

Förderinitiative

Verminderung von Stickstoffemissionen

Digital basiertes Stickstoffmanagement in landwirtschaftlichen Betrieben – Emissionsminderung durch optimierte Stickstoffkreisläufe und sensorgestützte teilflächenspezifische Düngung

Projektbericht, AZ 30743/01

Technische Universität München
Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme
Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen, Dr. Franz-Xaver Maidl
M.Sc. Martin Mittermayer, B.Sc. Jonas Weng, Dipl.-Ing. Andreas Kern

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
Prof. Dr. Frank Leßke
B.Sc. August Gilg

Förderzeitraum: 01.01.2017 bis 31.12.2019 (Laufzeit: 36 Monate)

Freising, 31.08.2020

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	9
Kurzfassung	11
1 Zielstellung des Projektes	15
1.1 Problemstellung	15
1.2 Forschungsbedarf	15
1.3 Forschungsansatz.....	16
1.4 Arbeitshypothesen	17
1.5 Projektzeitplan.....	17
2 Stand des Wissens und der Technik.....	18
2.1 Teilprojekt 1: Sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung.....	18
2.1.1 Sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung.....	18
2.1.2 Grundlagen der Pflanzenreflexion	18
2.1.3 Messalgorithmen.....	19
2.1.4 Verfahren der teilschlagbezogenen Düngung.....	20
2.1.5 Düngealgorithmen.....	21
2.2 Teilprojekt 2: Modellgestützte Analyse, Bewertung und Optimierung betrieblicher Stickstoffkreisläufe.....	22
2.2.1 Stickstoffeffizienz in der Landwirtschaft.....	22
2.2.2 Modelle zur Bilanzierung von Stickstoffkreisläufen	23
2.2.3 Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften.....	26
2.2.4 Teilflächenspezifische Stickstoffbilanzierung.....	26
2.2.5 Erfassung der räumlichen Variabilität	27
3 Material und Methoden	32
3.1 Teilprojekt 1	32
3.1.1 Maisversuche in den Jahren 2018 und 2019.....	32
3.1.2 Standortbeschreibung	32
3.1.3 Versuchsbeschreibung und Versuchsanlage.....	35
3.1.4 Beprobung der Versuche	42
3.2 Teilprojekt 2	44
3.2.1 Untersuchungsbetriebe und Versuchsflächen	44
3.2.2 Erfassung der Heterogenität von Schlägen	45
3.2.3 Programmiertechnische Umsetzung.....	52
3.2.4 Entwicklung eines N-Managementtools zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung und Modellvalidierung	55
4 Ergebnisse und Diskussion.....	58

4.1	Teilprojekt 1	58
4.1.1	Wirkung differenzierter Stickstoffdüngung Düngung auf die Ertragsbildung und die N-Effizienz bei Mais	58
4.1.2	Zusammenhänge von Pflanzenparametern zu frühen Entwicklungsstadien und dem Trockenmasseertrag zur Siloreife	65
4.1.3	Möglichkeiten der Charakterisierung des Wachstums von Mais in frühen Entwicklungsstadien durch Reflexionsmessungen.....	70
4.1.4	Messgleichungen zur Abschätzung der Biomassebildung und der Stickstoffaufnahme von Mais aus Reflexionsmessungen.....	82
4.2	Teilprojekt 2	85
4.2.1	Räumliche Variabilität des Untersuchungsschlages „D2“ (Freising)	85
4.2.1.1	Charakterisierung der Untersuchungsfläche	85
4.2.1.2	Räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge	86
4.2.1.3	Räumliche Variabilität der N-Salden	90
4.2.2	Räumliche Variabilität des Untersuchungsschlages „Bergfeld“ (Roggenstein)	91
4.2.2.1	Räumliche Variabilität der Bodenparameter.....	91
4.2.2.2	Räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge	94
4.2.2.3	Räumliche Variabilität der N-Entzüge und N-Salden.....	95
4.2.3	Räumliche Variabilität des Untersuchungsschlages „Hofacker“ (Hohenthann)....	99
4.2.3.1	Räumliche Variabilität der Bodenparameter.....	99
4.2.3.2	Räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge	102
4.2.3.3	Räumliche Variabilität der N-Salden	103
4.2.4	Räumliche Variabilität weiterer Untersuchungsschläge.....	104
4.2.4.1	Schlag Lager, links (Roggenstein)	104
4.2.4.2	Schlag Itzling (Freising)	106
4.2.5	Modellgestützte Analyse betrieblicher Stickstoffkreisläufe	109
4.2.5.1	Stickstoffkreislauf eines konventionell-intensiven Schweinemastbetriebes	109
4.2.5.2	Stickstoffkreisläufe in Abhängigkeit von der Betriebsstruktur	116
4.2.5.3	Vernetzung der Stoffkreislaufanalysen mit der teilschlagbezogenen N-Bilanzierung.....	120
5	Generaldiskussion und Fazit.....	123
6	Öffentlichkeitsarbeit	128
7	Literaturverzeichnis.....	129

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Reflexionsspektren von Winterweizen	19
Abbildung 2: Stadienabhängigkeit des Sensorwertes.....	20
Abbildung 3: N-Düngerbemessung beim Verfahren Online + Map-Overlay	21
Abbildung 4: N-Düngung von Weizen auf Teilschlägen unterschiedlicher Ertragsfähigkeit	21
Abbildung 5: Beispiel für einen betrieblichen Stickstoffkreislauf, modelliert mit REPRO (Küstermann et al. 2010).....	24
Abbildung 6: Modularer Aufbau des webbasierten Nährstoffmanagementsystems Web-Man mit dem Kernsystem (Verwaltung von Stammdaten- und Betriebsdaten) sowie Modulen zum Nährstoffmanagement.....	25
Abbildung 7: Versuchsplan Maisversuch N-Optimierung, Freising 2018 und 2019.....	37
Abbildung 8: Versuchsplan Maisversuch N-Optimierung, Hohertragsstandort Roggenstein 2018.....	38
Abbildung 9: Versuchsplan Maisversuch N-Optimierung, Niedrigertragsstandort Roggenstein 2018 und 2019.....	40
Abbildung 10: Versuchsplan Mais Sortenversuch, Roggenstein 2018 und 2019	41
Abbildung 11: Verteilung der Bodenproben (100 Punkte) auf der Ackerfläche „Bergfeld“	46
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Orthomosaikerstellung	47
Abbildung 13: Uniformierung der Daten	54
Abbildung 14: Berücksichtigte Größen bei der Berechnung des Stickstoffsaldos	55
Abbildung 15: Schema des Moduls N-Umsatz (nach Abraham 2001).....	57
Abbildung 16: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf den Silomaisertrag, Freising 2018.....	59
Abbildung 17: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf den Silomaisertrag, Roggenstein und Freising 2019	59
Abbildung 18: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf den Silomaisertrag im Mittel der Versuche in Roggenstein und Freising 2018 und 2019.....	60
Abbildung 19: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf den N-Gehalt in der oberirdischen Biomasse zur Siloreife, Mittel der Versuche in Roggenstein und Freising 2018 und 2019.....	60
Abbildung 20: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf die Stickstoffaufnahme in die oberirdische Biomasse zur Siloreife, Mittel der Versuche in Roggenstein und Freising 2018 und 2019.....	61
Abbildung 21: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf die N-Bilanz bei Silomais, Mittel der Versuche in Roggenstein und Freising 2018 und 2019.....	61
Abbildung 22: Wirkung differenzierter Stickstoffdüngung auf den Mais-Kornertrag, Freising 2018	62
Abbildung 23: Wirkung differenzierter Stickstoffdüngung auf den Mais-Kornertrag, Mittelwerte aus Freising und Roggenstein 2018 und 2019	63

Abbildung 24: Wirkung differenzierter Stickstoffdüngung auf den N-Saldo von Körnermais, Mittelwerte aus Freising und Roggenstein 2018 und 2019	64
Abbildung 25: Beziehung zwischen dem Biomasseertrag zu frühen Entwicklungsstadien und dem Silomais-TM-Ertrag (Freising 2018)	67
Abbildung 26: Beziehung zwischen der Trockenmassebildung bei 20 cm, 30 cm und 50 cm Wuchshöhe und dem Ertrag zur Siloreife, Versuche Freising und Roggenstein 2019	68
Abbildung 27: Beziehung zwischen dem N-Gehalt in der Biomasse zu frühen Entwicklungsstadien und dem Silomais-TM-Ertrag (Freising 2018)	69
Abbildung 28: Beziehung zwischen der Stickstoffaufnahme bei 20 cm, 30 cm und 50 cm Wuchshöhe und dem Ertrag zur Siloreife, Versuche Freising und Roggenstein 2019	69
Abbildung 29: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetations-indizes und dem N-Gehalt in der Biomasse zu Termin 1, 2018	70
Abbildung 30: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetations-indizes und dem N-Gehalt in der Biomasse zu Termin 2, 2018	71
Abbildung 31: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und dem N-Gehalt zu Termin 3, 2018.....	71
Abbildung 32: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex IRI 1 (740/730) und dem N-Gehalt zu frühen Entwicklungsstadien, 2018.....	72
Abbildung 33: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetations-indizes und dem Biomasseertrag zu Termin 2, Jahr 2018	73
Abbildung 34: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetations-indizes und dem Biomasseertrag zu Termin 1, 2018.....	73
Abbildung 35: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und dem Biomasseertrag zu Termin 3, Jahr 2018.....	74
Abbildung 36: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetations-indizes und der N-Aufnahme in der Biomasse zu Termin 1, Jahr 2018	75
Abbildung 37: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetations-indizes und der N-Aufnahme in der Biomasse zu Termin 2, Jahr 2018	75
Abbildung 38: Indexvergleich: R ² -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetations-indizes und der N-Aufnahme in der Biomasse zu Termin 3, Jahr 2018	76
Abbildung 39: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex IRI 2 (740/720) und dem Biomasseertrag zu frühen Entwicklungsstadien, Jahr 2018.....	77
Abbildung 40: Beziehung zwischen der N-Aufnahme von Mais und dem Vegetationsindex REIP in frühen Entwicklungsstadien der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2019.....	78
Abbildung 41: Beziehung zwischen der N-Aufnahme von Mais und dem Vegetationsindex SR 2 in frühen Entwicklungsstadien der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2019	78
Abbildung 42: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex REIP und der Trockenmassebildung in frühen Entwicklungsstadien der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2019.....	79
Abbildung 43: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex SR2 und der Trockenmassebildung in frühen Entwicklungsstadien der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2019	79

