biomasseproduktion und N-Aufnahme. Erst nach BBCH 30 begannen die Rapspflanzen mit einem deutlichen Massezuwachs, indem täglich bis zu 1,1 dt ha⁻¹ Biomasse gebildet bzw. bis zu 5,4 kg ha⁻¹ N aufgenommen wurden. Eine betonte N-Applikation zu Vegetationsbeginn förderte die Biomasseproduktion.

3. Bei allen in dieser Arbeit untersuchten Indices bestand die engste Korrelation zwischen der N-Aufnahme und dem Messwert zu Vegetationsende im Herbst. Im weiteren Messverlauf verschlechterten sich die R^2 -Werte, bis zur Vollblüte des Rapses keine Beziehung mehr bestand. Als bester Vegetationsindex zur Abschätzung der N-Aufnahme erwies sich der VX 2. Dessen hohe Präzision erreichte der VX 1 nicht ganz, während der NDVI und der SAVI die N-Aufnahme nur ungenügend abbilden konnten. Darüber hinaus unterlagen diese beiden Indices einem deutlichen Sättigungseffekt, was eine präzise Erfassung des N-Ernährungszustandes von Winterraps vor allem in Beständen mit hohen N-Aufnahmewerten erschwerte. Ein Sorteneffekt war bei keinem der Indices nachzuweisen.
4. Die Analyse aller Versuchsdaten bewies, dass einzelne N-Düngergaben im Frühjahr den Kornertrag wenig beeinflussen, während die Gesamtdüngermenge im Frühjahr sehr eng mit dem Kornertrag korrelierte. Darüber hinaus wurde eine enge Beziehung zwischen der N-Aufnahme im Herbst und der erforderlichen optimalen N-Düngermenge im Frühjahr festgestellt. Dagegen konnten zu Vegetationsbeginn und BBCH 30 keine sicheren Aussagen über die benötigte N-Düngermenge getroffen werden. Deshalb basiert das N-Düngesystem für Winterraps auf der Messung der N-Aufnahme im Herbst. Die Anpassung an unterschiedliche Ertragsniveaus erfolgt durch das Verschieben der Düngekurve in Abhängigkeit der N-Verwertung und des ertragsabhängigen unterschiedlichen N-Bedarfs, der sich über den N-Entzug Korn ableitet.

Es stellte sich heraus, dass neben der N-Menge auch die Verteilung des Mineraldünger-N die Ertragsbildung und die N-Verwertung beeinflusst. Im Mittel der neun Versuchsjahre erwies sich die Aufteilung der N-Düngermenge im Frühjahr in ein Drittel zu Vegetationsbeginn und zwei Drittel zu BBCH 30 als optimal. Der Witterungsverlauf im Winter sowie die Pflanzenentwicklung sind dabei zu berücksichtigen. Sind die Pflanzenbestände nach dem Winter schlecht entwickelt, so ist es besser, die Startdüngung zu erhöhen. In kräftigen Beständen nach milden Wintern sollte die Startgabe dagegen reduziert werden.

5. Der Test des Düngesystems in Streifenversuchen auf einem heterogenen Schlag zeigte, dass eine Berücksichtigung des Ertragspotentials kombiniert mit dem Pflanzenwachstum eine deutliche Einsparung von Mineraldünger-N ($73,0 \text{ kg ha}^{-1}$) gegenüber der einheitlich gedüngten Vergleichsvariante ermöglichte. Das neue Düngesystem (Online + Mapping) reduzierte die N-Salden deutlich, ohne Qualitätseinbußen beim Winterraps zu führen. Allerdings hatte eine falsche Einschätzung der Ertragserwartung eine Reduzierung des Kornertrags zur Folge.

Wintergerste

1. Sowohl die zwei- als auch die mehrzeilige Wintergerste reagierte mit deutlichen Ertragszuwächsen und höheren Proteingehalten auf steigende N-Mengen. Um 90% des Maximalertrags zu erzielen, reichten 61% der für den Maximalertrag nötigen N-Düngermenge aus. Tendenziell wurde der Stickstoff bei beiden Sortentypen bei einer kräftigen Startgabe besser verwertet als bei einer schwachen Düngung zu Vegetationsbeginn. Der Proteingehalt sowie der N-Entzug über das Korn wurden dagegen durch eine spätbetonte N-Düngung gefördert. Die schlechteren Wuchsbedingungen auf dem NE-Standort minderten die Ertragsleistung und die N-Effizienz beider Sortentypen deutlich gegenüber dem HE-Standort. Gleichzeitig war der N-Düngerbedarf auf dem NE-Standort geringer als auf dem HE-Standort.
2. Zweizeilige Wintergerste bildete bis zum Schossbeginn mehr Biomasse als der mehrzeilige Sortentyp. Ab diesem Zeitpunkt war der tägliche Biomassezuwachs beim mehrzeiligen Sortentyp kaum höher als beim zweizeiligen. Dennoch erreichte der mehrzeilige Sortentyp einen etwas höheren Gesamtbiomasseaufwuchs. Durch eine Betonung der Startgabe zu Vegetationsbeginn wurde der Biomasseaufwuchs gefördert, während spätere N-Düngergaben den TM-Aufwuchs weniger beeinflussten. Die N-Aufnahme verlief analog zur Biomasseentwicklung. In der Hauptwachstumsphase wurden täglich bis zu $4,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (zweizeilig) bzw. $7,1 \text{ kg ha}^{-1}$ (mehrzeilig) aufgenommen.
3. Auch für zwei- und mehrzeilige Wintergerste wurden Vegetationsindices gesucht, die die N-Aufnahme gut abbilden. Dabei überzeugten vor allem der VX 2 und der IRG zu den frühen Entwicklungsstadien. Ab BBCH 32 war der VX 3 in der Lage, die N-Aufnahme präzise bis zur Hauptblüte abzubilden. Mit dem VX 1 konnte die N-Aufnahme erst ab BBCH 49 mit einer hohen Präzision geschätzt werden. Mit Eintritt in die Hauptblüte ging bei beiden Sortentypen die Messgenauigkeit zurück. Über den Sortenversuch sollte vor allem die Anfälligkeit der Vegetationsindices gegenüber einem Sortenwechsel untersucht werden. Die Auswertungen der mehrjährigen Daten konnten bei keinem der Vegetationsindices eine durch Sorteneigenschaften verursachte Veränderung der Messwerte feststellen. Besonders beim NDVI fiel ein Sättigungseffekt auf, der sich im Verlauf der Vegetation noch verstärkte. Beim VX 1 und auch VX 2 trat dieser Effekt erst später in der Vegetation ab BBCH 49 auf.
4. Das Düngesystem ist bei beiden Sortentypen identisch aufgebaut. Der N-Düngerbedarf orientiert sich an den optimalen N-Aufnahmekurven, die sich in Abhängigkeit vom stand-

ortspezifischen Ertragspotential unterschieden. Um die korrekte N-Düngermenge zu erhalten, wurde diese um die Differenz zwischen der standort- und entwicklungsspezifischen Soll-N-Aufnahme sowie der tatsächlichen N-Aufnahme der Pflanzen korrigiert. Zum Schätzen der N-Aufnahme mit Hilfe eines Vegetationsindex wurden Schätzalgorithmen erarbeitet. Diese Algorithmen ermöglichen eine vom Entwicklungsstadium unabhängige Bestimmung der N-Aufnahme des Gerstenbestandes. Für die Berechnung der N-Düngermenge wurden zusätzlich die N-Wirkungsdauer, die N-Immobilisierung im Boden, die N-Mineralisierung und die N-Ausnutzungsrate in einem Korrekturfaktor (DIMA) berücksichtigt.

5. Dieses sensorgestützte Düngesystem wurde in einem Streifenversuch auf einem heterogenen Schlag bei mehrzeiliger Wintergerste mit einer schlageinheitlichen Düngung verglichen. Dabei konnten ohne Ertrags- und Qualitätseinbußen etwa $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ durch das System Online + Mapping gegenüber der schlageinheitlichen Variante DSN eingespart werden. Die verringerten N-Düngermengen führten zu einem ausgeglichenen N-Saldo.

Die Düngesysteme für Winterraps und Wintergerste wurden auf Standorten des warmgemäßigten Klimas mit ausreichend Niederschlägen entwickelt. In weiterführenden Arbeiten muss untersucht werden, ob eine Anpassung der Düngesysteme für Winterraps und Wintergerste an andere Standorte, wie den mitteldeutschen Raum oder maritim beeinflusste Standorte, nötig ist. Vor allem der Faktor DIMA bedarf noch der Anpassung an unterschiedliche Bodenqualitäten und Klimazonen sowie an Standorte mit unterschiedlich starkem N-Nachlieferungspotential, das sich in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und Temperatur jährlich verändert. Dazu müssen weitere Versuche an solchen Standorten durchgeführt werden.

7 Summary

The aim of this study is the development of sensor-based nitrogen fertilization systems for oilseed rape (*Brassica napus* L.) and winter barley (*Hordeum vulgare* L.) that enable mineral N fertilization specific to crop type, site and yield, and optimum yield development and product quality. These fertilization systems operate according to the concept of Online + Mapping. The nutrient status of the plants is measured using reflectance and, in combination with long-term yield maps, an N fertilization recommendation is made. In order to develop an appropriate method, N fertilization and variety trials were conducted from 2012 to 2014 at several locations. Data regarding yield development, N uptake and aboveground biomass yields were collected. A major part of this study was the measurement of plant reflectance and the calculation of vegetation indices for characterization of the nitrogen nutrition status of the crops. Data from previous N fertilization and variety trials were also incorporated to give the results a broad experimental base. The results can be summarized as follows:

Oilseed rape

1. The oilseed rape crop responded to increased N fertilization rates with a considerable increase in yield. Only 54% of the N fertilizer amount which led to maximum yield was necessary to achieve a yield of 85% of the maximum yield. High N fertilizer application rates in autumn had a negligible effect on yield, which led to a higher N surplus and a reduction in N efficiency. Emphasizing the second N application in spring promoted yield development and protein content, while at the same time decreasing oil content. N utilization was considerably lower at the low-yield site than at the high-yield site, which led to lower grain yields and higher N surpluses.
2. Fertilization in autumn had an effect on freeze and frost damage. Losses due to freeze and frost damage, and therefore N losses, were considerably higher after harsh winters than after mild winters in the treatments with high N fertilizer doses in the autumn. Increasing N doses led to increased biomass production and N uptake in the rapeseed field trials. Only after BBCH 30 did the rapeseed crop start to produce considerably more biomass, with daily growth of up to 1.1 dt ha⁻¹ and daily N uptake of up to 5.4 kg ha⁻¹. An emphasis on N application at the start of the growing season promoted biomass production.
3. Of all the indices analysed in this project, the highest correlation was between N uptake and measurement at the end of the growing season in autumn. R² values then decreased as

data collection continued until there was no longer any correlation at the flowering stage. VX 2 proved to be the best vegetation index for estimating N uptake. VX 1 could not quite match the high precision of VX 2, and the estimation of N uptake by NDVI and SAVI was not satisfactory. In addition, these two indices were affected by a considerable saturation effect that hampered a precise measurement of the nitrogen nutrition status in oilseed rape, particularly in crops with a high N uptake. The rapeseed variety did not have an effect on any of the indices.

4. An analysis of all trial data showed that individual N fertilizer applications in spring did not have a big influence on grain yield, whereas the total fertilizer amount in spring was highly correlated with grain yield. In addition, N uptake in autumn and the required optimum N fertilizer amount in spring were closely linked. In contrast, at the start of the growing season and at BBCH 30 no reliable estimates of the required N fertilization amount were possible. Therefore, the N fertilization system for rapeseed is based on the measurement of the N uptake in autumn. The system can be adjusted for different yield levels by shifting the fertilization curve as a function of the N utilization and the yield-dependent N demand, which can be derived from the seed N yield.

In addition to N quantity, the distribution of mineral fertilizer N also influences yield development and N utilization. On average over the nine-year trial period, the optimum division of the N fertilization was fertilizing a third in spring and fertilizing the remainder at the BBCH 30 stage. Weather conditions in winter and plant development need to be taken into account. If the crop has not developed well over the winter then it is better to increase the first fertilizer dose. In contrast, in vigorous crops after mild winters the first dose should be reduced.

5. Testing the fertilization system in strip trials on a heterogeneous field showed that when the yield potential and crop growth are taken into account, in comparison to the uniformly fertilized treatment a considerable reduction in applied nitrogen is possible (73.0 kg ha^{-1}). This new method (Online + Mapping) considerably reduced the N surpluses in rapeseed without reducing quality. However, incorrectly estimating the expected yield can lead to a reduction in rapeseed yield.

Winter barley

1. Both two- and six-row winter barley responded to increased N quantities with considerable yield increases and higher protein contents. Only 61% of the N fertilizer dose that resulted in the maximum yield was needed to achieve a yield of 90% of the maximum yield. N utilization tended to be better in both varieties if the first fertilizer application at the start of the growing period was higher rather than lower. In contrast, later N fertilization promoted protein content and N yield in grain. In contrast to the high-yield site, inferior growing conditions at the low-yield site lowered the yield performance and N efficiency of both varieties. At the same time, the N fertilizer demand at the low-yield site was lower than at the high-yield site.
2. Two-row barley developed more biomass up until the beginning of stem elongation than the six-row variety. Thereafter daily biomass growth in the six-row variety was barely higher than in the two-row variety. Nevertheless, total biomass yield of the six-row barley was slightly higher. An emphasis on the first application at the start of the growing period promoted biomass growth, whereas later N fertilization applications had less influence on dry matter growth. N uptake progressed similarly to biomass development. Up to 4.3 kg ha^{-1} (two-row) and 7.1 kg ha^{-1} (six-row) was taken up in the main growth phase.
3. Various vegetation indices were analysed in order to determine how well they could estimate the N uptake of two- and six-row winter barley. VX 2 and IRG in particular were convincing for the early development stages. VX 3 was able to precisely estimate N uptake from BBCH 32 to full flowering. The estimation of N uptake was highly precise only from BBCH 49 onwards for the VX 1. Measurement precision was lower for both varieties at the main flowering stage. The variety trial was used to determine if the vegetation indices were affected by a change in variety. Analysis of data from several years showed that the variety characteristics did not cause any measurement changes in any of the vegetation indices. However, NDVI was affected by a saturation effect, which intensified over the growing season. This effect occurred later in the vegetation from BBCH 49 onwards for VX 1 and VX 2.
4. The fertilization systems for both varieties are identically structured. The N fertilizer demand is based on the optimum N uptake curves, which differ according to the site-specific yield potential. In order to obtain the correct N fertilization rate, the difference between the site- and development-specific theoretical N uptake is corrected for, as well as for the actual crop N uptake. Estimation algorithms were developed so that the N uptake could be

calculated using a vegetation index. These algorithms enable a determination of the N uptake of a barley crop irrespective of the development stage. In addition, the effect duration of N application, N immobilization in soil, N mineralization and N utilization were taken into account as one factor (DIMA), so that the N fertilization rate could be calculated.