Abbildung 44: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex REIP und der N-Aufnahme in frühen Entwicklungsstadien im Mittel der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2018 und 2019....	83
Abbildung 45: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex SR2 und der N-Aufnahme in frühen Entwicklungsstadien im Mittel der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2018 und 2019....	83
Abbildung 46: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex REIP und der Trockenmassebildung in frühen Entwicklungsstadien im Mittel der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2018 und 2019	84
Abbildung 47: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex SR2 und der Trockenmassebildung in frühen Entwicklungsstadien im Mittel der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2018 und 2019....	84
Abbildung 48: Bodenschätzungskarte, Klassenzeichen, Bodenzahl und Ackerzahl, Schlag D2 (4,39 ha, Freising).....	85
Abbildung 49: Räumliche Variabilität der elektrischen Leitfähigkeit, bestimmt mit dem EM-38, Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018	86
Abbildung 50: Räumliche Variabilität der Winterweizenerträge, bestimmt mit Mähdrescher (links) und Parzellenmähdrescher (rechts), Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018	86
Abbildung 51: Räumliche Variabilität der Winterweizenerträge, bestimmt auf der Grundlage von Satellitendaten, Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018.....	87
Abbildung 52: Beziehung zwischen den mit Großmähdrescher und Parzellenmähdrescher bestimmten Weizenerträgen, Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018	88
Abbildung 53: Beziehung zwischen REIP (Sensormessung am 04.06.2018) und Korn-Ertrag (Mähdrescher), Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018	88
Abbildung 54: Beziehung zwischen REIP (Sensor) und NDVI (Satellit), Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018.....	88
Abbildung 55: Räumliche Variabilität der Vegetationsindices NDVI (Satellit, aufgenommen Anfang Juni 2018) und REIP (Sensor, gemessen am 04. Juni 2018), Schlag D2 (4,39 ha, Freising)	89
Abbildung 56: Räumliche Variabilität N-Entzüge, links: auf der Grundlage von Mähdrescherertragsdaten, rechts: auf der Grundlage von Satellitendaten, Schlag D2 (4,39 ha, Freising)	90
Abbildung 57: Teilflächenspezifische N-Salden, Schlag D2 (4,39 ha, Freising), Fruchtart Winterweizen (2018), berechnet auf der Basis von links: Mähdrescherertragsdaten, rechts: Satellitendaten.....	90
Abbildung 58: Bodenschätzungskarte, Klassenzeichen, Bodenzahl und Ackerzahl, Schlag Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein).....	91
Abbildung 59: P- und K-Gehalt, Ap-Horizont (0 – 30 cm), Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein)	91
Abbildung 60: Bodenparameter, Ap-Horizont (0 – 30 cm), Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein)	92
Abbildung 61: Winterweizen-Ertrag (2018) auf der Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein), links: Volumenstrommessung am Mähdrescher, rechts: Satellitendaten und Berechnungen mit dem Modell PROMET.	94
Abbildung 62: N-Entzug und N-Saldo auf der Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein).....	96
Abbildung 63: Nitratvorräte in verschiedenen Ertragszonen, Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein), ermittelt mit Rammkernsondierung bis 9 m Tiefe	98

Abbildung 64: Beziehung zwischen N-Saldo und Nitratvorräten bis 9 m Tiefe, Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein)	98
Abbildung 65: Räumliche Variabilität der Gehalte an Gesamt-Stickstoff (N_t) (links) und organischem Kohlenstoff (C_{org}), Ap-Horizont (0 bis 30 cm), Schlag Hofacker (4,15 ha, Hohenthann)	99
Abbildung 66: Räumliche Variabilität der nutzbaren Feldkapazität (links) und des Gehalts an pflanzenverfügbarem Kalium (rechts), Ap-Horizont (0 bis 30 cm), Schlag Hofacker (4,15 ha, Hohenthann).....	100
Abbildung 67: Räumliche Variabilität des Gehalts an pflanzenverfügbarem Phosphor (links) und der pH-Werte (rechts), Ap-Horizont (0 bis 30 cm), Schlag Hofacker (4,15 ha, Hohenthann).....	100
Abbildung 68: Teilflächenspezifische Erträge und N-Entzüge, Hofacker (4,15 ha, Hohenthann), Fruchtart Winterweizen (2019), auf der Basis von Mährescherertragsdaten.....	102
Abbildung 69: Teilflächenspezifische N-Salden, Schlag Hofacker (4,15 ha, Hohenthann), Fruchtart Winterweizen (2019), berechnet auf der Basis von: links: Mährescherertragsdaten, Mitte: Sensordaten, rechts: Satellitendaten	103
Abbildung 70: Teilflächenspezifische N_t -Gehalte, Bodenschicht 0 bis 30 cm, Schlag Lager, links (12,0 ha, Roggenstein)	104
Abbildung 71: Teilflächenspezifische Erträge und N-Entzüge auf der Grundlage von Mährescherertragsdaten, Schlag Lager, links (12,0 ha, Roggenstein).....	105
Abbildung 72: Teilflächenspezifische N-Salden, Schlag Lager, links (12,0 ha, Roggenstein), links: berechnet auf der Basis von Mährescherertragsdaten, rechts: berechnet anhand von REIP-Daten (Sensormessungen)	105
Abbildung 73: Teilflächenspezifische N_t -Gehalte, Bodenschicht 0 bis 30 cm, Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising).....	106
Abbildung 74: Teilflächenspezifische Erträge, Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising), Fruchtart Winterweizen (2018), links: Mährescherertragsdaten, rechts: Satellitendaten + Modell PROMET..	106
Abbildung 75: Teilflächenspezifische N-Entzüge, Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising), Fruchtart Winterweizen (2018), auf der Grundlage von links: Mährescherdaten, Mitte: Sensordaten, rechts: Satellitendaten.....	107
Abbildung 76: Teilflächenspezifische N-Salden, Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising), links: Mährescherertragsdaten, Mitte: Sensordaten, rechts: Satellitendaten	108
Abbildung 77: Stickstoffkreislauf eines konventionell-intensiven Schweinemastbetriebes, Modellregion Hohenthann, Untersuchungsjahr 2016/17 (Vilser, 2020)	111
Abbildung 78: Stickstoffkreislauf eines konventionell-intensiven Schweinemastbetriebes, Modellregion Hohenthann, Untersuchungsjahr 2017/18 (Vilser, 2020)	113
Abbildung 79: Stickstoffkreislauf eines konventionell-intensiven Schweinemastbetriebes, Modellregion Hohenthann, Untersuchungsjahr 2018/19 (Vilser, 2020)	114
Abbildung 80: Stickstoffkreislauf eines Marktfruchtbetriebes, Modellregion Hohenthann (Forster und Hülsbergen, 2017)	116
Abbildung 81: Stickstoffkreislauf eines Schweinemast- und Biogasbetriebes, Modellregion Hohenthann (Forster und Hülsbergen, 2017)	117
Abbildung 82: Stickstoffkreislauf eines Schweinemastbetriebes mit sehr hohem Tierbesatz, Modellregion Hohenthann (Forster und Hülsbergen, 2017).....	118

Abbildung 83: Beziehung zwischen Modellwerten (N-Saldo, Nitratverlusten) und gemessenen Nitratgehalten im Bodenwasser, Modellregion Hohenthann (Forster und Hülserbergen, 2017)	119
Abbildung 84: Verwaltung von Schlagdaten und GIS-Darstellung von Schlägen im Modell Web-Man	120
Abbildung 85: Prinzip-Darstellung zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung. Verwendung unterschiedlicher Datenquellen und Analysemethoden zur Bestimmung von N-Entzug, N-Düngung und N-Salden. Die Modellierung der Sickerwasserbildung und Nitratwaschung setzt die Verfügbarkeit georeferenzierter Standortdaten voraus.....	121
Abbildung 86: Konzept der Modellkopplung und des Datenaustauschs zwischen digitalem (webbasiertem) N-Managementsystem und sensorgestütztem N-Düngesystem.....	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Methoden zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Bodenparametern.....	28
Tabelle 2: Methoden zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Pflanzenparametern	29
Tabelle 3: Möglichkeiten zum Einsatz der Satellitenbilder (nach Bach et al. (2016)	31
Tabelle 4: Bodeneigenschaften der Versuchsfelder.....	33
Tabelle 5: Wetterdaten am Standort Freising (LfL Wetter 2018 und 2019)	34
Tabelle 6: Wetterdaten am Standort Roggenstein (LfL Wetter 2018 und 2019).....	34
Tabelle 7: N-Varianten und N-Düngung im Maisversuch N-Optimierung, Freising 2018 und 2019	36
Tabelle 8: N-Varianten im Maisversuch N-Optimierung, Niedrigertragsstandort Roggenstein 2018 und 2019.....	39
Tabelle 9: Untersuchte Maissorten im Sortenversuch, Roggenstein 2018 und 2019.....	41
Tabelle 10: Beprobungstermine und Messungen in den Maisversuchen 2018 und 2019 in Roggenstein und Freising	42
Tabelle 11: Versuchsfelder für die Analyse teilflächenbezogener Boden- und Pflanzenparameter an den Standorten Roggenstein, Freising und Hohenthann	44
Tabelle 12: Methoden für die Charakterisierung der räumlichen Variabilität von Böden	46
Tabelle 13: Methoden zur Bestimmung von Ertrag, N-Gehalt und N-Entzug	48
Tabelle 14: Datum und EC-Stadium der Reflexionsmessungen mit dem schleppergetragenen Sensorsystem.....	49
Tabelle 15: Anzahl Biomassehandschnitte zur Ertragsbestimmung	50
Tabelle 16: Parameter der eingesetzten Parzellenmähdrescher	51
Tabelle 17: Druschdatum und Mähdreschersystem auf den Untersuchungsflächen	52
Tabelle 18: Bedeutung von Pflanzenparametern zu frühen Entwicklungsstadien für den Siloreife-Trockenmasseertrag von Mais, dargestellt als Bestimmtheitsmaß R^2 quadratischer Regressionen....	66
Tabelle 19: Bestimmtheitsmaße ausgewählter Vegetationsindices zur Biomassebildung von Mais in frühen Entwicklungsstadien in verschiedenen Jahren auf unterschiedlichen Standorten	80
Tabelle 20: Bestimmtheitsmaße ausgewählter Vegetationsindices zur Stickstoffaufnahme von Mais in frühen Entwicklungsstadien in verschiedenen Jahren auf unterschiedlichen Standorten	81
Tabelle 21: Bestimmtheitsmaße ausgewählter Vegetationsindices zur Wuchshöhe von Mais in frühen Entwicklungsstadien in verschiedenen Jahren auf unterschiedlichen Standorten.....	82
Tabelle 22: Korrelationsmatrix (Korrelationskoeffizienten R^2) auf der Ackerfläche D2 (Freising).....	89
Tabelle 23: Bodenparameter, Ertrag und N-Bilanz der Ackerfläche "Bergfeld"	93
Tabelle 24: Korrelationsmatrix (Korrelationskoeffizienten R^2) auf Ackerfläche "Bergfeld".....	97
Tabelle 25: Bodenparameter, Ertrag und N-Bilanz der Ackerfläche "Hofacker"	101
Tabelle 26: Korrelationsmatrix (Korrelationskoeffizienten R^2) auf Ackerfläche "Hofacker".....	103

Tabelle 27: N-Entzüge und N-Salden der Ackerfläche Lager, links (12,0 ha, Roggenstein), 2018....	104
Tabelle 28: Korrelationsmatrix (Korrelationskoeffizienten R^2) auf Schlag Lager, links (12,0 ha, Roggenstein)	105
Tabelle 29: N-Entzüge und N-Salden der Ackerfläche Itzling 5 (4,69 ha, Freising).....	108
Tabelle 30: Korrelationsmatrix (Korrelationskoeffizienten R^2), Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising)....	108
Tabelle 31: Monatliche Durchschnittstemperaturen [$^{\circ}$ C] und Niederschläge [mm] im Mittel der Jahre 2004 – 2019, Wetterstation Schönbrunn der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL 2019).....	109
Tabelle 32: Fruchtartenspezifische N-Bilanz, konventioneller Schweinemastbetrieb, Hohenthann, 2016/17	111
Tabelle 33: Fruchtartenspezifische N-Bilanz, konventioneller Schweinemastbetrieb, Hohenthann, 2017/18.....	112
Tabelle 34: Fruchtartenspezifische N-Bilanz, konventioneller Schweinemastbetrieb, Hohenthann, 2018/19.....	114
Tabelle 35: N-Bilanz, Hofacker, konventioneller Schweinemastbetrieb, Hohenthann, 2018/19.....	115

Kurzfassung

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In der Bundesrepublik Deutschland sind die flächenbezogenen Stickstoff (N)-Salden mit etwa 90 bis 100 kg ha⁻¹ a⁻¹ seit Jahren auf zu hohem Niveau; dies führt zu umwelt- und klimarelevanten N-Emissionen sowie zu Konflikten mit dem Trinkwasserschutz. Hohe N-Überschüsse treten insbesondere in Betrieben und Regionen mit intensiver Tierhaltung und hohem Gülleanfall auf. Langjährig organisch gedüngte Böden können hohe N-Mineralisierungspotenziale aufweisen, die bei der Mineral-N-Düngung oftmals nur unzureichend berücksichtigt werden. Eine weitere Ursache hoher N-Salden ist die einheitliche N-Düngung auf heterogenen Schlägen. In Niedrigertragszonen kann dies zur N-Überdüngung und hohen N-Verlusten führen; in Hohertragszonen wird das Ertragspotenzial nicht ausgeschöpft oder es kommt zur Abnahme der Boden-N-Vorräte.

Die präzise Bestimmung des Stickstoffdüngedarfs von Kulturpflanzenbeständen erfordert die Berücksichtigung zahlreicher Einflussfaktoren, vor allem des Ertragspotenzials, der Nährstoffdynamik von Böden, der Pflanzenentwicklung und Nährstoffaufnahme sowie der Witterungsbedingungen in der Vegetationsperiode. Aufgrund der Komplexität der Stickstoffflüsse im System Boden – Pflanze – Umwelt, zahlreicher Interaktionen sowie der kleinräumigen Variabilität von Bodeneigenschaften ist eine exakte N-Düngebedarfsermittlung nach wie vor eine Herausforderung und auch mit digitalen Düngesystemen noch nicht optimal gelöst. Ein Lösungsansatz zur wirksamen Minderung der N-Überschüsse besteht in der Nutzung innovativer Technologien der sensorgestützten Stickstoffdüngung und des digitalen Stickstoffmanagements.

Im Forschungsprojekt wird in Teilprojekt 1 ein sensorgestütztes teilflächenspezifisches N-Düngesystem für die Fruchtart Mais nach dem Verfahren Online + Map-overlay entwickelt. Bisher gab es keine entsprechenden Düngealgorithmen und Düngestrategien für Mais. Mit diesem Düngesystem werden durch die Erfassung der Biomasseentwicklung und des N-Ernährungsstatus der Maisbestände anhand von Vegetationsindices indirekt die N-Nachlieferung des Bodens und die Bodenheterogenität bei der N-Düngung berücksichtigt und dadurch die N-Düngung präzisiert.

In Teilprojekt 2 wird das Potenzial der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung analysiert. Bisher werden N-Salden nur im Mittel von Ackerschlägen ausgewiesen, wodurch die tatsächlichen N-Verluste nur unzureichend erfasst werden. Anhand unterschiedlicher Datenquellen und Analysemethoden (Mähdrischerertragserfassung, Sensordaten, Satellitendaten) werden teilschlagspezifische N-Salden berechnet. Als Einflussfaktoren auf die räumlich variablen N-Salden werden ertragsrelevante Bodenparameter untersucht. Die ökologische Relevanz der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung wird bewertet. Die teilflächenspezifische N-Bilanzierung wird in ein digitales Stickstoffmanagementsystem eingebunden.

Beide Teilprojekte und Untersuchungsansätze – die teilflächenspezifische N-Düngung und die teilflächenspezifische N-Bilanzierung sind eng vernetzt. Beide Ansätze sind in digitale, webbasierte Stickstoffmanagementsysteme integrierbar. Die Projektziele sind somit (a) die Entwicklung eines Verfahrens zur teilflächenspezifischen sensorgesteuerten Stickstoffdüngung von Mais nach dem Verfahren Online + Map-overlay, (b) die Weiterentwicklung eines webbasierten N-Bilanzierungs- und Managementsystems durch ein GIS-gestütztes Tool zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung, (c) die Kopplung beider Systeme und (d) die Praxiserprobung der neuentwickelten Tools.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Teilprojekt 1

Im Projekt werden die Algorithmen und das sensorgestützte Düngesystem für die Fruchtart Mais auf der Grundlage umfangreicher Feldexperimente erarbeitet. Die Anwendbarkeit und Effizienz des Düngesystems wird in Feldversuchen geprüft.

Zur Ableitung der optimalen Stickstoffdüngemenge nach dem Verfahren Online + Map-overlay ist die Kenntnis der optimalen Stickstoffaufnahme während verschiedener Entwicklungsstadien der Pflanze in Abhängigkeit vom Ertragspotenzial notwendig. Je höher das Ertragspotenzial, desto höher die optimale N-Menge in der Pflanze.

Für die Realisierung des Gesamtziels eines Verfahrens zur teilflächenspezifischen sensorgesteuerten Stickstoffdüngung zu Mais sind folgende Teilschritte notwendig:

- Entwicklung von Vegetationsindices, die den N-Status von Mais gut abbilden (Unabhängigkeit von Sorte und Einstrahlungsbedingungen, geringe Sättigungseffekte, weiter Messbereich),
- Entwicklung von Messalgorithmen zur Umrechnung der Werte der Vegetationsindices in Stickstoffaufnahmemengen,
- Ableitung ertragspotenzialabhängiger optimaler Ziel-Stickstoffversorgungszustände von Mais zu verschiedenen Entwicklungsstadien,
- Entwicklung von Düngelgorithmen.

Experimentelle Grundlage von Teilprojekt 1 sind Feldversuche mit Mais. Zusätzlich stehen Daten aus in früheren Jahren durchgeführten Feldexperimenten zur Verfügung, die in die Auswertungen und die Ableitung von Düngelgorithmen einbezogen werden.

Teilprojekt 2

Die Integration der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung in ein webbasiertes Stickstoffmanagementsystem verbindet die teilflächenspezifische Analyse von N-Verlustpotenzialen mit der Modellierung betrieblicher Stickstoffflüsse (= N-Bilanzierung auf unterschiedlichen Systemebenen).

Die Arbeitsschritte sowie die verwendete Methodik umfassen:

- Erarbeitung eines Modellkonzepts für die GIS-gestützte teilflächenspezifische N-Bilanzierung unter Nutzung verschiedener Datenquellen und Analysemethoden. Definition der Anwendungsgebiete, der Zielgrößen und der Aussagen der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung. Ableitung des Datenbedarfs und Definition von Schnittstellen zum effizienten Datenaustausch. Anpassung des N-Bilanzmodells an die Anforderungen der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung.
- Entwicklung eines N-Managementtools zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung und Modellvalidierung. Programmiertechnische Umsetzung des Modellkonzepts. Die Modellerprobung erfolgt zunächst für die Fruchtart Weizen. Anschließend wird das Konzept auf andere Fruchtarten übertragen und erprobt. Die Modellerprobung und -validierung erfolgt auf der TUM-Versuchsstation Roggenstein sowie auf Praxisschlägen im Bayerischen Tertiärhügelland.

-
- Bewertung der Anwendbarkeit der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung in der landwirtschaftlichen Praxis und im Gewässerschutz. Beteiligung von Praxispartnern (landwirtschaftliche Unternehmen, Berater, Wasserwirtschaft) bei der Einschätzung der Praxistauglichkeit und Umsetzbarkeit, des N-Minderungspotenzials und der Umweltrelevanz der Aussagen.

Die Forschungsarbeiten gehen von folgenden Annahmen und Hypothesen aus:

- Die Optimierung des Mineral-N-Einsatzes bei Silomais durch die sensorgestützte teilflächenspezifische Applikation führt ohne Ertragsverluste zu signifikanten N-Effizienzsteigerungen und N-Verlustminderungen.
- Das Verfahren Online + Map-overlay ist geeignet, die N-Effizienz im Maisanbau zu erhöhen, weil der aktuelle Stickstoffernährungsstatus der Pflanzenbestände (Sensor-Ansatz) und das unterschiedliche Ertragspotenzial der Teilschläge (Mapping-Ansatz) berücksichtigt werden.
- Mit den Modellen REPRO und Web-Man können die Ursachen hoher N-Überschüsse in landwirtschaftlichen Betrieben identifiziert und wirksame N-Minderungsstrategien abgeleitet werden.
- Die Kombination beider Ansätze - optimierte Stickstoffkreisläufe und sensorgestützte teilflächenspezifische Düngung - führt zu Synergieeffekten und verbessert die Anwendbarkeit und Akzeptanz beider Systeme.
- Das neue N-Managementtool kann dazu beitragen, Nitratausträge in Trinkwasserschutzgebieten wirksam zu vermindern - insbesondere in Regionen mit intensiver Tierhaltung.

Ergebnisse zur teilflächenspezifischen N-Düngung von Mais

Ein vollständiger Verzicht einer N-Düngung zur Saat führte zu Ertragsverlusten. Eine kombinierte N-Düngung zur Saat und bei 20 cm oder 50 cm Wuchshöhe führte zu gleichen Erträgen wie die alleinige N-Düngung zur Saat. Damit ist eine wichtige Voraussetzung zur Anwendung der sensorgestützten N-Düngung bei Mais gegeben.

Zur Erzielung der Maximalerträge von Silo- und Körnermais reichte stets eine N-Düngermenge, die erheblich unter der entsprechenden N-Abfuhr lag, d.h. Maximalerträge von Silo- und Körnermais können auch bei negativen N-Salden erzielt werden. Die Boden-N-Nachlieferung ist daher bei der Ableitung von N-Düngealgorithmen zu beachten.

Die Pflanzenentwicklung in der Jugendphase von Mais lässt sich mit Reflexionsmessungen umso besser detektieren, je weiter die Pflanzen bereits entwickelt sind. Brauchbare Bestimmtheitsmaße $> 0,7$ werden ab Wuchshöhen von 50 cm erreicht.

Von den vielen geprüften Vegetationsindices erwies sich der SR2 als besonders geeignet. Der häufig verwendete Vegetationsindex NDVI erwies sich als wenig brauchbar.

Reflexionsmessungen des Vegetationsindex SR2 bei 50 cm Wuchshöhe erlauben eine genaue Abschätzung des ergänzenden N-Düngerbedarfs von Mais.

Ergebnisse zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen eine hohe Variabilität der N-Salden auf einheitlich gedüngten Schlägen. Das bedeutet, dass auch bei einer ausgeglichenen N-Bilanz umweltrelevante N-Verluste (z.B. Nitratausträge) auf Teilflächen auftreten können, die bei einer schlageinheitlichen Bilanzrechnung nicht sichtbar werden. Dies wird u.a. an den räumlich variablen N-Salden auf dem Untersuchungsschlag Bergfeld deutlich; sie betragen nach Mährescherdaten 10 (- 116 bis + 72) kg ha⁻¹, nach Sensordaten 24 (-76 bis + 91) kg ha⁻¹ und nach Satellitendaten 62 (-6 bis + 91) kg ha⁻¹. Der N-Saldo dient als Indikator, um das Verlustpotenzial an reaktiven N-Verbindungen anzuzeigen.

Um den N-Saldo auf den Ackerflächen teilflächenspezifisch zu berechnen, wurde die räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge ermittelt. Für Managemententscheidungen im Precision Farming, ist nicht nur die richtige räumliche Verteilung der Ertragspotenziale mit der Unterscheidung von Hoch- und Niedrigertragszonen wichtig, sondern auch das absolute Ertragsniveau. Auch auf Flächen, die nach der Bodenschätzung als weitgehend homogen klassifiziert sind, können bedeutende teilflächenspezifische Unterschiede der Erträge, der N-Entzüge und der N-Salden auftreten. So zeigte der mit dem Mährescher durch Volumenstrommessung ermittelte Weizenertrag der Ackerfläche Bergfeld eine ausgeprägte Variabilität (Ertragsschwankung von 6,2 bis 16,0) t ha⁻¹.

Durch die Bestimmung von Bodenparametern an georeferenziert gewonnenen Bodenproben wurden Einflussfaktoren auf die variierenden N-Salden erfasst. Anhand der Untersuchungsergebnisse ist einzuschätzen, dass sich die angewandten Technologien grundsätzlich für die Bestimmung von Ertrag und N-Entzug eignen; dies zeigen die Korrelationen z.B. auf der Ackerfläche Bergfeld zwischen Mährescher und Sensor ($R^2 = 0,58$), Mährescher und Satellit ($R^2 = 0,33$) sowie Sensor und Satellit ($R^2 = 0,47$). Auf den Untersuchungsschlägen hatten der C_{org} -Gehalt, der N_t -Gehalt und die nFK den stärksten Einfluss auf den Ertrag und N-Entzug. Der C_{org} -Gehalt korrelierte auf dem Untersuchungsschlag Bergfeld eng mit dem N_t -Gehalt ($R^2 = 0,94$) sowie relativ eng mit der nutzbaren Feldkapazität ($R^2 = 0,47$) und dem Bodenwassergehalt ($R^2 = 0,42$).