5. This sensor-based fertilization system was compared with a uniform system in a field trial with six-row barley on a heterogeneous field using a demonstration strip design. The Online + Mapping system resulted in a reduction in applied N of just under 50.0 kg ha⁻¹ compared with the uniform DSN treatment, without any reduction in yield or quality. The lower N fertilization rates also meant that there was no N surplus.

The fertilisation systems for oilseed rape and winter barley were developed on sites with a temperate climate and sufficient precipitation. Further research should investigate if the fertilisation systems for oilseed rape and winter barley need to be adapted for other locations, such as central Germany or sites with a maritime climate. In particular, the DIMA factor needs to be adapted for differing soil qualities and climate zones, and for sites with differing N availability, which changes yearly dependent on soil moisture and temperature. Further trials should take place at such locations.

8 Literaturverzeichnis

- ABBASI, M. K., ADAMS, W. A. (2000): Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 32, 1251-1259.
- AGRICON (2014^A): Yara N-Sensor ALS (active light source). Variable Stickstoffdüngung - rund um die Uhr. <http://agrimon.hostingkunde.de/de/produkte-leistungen/sensoren-agronomie/duengung-im-getreide>, Download: 22.05.2014.
- AGRICON (2014^B): Absolute Rapsdüngung. Ein Anwendungsmodul für den YARA N-Sensor/ALS. <http://agrimon.hostingkunde.de/de/produkte-leistungen/sensoren-agronomie/duengung-im-raps>, Download: 22.05.2014.
- ALZUETA, I., ABELEDO, L. G., MIGNONE, C. M., MIRALLES, D. J. (2012): Differences between wheat and barley in leaf and tillering coordination under contrasting nitrogen and sulfur conditions. *European Journal of Agronomy* 41, 92–102.
- ANGÁS, P., LAMPURLANÉS, J., CANTERO-MARTÍNEZ, C. (2006): Tillage and N fertilization effects on N dynamics and barley yield under semiarid Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research* 87, 59–71.
- APARICIO, N., VILLEGAS, D., ARAUS, J. L., CASADESÚS, J., ROYO, C. (2002): Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science* 42, 1547–1555.
- ASARE, E., SCARISBRICK, D. H. (1995): Rate of nitrogen and sulphur fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research* 44, 41–46.
- ASRAR, G., KANEMASU, E. T., YOSHIDA, M. (1985): Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sensing of Environment* 17, 1–11.
- ATZBERGER, C. (2004): Object-based retrieval of biophysical canopy variables using artificial neural nets and radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment* 93, 53–67.
- AUBERTOT, J.-N., PINOCHET, X., DORÉ, T. (2004): The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. *Crop Protection* 23, 635–645.
- AUERNHAMMER, H. (2001): Precision farming - the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture* 30, 31–43.
- BAETHGEN, W. E., CHRISTIANSON, C. B., LAMOTHE, A. G. (1995): Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield, and yield components of malting barley. *Field Crops Research* 43, 87–99.

- BARET, F., GUYOT, G. (1991): Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35, 161–173.
- BARŁOG, P., GRZEBISZ, W. (2004^A): Effect of timing and nitrogen fertilizer application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). I. Growth dynamics and seed yield. *Journal of Agronomy and Crop Science* 190, 305–313.
- BARŁOG, P., GRZEBISZ, W. (2004^B): Effect of timing and nitrogen fertilizer application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). II. Nitrogen uptake dynamics and fertilizer efficiency. *Journal of Agronomy and Crop Science* 190, 314–323.
- BARRACLOUGH, P. B. (1989): Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. *Plant and Soil* 119, 59–70.
- BAUSCH, W. C. (1993): Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment* 46, 213–222.
- BEHRENS, T., HORST, W. J., WIESLER, F. (2001): Effect of rate, timing, and form of nitrogen application on yield formation and nitrogen balance in oilseed rape production. In: HORST, W. J. (Ed.). *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 800–801.
- BEHRENS, T., KRAFT, M., WIESLER, F. (2004): Influence of measuring angle, nitrogen fertilization, and variety on spectral reflectance of winter oilseed rape canopies. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167, 99–105.
- BEHRENS, T., DIEPENBROCK, W. (2006): Using digital image analysis to describe canopies of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) during vegetative developmental stages. *Journal of Agronomy and Crop Science* 192, 295–302.
- BEHRENS, T., MÜLLER, J., DIEPENBROCK, W. (2006): Utilization of canopy reflectance to predict properties of oilseed rape (*Brassica napus* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) during ontogenesis. *European Journal of Agronomy* 25, 345–355.
- BERRY, P. M., SPINK, J., FOULKES, M. J., WHITE, P. J. (2010): The physiological basis of genotypic differences in nitrogen use efficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research* 119, 365–373.
- BIS Bayern (2015^A): GeoFachdatenAtlas (Bodeninformationssystem Bayern). Versuchsstation Roggenstein. <http://www.bis.bayern.de/bis/initParams.do;jsessionid=28166F470C518490B4EC22FEB56CABD6>, Download: 09.04.2015.
- BIS Bayern(2015^B): GeoFachdatenAtlas (Bodeninformationssystem Bayern). Versuchsstation Dürnast. <http://www.bis.bayern.de/bis/initParams.do;jsessionid=ED0446D660DFD091923A8EEEF536D297>, Download: 09.04.2015.

- BLACKBURN, G. A. (1998): Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing* 19, 657–675.
- BLAG (2012): Evaluierung der Düngeverordnung – Ergebnisse und Optionen zur Weiterentwicklung. Abschlussbericht. Bund-Länder-Arbeitsgruppe (BLAG) zur Evaluierung der Düngeverordnung. Johann Heinrich Thünen-Institut, Braunschweig.
- BOSCH, J. (2011): Leitfaden Greenseeker „Düngung“.
<http://www.eurosoft.de/uploads/media/AnleitungGreenseekerDuengung.pdf>,
Download: 22.05.2014.
- BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe & Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 5. Auflage 2005, Druckhaus Thomas Müntzer, Langensalza.
- BRAVO, C., MOSHOU, D., WEST, J., MCCARTNEY, A., RAMON, H. (2003): Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance. *Biosystems Engineering* 84, 137–145.
- BSA (2013): Beschreibende Sortenliste, Getreide, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Hrsg.: Bundessortenamt, Hannover.
- BSA (2015): Beschreibende Sortenliste, Bundessortenamt.
http://www.bundessortenamt.de/isapi/drvisapi.dll?MIval=typo3_bsl_int_Smtliste&MItab=wbpages&p_kbst=GW&p_sortiment=1&p_smtbez=Wintergerste&p_jahr=2008&p_m_gr_nr_1=1&p_m_gr_nr_2=2&p_order=n58+asc+++%2c+n65%2c+datum+desc%2c+1&OK=HTML+anzeigen&p_druck=nein, Download: 02.09.2015.
- BUSCHMANN, C., LANGSDORF, G., LICHTENTHALER, H. K. (2000): Imaging of the blue, green, and red fluorescence emission of plants: An overview. *Photosynthetica* 38, 483–491.
- BUSCHMANN, C. (2007): Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves. *Photosynthesis research* 92, 261–271.
- CARLSON, T. N., RIPLEY, D. A. (1997): On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62, 241–252.
- CARRECK, N. L., CHRISTIAN, D. G. (1991): Studies on the patterns of nitrogen uptake and translocation to the grain of winter barley intended for malting. *Annals of Applied Biology* 119, 549–559.
- CARRECK, N. L., CHRISTIAN, D. G. (1993): The effect of the previous crop on the growth, nitrogen uptake and yield of winter barley intended for malting. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 62, 137–145.
- CARTER, G. A., KNAPP, A. K. (2001): Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany* 88, 677–684.

- CETIOM (2014): http://www.cetiom.fr/reglette/index.php?message=saisie®ion_id=1,
Download: 10.05.2014.
- CHATTARAJ, S., CHAKRABORTY, D., GARG, R. N., SINGH, G. P., GUPTA, V. K., SINGH, S., SINGH, R. (2013): Hyperspectral remote sensing for growth-stage-specific water use in wheat. *Field Crops Research* 144, 179–191.
- CHEEMA, M. A., SALEEM, M. F., MUHAMMAD, N., WAHID, M. A., BABER, B. H. (2010): Impact of rate and timing of nitrogen application on yield and quality of canola (*Brassica napus* L.). *Pakistan Journal of Botany* 42, 1723–1731.
- CIGANDA, V. S., GITELSON, A. A., SCHEPERS, J. (2012): How deep does a remote sensor sense? *Remote Sensing of Environment* 126, 240–247.
- CLEVERS, J. G. P. W., JONG, S. M. de, EPEMA, G. F., VAN DER MEER, F., BAKKER, W. H., SKIDMORE, A. K., ADDINK, E. A. (2001): MERIS and the red-edge position. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 3, 313–320.
- CLEVERS, J. G. P. W., GITELSON, A. A. (2013): Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23, 344–351.
- COLNENNE, C. (1998): Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of Botany* 81, 311–317.
- COLNENNE, C., MEYNARD, J.M, ROCHE, R., REAU, R. (2002): Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape. *European Journal of Agronomy* 17, 11–28.
- COLWELL, J. E. (1974): Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 3, 175–183.
- CROFT, H., ANDERSON, K., KUHN, N. J. (2012): Reflectance anisotropy for measuring soil surface roughness of multiple soil types. *CATENA* 93, 87–96.
- CROFT, H., CHEN, J. M., ZHANG, Y. (2014): The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and canopy structures. *Ecological Complexity* 17, 119–130.
- DAMPNEY, P. M. R., GOODLASS, G., FROMENT, M. A., STAFFORD, J.V. (1999): Environmental and production effects from variable rate nitrogen fertilizer to winter wheat in England. In: P.C. ROBERT, R. H. RUST (Eds.), *Precision Agriculture 1998, Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture*, St. Paul, Minnesota. 697–709.
- DARVISHZADEH, R., SKIDMORE, A., ATZBERGER, C., VAN WIEREN, S. (2008): Estimation of vegetation LAI from hyperspectral reflectance data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10, 358–373.

- DAUGHTRY, C. S. T., WALTHALL, C. L., KIM, M. S., BROWN DE COLSTOUN, E., MCMURTREY, J. E. (2000): Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74, 229–239.
- DAUGHTRY, C.S.T., DORAISWAMY, P. C., HUNT, E. R., STERN, A. J., MCMURTREY, J. E., PRUEGER, J. H. (2006): Remote sensing of crop residue cover and soil tillage intensity. *Soil and Tillage Research* 91, 101–108.
- DAWSON, T. P., CURRAN, P. J. (1998): Technical note. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing* 19, 2133–2139.
- DE SAN CELEDONIO, R. P., ABELEDO, L. G., MIRALLES, D. J. (2014): Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley. *Plant and Soil* 378, 265–277.
- DEJOUX, J.-F., MEYNARD, J.-M., REAU, R. (1999): Rapeseed new crop management with very early sowing in order to reduce N-leaching and N-fertilization. In: WRATTEN, N., SALISBURY, P. A. (Eds.), *New Horizons for an Old Crop. Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress*, GCIRC: CD-ROM, Canberra, Australia. <http://www.regional.org.au/au/gcirt/2/343.html>, Download: 12.10.2015.
- DEJOUX, J.-F., RECOUS, S., MEYNARD, J.-M., TRINSOUTROT, I., LETERME, P. (2000): The fate of nitrogen from winter-frozen rapeseed leaves: mineralization, fluxes to the environment and uptake by rapeseed crop in spring. *Plant and Soil* 218/2, 257–272.
- DELIN, S., STENBERG, M. (2014): Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. *European Journal of Agronomy* 52, 291–296.
- DELOGU, G., CATTIVELLI, L., PECCHIONI, N., FALCIS, D. de, MAGGIORE, T., STANCA, A.M (1998): Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy* 9, 11–20.
- DIEPENBROCK, W., GROSSE, F. (1995): Rapeseed (*Brassica napus* L.) Physiology. In: DIEPENBROCK, W., BECKER, H. C. (Eds.). *Physiological Potentials for Yield improvement of annual Oil and Protein Crops*. Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin, 21–53.
- DIEPENBROCK, W. (2000): Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Field Crops Research* 67, 35–49.
- DORDAS, C. (2012): Variation in dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in barley as affected by fertilization, cultivar, and source–sink relations. *European Journal of Agronomy* 37, 31–42.
- DÜNGEVERORDNUNG (2006): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV). Düngeverordnung in der

Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Berlin.

DWD (2014^A): Durchschnittstemperatur Roggenstein (1981-2010). Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes. http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/temp__8110__akt__html,templateId=raw,property=publicationFile.html/temp_8110_akt_html.html, Download: 09.10.2014.

DWD (2014^B): Mittlerer Niederschlag Roggenstein (1981-2010). Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes. http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/nieder__8110__akt__html,templateId=raw,property=publicationFile.html/nieder_8110_akt_html.html, Download: 09.10.2014.

DWD (2014^C): Durchschnittstemperatur Dürnast (1981-2010). Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes. http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/temp__8110__akt__html,templateId=raw,property=publicationFile.html/temp_8110_akt_html.html, Download: 09.10.2014.

DWD (2014^D): Durchschnittstemperatur Dürnast (1981-2010). Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes. http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/nieder__8110__fest__html,templateId=raw,property=publicationFile.html/nieder_8110_fest_html.html, Download: 09.10.2014.

EBERTSEDER, T., GUTSER, R., HEGE, U., BRANDHUBER, R., SCHMIDHALTER, U. (2003): Strategies for site-specific nitrogen fertilization with respect to long-term environmental demands. In: STAFFORD, J., WERNER, A. (Eds.): Precision agriculture. Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 193-198.

EISELE, J. (2013): Vortrag: Neue Entwicklungen im Düngerecht – Was kommt auf die Betriebe zu? Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz, Nordrhein-Westfalen.

ELEMENTAR (2004): Bedienungsanleitung vario MAX CNS, Makroelementaranalysator. Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau.

ELLEN, J. (1993): Growth, yield and composition of four winter cereals. I. Biomass, grain yield and yield formation. Netherlands Journal of Agricultural Science 41, 153–165.

ENGSTRÖM, L. (2012): Optimising the spring N fertilisation rate to winter oilseed rape. In: RICHARDS, K.G., FENTON, O., WATSON, C. J. (Eds.), Proceedings of the 17th Nitrogen Workshop – Innovations for sustainable use of nitrogen resources. Wexford, Ireland, 192–193.