Fazit

Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse ist einzuschätzen, dass eine teilflächenspezifische N-Bilanzierung auf der Basis moderner Technologien unter Praxisbedingungen möglich und sinnvoll ist. Diese digitalen Tools können für eine Minderung von umweltrelevanten N-Emissionen (z.B. im Trinkwasserschutz) eingesetzt werden. In weiteren Untersuchungen sollte analysiert werden, ob die in dieser Arbeit verwendeten Datenquellen und Methoden auch bei mehrjährigen Analysen und bei abweichenden Bedingungen in Bezug auf Fruchtart, Klima und Bewirtschaftung zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

Die Projektergebnisse zeigen, dass die Verknüpfung der sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung und N-Bilanzierung mit der betrieblichen Stickstoffbilanzierung ein hohes Potenzial zur N-Emissionsminderung in landwirtschaftlichen Betrieben aufweist.

Auf der Grundlage der Projektergebnisse ergeben sich neue Ansatzpunkte für Forschungsarbeiten und Folgeprojekte, z.B. (a) die Ableitung von Düngealgorithmen für eine grundwasserschonende Bewirtschaftung in Trinkwasserschutzgebieten, (b) die Modellierung umweltrelevanter Stickstoffflüsse auf unterschiedlichen Skalenebenen – vom Teilschlag über den Betrieb bis zur Agrarlandschaft unter Nutzung von Sensor- und Satellitendaten.

1 Zielstellung des Projektes

1.1 Problemstellung

In der Bundesrepublik Deutschland sind die N-Salden seit Jahren mit 90 bis 100 kg ha⁻¹ a⁻¹ auf zu hohem Niveau; dies führt zu umwelt- und klimarelevanten N-Emissionen. Besonders hohe N-Verluste treten in Betrieben und Regionen mit hohem Tierbesatz (> 2 GV ha⁻¹) auf (Wechsung, 2002, Wiesler et al. (2016). Durch den Bau von Biogasanlagen in diesen Gebieten wurde die N-Überschussproblematik weiter verschärft (Böswirth 2017b).

Der intensive Anbau von Mais mit hohen Gaben organischer Dünger, die nicht immer effizient verwertet werden, ist aus ökologischen Gründen (hohe N_{min}-Gehalte und Nitratausträge) problematisch. Die Anbaufläche von Mais ist in der Bundesrepublik Deutschland in den letzten Jahren deutlich gestiegen (2006: 1,7 Mio. ha, 2017: 2,6 Mio. ha, davon > 75 % Silomais) (FNR 2017). Dabei ist der Silomaisanbau meist mit intensiver organischer Düngung gekoppelt (Gülle aus der Tierhaltung, Gärreste aus der Biogaserzeugung). Bei langjähriger organischer Düngung können die Boden-N-Vorräte und das N-Mineralisationspotenzial zum Teil erheblich ansteigen (Köhler et al. 2006). Je nach Jahreswitterung kommt es zu Mineralisierungsschüben in unterschiedlicher Höhe und zu verschiedenen Terminen. Nicht immer fallen diese Mineralisationsschübe mit dem Nährstoffbedarf bzw. der N-Aufnahme der Pflanzen zusammen. Zudem bleibt die N-Mineralisierung bei der Mineral-N-Düngung oftmals unberücksichtigt. Dies mindert die N-Effizienz und führt zu Konflikten mit dem Trinkwasserschutz (Ruijter et al. 2007).

Aufgrund von Bodenunterschieden (Textur, Relief) weisen landwirtschaftliche Nutzflächen eine Heterogenität der N-Nachlieferung und der Ertragsbildung auf. Bei einheitlicher N-Düngung kommt es in Niedrigertragszonen zur Überdüngung, während in Hohertragszonen negative N-Salden auftreten können. Hohe N-Überschüsse in den Niedrigertragszonen führen zu ökologischen Problemen und ökonomischen Nachteilen. In den Hohertragszonen kommt es bei mehrjährig negativen N-Salden zur Abnahme der Boden-N-Vorräte und der Ertragsfähigkeit. Eine Lösung dieser Probleme bietet die sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung (Limbrunner und Maidl 2009; Maidl 2011, 2012).

In Trinkwasserschutzgebieten brachten maßnahmenorientierte Ansätze zur Minderung von Nitratausträgen (Fruchtfolgeanpassung, Zwischenfruchtanbau, Beratung etc.) nicht immer die gewünschten Erfolge. Zielorientierte Ansätze wie etwa die Vorgabe einzuhaltender N-Salden und Nitratgehalte im Grundwasser, bieten den Landwirten mehr Flexibilität im Management, erfordern aber leistungsfähige Stickstoffmanagementtools, um positive Umwelteffekte zu erreichen.

1.2 Forschungsbedarf

In landwirtschaftlichen Betrieben entstehen umweltrelevante N-Verluste sowohl im Pflanzenbau (Lachgas, Ammoniak, Nitrat) als auch in der Tierhaltung, z.B. im Stall, bei der Lagerung und Aufbereitung der Wirtschaftsdünger, beim Weidegang. Die betriebliche N-Effizienz und die N-Emissionen sind von zahlreichen Faktoren abhängig:

- den Standortbedingungen (Boden, Witterung, Ertragspotenzial),
- den Betriebsstrukturen (z.B. Tierbesatz, Anbaustruktur und Fruchtfolge),
- der Produktionsintensität (z.B. Stickstoffdüngung, Ertragsleistungen) und
- der Verfahrensgestaltung (z.B. N-Applikationstechnik).

Ein leistungsfähiges betriebliches N-Managementsystem muss diese verschiedenen Einflussfaktoren und deren Interaktionen berücksichtigen. Bei der Minderung von N-Verlusten standen bisher jedoch Einzelmaßnahmen im Vordergrund – integrierte Managementsysteme fehlen weitgehend.

Mit dem Modell REPRO (Küstermann et al. 2010) wurde ein betriebliches N-Bilanzierungssystem entwickelt, mit dem alle relevanten N-Flüsse im System Boden – Pflanze – Tier – Umwelt abgebildet werden können. Dabei bietet das Modell die Möglichkeit, standort- und betriebsbezogene Ursachen geringer N-Effizienz und überhöhter N-Verluste aufzudecken und zielgerichtete N-Minderungsstrategien abzuleiten (Analyse, Bewertung und Optimierung). Aufgrund der Komplexität, der erforderlichen Spezialkenntnisse und der umfangreichen Eingangsdaten, kommt dieses Modell vorwiegend in der Wissenschaft und noch zu wenig in der landwirtschaftlichen Praxis zur Anwendung. Eine Weiterentwicklung des Modells REPRO ist das webbasierte Nährstoffmanagementsystem Web-Man, das neben Modulen zur betrieblichen N-Bilanzierung auch Modellkomponenten zur N-Düngebedarfsermittlung und zur Modellierung von Nitratausträgen enthält. Web-Man enthält GIS-Komponenten (Abbildung von Teilschlägen und Bodeninformationen, Schnittstellen zum Import teilschlagspezifischer Daten) und ist daher für die Integration von Modulen zur teilflächenspezifischen N-Düngung und N-Bilanzierung gut geeignet.

Die Techniken des Precision Farming, vor allem die sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung nach dem System Online + Map-overlay, besitzen ein hohes N-Minderungspotenzial ohne negative Ertragseffekte (Hülsbergen et al. 2017, Maidl et al. 2019). Die Praxisanwendungen sind jedoch sehr begrenzt, aufgrund noch bestehender technischer Unzulänglichkeiten, der Anwendbarkeit bei nur wenigen Fruchtarten (Winterweizen, Wintergerste, Winterraps) und nicht unerheblicher Kosten der Sensor- und Düngeysteme. Derzeit gibt es noch keine praxisanwendbaren N-Düngealgorithmen für die Fruchtart Mais, obwohl gerade diese Kultur von zentraler Bedeutung für die Erhöhung der N-Effizienz landwirtschaftlicher Betriebe ist.

Die Verbindung beider N-Managementtools – der N-Bilanzierung zur Analyse und Optimierung betrieblicher Stoffkreisläufe und der sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung – kann zu Synergieeffekten führen, die Leistungsfähigkeit beider Ansätze erhöhen, neue Anwendungsgebiete erschließen und die Akzeptanz in der Praxis verbessern.

1.3 Forschungsansatz

Die Innovation des Forschungsprojektes besteht darin, verschiedene N-Managementtools – die betriebliche und teilflächenspezifische Stickstoffbilanzierung (Mittermayer et al. 2020) sowie die sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung nach dem System Online + Map-overlay (Maidl 2011) weiterzuentwickeln und zu einem praxistauglichen Gesamtsystem zu verbinden.

Im Projekt sollen folgende Ziele erreicht werden:

- a) die Entwicklung eines Verfahrens zur teilflächenspezifischen sensorgesteuerten Stickstoffdüngung von Mais nach dem Verfahren *Online + Map-overlay*,
- b) die Weiterentwicklung des Modells REPRO (bzw. des darauf aufbauenden Modells Web-Man) durch ein GIS-gestütztes Tool zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung,

-
- c) die Kopplung der Systeme. Hierbei wird ein effizienter Datenaustausch angestrebt, um georeferenzierte Daten auf Schlagebene hinsichtlich des Stickstoffmanagements generieren zu können. Das sensorgestützte N-Düngesystem liefert dabei räumlich hochauflösende Daten (teilflächenspezifische Erträge, N-Entzüge, N-Düngung), die zur teilschlagspezifischen N-Bilanzierung (Ermittlung der N-Salden und Nitrataustragpotenziale) verwendet werden,
 - d) die Praxiserprobung und Modellvalidierung in landwirtschaftlichen Versuchsstationen der Technischen Universität München sowie in landwirtschaftlichen Betrieben.

1.4 Arbeitshypothesen

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden nachfolgende Arbeitshypothesen geprüft:

- 1) Die Optimierung des Gülle- und Mineral-N-Einsatzes bei Silomais durch die sensorgestützte teilflächenspezifische Applikation führt ohne Ertragsverluste zu signifikanten N-Effizienzsteigerungen und N-Verlustminderungen.
- 2) Das Verfahren *Online + Map-overlay* ist geeignet, die N-Effizienz im Maisanbau zu erhöhen, weil der aktuelle Stickstoffernährungsstatus der Pflanzenbestände (Sensor-Ansatz) und das unterschiedliche Ertragspotenzial der Teilschläge (Mapping-Ansatz) berücksichtigt werden.
- 3) Mit den Modellen REPRO und Web-Man können die Ursachen hoher N-Überschüsse in landwirtschaftlichen Betrieben identifiziert und wirksame N-Minderungsstrategien abgeleitet werden.
- 4) Die Kombination beider Ansätze – optimierte Stickstoffkreisläufe und sensorgestützte teilflächenspezifische Düngung – führt zu Synergieeffekten und verbessert die Anwendbarkeit und Akzeptanz beider Systeme.
- 5) Das neue N-Managementtool kann dazu beitragen, Nitratausträge in Trinkwasserschutzgebieten wirksam zu vermindern – insbesondere in Regionen mit intensiver Tierhaltung.

1.5 Projektzeitplan

Die Projektarbeiten waren für den Zeitraum 01.01.2017 bis 31.12.2019 geplant. Auf Antrag der TU München wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.08.2020 bewilligt.

2 Stand des Wissens und der Technik

2.1 Teilprojekt 1: Sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung

2.1.1 Sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung

Die meisten landwirtschaftlichen Nutzflächen weisen eine mehr oder minder große Bodenheterogenität auf. Dies führt zu unterschiedlichem Pflanzenwachstum, unterschiedlichen Erträgen und stark variierenden Nährstoffentzügen. Flächeneinheitliche Düngung führt auf heterogenen Flächen zu Nährstoffüberschüssen bzw. zur Nährstoffunterversorgung auf Teilflächen. Eine Nährstoffüber- und -unterversorgung ist weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll. Mit der Zunahme der Schlag- und Betriebsgrößen verschärft sich dieses Problem. Aus Arbeits- und Kostengründen ist es nicht möglich, jährlich teilflächenspezifisch Bodenproben für eine N-Düngerbedarfsermittlung zu nehmen.

In Betrieben mit intensiver Viehhaltung ergeben sich weitere Probleme. Zum einen fehlen genaue Angaben zu den N-Gehalten organischer Dünger, insbesondere der Gülle, da die Trockenmasse- und Nährstoffgehalte in Abhängigkeit von Tierart, Tierleistung, Fütterung, Lagerung, Aufbereitung und Homogenisierung stark variieren; eine repräsentative Beprobung ist nicht immer möglich. Ferner variieren in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen die NH_3 -Verluste bei der Ausbringung organischer Dünger sehr stark. Zudem führt die unterschiedliche Jahreswitterung zu einer großen mengenmäßigen und zeitlichen Variation der Nährstoffverfügbarkeit aus organischen Düngern (Maidl 2004).

Während der Wachstumsphase landwirtschaftlicher Kulturpflanzen lässt sich der aktuelle N-Düngerbedarf wesentlich genauer und schneller mit berührungslos arbeitenden Sensoren ermitteln (Oikeh et al. 2003, Shaver et al. 2010). Durch Sensoren, die den N-Ernährungsstatus (Biomasse, N-Aufnahme) der Pflanzen erfassen, werden die N-Wirkung der organischen Dünger sowie die N-Nachlieferung aus dem Boden einbezogen und so der Mineral-N-Bedarf zielgenauer abgeschätzt (Montemurro et al. 2006).

2.1.2 Grundlagen der Pflanzenreflexion

Zur Bestimmung des Nährstoffstatus der Pflanzen werden heute überwiegend Reflexionssensoren verwendet. Innerhalb der Gruppe von Reflexionssensoren ist zu unterscheiden zwischen passiv und aktiv arbeitenden Sensoren. Passive Sensoren verwenden das Sonnenlicht, können also nur am Tag eingesetzt werden. Aktive Sensoren sind mit eigener Lichtquelle ausgestattet und erlauben damit auch Messungen während der Nacht. Im Bereich des sichtbaren Lichts ($< 670 \text{ nm}$) ist die Reflexion gering. Dieses Licht wird für die Photosynthese genutzt. Je höher die N-Düngung desto höher der Chlorophyllgehalt in der Pflanze und damit die Photosynthese. Das Ergebnis ist eine Abnahme der Reflexion im sichtbaren Bereich ($< 670 \text{ nm}$) mit steigender Stickstoffversorgung. Im Nahinfrarotbereich ($> 720 \text{ nm}$) sind die Reflexionsverhältnisse umgekehrt. Nahinfrarotlicht wird von den Pflanzen reflektiert und vom Boden verschluckt. Je größer die Biomasse, umso mehr Nahinfrarotlicht wird reflektiert. Aus der Höhe der Reflexion in bestimmten Wellenlängenbereichen kann so auf den Stickstoffstatus der Pflanzen geschlossen werden. Derartige Messungen lassen sich mit hoher Frequenz (300 – 1000 Messungen pro Sekunde) durchführen, so dass diese während der Traktorüberfahrt ausgeführt werden können.

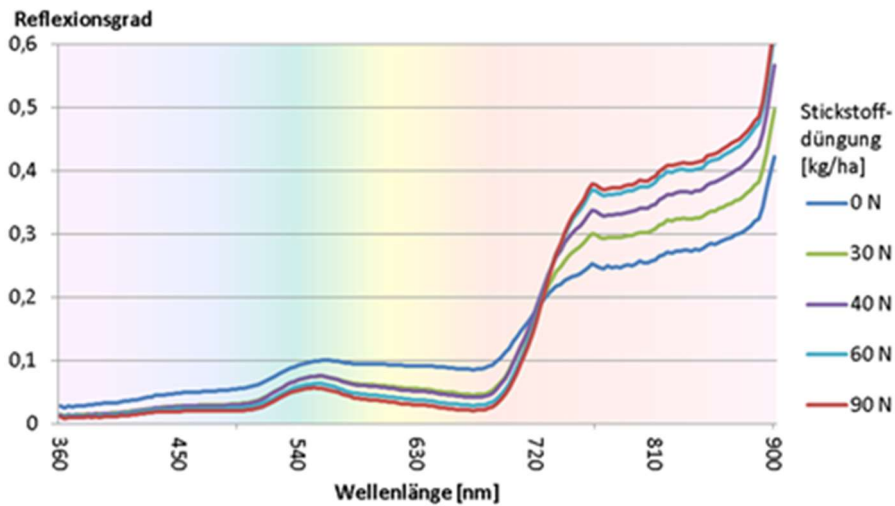


Abbildung 1: Reflexionsspektren von Winterweizen

Eine wissenschaftliche Herausforderung liegt in der optimalen Auswahl verschiedener Wellenlängen zur Berechnung von Vegetationsindices. Bekannte Vegetationsindices sind NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SRI (Simple Ratio), SAVI (Soil Adjusted Vegetationindex), REIP (Red Edge Inflection Point). An die Vegetationsindices sind vielfältige Anforderungen zu stellen, unter anderem:

- gute Abbildung der Messgröße (z.B. des N-Aufnahme in der Biomasse),
- großer Messbereich,
- Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen (Strahlung, Nässe, ...),
- Sortenunabhängigkeit.

2.1.3 Messalgorithmen

Bei Reflexionsmessungen handelt es sich um indirekte Messungen. Die Umrechnung der Vegetationsindices in pflanzenbaulich relevante Größen (z.B. Biomasse in dt ha^{-1} , N-Aufnahme in kg ha^{-1}) erfolgt mit Algorithmen. Diese Umrechnungen werden als Messalgorithmen bezeichnet. Zu beachten ist bei Reflexionsmessungen, dass mit zunehmender Pflanzengröße der Beitrag der unteren Blätter und Stängel eines Pflanzenbestandes sinkt. Je nach Pflanzengröße bedeutet daher ein und derselbe Wert eines Vegetationsindices eine unterschiedliche Stickstoffversorgung (Abbildung 2). Für eine genaue Abschätzung von Pflanzenparametern (z.B. N-Aufnahme) ist daher eine möglichst starke Aufgliederung der Entwicklungszeit der Pflanze in viele stadienspezifische Messalgorithmen notwendig.

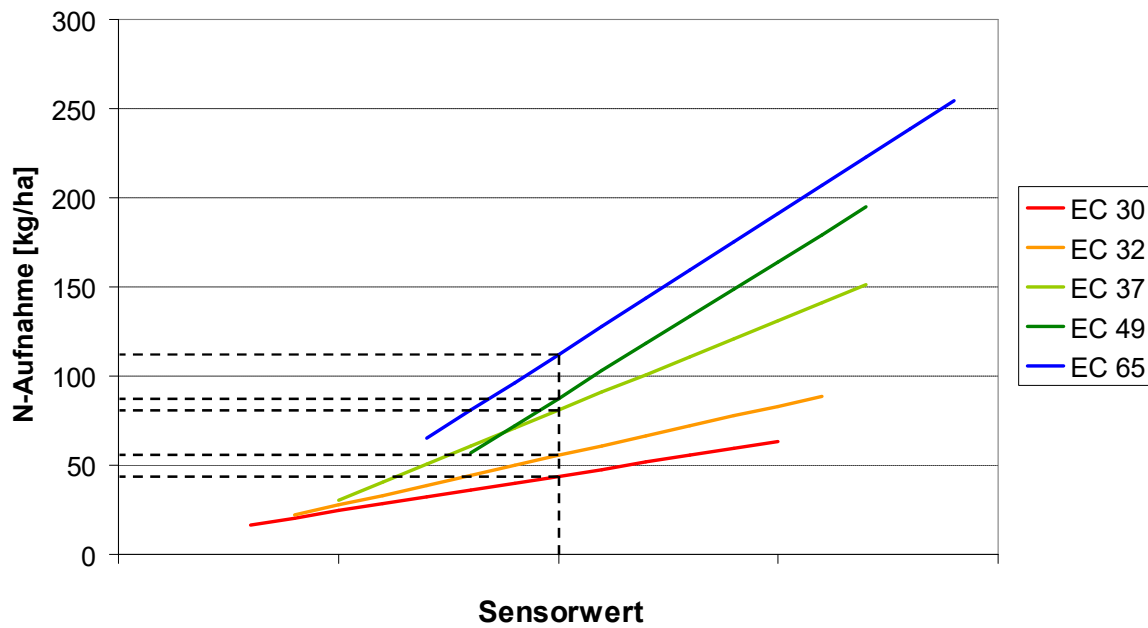


Abbildung 2: Stadienabhängigkeit des Sensorwertes

2.1.4 Verfahren der teilschlagbezogenen Düngung

Drei verschiedene Verfahren der teilschlagbezogenen Düngung werden unterschieden – „Mapping“, „Online“ und „Online + Map-Overlay“.

Unter Mapping-Ansatz wird die Steuerung der Düngung mittels historischer Schlaginformationen zusammengefasst. Als Basis zur Düngerbemessung dienen Boden- und Ertragskarten. Es ist kein Sensor notwendig. Die N-Düngung erfolgt je nach Ertragspotential des Teilschlages, z.B. hoch, mittel, niedrig. Nachteil bei diesem Verfahren ist, dass die aktuelle Pflanzenentwicklung nicht berücksichtigt wird.

Beim Online-Verfahren erfolgt die Düngung ausschließlich nach dem Versorgungszustand der Pflanzen (Abbildung 3). Schwach ernährte Pflanzen werden stark, kräftig ernährte Pflanzen mäßig gedüngt. Dabei wird in der praktischen Anwendung die Pflanzenreflektion in Echtzeit in einen Düngewert umgerechnet und dieser Wert an den Düngestreuer weitergegeben. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass Niedrigertragsbereiche häufig überdüngt werden, da dort die Nährstoffversorgung meist gering ist. Hohertragsbereiche werden schwach gedüngt, da die Pflanzen eine hohe Nährstoffversorgung aufweisen. Ein weiteres Charakteristikum ist, dass zu einem Düngetermin für den gesamten Schlag eine Applikationskurve verwendet wird.

Die beiden beschriebenen Möglichkeiten der teilflächenspezifischen Düngung können zu einem dritten Verfahren kombiniert werden, dem Verfahren Online + Map-Overlay. Bei diesem Ansatz erfasst der Sensor bei der Überfahrt den Ernährungszustand des Pflanzenbestandes. Gleichzeitig werden über hinterlegte Ertrags- oder Bodendaten weitere Information für die schlagspezifische Düngung bereitgestellt. Über den Mapping-Ansatz wird das mögliche Ertragspotential (hoch, mittel, niedrig) als „Basis“ festgelegt und dann mit der vom Sensor gemessenen jeweiligen N-Aufnahme korrigiert. Bei diesem Verfahren wird für jeden Teilschlag eine separate Applikationskurve verwendet. Ergeben sich drei verschiedene Ertragszonen, so finden pro Schlag und Düngetermin drei Applikationskurven Anwendung.