- ENGSTRÖM, L., STENBERG, M., WALLENHAMMAR, A.-C., STÅHL, P., GRUVAEUS, I. (2014): Organic winter oilseed rape response to N fertilisation and preceding agroecosystem. *Field Crops Research* 167, 94–101.
- ERDLE, K., MISTELE, B., SCHMIDHALTER, U. (2011): Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research* 124, 74–84.
- ERDLE, K., MISTELE, B., SCHMIDHALTER, U. (2013): Spectral high-throughput assessments of phenotypic differences in biomass and nitrogen partitioning during grain filling of wheat under high yielding Western European conditions. *Field Crops Research* 141, 16–26.
- ERISMAN, J. W., SUTTON, M., GALLOWAY, J., KLIMONT, Z., WINIWARTER, W. (2008): How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1, 636–639.
- ERZEUGERRING SÜDBAYERN (2013): Düngeberatungssystem Stickstoff (DSN), N-Empfehlung zu Wintergerste, Bergacker in Roggenstein.
- ESCOBAR-GUTIÉRREZ, A. J., COMBE, L. (2012): Senescence in field-grown maize: From flowering to harvest. *Field Crops Research* 134, 47–58.
- FAO (2015): <http://faostat3.fao.org/download/R/RA/E>, Download: 27.08.2015.
- FILELLA, I., PEÑUELAS, J. (1994): The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing* 15, 1459–1470.
- FISCHBECK, G., DENNERT, J., MÜLLER, R. (1993): Untersuchungen zur Optimierung der N-Aufnahme von Winterweizenbeständen durch ergänzende Düngungsmaßnahmen. *Journal of Agronomy and Crop Science* 171, 82–95.
- FISCHBECK, G., DENNERT, J., MAIDL, F.-X. (1997): Auswirkungen von N-Spätdüngungsmaßnahmen zu Winterweizen auf oberirdische Biomasse, Kornertrag und Proteingehalt bei unterschiedlicher N-Grunddüngung. *Pflanzenbauwissenschaften* 1, 145–153.
- FITZGERALD, G. J., PINTER, P. J., HUNSAKER, D. J., CLARKE, T. R. (2005): Multiple shadow fractions in spectral mixture analysis of a cotton canopy. *Remote Sensing of Environment* 97, 526–539.
- FÖRSTER, F. (2013): BEFU, ab Version 2013. Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- FRITZMEIER (2015): <http://fritzmeier-umwelttechnik.com/index.php/isaria/>, Download:11.11.2015.
- FUNK, H. (2012): Was ist bei der Rapsabrechnung zu beachten? Verlag DLG AgroFood Medien, Raps 3, 48–51.

- GABRIELLE, B., DENOROY, P., GOSSE, G., JUSTES, E., ANDERSEN, M. N. (1998): A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Research* 57, 209–222.
- GALLOWAY, J. N., ABER, J. D., ERISMAN, J. W., SEITZINGER, S. P., HOWARTH, R. W., COWLING, E. B., COSBY, J. (2003): The nitrogen cascade. *BioScience* 53, 341–356.
- GALVÃO, L. S., FORMAGGIO, A. R., TISOT, D. A. (2005): Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment* 94, 523–534.
- GAMMELVIND, L. H., SCHJOERRING, J. K., MOGENSEN, V. O., JENSEN, C. R., BOCK, J. G. H. (1996): Photosynthesis in leaves and siliques of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil* 186, 227–236.
- GARCÍA DEL MORAL, M. B., GARCÍA DEL MORAL, L. F. (1995): Tiller production and survival in relation to grain yield in winter and spring barley. *Field Crops Research* 44, 85–93.
- GARCÍA DEL MORAL, L. F., GARCÍA DEL MORAL, M. B., MOLINA-CANO, J. L., SLAFER, G. A. (2003): Yield stability and development in two- and six-rowed winter barleys under Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 81, 109–119.
- GAUSMANN, H. W., ALLEN, W. A. (1973): Optical parameters of leaves of 30 plant species. *Plant Physiology* 52, 57–62.
- GAUSMAN, H. W., ALLEN, W. A., ESCOBAR, D. E. (1974): Refractive index of plant cell walls. *Applied optics* 13, 109–111.
- GAUSMAN, H. W. (1984): Evaluation of factors causing reflectance differences between sun and shade leaves. *Remote Sensing of Environment* 15, 177–181.
- GEISLER, G., STOY, A. (1987): Untersuchungen zum Einfluss der Bestandesdichte auf das Ertragspotential von Rapspflanzen (*Brassica napus* var. L.). *Jornal of Agronomy and Crop Science* 159, 323–240.
- GERSTENMODELL BAYERN (2005): Gerstenkrankheiten. Diagnose- und Entscheidungshilfen zum Gerstenmodell Bayern. Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, Freising-Weißenstephan. 4. geänderte Auflage.
- GITELSON, A. A., MERZLYAK, M. N., LICHTENTHALER, H. K. (1996): Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *Journal of Plant Physiology* 148, 501–508.
- GITELSON, A. A., GRITZ, Y., MERZLYAK, M. N. (2003): Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology* 160, 271–282.

- GNYP, M. L., MIAO, Y., YUAN, F., USTIN, S. L., YU, K., YAO, Y., HUANG, S., BARETH, G. (2014^A): Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages. *Field Crops Research* 155, 42–55.
- GNYP, M. L., BARETH, G., LI, F., LENZ-WIEDEMANN, V. I.S., KOPPE, W., MIAO, Y., HENNIG, S. D., JIA, L., LAUDIEN, R., CHEN, X., ZHANG, F. (2014^B): Development and implementation of a multiscale biomass model using hyperspectral vegetation indices for winter wheat in the North China Plain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 33, 232–242.
- GOMBERT, J., LE DILY, F., LOTHIER, J., ETIENNE, P., ROSSATO, L., ALLIRAND, J.-M., JULLIEN, A., SAVIN, A., OURRY, A. (2010): Effect of nitrogen fertilization on nitrogen dynamics in oilseed rape using ¹⁵N-labeling field experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173, 875–884.
- GRANT, L. (1987): Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Remote Sensing of Environment* 22, 309–322.
- GRANT, C. A., GAUER, L. E., GEHL, D. T., BAILEY, L. D. (1991^A): Yield response of semi-dwarf and conventional height barley cultivars to nitrogen fertilizer under varying moisture conditions. *Canadian Journal of Plant Science* 71, 361–371.
- GRANT, C. A., GAUER, L. E., GEHL, D. T., BAILEY, L. D. (1991^B): Protein production and nitrogen utilization by barley cultivars in response to nitrogen fertilizer under varying moisture conditions. *Canadian Journal of Plant Science* 71, 997–1009.
- GRANT, C. A., DERKSEN, D. A., MCLAREN, D. L., IRVINE, R. B. (2011): Nitrogen fertilizer and urease inhibitor effects on canola seed quality in a one-pass seeding and fertilizing system. *Field Crops Research* 121, 201–208.
- GRIMM, S (2010): Merkblatt N-Düngerechnung. Hrsg.: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg. <http://www.landwirtschaft-bw.de/pb/MLR.Landwirtschaft,Lde/Startseite/Ackerbau/Stickstoff>, Download: 05.05.2014.
- GUO, D.-P., GUO, Y.-P., ZHAO, J.-P., LIU, H., PENG, Y., WANG, Q.-M., CHEN, J.-S., RAO, G.-Z. (2005): Photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in leaves of stem mustard (*Brassica juncea* var. *tsatsai*) after turnip mosaic virus infection. *Plant Science* 168, 57–63.
- GUYOT, G., BARET, F. (1988): Utilisation de la haute résolution spectrale pour suivre l'état des couverts végétaux. In: GUYENNE, T. D., HUNT, J. J. (Eds.), *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures in Remote sensing*. ESA SP-287, Aussois, France, 279–286.

- GUYOT, G, BARET, F., JACQUEMOUD, S. (1992): Imaging spectroscopy for vegetation studies. In: TOSELLI, F., BODECHTEL, J. (Eds.), *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 145–165.
- HABEKOTTÉ, B. (1993): Quantitative analysis of pod formation, seed set and seed filling in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under field conditions. *Field Crops Research* 35, 21–33.
- HABEKOTTÉ, B. (1997): Options for increasing seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) : a simulation study. *Field Crops Research* 54, 109–126.
- HABOUDANE, D., MILLER, J. R., PATTEY, E., ZARCO-TEJADA, P. J., STRACHAN, I. B. (2004): Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90, 337–352.
- HACK, H., BLEIHOLDER, H., BUHR, L., MEIER, U., SCHNOCK-FRICKE, U., WEBER, E., WITZENBERGER, A. (1992): Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen – Erweiterung BBCH-Skala, Allgemein. In: MEIER, U. (Ed.), *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen, BBCH Monografie*, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 2. Auflage, 2001.
- HÄCKEL, H. (1986): Das Klima. In: *Standortkundliche Bodenkarte, Bayern-München-Augsburg und Umgebung*. Bayerisches Geologisches Landesamt, 81–100.
- HAMM, R.-L., HEIM, M., WEIß, J., DORFNER, G. (2014): *Landwirtschaftliche Erzeugerpreise in Bayern*. Datensammlung für die Landwirtschaftsberatung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökonomie, München.
- HANSEN, P. M., SCHJOERRING, J. K. (2003): Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment* 86, 542–553.
- HATFIELD, J. L. (2000): *Precision agriculture and environmental quality: Challenges for research and education*. U.S. Department of Agriculture's Natural Resources Conservation Service. www.arborday.org. Download: 28.07.2014.
- HÄUSLER, W. (2012): mündliche Mitteilung
- HEBINGER, H. (2005): Vortrag: Optimierung der Rapsertträge durch Stickstoff-Düngemodelle in Frankreich. http://www.pflanzenbau.uni-kiel.de/ufop/hebinger_vortrag_cetiom.pdf, Download: 07.05.2014.
- HEBINGER, H. (2009): Vortrag: Fertilization decision support systems for WOSR based on a predictive balance sheet method based on a predictive balance sheet method. European rapeseed and N-Workshop – Berlin, 23. – 24. März 2009. [https://www.pflanzenbau.uni-](https://www.pflanzenbau.uni-kiel.de/ufop/hebinger_vortrag_cetiom.pdf)

- kiel.de/de/veranstaltungen/workshop-n-duengung-zu-winterraps/pdf-
praesentationen/hebinger, Download: 07.05.2014.
- HENKE, J. (2009): Entwicklung und Bewertung von Strategien zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz im Winterrapsanbau. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- HERRMANN, I., PIMSTEIN, A., KARNIELI, A., COHEN, Y., ALCHANATIS, V., BONFIL, D. J. (2011): LAI assessment of wheat and potato crops by VEN μ S and Sentinel-2 bands. *Remote Sensing of Environment* 115, 2141–2151.
- HEUMANN, S., FIER, A., HABDENTEUFEL, M., HÖPER, H., SCHÄFER, W., EILER, T., BÖTTCHER, J. (2013): Minimizing nitrate leaching while maintaining crop yields: insights by simulating net N mineralization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 95, 395–408.
- HOCKING, P. J., RANDALL, P. J., DEMARCO, D. (1997): The response of dryland canola to nitrogen fertilizer: partitioning and mobilization of dry matter and nitrogen, and nitrogen effect on yield components. *Field Crops Research* 54, 201–220.
- HOUBORG, R., BOEGH, E. (2008): Mapping leaf chlorophyll and leaf area index using inverse and forward canopy reflectance modeling and SPOT reflectance data. *Remote Sensing of Environment* 112, 186–202.
- HOULÈS, V. (2004): Mise au point d'un outil de modulation intraparcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basée sur la télédétection et un modèle de culture. Saint-Mandé (France): Université de Marne la Vallée. In: BARET, F., HOULÈS, V, GUÉRIFF, M (2007): Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. *Journal of Experimental Botany* 58, 869–880.
- HUETE, A. R., JACKSON, R. D., POST, D. F. (1985): Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment* 17, 37–53.
- HUETE, A.R (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309.
- ISERMEYER, F., SCHLEEF, K.H. (1995): Policies to reduce nitrogen surplus in German agriculture. *Marine Pollution Bulletin* 29, 464–470.
- ISIP (2015): Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion.
<http://www.isip.de/isip/servlet/contentblob/36586/Dokument/11527,property=Dokument.pdf>, Download: 02.09.2015.
- ISLAM, N., EVANS, E. J. (1994): Influence of lodging and nitrogen rate on the yield and yield attributes of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Theoretical and applied genetics* 88, 530–534.
- JACKSON, R. D., PINTER, P. J. (1986): Spectral response of architecturally different wheat canopies. *Remote Sensing of Environment* 20, 43–56.

- JACKSON, G.-D. (2000): Effects of nitrogen and sulfur on canola yield and nutrient uptake. *Agronomy Journal* 92, 644–649.
- JAMES, I. T., GODWIN, R. J. (2003): Soil, water and yield relationships in developing strategies for the precision application of nitrogen fertiliser to winter barley. *Biosystems Engineering* 84, 467–480.
- JASPER, J., REUSCH, S., LINK, A. (2009): Active Sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination: impact of seed rate, variety and growth stage. In: VAN HENTEN, E. J., GOENSE, D., LOKHORST, C. (Eds.), *Precision agriculture 09, Papers presented at the 7th European Conference on Precision Agriculture*, Wageningen, Netherlands, Wageningen Academic Publishers, 23–30.
- JIA, F., LIU, G., DING, S., YANG, Y., FU, Y., WANG, Z. (2013): Using leaf spectral reflectance to monitor the effects of shading on nicotine content in tobacco leaves. *Industrial Crops and Products* 51, 444–452.
- JOHNEN, T., BOETTCHER, U., KAGE, H. (2014): An analysis of factors determining spatial variable grain yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy* 52, 297–306.
- JUSTES, E., DENOROY, P., GABRIELLE, B., GOSSE, G. (2000): Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. *European Journal of Agronomy* 13, 165–177.
- KALAJI, H. M., OUKARROUM, A., ALEXANDROV, V., KOUZMANOVA, M., BRESTIC, M., ZIVCAK, M., SAMBORSKA, I. A., CETNER, M. D., ALLAKHVERDIEV, S. I., GOLTSEV, V. (2014): Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by in vivo chlorophyll a fluorescence measurements. *Plant physiology and biochemistry : PPB / Société française de physiologie végétale* 81, 16–25.
- KARAASLAN, D. (2008): The effect of different nitrogen doses on seed yield, oil, protein and nutrient contents of spring rape. *Pakistan Journal of Botany* 40, 807–813.
- KELLER, T., SUTTER, J. A., NISSEN, K., RYDBERG, T. (2012): Using field measurement of saturated soil hydraulic conductivity to detect low-yielding zones in three Swedish fields. *Soil and Tillage Research* 124, 68–77.
- KEPPNER, L., ROHRMOSER, W., WENDANG, J., FISCHER, D. (2012): *Nitratbericht 2012*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Bonn.
- KESSEL, B., SCHIERHOLT, A., BECKER, H. C. (2012): Nitrogen use efficiency in a genetically diverse set of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Crop Science* 52, 2546–2554.
- KNIPLING, E. B. (1970): Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 155, 155–159.