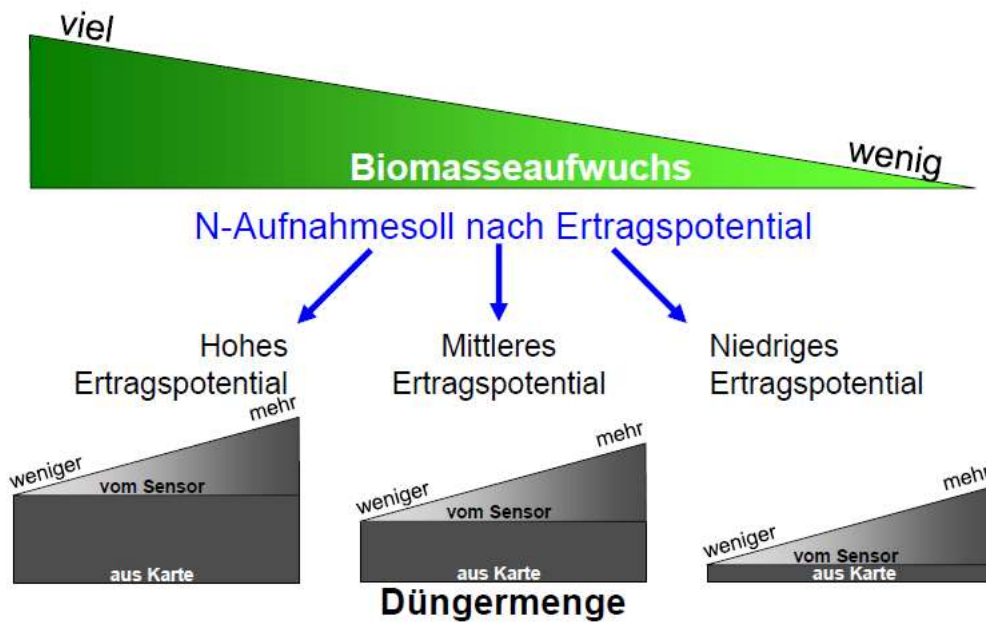


Abbildung 3: N-Düngerbemessung beim Verfahren Online + Map-Overlay

2.1.5 Düngelgorithmen

Auf verschiedenen Standorten mit unterschiedlicher Ertragsfähigkeit durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass in Abhängigkeit vom Ertragspotential eine optimale N-Aufnahme zu den verschiedenen Entwicklungsstadien von Winterweizen anzustreben ist (Abbildung 4). In frühen Entwicklungsstadien ist der Effekt des standortspezifischen Ertragspotentials hinsichtlich der notwendigen N-Aufnahme gering, mit zunehmendem EC-Stadium gibt es jedoch deutliche Differenzierungen. Die optimalen N-Aufnahmekurven unterscheiden sich auch entsprechend des angestrebten Proteingehalts im Korn bzw. der Qualitätsstufe von Weizen.

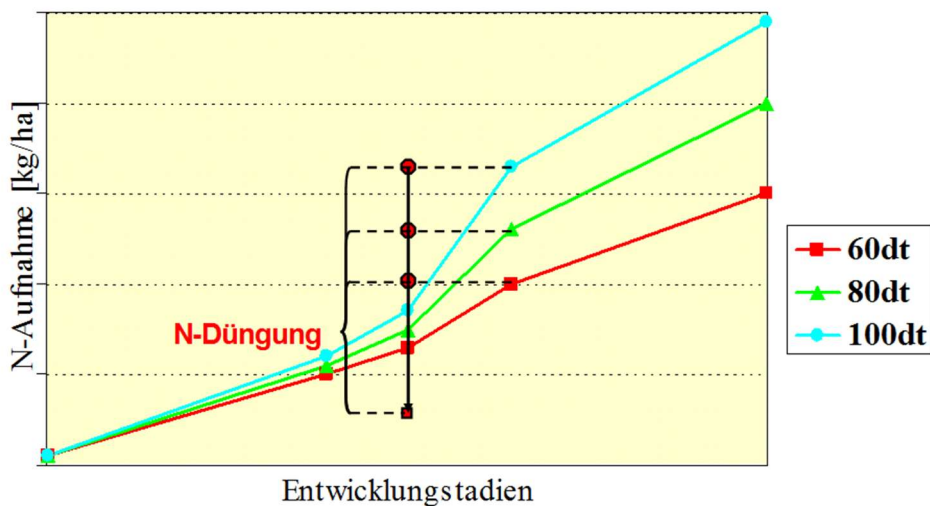


Abbildung 4: N-Düngung von Weizen auf Teilschlägen unterschiedlicher Ertragsfähigkeit

Grundlage für das Bemessen der Stickstoffdüngermenge bilden die für die einzelnen Ertragsniveaus und Qualitätsstufen ermittelten optimalen N-Aufnahmekurven, anhand derer die für das weitere Wachstum benötigte Stickstoffdüngermenge berechnet wird (Abbildung 4).

Die für ein Entwicklungsstadium optimale N-Aufnahme wird mit der vom Sensor ermittelten N-Aufnahme verglichen. Fehlbeträge werden auf die Düngeempfehlung aufgeschlagen, während bei einer Überversorgung eine Reduktion der ausgebrachten N-Menge erfolgt. In die aktuelle Düngeempfehlung gehen zudem die Wirkungskdauer des Düngers, die N-Immobilisierung und N-Mineralisierung sowie die Düngerausnutzungsrate ein (Maidl, 2011).

2.2 Teilprojekt 2: Modellgestützte Analyse, Bewertung und Optimierung betrieblicher Stickstoffkreisläufe

2.2.1 Stickstoffeffizienz in der Landwirtschaft

Seit langem wird kritisiert, dass die N-Effizienz der Landwirtschaft zu gering und die N-Emissionen aus Sicht des Umweltschutzes zu hoch sind (Isermann 1990; van der Ploeg et al. 1997; Crutzen et al. 2008). Als Zielwert für die N-Effizienz in Europa nennen Zhang et al. (2015) einen Wert von 75 %. Leip et al. (2011) geben eine N-Effizienz der pflanzlichen Produktion in Europa von 65 % an, während Deutschland mit ca. 68 % eine etwas höhere N-Effizienz aufweist. Untersuchungen aus Praxisbetrieben in Deutschland und Frankreich belegen, dass unter optimaler Bewirtschaftung im Pflanzenbau eine N-Effizienz von bis zu 90 % erreicht werden kann (Küstermann et al. 2010; Anglade et al. 2015).

Für die Landwirtschaft wurden verschiedene Einzelmaßnahmen und N-Minderungsstrategien vorgeschlagen (Isermann 1994; Eichler und Schulz 1998), ohne jedoch bisher ausreichende Erfolge zu erzielen. Moderne Technologien der N-Bedarfsermittlung von Pflanzenbeständen sowie der Einsatz der sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung sind wichtige Ansatzpunkte zur Erhöhung der N-Effizienz im Pflanzenbau.

In der Tierhaltung wird, bedingt durch biologische Stoffwechselprozesse, nur eine N-Effizienz von rund 10 % in der Rindermast bis 35 % in der Milchproduktion erreicht. Die N-Effizienz in der Mastschweinehaltung liegt in Europa bei rund 33 % (Dourmad et al. 1999, Hou et al. 2016). Während in den tierischen Exkrementen zwischen 65 bis 90 % des mit Futtermitteln zugeführten Stickstoffs enthalten sind (Frank 2014), kann in modernen Biogassystemen mit gasdichten Gärrestbehältern davon ausgegangen werden, dass die mit der Biomasse zugeführte Stickstoffmenge nahezu vollständig im Gärrest enthalten ist (Böswirth 2017b). Es ist es notwendig, diese anfallenden N-Mengen möglichst verlustarm im Pflanzenbau einzusetzen. Dem steht jedoch vielfach die betriebliche oder regionale Trennung von Pflanzenbau und Tierhaltung entgegen. In Gebieten mit intensiver Tierhaltung (Tierbesatz über 2 GV ha⁻¹) kommt es häufig zu überlasteten N-Kreisläufen mit hohen N-Verlusten.

Dies zeigt, dass es im Pflanzenbau und in der Tierhaltung dringend erforderlich ist, eine höhere N-Verwertung anzustreben. Aufgrund der Vielzahl an negativen Umweltwirkungen, die mit einer schlechten Stickstoffverwertung einhergehen, wird eine Verbesserung der N-Effizienz als unbedingt notwendig erachtet (Rockström et al. 2009).

2.2.2 Modelle zur Bilanzierung von Stickstoffkreisläufen

Es besteht großer Bedarf, die N-Kreisläufe auf der Ebene landwirtschaftlicher Betriebssysteme zu optimieren. Um die komplexen betrieblichen N-Flüsse und deren Interaktionen abbilden und darauf aufbauend standort- und betriebsspezifische N-Minderungsstrategien ableiten zu können, bedarf es leistungsfähiger Modelle und Beratungsinstrumente. Die am häufigsten verwendete Methode zur Analyse der N-Flüsse auf Betriebsebene ist die N-Bilanzierung (Schröder et al. 2003). Der mit Bilanzen berechnete N-Saldo beschreibt das N-Verlustpotenzial an reaktiven N-Verbindungen (Oenema et al. 2003). In einfachen Input-Output-Analysen (Hoftorbilanz) werden Betriebe als „*Black Box*“ betrachtet, die innerbetrieblichen Strukturen, Stickstoffflüsse und Interaktionen bleiben unberücksichtigt. Um Managemententscheidungen zu unterstützen ist es aber wichtig, die betrieblichen Stoffflüsse detailliert zu beschreiben (Küstermann et al. 2010; Böswirth 2017b). Auf diese Weise wird es möglich, Ursachen für eine geringe N-Effizienz und überhöhte N-Salden zu ermitteln und integrierte Minderungsstrategien abzuleiten (Watson et al. 2002; Oenema et al. 2003).

Trotz aller Bemühungen ist es bisher noch nicht gelungen, eine allgemein anerkannte N-Bilanzierungsmethode für landwirtschaftliche Betriebssysteme zu entwickeln. Nach Halberg et al. (2005) und Goodlass et al. (2003) können N-Bilanzmodelle unterschieden werden hinsichtlich

- der Systemebene: Betriebsebene (Hoftorbilanz, Eckert et al. (2000)), Pflanzenbau (Boden- oder flächenbezogene N-Bilanz, Schröder et al. (2003), Oenema et al. (2003)), Tierhaltung (Stallbilanz, Powell et al. (2010)),
- der berücksichtigten N-Flüsse und N-Pools (Oenema et al. 2003),
- der N-Bilanzkoeffizienten und Algorithmen (Schröder et al. 2003),
- der Datengrundlagen: Messdaten (Schröder et al. 2003), Schätz- und Kalkulationsdaten (Eckert et al. 2000) sowie statistische Daten (van der Ploeg et al. 1997).

Daher ist es bei der N-Bilanzierung außerordentlich wichtig, die methodischen Grundlagen exakt zu beschreiben, um die Ergebnisse interpretieren und einordnen zu können.

Modell REPRO

Das Modell REPRO und das darauf basierende, neuentwickelte webbasierte Nährstoffmanagementsystem Web-Man bilden eine methodische Grundlage des Projektes.

REPRO ist auf die Analyse der Stoffkreisläufe (Abbildung 5) und Umweltwirkungen landwirtschaftlicher Betriebssysteme ausgerichtet (Hülsbergen 2003; Hülsbergen und Küstermann 2007; Hülsbergen 2009). Die Modellentwicklung hatte zum Ziel, einen system- und prozessorientierten Analyseansatz in eine praxisanwendbare Software zu integrieren.

REPRO ist hierarchisch aufgebaut. Niedere Systemebenen (Schläge, Pflanzenbestände, Produkte) werden als Elemente höherer Systemebenen (Fruchtfolgen, Betrieb) aufgefasst. Interaktionen zwischen Betriebsteilen, z.B. Pflanzenbau und Tierhaltung oder Ackerland und Grünland, werden als Stoff- und Energieflüsse dargestellt. Wechselbeziehungen mit der Umwelt beinhalten u. a. die In- und Outputs über die Betriebsgrenze. Damit unterscheidet sich das Modellkonzept wesentlich von „*Black Box*“-Ansätzen. Die Auflösung der innerbetrieblichen Stoffflussbeziehungen und die prozessorientierte Analyse ermöglichen Aussagen zu Ursachen und zum Entstehungsort von Umwelteffekten. Dieser Ansatz ist auch Grundlage für Schwachstellenanalysen und die Ableitung von Optimierungsstrategien.