- KOEFOED, N. (1993): Effect of rate and timing of nitrogen fertilizer application on the proportion of ear, the digestibility of straw constituent and the quality of whole crop barley at different stages of maturity. *Animal Feed Science and Technology* 44, 73–84.
- 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.
- LAMB, J. A., DOWDY, R. H., ANDERSON, J. L., REHM G. W. (1997): Spatial and temporal stability of corn grain yields. *Journal of Production Agriculture* 10, 410–414.
- LANCASHIRE, P.D., BLEIHOLDER, H., LANGELÜDDECKE, P., STAUSS, R., VAN DEN BOOM, T., WEBER, E., WITZENBERGER, A. (1991): An uniformdecimal code for growth stages of crops and weeds. In: MEIER, U (Hrsg.), *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen*, BBCH Monografie, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 2. Auflage, 2001.
- LAWES, R. A., OLIVER, Y. M., ROBERTSON, M. J. (2009): Integrating the effects of climate and plant available soil water holding capacity on wheat yield. *Field Crops Research* 113, 297–305.
- LEAMER, R. W., NORIEGA, J. R., WIEGAND, C., L. (1978): Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars. *Agronomy Journal* 70, 113–118.
- LE GOUIS, J. (1992): A comparison between two- and six-row winter barley genotypes for above-ground dry matter production and distribution. *Agronomie* 12, 163–171.
- LE GOUIS, J., DELEBARRE, O., BEGHIN, D., HEUMEZ, E., PLUCHARD, P. (1999): Nitrogen uptake and utilisation efficiency of two-row and six-row winter barley cultivars grown at two N levels. *European Journal of Agronomy* 10, 73–79.
- LELEU, O., VUYLSTEKER, C., TÊTU, J.-F., DEGRANDE, D., CHAMPOLIVIER, L., RAMBOUR, S. (2000): Effect of two contrasted N fertilisations on rapeseed growth and nitrate metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry* 38, 639–645.
- LENTH, R. V. (2015): Least-Squares Means: The R Package lsmeans. *Journal of Statistical Software*, 69, 1-33. doi:10.18637/jss.v069.i01.
- LfL (2014): Düngebedarfsermittlung für Schläge ohne eigene N_{\min} -Untersuchung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Freising-Weißenstephan. <http://www.lfl.bayern.de>, Download: 18.06.2014.
- LfL WETTER (2015^A): Niederschlagssumme und Durchschnittstemperatur am Standort Roggenstein (2011 bis 2014). Wetterstation der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. <http://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=GSSGT0B084&p1title%3DRoggenstein+~~~url%3D%2FInternet%2FAM%2FNotesBAM.nsf%2F>

XP_ABC_All%2FB262A93FE0D32DEBC125739200444135%3FOpenDocument&p3=186397Z4DJ, Download: 01.09.2015.

LFL WETTER (2015^B): Niederschlagssumme und Durchschnittstemperatur am Standort Dürnast (2011 bis 2014). Wetterstation der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. http://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=GSSGT0B084&p1=title%3DFreising+~url%3D%2FInternet%2FAM%2FNotesBAM.nsf%2FXP_ABC_All%2F89952241408487F9C12573920045299B%3FOpenDocument&p3=186397Z4DJ, Download: 01.09.2015.

LFULG SACHSEN (2015): Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. http://www.landwirtschaft.sachsen.de/bpsplan2007/asp/hilfswert.asp?id_hw=1818&bez_hw=N+Jahrespreis&ht=1&formal=PrNJW&inten=1&mv=2, zuletzt aufgerufen:25.06.2015.

LI, F., GNYP, M. L., JIA, L., MIAO, Y., YU, Z., KOPPE, W., BARETH, G., CHEN, X., ZHANG, F. (2008): Estimating N status of winter wheat using a handheld spectrometer in the north China plain. *Field Crops Research* 106, 77–85.

LI, F., MISTELE, B., HU, Y., CHEN, X., SCHMIDHALTER, U. (2014^A): Reflectance estimation of canopy nitrogen content in winter wheat using optimised hyperspectral spectral indices and partial least squares regression. *European Journal of Agronomy* 52, 198–209.

LI, F., MIAO, Y., FENG, G., YUAN, F., YUE, S., GAO, X., LIU, Y., LIU, B., USTIN, S. L., CHEN, X. (2014^B): Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research* 157, 111–123.

LICHTENTHALER, H. K., GITELSON, A., LANG, M. (1996): Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. *Journal of Plant Physiology* 148, 483–493.

LICHTENTHALER, H. K., RINDERLE, U. (1988): The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. *C R C Critical Reviews in Analytical Chemistry* 19, 29–85.

LICHTENTHALER, H. K., SCHWEIGER, J. (1998): Cell wall bound ferulic acid, the major substance of the blue-green fluorescence emission of plants. *Journal of Plant Physiology* 152, 272–282.

LIEBLER, J. (2003): Feldspektroskopische Messungen zur Ermittlung des Stickstoffstatus von Winterweizen und Mais auf heterogenen Schlägen. Dissertation, TU München, Freising-Weihenstephan.

LK-SH (2013): Auszug aus: Richtwerte für die Düngung 2013. Landwirtschaftskammer Schleswig Holstein. 23. Auflage. http://www.lksh.de/fileadmin/dokumente/Landwirtschaft/Pflanze/Auszug_Richtwerte_2013_fuer_LK_Seite.pdf, Download: 12.05.2014.

- LIMBRUNNER, B. (2014): mündliche Mitteilung, vom: 06.10.214.
- LIU, Z.-Y., HUANG, J.-F., WU, X.-H., DONG, Y.-P. (2007): Comparison of vegetation indices and red-edge parameters for estimating grassland cover from canopy reflectance Data. *Journal of Integrative Plant Biology* 49, 299–306.
- LORD, D., DESJARDINS, R. L., DUBÉ, P. A. (1985): Influence of wind on crop canopy reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 18, 113–123.
- LTZ (2013): Düngung von Acker- und Sonderkulturen. Hrsg.: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg.
<http://www.landwirtschaft-bw.de/pb/MLR.Landwirtschaft,Lde/Startseite/Ackerbau>,
Download: 12.05.2014.
- LU, Q., LU, C., ZHANG, J., KUANG, T. (2002): Photosynthesis and chlorophyllafluorescence during flag leaf senescence of field-grown wheat plants. *Journal of Plant Physiology* 159, 1173–1178.
- LWK-NRW (2012^A): Stickstoffdüngung im Getreide. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/getreide/getreide-n-duengung.pdf>, Download: 05.05.2014.
- LWK-NRW (2012^B): Stickstoffdüngung im Raps. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/raps/n-duengung-pdf.pdf>, Download: 05.05.2014.
- MA, B.-L., BISWAS, D. K., HERATH, A. W., WHALEN, J. K., RUAN, S. Q., CALDWELL, C., EARL, H., VANASSE, A., SCOTT, P., SMITH, D. L. (2015): Growth, yield, and yield components of canola as affected by nitrogen, sulfur, and boron application. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178, 658–670.
- MACCIONI, A., AGATI, G., MAZZINGHI, P. (2001): New vegetation indices for remote measurement of chlorophylls based on leaf directional reflectance spectra. *Journal of Photochemistry and Photobiology* 61, 52–61.
- MADEIRA, A.C, GILLESPIE, T.J, DUKE, C.L (2001): Effect of wetness on turfgrass canopy reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 117–130.
- MAHLEIN, A.-K., RUMPF, T., WELKE, P., DEHNE, H.-W., PLÜMER, L., STEINER, U., OERKE, E.-C. (2013): Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment* 128, 21–30.
- MAIDL, F.-X., PANSE, A., DENNERT, J., RUSER, R., FISCHBECK, G. (1996): Effect of varied N rates and N timings on yield, N uptake and fertilizer N use efficiency of a six-row and a two-row winter barley. *European Journal of Agronomy* 5, 247–257.

- MAIDL, F.-X., STICKSEL, E., RETZER, F., FISCHBECK, G. (1998): Effect of varied N-fertilization on yield formation of winter wheat under particular consideration of mainstems and tillers. *Journal of Agronomy and Crop Science* 180, 15–22.
- MAIDL, F.-X., BRUNNER, R., STICKSEL, E., FISCHBECK, G. (1999): Ursachen kleinräumiger Ertragsschwankungen im bayerischen Tertiärhügelland und Folgerungen für eine teil-schlagbezogene Düngung. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 162, 337–342.
- MAIDL, F.-X., SCHÄCHTL, J., HUBER, G. (2004): Strategies for site-specific nitrogen fertilization on winter wheat. In: MULLA, D. J. (Ed), *Precision Agriculture 2004, Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, Minneapolis, Minnesota. 1938–1948
- MAIDL, F.-X. (2011^A): Verfahren zur Bestimmung des Düngerbedarfs, insbesondere des Stickstoff-Düngerbedarfs und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Patentschrift TU1505.
- MAIDL, F.-X. (2011^B): Verfahren zur Bestimmung des Düngerbedarfs, insbesondere des Stickstoff-Düngerbedarfs und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Patentschrift TU1507/85.
- MALAGOLI, P., LAINE, P., ROSSATO, L., OURRY, A. (2005): Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest: I. Global N flows between vegetative and reproductive tissues in relation to leaf fall and their residual N. *Annals of Botany* 95, 853–861.
- MANDERSCHIED, R., PACHOLSKI, A., FRÜHAUF, C., WEIGEL, H.-J. (2009): Effects of free air carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth and yield of winter barley cultivated in a crop rotation. *Field Crops Research* 110, 185–196.
- MARINACCIO, F., REYNERI, A., BLANDINO, M. (2015): Enhancing grain yield and quality of winter barley through agronomic strategies to prolong canopy greenness. *Field Crops Research* 170, 109–118.
- MARSHALL, B., ELLIS, R. P. (1998): Growth, yield and grain quality of barley (*Hordeum vulgare* L.) in response to nitrogen uptake I. A low cost, controlled nutrient supply system. *Journal of Experimental Botany* 49, 1049–1057.
- MASONI, A., ERCOLI, L., MARIOTTI, M. (1996): Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium, and manganese. *Agronomy Journal* 88, 937–943.
- MENDHAM, N. J., SCOTT, R. K. (1975): The limiting effect of plant size at inflorescence initiation on subsequent growth and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *The Journal of Agricultural Science* 84, 487–502.

- MENGEL, K., HÜTSCH, B., KANE, Y. (2006): Nitrogen fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen. *European Journal of Agronomy* 24, 343–348.
- MISTELE, B., SCHMIDHALTER, U. (2008): Spectral measurements of the total aerial N and biomass dry weight in maize using a quadrilateral-view optic. *Field Crops Research* 106, 94–103.
- MOELLER, C., ASSENG, S., BERGER, J., MILROY, S. P. (2009): Plant available soil water at sowing in Mediterranean environments—Is it a useful criterion to aid nitrogen fertiliser and sowing decisions? *Field Crops Research* 114, 127–136.
- MOGENSEN, V. O., JENSEN, C. R., MORTENSEN, G., THAGE, J. H., KORIBIDIS, J., AHMED, A. (1996): Spectral reflectance index as an indicator of drought of field grown oilseed rape (*Brassica napus* L.). *European Journal of Agronomy* 5, 125–135.
- MOHD NOOR, M. F. (2003): Critical assessment of ground based sensor technique for addressing the nitrogen requirement of cereals. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Braunschweig. www.fal.de, Download: 04.07.2014
- MONTEMURRO, F., MAIORANA, M., FERRI, D., CONVERTINI, G. (2006): Nitrogen indicators, uptake and utilization efficiency in a maize and barley rotation cropped at different levels and sources of N fertilization. *Field Crops Research* 99, 114–124.
- MORAN, M. S., PINTER, P. J., CLOTHIER, B. E., ALLEN, S. G. (1989): Effect of water stress on the canopy architecture and spectral indices of irrigated alfalfa. *Remote Sensing of Environment* 29, 251–261.
- MORELL, F. J., LAMPURLANÉS, J., ÁLVARO-FUENTES, J., CANTERO-MARTÍNEZ, C. (2011): Yield and water use efficiency of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Long-term effects of tillage and N fertilization. *Soil and Tillage Research* 117, 76–84.
- MÜLLER, K., BÖTTCHER, U., KAGE, H. (2005): Teilflächenspezifisch variierende Stickstoff- und Wasserverfügbarkeit als Ursache für Differenzen im Ertragspotential. In: KÄMPF, A., CLAUPEIN, W., GRAEFF, S., DIEPENBROCK, W. (Hrsg.): *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 2005*, Band 17, Verlag Günther Heimbach, Stuttgart, 104–105.
- MÜLLER, K., BÖTTCHER, U., MEYER-SCHATZ, F., KAGE, H. (2008): Analysis of vegetation indices derived from hyperspectral reflection measurements for estimating crop canopy parameters of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Biosystems Engineering* 101, 172–182.
- MUTANGA, O., SKIDMORE, A. K. (2007): Red edge shift and biochemical content in grass canopies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62, 34–42.

- NAGLER, P. L., DAUGHTRY, C.S.T., GOWARD, S. N. (2000): Plant litter and soil reflectance. *Remote Sensing of Environment* 71, 207–215.
- NGUYEN, H. T., LEE, B.-W. (2006): Assessment of rice leaf growth and nitrogen status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. *European Journal of Agronomy* 24, 349–356.
- N_{MIN}-NRW (2014): <http://www.nmin.de/nminnrw/>, letztes Aufrufen: 30.09.2014.
- OBENAUF, U. (2014): Empfehlungen zur Stickstoffdüngung zu Wintergetreide. Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein.
http://www.lksh.de/fileadmin/dokumente/Landwirtschaft/Pflanze/NDuengung_Getreide_Raps/0814_N-Duengung_Getreide.pdf, Download: 05.05.2014.
- OLIVER, Y. M., ROBERTSON, M. J., WONG, M.T.F. (2010): Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *European Journal of Agronomy* 32, 40–50.
- OZER, H. (2003): Sowing date and nitrogen rate effects on growth, yield and yield components of two summer rapeseed cultivars. *European Journal of Agronomy* 19, 453–463.
- PAHLMANN, I. (2013): Teilflächenspezifische N-Düngung von Winterraps. In: PEKRUN, C., WACHENDORF, M., FRANCKE-WELTMANN, L. (Hrsg.), *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 2013, Band 25*. Verlag Liddy Halm, Göttingen, 40–43.
- PAPANTONIOU, A. N., TSIALTAS, J. T., PAPAKOSTA, D. K. (2013): Dry matter and nitrogen partitioning and translocation in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown under rainfed Mediterranean conditions. *Crop and Pasture Science* 64, 115–122.
- PEARSON, R. L., MILLER, L. D. (1972): Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. ERIM, Ann Arbor, Michigan, 1357–1381.
- PETERSSON, C. G., ECKERSTEN, H. (2007): Prediction of grain protein in spring malting barley grown in northern Europe. *European Journal of Agronomy* 27, 205–214.
- PIMSTEIN, A., EITEL, J. U. H., LONG, D. S., MUFRADI, I., KARNIELI, A., BONFIL, D. J. (2009): A spectral index to monitor the head-emergence of wheat in semi-arid conditions. *Field Crops Research* 111, 218–225.
- PINTER, P. J., JACKSON, R. D. A. Y., EZRA, E. C., GAUSMAN, H. W. (1985): Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. *International Journal of Remote Sensing* 6, 1813–1825.
- PINTER, P. J. (1986): Effect of dew on canopy reflectance and temperature. *Remote Sensing of Environment* 19, 187–205.

- PINTER, P. J., ZIPOLI, G., MARACCHI, G., REGINATO, R. J. (1987): Influence of topography and sensor view angles on NIR/red ratio and greenness vegetation indices of wheat. *International Journal of Remote Sensing* 8, 953–957.
- PINTER, P. J., JACKSON, RAY. D., MORAN, M. S. (1990): Bidirectional reflectance factors of agricultural targets: A comparison of ground-, aircraft-, and satellite-based observations. *Remote Sensing of Environment* 32, 215–228.
- PROPLANT (2015): <http://www.proplantexpert.com>, letztes Aufrufen: 02.09.2015
- PRYSTUPA, P., SLAFER, G. A., SAVIN, R. (2003): Leaf appearance, tillering and their coordination in response to N×P fertilization in barley. *Plant and Soil* 255, 587–594.
- PRYSTUPA, P., SAVIN, R., SLAFER, G. A. (2004): Grain number and its relationship with dry matter, N and P in the spikes at heading in response to N×P fertilization in barley. *Field Crops Research* 90, 245–254.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2013): QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- RANSON, K. J., DAUGHTRY, C. S. T., BIEHL, L. L., BAUER, M. E. (1985): Sun-view angle effects on reflectance factors of corn canopies. *Remote Sensing of Environment* 18, 147–161.
- RATHKE, G.-W., SCHUSTER, C. (2001): Yield and quality of winter oilseed rape related to nitrogen supply. In: HORST, W. J. (Ed.). *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 798–799.
- RATHKE, G.-W., CHRISTEN, O., DIEPENBROCK, W. (2005): Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations. *Field Crops Research* 94, 103–113.
- RATHKE, G.-W., BEHRENS, T., DIEPENBROCK, W. (2006): Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 117, 80–108.
- R CORE TEAM (2015): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- REUSCH, S. (1997): Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- RIEDEL, W. E., BLACKMER, T. M. (1999): Leaf reflectance spectra of cereal aphid-damaged wheat. *Crop Science* 39, 1835–1840.
- RONDEAUX, G., STEVEN, M., BARET, F. (1996): Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 55, 95–107.

- ROßBERG, D., MICHEL, V., GRAF, R., NEUKAMPF, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst 59, 155–161.
- ROUSE, J. W, HAAS, R. H., SCHEEL, J. A., AND DEERING, D. W. (1974): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: FREDEN, S. C., MERCANTI, E. P., BECKER, M. A. (Eds.), Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 Symposium, Vol. 1: Technical Presentations, 309–318.
- SAUERMAN, W., KAGE, H. UND SIELING, K. (2009): Optimierung der N-Düngung zu Winter-raps – Bestimmung der Stickstoffmenge im Herbst. Bauernblatt Schleswig-Holstein Heft 46, 30–33.
- SCHÄCHTL, J. (2004): Sensorgestützte Bonitur von Aufwuchs und Stickstoffversorgung bei Weizen- und Kartoffelbeständen. Dissertation, TU München, Freising-Weihenstephan.
- SCHJOERRING, J. K., BOCK, J. G. H., GAMMELVIND, L., JENSEN, C. R., MOGENSEN, V. O. (1995): Nitrogen incorporation and remobilization in different shoot components offield-grown winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) as affected by rate of nitrogen application and irrigation. Plant and Soil 177, 255–264.
- SCHLEMMER, M., GITELSON, A., SCHEPERS, J., FERGUSON, R., PENG, Y., SHANAHAN, J., RUNDQUIST, D. (2013): Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 25, 47–54.
- SCHLIEPHAKE, W. (2011): Teilflächendüngung auf trockenen Standorten. Schriftenreihe des LfULG, Heft 17/2011. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- SCHLIEPHAKE, W., FÖRSTER, F., ALBERT, E. (2014): Neues Berechnungsverfahren für die Ermittlung des N-Düngebedarf zu Winterraps mit dem Beratungsprogramm BEFU. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
<https://www.landwirtschaft.sachsen.de>, Download: 19.05.2014.
- SCHMID, A. (2006): Erfassung des aktuellen Stickstoffstatus von Kulturpflanzen mit berührungsloser Sensorik zur Optimierung der teilflächenspezifischen Bestandesführung. Dissertation, TU München, Freising-Weihenstephan.
- SCHNEIDER-GÖTZ, N., PFLEIDERER, H., ELSÄSSER, M., BREUER, J. (2010): Beratungsgrundlagen für die Düngung im Ackerbau und auf Grünland in Baden-Württemberg. Hrsg.: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg.
http://www.ltz-bw.de/pb/Lde/Startseite/Pflanzenbau+_+Umweltschutz/Duengung,
Download: 12.05.2014.

- SCHRÖDER, G., MAKOWSKI, N. (1996): Betrachtungen zur Ertragsbildung bei Winterraps. *Archives of Agronomy and Soil Science* 40, 175–181.
- SCHULTE AUF‘M ERLEY, G., BEHRENS, T., ULAS, A., WIESLER, F., HORST, W. J. (2011): Agronomic traits contributing to nitrogen efficiency of winter oilseed rape cultivars. *Field Crops Research* 124, 114–123.
- SCHULZ, R.-R. (2011): Was bringt eine Stickstoffdüngung zu Raps im Herbst? Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz, Mecklenburg-Vorpommern.
- SCOTT, R. K., OGUNREMI, E. A., IVINS, J. D., MENDHAM, N. J. (1973): The effect of sowing date and season on growth and yield of oilseed rape (*Brassica napus*). *The Journal of Agricultural Science* 81, 277–285.
- SCOTFORD, I. M., MILLER, P.C.H. (2004^A): Estimating Tiller Density and Leaf Area Index of Winter Wheat using Spectral Reflectance and Ultrasonic Sensing Techniques. *Biosystems Engineering* 89, 395–408.
- SCOTFORD, I. M., MILLER, P.C.H. (2004^B): Combination of Spectral Reflectance and Ultrasonic Sensing to monitor the Growth of Winter Wheat. *Biosystems Engineering* 87, 27–38.
- SCOTFORD, I. M., MILLER, P. C. H. (2005): Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: A review. *Biosystems Engineering* 90, 235–250.
- SELEIMAN, M. F., SANTANEN, A., JAAKKOLA, S., EKHOLM, P., HARTIKAINEN, H., STODDARD, F. L., MÄKELÄ, P. S. A. (2013): Biomass yield and quality of bioenergy crops grown with synthetic and organic fertilizers. *Biomass and Bioenergy* 59, 477–485.
- SERRAGO, R. A., ALZUETA, I., SAVIN, R., SLAFER, G. A. (2013): Understanding grain yield responses to source–sink ratios during grain filling in wheat and barley under contrasting environments. *Field Crops Research* 150, 42–51.
- SERRANO, L., FILELLA, I., PEÑUELAS, J. (2000): Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science* 40, 723–731.
- SHIBAYAMA, M., WIEGAND, C. L. (1985): View azimuth and zenith, and solar angle effects on wheat canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 18, 91–103.
- SELING, K., KAGE, H. (2006): N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape – winter wheat – winter barley rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 115, 261–269
- SELING, 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. *European Journal of Agronomy* 25, 40–48.

- SIELING, K., HENKE, J., SAUERMAN, W. UND KAGE, H. (2009): N-Düngung Winterraps: Optimierung durch Berücksichtigung der N-Menge. Bauernblatt Schleswig-Holstein Heft 42, 30–32.
- SIMS, D. A., GAMON, J. A. (2002): Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81, 337–354.
- SLATON, M. R., HUNT, E. R., SMITH, W. K. (2001): Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *American Journal of Botany* 88, 278–284.
- SMITH, C. J., WRIGHT, G. C., WOODROOFE, M. R. (1988): The effect of irrigation and nitrogen fertilizer on rapeseed (*Brassica napus*) production in South-Eastern Australia. *Irrigation Science* 9, 15–25.
- SPSS INC. RELEASED (2009): PASW Statistics for Windows, Version 18.0. Chicago: SPSS Inc.
- STAT. BUNDESAMT (2015): Statistisches Jahrbuch 2015, Land- und Forstwirtschaft. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 484–485.
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/LandForstwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile, Download: 31.21.2015.
- STEFANOWSKA, M., KURAŚ, M., KUBACKA-ZĘBALSKA, M., KACPERSKA, A. (1999): Low temperature affects pattern of leaf growth and structure of cell walls in winter oilseed rape (*Brassica napus* L., var. *oleifera* L.). *Annals of Botany* 84, 313–319.
- STEINHAUSER, H., LANGBEHN, C., PETERS, U. (1992): Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre. Allgemeiner Teil. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 5. Auflage.
- STICKSEL, E., MAIDL, F.-X., RETZER, F., DENNERT, J., FISCHBECK, G. (2000): Efficiency of grain production of winter wheat as affected by N fertilisation under particular consideration of single culm sink size. *European Journal of Agronomy* 13, 287–294.
- STOY, A. (1983): Untersuchungen zur Konkurrenz bei Winterraps (*Brassica napus* var. L.) vor und nach dem Überwintern und deren Bedeutung für das Ertragspotential des Bestandes. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- STRENNER, M. (2011): Spektrometer Bedienungsanleitung. Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, 2011.
- TAKEBE, M., YONEYAMA, T., INADA, K., MURAKAMI, T. (1990): Spectral reflectance ratio of rice canopy for estimating crop nitrogen status. *Plant and Soil* 122, 295–297.
- TARPLEY, L., REDDY, K. R., SASSENATH-COLE, G. F. (2000): Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. *Crop Science* 40, 1814–1819.

- TAYLOR, A. J., SMITH, C. J., WILSON, I. B. (1991): Effect of irrigation and nitrogen fertilizer on yield, oil content, nitrogen accumulation and water use of canola (*Brassica napus* L.). Fertilizer Research 29, 249–260.
- TAYLOR, J. C., WOOD, G. A., EARL, R., GODWIN, R. J. (2003): Soil factors and their influence on within-field crop variability, Part II: Spatial analysis and determination of management zones. Biosystems Engineering 84, 441–453.
- TEC5 (2010): HySpec Bedienungsanleitung, Version 2.13. tec5 AG Oberursel
- TERASHIMA, I., SAEKI, T. (1983): Light Environment within a Leaf I. Optical properties of paradermal sections of camellia leaves with special reference to differences in the optical properties of palisade and spongy tissues. Plant and Cell Physiology 24, 1493–1501.
- TIAN, Y. C., YAO, X., YANG, J., CAO, W. X., HANNAWAY, D. B., ZHU, Y. (2011): Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. Field Crops Research 120, 299–310.
- TIAN, Y. C., GU, K. J., CHU, X., YAO, X., CAO, W. X., ZHU, Y. (2014): Comparison of different hyperspectral vegetation indices for canopy leaf nitrogen concentration estimation in rice. Plant and Soil 376, 193–209.
- TILMAN, D., CASSMAN, K. G., MATSON, P. A., NAYLOR, R., POLASKY, S. (2002): Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature 418, 671–677.
- TRINKWASSERVERORDNUNG (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), die durch Artikel 4 Absatz 22 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Berlin.
- ULAS, A., BEHRENS, T., WIESLER, F., HORST, W. J., SCHULTE AUF’M ERLEY, G. (2013): Does genotypic variation in nitrogen remobilisation efficiency contribute to nitrogen efficiency of winter oilseed-rape cultivars (*Brassica napus* L.)? Plant and Soil 371, 463–471.
- ULAS, A., BEHRENS, T., WIESLER, F., HORST, W. J., SCHULTE AUF’M ERLEY, G. (2015): Defoliation affects seed yield but not N uptake and growth rate in two oilseed rape cultivars differing in post-flowering N uptake. Field Crops Research 179, 1–5.
- VERHULST, N., GOVAERTS, B., NELISSEN, V., SAYRE, K. D., CROSSA, J., RAES, D., DECKERS, J. (2011): The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat growth and development evaluated with an optical sensor. Field Crops Research 120, 58–67.