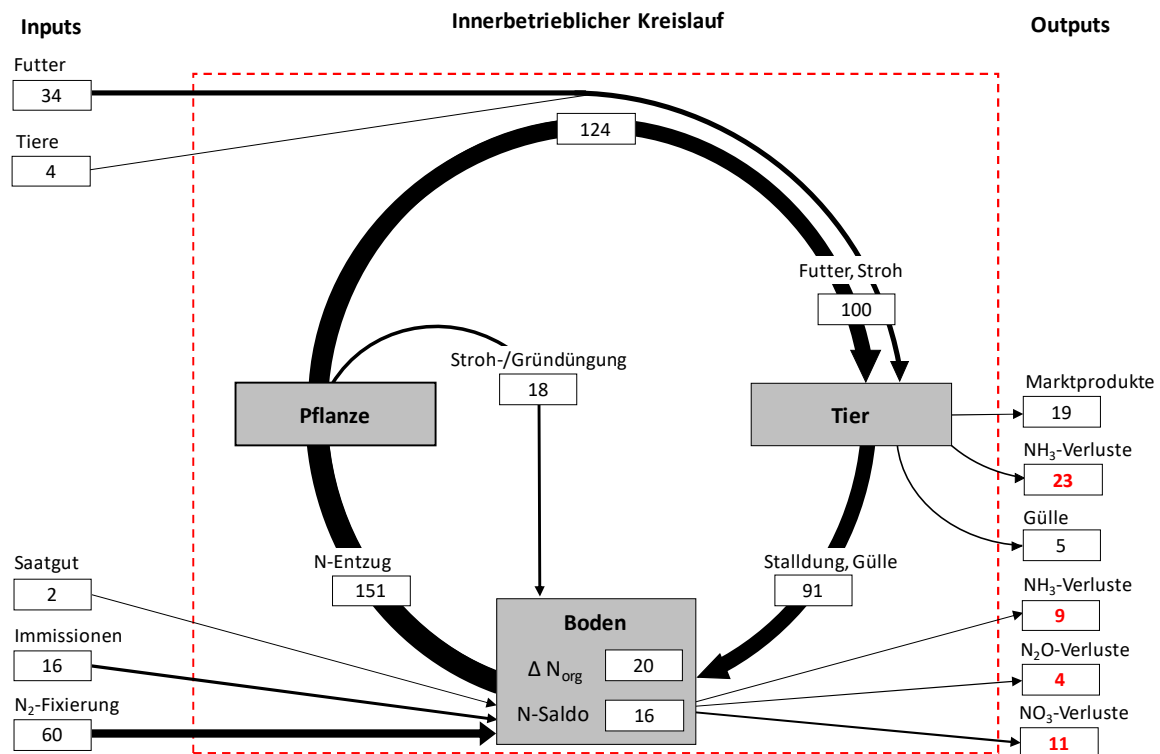


Abbildung 5: Beispiel für einen betrieblichen Stickstoffkreislauf, modelliert mit REPRO (Küstermann et al. 2010)

Die im Modell erfassten N-Flüsse und N-Pools, die verwendeten Algorithmen und N-Bilanzparameter sowie die Bewertungsfunktionen sind detailliert beschrieben (Abraham 2001; Hülsbergen 2003; Küstermann et al. 2010). Mit dem Modell können Landwirtschaftsbetriebe als Systeme abgebildet werden, die auf Managementmaßnahmen, z.B. Veränderungen der Struktur, der Intensität und der Verfahren, reagieren. Das Modell enthält Methoden, um N-Flüsse auf der Basis einfach zu erfassender Standort- und Betriebsdaten zu berechnen. So werden beispielsweise die N-Anfallmengen der Wirtschaftsdünger anhand des Tierbestandes, der Fütterung (Proteinversorgung), der Tierleistungen, der Aufstallungsart sowie der Wirtschaftsdüngerlagerung und -aufbereitung kalkuliert.

Im REPRO-Modul N-Umsatz werden unter Berücksichtigung des Witterungsverlaufs, der Bodeneigenschaften, des Bodenprofilaufbaus sowie relevanter Managementmaßnahmen (z.B. Menge und Zeitpunkt einer N-Düngung, Termin eines Klee grasumbruchs) die N-Mineralisierung und N-Immobilisierung sowie die N-Verluste quantifiziert. Der Systemansatz erlaubt es, Ursachen unterschiedlicher N-Effizienz aufzudecken und in Szenariorechnungen umsetzbare N-Minderungsstrategien zu prüfen. Das Modell wurde so konzipiert und mit Parametern unterlegt, dass es unabhängig vom Intensitätsniveau (in Low- oder High-Input-Systemen) und der Betriebsstruktur eingesetzt werden kann. Es ist gleichermaßen für Anwendungen in ökologischen und konventionellen Betriebssystemen geeignet (Hülsbergen und Küstermann 2007). Bisher werden im Modell REPRO die flächenbezogenen N-Bilanzen (N-Flüsse, N-Salden und N-Effizienz) im Mittel von Schlägen berechnet. Eine räumlich differenzierte N-Bilanzierung von Teilschlägen sowie die Darstellung teilflächenspezifischer N-Salden ist mit REPRO nicht möglich; eine entsprechende GIS-Komponente fehlt.

Webbasiertes Nährstoffmanagementsystem Web-Man

Das neue digitale Nährstoffmanagementsystem Web-Man¹ weist gegenüber REPRO zahlreiche Innovationen und einen deutlich erweiterten Leistungsumfang auf. Während REPRO auf die Analyse von betrieblichen Nährstoffkreisläufen fokussiert ist, enthält Web-Man zusätzliche Module zur Düngbedarfsermittlung (nach der Düngverordnung und dem Düngesystem BEFU) und ein noch in der Entwicklung befindliches Entscheidungsunterstützungssystem (Abbildung 6).

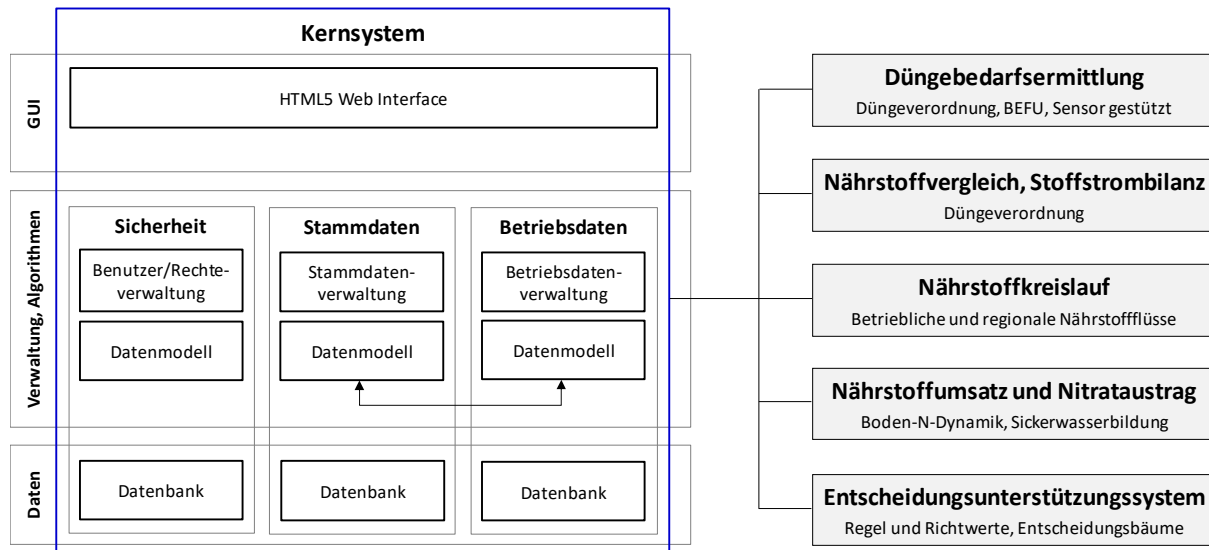


Abbildung 6: Modularer Aufbau des webbasierten Nährstoffmanagementsystems Web-Man mit dem Kernsystem (Verwaltung von Stammdaten- und Betriebsdaten) sowie Modulen zum Nährstoffmanagement

Web-Man hat ein integriertes GIS zur Verwaltung und Auswertung teilflächenspezifischer Daten (Standortinformationen, Erträge, N-Entzüge, etc.) mit Schnittstellen für den Datenimport. Damit eignet sich Web-Man prinzipiell für die Vernetzung mit sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngesystemen sowie für die Integration eines Moduls zur teilschlagspezifischen N-Bilanzierung.

Das Managementsystem besteht aus einem Kernsystem zum Verwalten von Stamm- und Betriebsdaten. Berechnungen und Algorithmen werden als Module in das System integriert (Abbildung 6). Durch die modulare Struktur ist eine Erweiterung möglich. Zur Integration neuer Module für ein teilflächenspezifisches Management muss das Kernsystem angepasst und um neue Stamm- und Betriebsdaten erweitert werden.

¹ Web-Man wird im Rahmen des FE-Projektes „Webbasiertes Nährstoff-Management im ökologischen Landbau“, gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft. Es enthält Düngalgorithmen, die auf den Systemen BEFU/BESyD (Förster 2018) des Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie aufbauen sowie N-Bilanzierungsmethoden, die auf dem Modell REPRO basieren.

2.2.3 Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften

Die Ertragsbildung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen wird durch die Standortbedingungen und die Bodenfruchtbarkeit (Klima und Witterung, Topographie, physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften), das Ertragspotenzial der angebauten Sorten sowie die Gestaltung der Anbauverfahren (Bodenbearbeitung, Fruchtfolge, Düngung, Pflanzenschutz, ...) geprägt (Godwin et al. 2003, Hatfield 2000). Bei den Bodeneigenschaften haben z.B. die nutzbare Feldkapazität, die Durchwurzelungsfähigkeit, die Kationen-Austausch-Kapazität, die Humus- und Nährstoffgehalte großen Einfluss auf den Ertrag (Godwin et al. 2003).

Die räumliche Variabilität der ertragsbildenden Parameter kann auf einer landwirtschaftlichen Fläche stark ausgeprägt sein. Diese Heterogenität wirkt sich auf die Ertragsbildung aus und bedingt Zonen mit unterschiedlichem Ertragspotenzial (Hoch- und Niedrigertragszonen). So weisen beispielsweise Teilflächen mit sandigen Böden und hohem Grobporenanteil eine schlechtere Wasserspeicherkapazität auf als Böden, die höhere Ton- und Schluffanteile und damit mehr Fein- und Mittelporen haben (Keller et al. 2012). In trockenen Jahren kann dies auf sandigen Böden zu Mindererträgen im Vergleich zu Böden mit einer besseren Wasserspeicherkapazität führen. Besonders in niederschlagsarmen Jahren werden die Unterschiede der Hoch- und Niedrigertragsstandorte deutlich sichtbar. In sehr feuchten Jahren jedoch haben sandige Böden Vorteile, da sie überschüssiges Wasser schneller ableiten und somit keine Staunässe auftritt. Daher sind Ertragszonen innerhalb eines Schlates witterungs- und jahresspezifisch unterschiedlich ausgeprägt. Einen weiteren Einfluss auf die Ertragsvariabilität besitzt die Topografie (Godwin et al. 2003; Hatfield 2000). So sind Hügelkuppen oftmals erodiert und weisen eine schlechte Nährstoff- und Wasserversorgung auf. Die Kolluvien sind hingegen häufig durch eine gute Nährstoff- und Wasserversorgung charakterisiert und daher oft Hohertragszonen.