- VIÑA, A., GITELSON, A. A., NGUY-ROBERTSON, A. L., PENG, Y. (2011): Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment* 115, 3468–3478.
- VOGELMANN, T. (1993): Plant tissue optics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 44, 231–251.
- WANG, X., MATHIEU, A., COURNÈDE, P.-H., ALLIRAND, J.-M., JULLIEN, A., DE REFFYE, P., ZHANG, B. G. (2011): Variability and regulation of the number of ovules, seeds and pods according to assimilate availability in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research* 122, 60–69.
- WEBER, E., BLEIHOLDER, H. (1990): Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse – mit Abbildungen. In: MEIER, U. (Ed.), *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen, BBCH Monografie*, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 2. Auflage, 2001.
- WEIDONG, L., BARET, F., XINGFA, G., QINGXI, T., LANFEN, Z., BING, Z. (2002): Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment* 81, 238–246.
- WELSH, J.P, WOOD, G.A, GODWIN, R.J, TAYLOR, J.C, EARL, R., BLACKMORE, S., KNIGHT, S.M (2003^A): Developing strategies for spatially variable nitrogen application in Cereals, Part I: Winter barley. *Biosystems Engineering* 84, 481–494.
- WELSH, J.P, WOOD, G.A, GODWIN, R.J, TAYLOR, J.C, EARL, R., BLACKMORE, S., KNIGHT, S.M (2003^B): Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals, Part II: Wheat. *Biosystems Engineering* 84, 495–511.
- WENDLAND, M., DIEPOLDER, M, CAPRIEL, P. (2012): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. Gelbes Heft. Hrsg.: Bayerische Landwirtschaft für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Freising- Weihenstephan, 10. unveränderte Auflage.
- WENDLAND, M., OFFENBERGER, K. (2012): N-Düngung zu Wintergetreide und Winterraps. Beitrag im Bayerischen Landwirtschaftlichen Wochenblatt, Ausgabe 08/2012
- WIESLER, F., BEHRENS, T., HORST, W. J. (2001): The role of nitrogen-efficient cultivars in sustainable agriculture. *The Scientific World Journal* 1, 61–69.
- WITZENBERGER, A., HACK, A., VAN DEN BOOM, T. (1989): Erläuterungen zum BBCH-Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides – mit Abbildungen. In: MEIER, U. (Ed.), *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen, BBCH Monografie*, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 2. Auflage, 2001.
- WOOD, G. A., TAYLOR, J. C., GODWIN, R. J. (2003): Calibration Methodology for Mapping Within-field Crop Variability using Remote Sensing. *Biosystems Engineering* 84, 409–423.
- WRÓBEL, M. (2014): mündliche Mitteilung, vom: 08.10.2014

- WU, J., WANG, D., BAUER, M. E. (2007): Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. *Field Crops Research* 102, 33–42.
- YAO, X., REN, H., CAO, Z., TIAN, Y., CAO, W., ZHU, Y., CHENG, T. (2014): Detecting leaf nitrogen content in wheat with canopy hyperspectrum under different soil backgrounds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 32, 114–124.
- YARA (2014): Yara N-Sensor. Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung. http://www.yara.de/doc/39944_Broschuere_N-Sensor_201206.pdf, Download: 22.05.2014.
- YODER, B. J., PETTIGREW-CROSBY, R. E. (1995): Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment* 53, 199–211.
- ZAJĄC, T., OLEKSY, A., STOKŁOSA, A., KLIMEK-KOPYRA, A. (2011): Comparison of morphological traits, productivity, and canopy architecture of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) and white mustard (*Sinapis alba* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality* 84, 183–191.
- ZHANG, X., HE, Y. (2013): Rapid estimation of seed yield using hyperspectral images of oilseed rape leaves. *Industrial Crops and Products* 42, 416–420.
- ZHAO, B. (2014): Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley. *Field Crops Research* 160, 64–72.
- ZHAO, D., YANG, T., AN, S. (2012): Effects of crop residue cover resulting from tillage practices on LAI estimation of wheat canopies using remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14, 169–177.
- ZHAO, F., EVANS, E. J., BILSBORROW, P. E., SYERS, J. K. (1993): Influence of sulphur and nitrogen on seed yield and quality of low glucosinolate oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 63, 29–37.

9 Anhang

Tab. A 1: Schema zur Berechnung der N-Düngermengen für Winterraps nach dem Düngerberatungssystem Stickstoff (DSN) der LfL (ERZEUGERRING SÜDBAYERN, 2012).

		1. Gabe (VB) [kg ha ⁻¹]	2. Gabe (BBCH 30) [kg ha ⁻¹]
Sollwert bei 40 dt ha ⁻¹ Ertragsniveau		140	70
N _{min} im Boden	0 cm bis 90cm	-34	
Bestandesentwicklung	normal		10
Bodenart	sL		
Tierhaltung	keine		
Vorfrucht	Winterweizen		
Stroh-/Blattbergung	nein		
Zwischenfrucht	keine		
Sonstige Zu-/Abschläge	keine		
Anrechnung Herstdüngung		-20	
organische Düngung	keine		
rechnerisch notwendige mineralische Düngung		86	80
Düngeempfehlung DSN (auf pflanzenbaulich sinnvolle Mengen korrigiert)		86	80

Tab. A 2: Schema zur Berechnung der N-Düngermengen für mehrzeilige Wintergerste nach dem Düngerberatungssystem Stickstoff (DSN) der LfL (WENDLAND et al., 2012, WENDLAND & OFFENBERGER, 2012).

		1. Gabe (VB) [kg ha ⁻¹]	2. Gabe (BBCH 32) [kg ha ⁻¹]	3. Gabe (BBCH 39) [kg ha ⁻¹]
Sollwert bei 80 dt ha ⁻¹ Ertragsniveau		110	50	70
N _{min} im Boden	0 cm bis 90cm	-25		
Bestandesentwicklung	normal			
Bodenart	sL			
Tierhaltung	keine			
Vorfrucht	Winterweizen			
Stroh-/Blattbergung	nein	10		
Zwischenfrucht	keine			
Sonstige Zu-/Abschläge	keine			
Anrechnung Herbsdüngung				
organische Düngung	keine			
rechnerisch notwendige mineralische Düngung		95	50	70
Düngeempfehlung DSN (auf pflanzenbaulich sinnvolle Mengen korrigiert)		60	50	70

Tab. A 3: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den Faktoren N-Stufe, Jahr und Standort für die Variablen Kornertrag, N-Entzug Korn, Öl- und Proteingehalt, N-Saldo und die N-Effizienz (N-Steigerungsversuch HE und NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Faktor	Kornertrag	N-Entzug	Protein- gehalt	Ölgehalt	N-Saldo	N-Effizienz
N-Stufe	90,8***	16,25***	79,3***	38,2***	228,4***	75,5***
Jahr	1,4	62,8***	237,8***	233,6***	60,6***	0,2
Standort	434,1***	404,3***	62,1***	23,4***	383,2***	417,9***
N-Stufe*Jahr	1,0	2,6**	5,3***	4,6***	3,6***	0,6
N-Stufe*Standort	1,8	5,3***	2,2*	4,1***	3,3**	4,5***
Jahr*Standort	20,2***	10,0***	32,7***	27,9***	9,9***	17,6***

Tab. A 4: Minimale (min.) und maximale (max.) Bestimmtheitsmaße der für die Einzeljahre und Termine gerechneten quadratischen Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme von Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Termin		VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
Herbst	max.	0,93	0,92	0,93	0,89	0,87	0,94	0,93	0,91	0,94	0,88	0,94
	min.	0,58	0,63	0,66	0,43	0,57	0,59	0,65	0,44	0,64	0,35	0,63
VB	max.	0,50	0,68	0,49	0,69	0,70	0,72	0,68	0,73	0,53	0,53	0,53
	min.	0,20	0,52	0,07	0,55	0,54	0,59	0,46	0,50	0,34	0,34	0,34
BBCH 30	max.	0,88	0,87	0,80	0,89	0,85	0,85	0,87	0,89	0,84	0,84	0,84
	min.	0,08	0,31	0,22	0,38	0,35	0,30	0,32	0,39	0,30	0,30	0,30
BBCH 50	max.	0,91	0,89	0,89	0,88	0,85	0,87	0,90	0,87	0,90	0,90	0,90
	min.	0,49	0,36	0,55	0,29	0,27	0,34	0,44	0,33	0,53	0,53	0,53
BBCH 65	max.	0,89	0,84	0,76	0,89	0,80	0,82	0,84	0,89	0,79	0,79	0,79
	min.	0,30	0,11	0,38	0,03	0,04	0,03	0,22	0,16	0,35	0,35	0,34

Tab. A 5: Minimale (min.) und maximale (max.) Bestimmtheitsmaße der für die Einzeljahre und Termine gerechneten quadratischen Regressionsgleichungen zwischen dem TM-Aufwuchs von Raps und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices (N-Steigerungsversuch HE Winterraps, Roggenstein, 2005 bis 2014, N-Steigerungsversuch NE Winterraps, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Termin		VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
Herbst	max.	0,87	0,88	0,89	0,88	0,88	0,91	0,88	0,88	0,89	0,89	0,61
	min.	0,38	0,52	0,50	0,39	0,52	0,50	0,47	0,40	0,44	0,44	0,12
VB	max.	0,69	0,78	0,64	0,83	0,79	0,83	0,78	0,77	0,74	0,74	0,87
	min.	0,25	0,51	0,10	0,56	0,55	0,60	0,45	0,60	0,38	0,38	0,40
BBCH 30	max.	0,75	0,76	0,74	0,80	0,77	0,75	0,77	0,82	0,75	0,82	0,89
	min.	0,14	0,15	0,25	0,22	0,29	0,37	0,30	0,15	0,38	0,40	0,38
BBCH 50	max.	0,76	0,76	0,75	0,70	0,75	0,79	0,76	0,77	0,76	0,76	0,75
	min.	0,32	0,27	0,39	0,18	0,22	0,27	0,34	0,24	0,42	0,38	0,42
BBCH 65	max.	0,77	0,67	0,58	0,76	0,70	0,66	0,73	0,76	0,61	0,62	0,75
	min.	0,21	0,04	0,15	0,04	0,05	0,03	0,07	0,06	0,13	0,13	0,12

Tab. A 6: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme mit den unabhängigen Faktoren für die Entwicklungsstadien Herbst und BBCH 50 (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2012).

Faktor	TM-Aufwuchs		N-Aufnahme	
	Herbst	BBCH 50	Herbst	BBCH 50
Sorte	5,1***	2,1	2,0	3,7**
N-Stufe	14,1***	36,3***	34,5***	92,1***
Sorte*N-Stufe	2,0	1,7	2,1	3,2**

Tab. A 7: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für den TM-Aufwuchs und die N-Aufnahme mit den unabhängigen Faktoren für die Entwicklungsstadien Herbst und BBCH 30 (Sortenversuch Winterraps, Roggenstein, 2013).

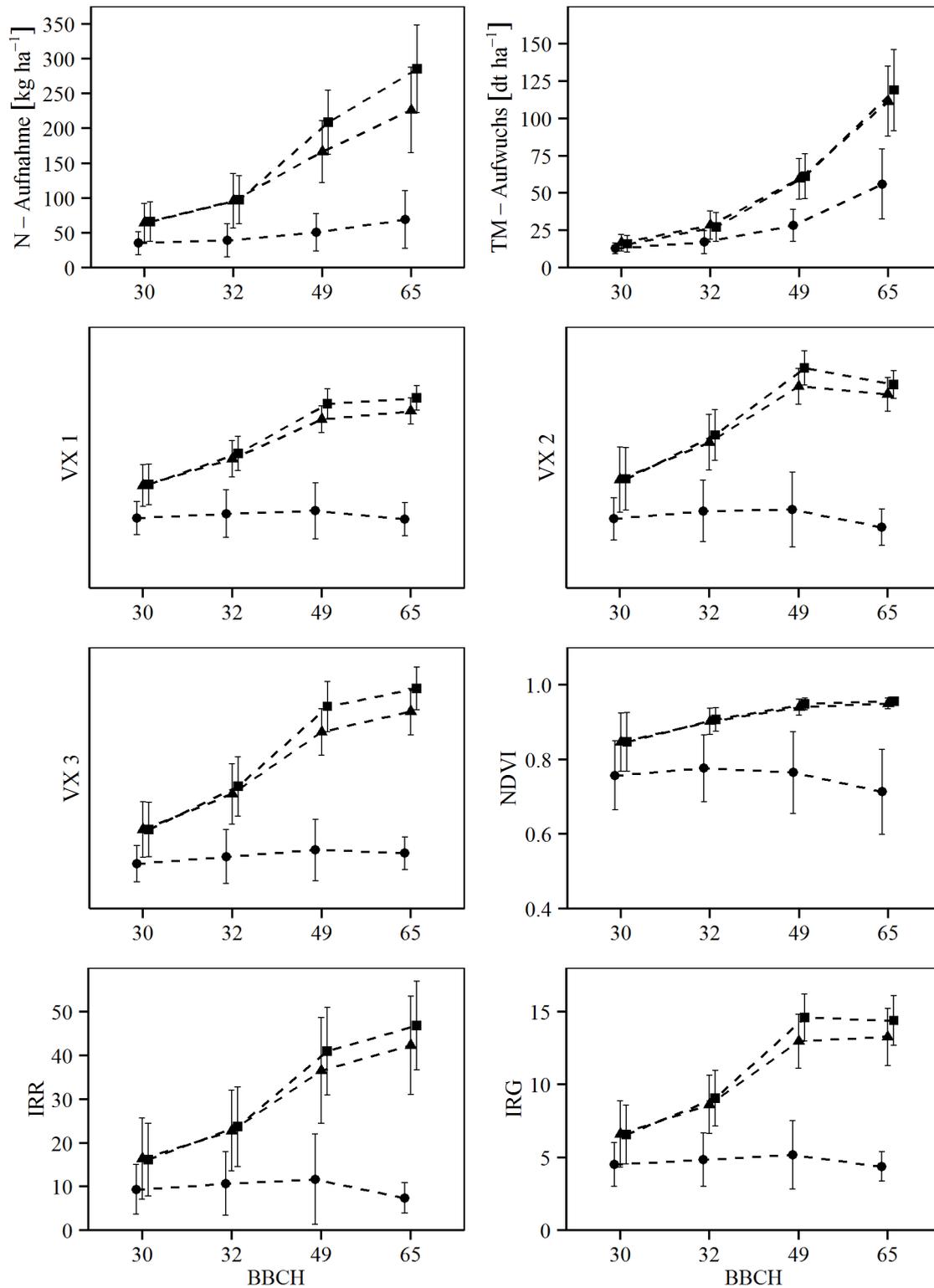
Faktor	TM-Aufwuchs		N-Aufnahme	
	Herbst	BBCH 30	Herbst	BBCH 30
Sorte	1,3	1,3	0,4	0,9
N-Stufe	18,4***	4,1	29,3***	7,6**
Sorte*N-Stufe	0,8	2,4	1,1	2,5*

Tab. A 8: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Düngerverfahren und Ertragsniveau für die Variablen N-Düngermenge, Kornertrag, Öl- und Proteingehalt und die NKfL (Streifenversuch Winterraps, Roggenstein, 2013).

Faktor	N-Düngermenge	Kornertrag	Ölgehalt	Proteingehalt	NKfL
Düngerverfahren	2420,4***	83,6***	97,9***	88,1***	33,5***
Ertragsniveau	1127,7***	71,8***	15,8***	8,7***	44,7***
Düngerverfahren*Ertragsniveau	263,5***	15,6***	10,6***	8,8***	8,8***

Tab. A 9: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Düngerverfahren und Ertragsniveau für die Variablen N-Entzug Korn, N-Saldo sowie die N-Effizienz (Streifenversuch Winterraps, Roggenstein, 2013).

Faktor	N-Entzug	N-Saldo	N-Effizienz
Düngerverfahren	113,6***	349,3***	266,7***
Ertragsniveau	57,7***	159,2***	166,8***
Düngerverfahren*Ertragsniveau	16,8***	34,8***	49,2***



N-Stufe • N 1 ▲ N 5 ■ N 14

Abb. A 1: Entwicklung von N-Aufnahme und TM-Aufwuchs von mehrzeiliger Wintergerste und Verlauf der Messwerte der Vegetationsindizes VX 1, VX 2, VX 3, NDVI, IRR und IRG während der Vegetation für die N-Stufen N 1, N 5 und N 14 im Mittel beider Standorte (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

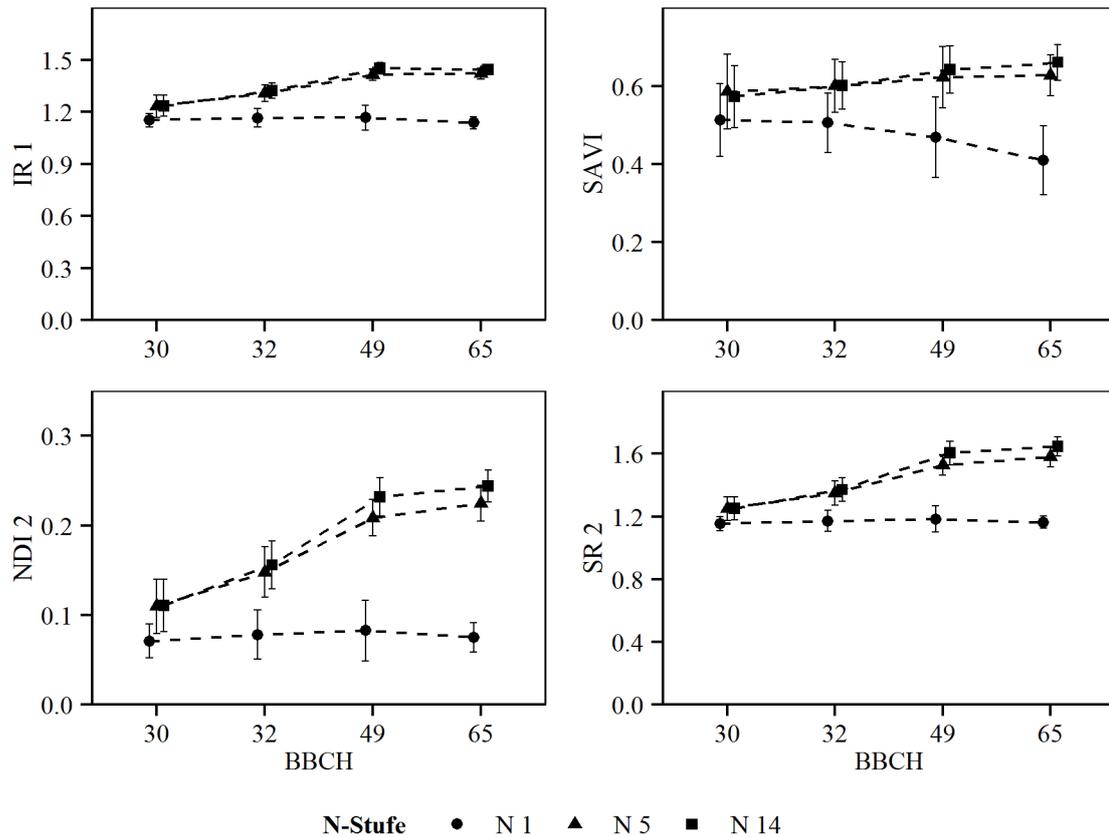


Abb. A 2: Verlauf der Messwerte der Vegetationsindizes IR 1, SAVI, NDI 2 und SR 2 während der Vegetation in mehrzeiliger Wintergerste für die N-Stufen N 1, N 5 und N 14 im Mittel beider Standorte (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014).

Tab. A 10: Minimale (min.) und maximale (max.) Bestimmtheitsmaße der für die Einzeljahre und Termine gerechneten quadratischen Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme von zweizeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindizes (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013).

BBCH		VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
30	max.	0,86	0,93	0,83	0,95	0,96	0,87	0,91	0,89	0,81	0,82	0,82
	min.	0,48	0,51	0,18	0,54	0,48	0,35	0,50	0,01	0,54	0,54	0,54
32	max.	0,88	0,87	0,88	0,96	0,89	0,89	0,88	0,87	0,88	0,88	0,88
	min.	0,69	0,51	0,80	0,52	0,57	0,62	0,65	0,51	0,76	0,79	0,80
39	max.	0,89	0,85	0,92	0,91	0,77	0,83	0,87	0,88	0,91	0,90	0,91
	min.	0,73	0,63	0,81	0,51	0,56	0,64	0,66	0,56	0,74	0,74	0,75
49	max.	0,94	0,93	0,94	0,92	0,93	0,94	0,93	0,91	0,94	0,94	0,94
	min.	0,67	0,63	0,64	0,52	0,54	0,57	0,67	0,32	0,66	0,66	0,66
65	max.	0,93	0,93	0,94	0,95	0,92	0,90	0,92	0,95	0,94	0,94	0,94
	min.	0,66	0,55	0,58	0,44	0,46	0,51	0,56	0,29	0,56	0,57	0,55

Tab. A 11: Minimale (min.) und maximale (max.) Bestimmtheitsmaße der für die Einzeljahre und Termine gerechneten quadratischen Regressionsgleichungen zwischen der N-Aufnahme von mehrzeiliger Wintergerste und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, N-Steigerungsversuch HE und NE, mehrzeilige Wintergerste Dürnast, 2009 bis 2013).

BBCH		VX 1	VX 2	VX 3	NDVI	IRR	IRG	IR 1	SAVI	NDI 2	SR 1	SR 2
30	max.	0,87	0,89	0,86	0,84	0,87	0,88	0,88	0,84	0,87	0,87	0,88
	min.	0,51	0,58	0,42	0,37	0,41	0,44	0,47	0,35	0,49	0,50	0,48
32	max.	0,91	0,93	0,91	0,94	0,93	0,91	0,92	0,93	0,92	0,92	0,92
	min.	0,68	0,46	0,68	0,49	0,47	0,72	0,72	0,25	0,70	0,70	0,70
39	max.	0,92	0,89	0,95	0,75	0,77	0,88	0,91	0,80	0,94	0,93	0,94
	min.	0,62	0,61	0,58	0,61	0,63	0,59	0,62	0,43	0,60	0,61	0,58
49	max.	0,94	0,94	0,94	0,92	0,88	0,92	0,94	0,90	0,94	0,94	0,94
	min.	0,28	0,27	0,25	0,42	0,25	0,28	0,27	0,44	0,26	0,27	0,25
65	max.	0,93	0,92	0,93	0,93	0,91	0,91	0,93	0,93	0,93	0,94	0,93
	min.	0,39	0,38	0,42	0,36	0,36	0,40	0,40	0,23	0,41	0,41	0,40

Tab. A 12: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse für die abhängigen Variablen N-Aufnahme und TM-Aufwuchs mit den Faktoren Termin, Sortentyp und N-Stufe (Sortenversuch Wintergerste, Dürnast, 2010 bis 2012).

Faktor	N-Aufnahme	TM-Aufwuchs
Termin	585,5***	1352,3***
Sortentyp	19,4***	15,4***
N-Stufe	181,6***	54,0***
Termin*Sortentyp	3,4**	2,3
Termin*N-Stufe	26,5***	13,6***
Sortentyp*N-Stufe	1,5	0,1

Tab. A 13: SSQ-Werte der Kovarianzanalyse für den VX 1, VX 2, VX 3, NDVI, IRR und IRG bei der zweizeiligen Wintergerste mit den Faktoren Sorte und Jahr sowie der Kovariaten N-Aufnahme, aufgeteilt nach BBCH-Stadien (Sortenversuch Wintergerste, Dürmast, 2010 bis 2012).

	VX 1					VX 2				
	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
BBCH	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
Kovariate N-Aufnahme	159,6***	180,1***	21,4***	107,6***	141,8***	1,3***	1,7***	0,3***	1,2***	1,0***
Faktor Sorte	12,5	7,1	1,0	4,4	13,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
Jahr	252,0	16,6***	60,5***	143,0***		0,9***	0,2***	1,8***	4,4***	

	VX 3					NDVI				
	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
BBCH	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
Kovariate N-Aufnahme	0,004***	0,007***	0,001***	0,006***	0,008***	0,085***	0,027***	0,008***	0,013***	0,019***
Faktor Sorte	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001*	0,01	0,001	0,005	0,005*	0,006*
Jahr	0,008***	0,001***	0,002***	0,005***		0,038***	0,004***	0,049***	0,256***	

	IRR					IRG				
	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
BBCH	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
Kovariate N-Aufnahme	989,5***	1689,2***	221,1***	843,2***	1918,5***	56,0***	99,8***	13,1***	62,7***	81,4***
Faktor Sorte	101,8	39,2	72,5	182,9*	333,6***	6,2	2,2	0,9	3,0	12,2*
Jahr	168,9***	112,8**	2464,2***	10426,6***		53,7***	6,3**	54,6***	257,1***	

Tab. A 14: SSQ-Werte der Kovarianzanalyse für den IR 1, NDI 2, SR 1 und SR 2 bei der zweizeiligen Wintergerste mit den Faktoren Sorte und Jahr sowie der Kovariaten N-Aufnahme, aufgeteilt nach BBCH-Stadien (Sortenversuch, Wintergerste Dürrast, 2010 bis 2012).

Kovariate	IR 1					NDI 2				
	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
BBCH										
N-Aufnahme	0,075***	0,100***	0,016***	0,071***	0,062***	0,017***	0,029***	0,003***	0,023***	0,027***
Sorte	0,006	0,003	0,02	0,003	0,005	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002
Jahr	0,072***	0,006***		0,085***	0,178***	0,025***	0,002**		0,014***	0,032***

Kovariate	SR 1					SR 2				
	30	32	39	49	65	30	32	39	49	65
BBCH										
N-Aufnahme	0,048***	0,073***	0,008***	0,052***	0,057***	0,10***	0,21***	0,02***	0,17***	0,23***
Sorte	0,003	0,003	0,000	0,002	0,005	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02*
Jahr	0,073***	0,006***		0,031***	0,070***	0,15***	0,01**		0,10***	0,26***

Tab. A 15: Bestimmtheitsmaße sowie Parameter der linearen Regressionsgleichung zwischen den Messwerten des VX 2 und der N-Aufnahme, nach Jahr und Termin, zwei- und mehrzeilige Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE Roggenstein zwei- und mehrzeilige Wintergerste, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

Jahr	BBCH	mehrzeilig			zweizeilig		
		R ²	Steigung	Y-Achsenabschnitt	R ²	Steigung	Y-Achsenabschnitt
2002	30	0,46	3,2	1,6	0,49	3,3	-4,3
	32	0,85	11,3	-36,3	0,63	8,7	-27,4
	49	0,83	15,5	-45,2	0,60	12,5	-39,4
	65	0,91	36,6	-144,7	0,89	28,0	-107,7
2004	30	0,72	13,4	-52,2	0,62	12,5	-44,5
	32	0,70	12,8	-48,7	0,67	11,6	-47,6
	49	0,76	18,8	-69,0	0,85	19,3	-76,8
	65	0,84	26,3	-111,8	0,86	22,4	-81,3
2005	32	0,85	16,2	-63,2	0,66	10,0	-19,6
	49	0,68	30,3	-118,0	0,58	32,9	-133,1
	55	0,57	40,5	-173,8	0,77	45,9	-204,9
	65	0,67	46,0	-198,2	0,67	40,3	-157,4
2006	30	0,69	11,2	-40,3	0,73	10,1	-33,9
	49	0,61	18,4	-68,0	0,68	18,5	-71,7
	55	0,70	22,9	-80,7	0,80	25,0	-93,9
	65	0,78	33,9	-143,0	0,76	27,0	-101,1
2008	30	0,65	12,1	-42,6	0,66	13,2	-52,8
	32	0,67	22,0	-75,5	0,75	33,8	-168,6
	65	0,22	22,5	-56,3	0,58	40,4	-191,4
2009	30	0,58	17,3	-65,5	0,79	12,1	-43,4
	32	0,74	13,2	-47,6	0,86	17,5	-79,2
	49	0,22	7,7	-3,5	0,70	48,5	-229,8
	65	0,37	20,5	-44,5			
2010	30	0,73	10,6	-35,6	0,51	15,7	-62,9
	32	0,70	11,8	-45,0	0,87	11,0	-39,0
	49	0,68	29,1	-144,3	0,78	26,2	-120,6
2011	30	0,77	11,5	-45,4	0,74	10,6	-46,0
	32			0,0	0,58	12,1	-35,8
	49	0,73	15,5	-55,2	0,64	23,5	-96,4
	65	0,58	21,3	-44,3	0,55	35,4	-123,6
2012	30	0,64	14,8	-52,7	0,80	18,6	-75,2
	32	0,79	14,1	-57,6	0,85	13,5	-51,7
	39	0,50	15,4	-59,6	0,77	10,4	-29,6
	49	0,75	19,4	-75,7	0,69	23,6	-93,1
	65	0,57	22,9	-55,0	0,68	34,2	-143,8
2013	30	0,73	18,7	-76,5	0,78	21,8	-99,6
	32	0,75	23,5	-107,9	0,77	23,0	-104,0
	39	0,56	29,8	-160,2			
	49	0,57	49,7	-291,4	0,72	33,0	-160,4
	65	0,46	43,3	-180,8	0,46	36,6	-143,6

Tab. A 16: Bestimmtheitsmaße sowie Parameter der linearen Regressionsgleichung zwischen den Messwerten des VX 1 und der N-Aufnahme, nach Jahr und Termin, zwei- und mehrzeilige Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE Roggenstein zwei- und mehrzeilige Wintergerste, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

Jahr	Termin	mehrzeilig			zweizeilig		
		R ²	Steigung	Y-Achsenabschnitt	R ²	Steigung	Y-Achsenabschnitt
2002	30	0,52	130,0	-7,7	0,47	119,6	-7,1
	32	0,84	445,8	-26,7	0,66	313,7	-18,8
	49	0,81	600,8	-36,0	0,77	614,7	-36,9
	65	0,91	1259,6	-75,7	0,88	868,3	-52,1
2004	30	0,73	577,1	-34,8	0,57	541,1	-32,6
	32	0,74	577,6	-34,8	0,67	571,8	-34,6
	49	0,76	880,6	-53,1	0,83	835,8	-50,4
	65	0,86	1016,8	-61,5	0,86	859,0	-51,8
2005	32	0,81	580,9	-34,9	0,67	407,8	-24,4
	49	0,72	1228,2	-74,0	0,67	1384,6	-83,6
	55	0,59	1566,7	-94,6	0,79	1534,5	-92,6
	65	0,70	1625,7	-98,2	0,68	1338,1	-80,6
2006	30	0,79	503,0	-30,3	0,71	409,5	-24,6
	49	0,62	750,3	-45,2	0,63	710,5	-42,8
	55	0,72	892,4	-53,7	0,79	969,1	-58,4
	65	0,77	1285,0	-78,0	0,79	1067,4	-64,6
2008	30	0,62	623,1	-37,6	0,63	747,3	-45,2
	32	0,64	989,6	-59,7	0,75	1516,9	-92,0
	65	0,24	893,9	-53,7	0,63	1456,1	-88,2
2009	30	0,50	531,2	-31,9	0,78	453,0	-27,2
	32	0,68	456,2	-27,4	0,86	611,9	-36,9
	49	0,24	303,7	-18,0	0,75	1504,9	-90,8
	65	0,38	686,9	-41,0			
2010	30	0,73	398,1	-23,9	0,60	652,7	-39,2
	32	0,67	410,8	-24,6	0,85	389,5	-23,3
	49	0,72	1126,1	-67,9	0,78	967,5	-58,2
2011	30	0,75	416,2	-25,0	0,57	396,0	-23,8
	32				0,68	581,7	-34,9
	49	0,70	596,6	-35,8	0,65	893,0	-53,8
	65	0,53	571,7	-34,0	0,60	1175,1	-70,6
2012	30	0,62	498,3	-29,8	0,69	553,2	-33,2
	32	0,78	453,1	-27,2	0,84	428,4	-25,6
	39	0,51	606,0	-36,3	0,78	396,2	-23,7
	49	0,75	695,1	-41,7	0,73	749,1	-44,9
	65	0,58	767,4	-45,7	0,73	1054,5	-63,3
2013	30	0,68	701,1	-42,1	0,69	879,4	-53,0
	32	0,75	872,4	-52,5	0,74	909,3	-54,7
	39	0,60	1093,8	-66,1			
	49	0,70	1781,3	-107,8	0,75	1278,4	-77,1
	65	0,55	1496,4	-90,0	0,53	1278,2	-76,8

Tab. A 17: Bestimmtheitsmaße sowie Parameter der linearen Regressionsgleichung zwischen den Messwerten des IRG und der N-Aufnahme, nach Jahr und Termin, zwei- und mehrzeilige Wintergerste (N-Steigerungsversuch HE und NE Roggenstein zwei- und mehrzeilige Wintergerste, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

Jahr	Termin	mehrzeilig			zweizeilig		
		R ²	Steigung	Y-Achsenabschnitt	R ²	Steigung	Y-Achsenabschnitt
2002	30	0,43	2,3	16,0	0,51	2,4	7,8
	32	0,85	7,5	-3,7	0,62	6,3	-3,5
	49	0,82	10,1	2,3	0,61	9,3	-6,5
	65	0,89	25,3	-60,1	0,88	21,5	-46,1
2004	30	0,70	8,8	-15,0	0,64	8,2	-6,7
	32	0,66	7,7	-10,7	0,66	7,3	-16,1
	49	0,78	11,9	-13,5	0,82	12,3	-20,2
	65	0,84	15,5	-41,1	0,85	14,9	-19,0
2005	32	0,83	11,6	-23,2	0,68	6,2	21,5
	49	0,68	21,9	-52,3	0,55	21,4	-41,6
	55	0,56	27,5	-79,5	0,76	30,7	-92,5
	65	0,67	28,9	-79,9	0,70	26,2	-43,6
2006	30	0,67	8,0	-10,7	0,72	8,0	-8,2
	49	0,60	14,3	-25,0	0,72	14,5	-31,7
	55	0,67	15,7	-13,7	0,79	18,2	-27,6
	65	0,77	21,0	-57,9	0,76	18,0	-29,1
2008	30	0,66	10,2	-16,7	0,66	9,9	-18,9
	32	0,68	14,4	-8,0	0,72	23,5	-96,5
	65	0,24	14,9	18,4	0,60	25,0	-80,6
2009	30	0,57	11,9	-17,5	0,78	6,9	-1,5
	32	0,73	8,5	-6,3	0,86	10,3	-25,2
	49	0,24	5,1	29,2	0,74	26,4	-87,6
	65	0,39	12,6	24,9			
2010	30	0,75	8,9	-5,0	0,49	13,1	-23,7
	32	0,73	9,4	-10,4	0,87	8,6	-6,7
	49	0,74	18,3	-46,1	0,83	19,8	-55,5
2011	30	0,75	9,5	-16,3	0,23	4,4	-1,1
	32				0,56	9,7	-1,4
	49	0,71	9,2	-2,6	0,57	15,5	-22,7
	65	0,55	16,2	26,5	0,53	29,3	-36,0
2012	30	0,66	13,2	-16,1	0,84	16,6	-34,4
	32	0,80	11,4	-22,5	0,86	10,8	-16,8
	39	0,50	10,1	-9,7	0,74	7,6	4,6
	49	0,77	13,0	-14,4	0,72	18,3	-34,9
	65	0,59	15,0	30,0	0,72	23,0	-47,8
2013	30	0,55	9,4	2,8	0,76	13,0	-26,8
	32	0,70	13,8	-23,3	0,79	15,3	-33,3
	39	0,59	16,0	-51,7			
	49	0,61	25,2	-119,5	0,76	17,7	-30,1
	65	0,44	22,4	-7,8	0,56	22,9	-37,2

Tab. A 18: Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichung zwischen der terminspezifischen N-Aufnahme und dem Kornertrag von zweizeiliger Wintergerste, dargestellt nach Einzeljahren an den Standorten Dürnast und Roggenstein (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch zweizeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2013).

Jahr	Ort	BBCH	R ²	Jahr	Ort	BBCH	R ²
2002	Freising	30	0,33	2011	Freising	30	0,72
		32	0,72			32	
		39				39	0,26
		49	0,70			49	0,56
		65	0,88			65	0,47
		92	0,91			92	
2004	Freising	30	0,25	2012	Freising	30	
		32	0,54			32	0,94
		39				39	0,87
		49	0,78			49	0,81
		65	0,87			65	0,84
		92	0,79			92	0,92
2005	Freising	30		2013	Freising	30	0,61
		32	0,74			32	0,67
		39				39	
		49	0,82			49	0,80
		65	0,94			65	0,73
		92	0,92			92	0,86
2006	Freising	30	0,88	2012	Roggenstein	30	0,55
		32				32	0,78
		39				39	
		49	0,68			49	0,67
		65	0,77			65	0,71
		92	0,79			92	0,76
2008	Freising	30	0,51	2013	Roggenstein	30	0,85
		32	0,67			32	0,91
		39				39	
		49	0,33			49	0,81
		65				65	0,78
		92	0,40			92	0,91
2009	Freising	30	0,84	2014	Roggenstein	30	0,47
		32	0,80			32	0,79
		39				39	0,68
		49	0,60			49	0,76
		65	0,43			65	0,64
		92	0,48			92	0,70
2010	Freising	30	0,94				
		32	0,85				
		39					
		49	0,75				
		65	0,71				
		92	0,83				

Tab. A 19: Bestimmtheitsmaße der Regressionsgleichung zwischen der terminspezifischen N-Aufnahme und dem Kornertrag von mehrzeiliger Wintergerste, dargestellt nach Einzeljahren (N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2012 bis 2014, N-Steigerungsversuch mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2002 bis 2008, N-Steigerungsversuch HE und NE mehrzeilige Wintergerste, Dürnast, 2009 bis 2013).

Jahr	Ort	BBCH	R ²	Jahr	Ort	BBCH	R ²
2002	Dürnast	30	0,36	2011	Dürnast	30	0,49
		32	0,88			32	
		39				39	0,52
		49	0,78			49	0,50
		65	0,90			65	0,03
		92	0,91			92	0,94
2004	Dürnast	30	0,78	2012	Dürnast	30	0,52
		32	0,84			32	0,31
		39				39	0,43
		49	0,84			49	
		65	0,86			65	0,26
		92	0,94			92	0,73
2005	Dürnast	30		2013	Dürnast	30	
		32	0,88			32	0,68
		39				39	0,55
		49	0,87			49	0,44
		65	0,91			65	0,35
		92	0,91			92	0,66
2006	Dürnast	30	0,78	2012	Roggenstein	30	0,56
		32				32	0,85
		39				39	
		49	0,69			49	0,75
		65	0,83			65	0,60
		92	0,91			92	0,77
2008	Dürnast	30	0,50	2013	Roggenstein	30	0,80
		32	0,63			32	0,92
		39				39	
		49				49	0,78
		65	0,45			65	0,75
		92	0,79			92	0,79
2009	Dürnast	30	0,11	2014	Roggenstein	30	0,68
		32	0,20			32	0,73
		39				39	0,74
		49	0,15			49	0,71
		65	0,36			65	0,49
		92	0,68			92	0,69
2010	Dürnast	30	0,62				
		32	0,62				
		39					
		49	0,60				
		65	0,51				
		92	0,79				

Tab. A 20: Bestimmtheitsmaße und quadratische Regressionsgleichung zwischen der terminspezifischen N-Aufnahme mehrzeiliger Wintergerste und dem Kornertrag (N-Steigerungsversuch HE und NE zweizeilige Wintergerste, Roggenstein, 2013).

BBCH	R ²	Gleichung
30	0,80	$KE = -0,0091 \cdot NA_{Ter}^2 + 2,05 \cdot NA_{Ter} - 20,6$
32	0,92	$KE = -0,0043 \cdot NA_{Ter}^2 + 1,41 \cdot NA_{Ter} - 19,3$
49	0,78	$KE = -0,002 \cdot NA_{Ter}^2 + 0,89 \cdot NA_{Ter} - 5,0$
65	0,75	$KE = -0,0008 \cdot NA_{Ter}^2 + 0,52 \cdot NA_{Ter} + 12,4$
92	0,79	$KE = -0,0014 \cdot NA_{Ter}^2 + 0,82 \cdot NA_{Ter} - 11,5$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
KE	dt ha ⁻¹	Kornertrag
NA _{Ter}	kg ha ⁻¹	terminspezifische N-Aufnahme

Tab. A 21: Tage zwischen den einzelnen Entwicklungsstadien für zwei- und mehrzeilige Wintergerste, gemittelt über die Standorte Dürnast und Roggenstein.

BBCH von - bis	Tage
30 - 31	9
30 - 32	16
32 - 39	14
32 - 49	24
39 - 49	10
49 - 61	8

Tab. A 22: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Düngeverfahren und Ertragsniveau für die Variablen N-Düngermenge, Kornertrag, Proteingehalt und NKfL (Streifenversuch mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2013).

Faktor	N-Dünger- menge	Kornertrag	Protein- gehalt	NKfL
Düngeverfahren	727,7***	0,6	32,4***	3,8*
Ertragsniveau	37,6***	12,8***	37,1***	10,4***
Düngeverfahren*Ertragsniveau	13,1***	1,8	0,7	1,3

Tab. A 23: F-Werte und Signifikanzen der Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Düngeverfahren und Ertragsniveau für die Variablen N-Düngermenge, Kornertrag, Proteingehalt und NKfL (Streifenversuch mehrzeilige Wintergerste, Roggenstein, 2013).

Faktor	N-Entzug Korn	N-Saldo	N- Effizienz
Düngeverfahren	11,5***	73,0***	124,7***
Ertragsniveau	23,6***	2,3	1,2
Düngeverfahren*Ertragsniveau	2,5*	0,7	0,6

Danksagung

Zum Abschluss dieser Promotion möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. K.-J. Hülsbergen für das Überlassen dieses spannenden und innovativen Themas sowie die steten Ratschläge beim Abfassen dieser Arbeit.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Prof. R. Hückelhoven für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und bei Herrn Prof. U. Schmidhalter für die Übernahme des Koreferats.

Weiterhin gebührt Herrn Dr. F.-X. Maidl Dank, der durch seine kritischen Anregungen, die jederzeit gewährte Hilfe und Bereitschaft zur fachlichen Diskussion einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Promotion leistete.

Der Firma Fritzmeier Umwelttechnik sei gedankt für die produktive Zusammenarbeit im gemeinsamen Projekt OpSeN sowie für die Teilfinanzierung meiner Stelle.

Dank schulde ich ebenfalls den Herren Prof. K. Auerswald und Thomas Machl für die Hilfestellung bei geostatistischen Fragen. Dankenswerterweise haben mich Karin Levin bei den Übersetzungen ins Englische und Anna Köhler bei der Erstellung der Grafiken unterstützt. Frau Nicole Steiner gebührt großer Dank für die Korrektur dieser Arbeit und die kritischen Anmerkungen.

Besonders möchte ich mich bei all denjenigen Kollegen sowie den vielen HiWis, Praktikanten und Lehrlingen an den Versuchsstationen und dem Labor bedanken, ohne deren stete Einsatzbereitschaft die Datenerhebung in dieser Form nicht möglich gewesen wäre. Namentlich erwähnen möchte ich Dieter Hirschel, Jan-Dirk Otten, Florian Schmid, Ingo Brauer, Iris Leineweber, Stefan Kimmelman, Andreas Kern sowie Agathe Zach, Franziska Fella und Monika Kaindl. Dem Betriebsleiter von Roggenstein, Robert Schmid, gebührt für die unkomplizierte Bereitschaft Flächen sowie Technik zur Verfügung zu stellen ebenfalls großer Dank.

Für das angenehme Arbeitsumfeld am Lehrstuhl und die zahlreichen, auch erheiternden Diskussionen bedanke ich mich vor allem bei meinen Kollegen Anna Köhler, Dominik Holland, Tobias Böswirth, Beat Vincent, Sebastian Grabendorfer und Josef Prücklmaier.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern für das Ermöglichen des Studiums sowie für die Unterstützung in all den Jahren herzlich bedanken.

Lebenslauf

Name: Andreas Spicker

Geboren: 21.11.1984

Schlussausbildung:

09/1991 bis 07/1995 Grundschole Greifenberg/ Eching am Ammersee

09/1995 bis 05/2004 Rhabanus-Maurus-Gymnasium, St. Ottilien
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Studium:

10/2005 bis 08/2008 Bachelor of Science „Landnutzung“, Fachrichtung Agrarwissenschaften, TU München, Freising

10/2009 bis 03/2012 Master of Science „Agrarmanagement“, TU München, Freising

Wehrdienst:

07/2004 bis 03/2005 allg. Grundwehrdienst, FLARAK Gruppe 22, Penzing

Praktikum:

03/2005 bis 08/2005 landwirtschaftlicher Betrieb, Stefan Geiger, Bibertal

02/2007 bis 04/2007 Zweckverband für künstliche Besamung, Greifenberg

08/2007 bis 09/2007 Saatenunion GmbH, Versuchsstation Moosburg

08/2008 bis 12/2008 De Snayer Dairy, Lodi, Kalifornien

01/2009 bis 02/2009 LfL, Institut für Agrarökonomie, München

03/2009 bis 08/2009 Syngenta Agro, Maintal

08/2010 bis 09/2010 Landgut Krosigk GmbH, Petersberg

Beruflicher Werdegang:

04/2012 bis 12/2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, TU München, Freising

ab 01/2016 Betriebsleiter, Agrar GmbH Neutz, Wettin-Löbejün