Durch die Bewirtschaftung veränderbare Parameter sind beispielsweise die Humus- und Nährstoffgehalte sowie der pH-Wert. So wird der Humusgehalt u. a. durch Standortfaktoren (Tongehalt, Erosion) und Anbaumaßnahmen (Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung) beeinflusst (Hülsbergen 2003). Zwischen den Bodenparametern treten Wechselbeziehungen auf; so kann beispielsweise eine starke Kalkung und pH-Wert-Erhöhung auf sandigen Böden zu einer Festlegung von Spurenelementen führen (Hinck et al. 2016). Untersuchungen zur Heterogenität von Böden zeigen, dass Humusgehalte, pH-Werte und Makronährstoffe (z.B. Phosphor) in erheblichem Maße kleinräumig variieren können, auch auf langjährig einheitlich bewirtschafteten Schlägen (vgl. Hülsbergen 2003).

2.2.4 Teilflächenspezifische Stickstoffbilanzierung

Wenn zur Ermittlung des N-Düngebedarfs der mittlere Ertrag des Schlates angenommen wird, kann dies auf heterogenen Schlägen dazu führen, dass im Hohertragsbereich das Ertragspotenzial nicht ausgeschöpft wird und/oder die N-Entzüge der Pflanzen die N-Zufuhren übersteigen und die Boden-N-Vorräte abnehmen, im Niedrigertragsbereich hohe N-Salden und Nitratverluste auftreten, ggf. auch Stickstoff im Boden akkumuliert wird (Dalgaard et al. 2012; Hülsbergen et al. 2017). Aufgrund dieser Zusammenhänge ist anzunehmen, dass auf heterogenen Schlägen auch die N-Salden und N-Verluste kleinräumig variieren. Unter diesen Bedingungen könnten selbst bei einer im Mittel des Schlates aus-

geglichenen Stickstoffbilanz auf Teilschlägen hohe N-Salden und N-Verlustpotenziale, auf anderen Teilschlägen negative N-Salden auftreten. Mit einer teilflächenspezifischen N-Bilanzierung können die tatsächlichen umweltrelevanten N-Verluste genauer quantifiziert werden.

Voraussetzung für die teilflächenspezifische N-Bilanzierung ist die Verfügbarkeit georeferenzierter Daten zur N-Düngung, zu Erträgen und N-Entzügen, ggf. auch zu weiteren N-Bilanzgliedern wie z.B. der N₂-Fixierung. Diese Eingangsdaten der N-Bilanzierung können mit unterschiedlichen Methoden in unterschiedlicher räumlicher Auflösung, Genauigkeit, Verfügbarkeit und mit unterschiedlichen Kosten ermittelt werden. So können z.B. Daten multispektraler Reflexionssensoren (Maidl et al. 2004), Satellitendaten (ESA 2018), Daten von Drohnen (Maes und Steppe 2019) und Daten von Mähdreschern mit integrierter Ertragserfassung (Steinmayr 2002) zur Berechnung der Biomasse und N-Entzugs von Pflanzenbeständen genutzt werden.

Zur Interpretation und Aufklärung von Ursachen räumlich differenzierter N-Bilanzen können diverse Bodenparameter genutzt werden, z.B. räumlich differenzierte Humus- und Stickstoffgehalte (Hatfield 2000), die elektrische Leitfähigkeit zur indirekten Bestimmung der Bodentextur, Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit (Heil und Schmidhalter 2015). Zudem können GIS-gestützte Erosionsmodelle genutzt werden, um den potenziellen Bodenabtrag und die Nährstoffverlagerung innerhalb von Schlägen zu berechnen (Siebrecht 2009).

Mit teilflächenspezifischen N-Bilanzen können die Indikatoren N-Saldo (kg ha⁻¹ a⁻¹) und N-Effizienz (%) bestimmt werden. Der N-Saldo kennzeichnet die Höhe der potenziellen N-Verluste.

$$\text{N-Saldo} = \sum \text{N-Input} - \sum \text{N-Output} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{N-Effizienz} = \sum \text{N-Output} \cdot (\sum \text{N-Input})^{-1} \quad (\text{Gl. 2})$$

Es kann davon ausgegangen werden, dass die georeferenzierte N-Bilanzierung neue Möglichkeiten zum N-Management (z.B. in Trinkwassereinzugsgebieten) eröffnet. Einerseits kann die Genauigkeit der Berechnungen erhöht werden (z.B. durch die sensorgestützte Erfassung der Erträge und N-Entzüge anstelle der Verwendung von Durchschnittswerten und Faustzahlen). Andererseits kann die Standortheterogenität (Bodenart, Bodenzahl, Textur und Wasserspeicherfähigkeit, Versickerungsleistung, N-Nachlieferung etc.) berücksichtigt werden.

2.2.5 Erfassung der räumlichen Variabilität

Eine hochauflösende und georeferenzierte N-Bilanzierung setzt unter Praxisbedingungen die Verfügbarkeit der benötigten Eingangsdaten voraus.

Eine methodische Herausforderung besteht darin, die räumliche Variabilität von Bodenparametern

(Tabelle 1) und Pflanzenparametern (vgl. Tabelle 2) georeferenziert zu erfassen und darzustellen.

Da sehr unterschiedliche Methoden zur Erfassung von Boden- und Pflanzenparametern zur Anwendung kommen, die zur Berechnung teilflächenspezifischer Nährstoffbilanzen nutzbar sind, ist eine Analyse der Genauigkeit und Eignung dieser verschiedenen methodischen Ansätze erforderlich.

Tabelle 1: Methoden zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Bodenparametern

Methoden	Messprinzip	Untersuchungsparameter
Bodenschätzungskarte	Bodenkartierung	Bodenart, Bodentyp, Bodenzahl
Feld- und Labormethoden	Bodenanalysen	Bodentextur, Humusgehalt, pH-Wert, Nährstoffgehalt (P_{CAL} , K_{CAL} , C_t , N_t , C_{org} , N_{min} , S_{min} ,...)
EM-38 MK-2	Elektromagnetisches Prinzip	Elektrische Leitfähigkeit, indirekte Bestimmung von Bodenart, Wassergehalt, Salz- und Nährstoffgehalt, Humusgehalt
Drohne (UAV)	Wärmebildkamera	Bodenerwärmung
Rammkernsondierung	Bodenanalysen	Stickstoff- und Nitratgehalt und -vorrat in tieferen Bodenschichten (1 bis 10 m)

Im Folgenden werden einige Methoden näher erläutert, die zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern eingesetzt werden.

Elektrische Leitfähigkeit

Die Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit kann beispielsweise mit dem EM-38 MK-2 durchgeführt werden (Geonics Limited 2019). Hierbei wird ohne Bodenkontakt nach dem elektromagnetischen Messprinzip gemessen. Durch Drehung von 90° um die Längsachse kann die Orientierung der Spulen bei dem EM-38 MK-2 verändert werden, um so in unterschiedlichen Tiefen zu messen. Im Vertikalmodus beträgt die effektive Messtiefe ca. 1,5 m, im Horizontalmodus ca. 0,75 m. Das EM-38 MK-2 besitzt zwei Empfängerspulen, die in einem Abstand von 0,5 m und 1 m von der Senderspule entfernt sind. Die Senderspule wird mit Wechselstrom angetrieben, wodurch ein zeitlich verändertes Magnetfeld im Boden erzeugt wird. Dadurch fließt im Boden Strom und es wird ein sekundäres Magnetfeld erzeugt. Die Stärke dieses sekundären elektromagnetischen Feldes ist direkt proportional zur Leitfähigkeit im Boden (Heil und Schmidhalter 2015).

Messungen der elektrischen Leitfähigkeit haben den Vorteil, die räumliche Variabilität der Böden schnell und kostengünstig zu untersuchen und zu klassifizieren. Mit einer Methode können dabei die Bodenunterschiede in heterogenen und großen Schlägen erfasst werden. Die Messungen müssen nur einmal durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind nutzbar für die teilflächenspezifische Saat, Bodenbearbeitung und Düngung. Derzeit werden die Messungen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit überwiegend zu wissenschaftlichen Zwecken durchgeführt. Anhand der elektrischen Leitfähigkeit kann auf den Salzgehalt, die Bodenart, den Wasser- und Nährstoffgehalt, die Bodenverdichtung sowie auf den Humusgehalt geschlossen werden (Doolittle und Brevik 2014).

Einsatz von Drohnen (UAV)

Für den landwirtschaftlichen Einsatz können Drohnen mit verschiedenen Kameras ausgestattet werden. So gibt es Multispektralkameras, Hyperspektralkameras, Thermalbildkameras und RGB-Kameras. Je nach Kamera und Anwendung können Drohnen für die verschiedensten Ziele eingesetzt werden.

So erlauben Drohnen beispielsweise, Aussagen über das heterogene Wachstum von Pflanzenbeständen zu treffen und den Ertrag abzuschätzen. Mithilfe von RGB-basierten Vegetationsindices haben Lussem et al. (2018) die Biomasse auf Grünlandflächen mit einer Drohne erfasst und berechnet. Diese wurden mit den vom Yara-N-Sensor berechneten Indizes verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine relativ gute Korrelation der beiden Methoden ($R^2 = 0,62$). McKinnon und Hoff (2017) verglichen zwei RGB-basierte Vegetationsindices und kamen im Gegensatz zu Lussem et al. (2018) zu der Aussage, dass keiner dieser Vegetationsindices auf der Basis von drohnenbasierten RGB-Bildern einen zuverlässigen Indikator für die Pflanzengesundheit darstellt.

Eine weitere Verwendung von Drohnen in der Landwirtschaft ist der Einsatz von Thermalbildkameras. Wärmebilder können Aufschluss über die räumliche Variabilität und den Wasserhaushalt sowie deren Einfluss auf die Abreife und die Bodenerwärmung geben. Bellvert et al. (2013) untersuchten die Verwendung von Wärmebildern einer Thermalbildkamera, um die räumliche Variabilität des Wasserhaushaltes zu bestimmen, um so eine effizientere Bewässerung zu erreichen. Durch Erstellung von Karten, die den Trockenstress abbilden, können somit auf Basis der Wärmebilder Managemententscheidungen hinsichtlich der Bewässerung getroffen werden (Bellvert et al. 2013).

Drohnen können auch für die Ermittlung von Bestandeshöhen sowie für die Erkennung von Störfaktoren und Fehlstellen (z.B. durch Schädlingsbefall) dienen (Perner und Reinsch 2017).

Tabelle 2: Methoden zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Pflanzenparametern

Methoden	Messprinzip	Untersuchungsparameter
Mährescherertragskartierung	Volumenstrommessung	Kornertrag, Kornfeuchte
Drohne (UAV)	RGB-Bilder, Thermal-, Multispektralmessung	Biomassebildung, Wasserhaushalt und Abreife
Traktormontierte Sensoren	Reflexionsmessung	Berechnung von Vegetationsindices, Biomasseertrag, N-Gehalt, N-Aufnahme
Satelliten	Reflexionsmessung	Berechnung von Vegetationsindices, Biomasseertrag, N-Aufnahme

Mährescherertragskartierung

Moderne Mähreschersysteme verfügen über Messeinheiten, die eine Vielzahl von Zustandswerten georeferenziert erfassen können, z.B. den Kornertrag. Zudem sind diese Systeme auch mit einem Feuchtesensor ausgestattet. Dies ermöglicht den Rückschluss auf die Trockenmasseerträge je Hektar.

Diese Messungen laufen kontinuierlich und automatisch beim Mähdrusch ab. Mithilfe der Ertragskartierung können Unterschiede innerhalb eines Schlages aufgedeckt und eine Einteilung in verschiedene Ertragszonen vorgenommen werden. Durch mehrjährige Nutzung können Ertragspotenziale erkennbar gemacht werden. Die Ertragserfassung kann für alle Druschfrüchte wie z.B. Weizen, Körnermais und Raps angewendet werden. Es existieren verschiedene Messprinzipien wie z.B. das volumetrische Messprinzip, das die Schütthöhe auf den Förderelementen des Körnerelators mit Hilfe einer Lichtschranke erfasst oder das Kraft-Impuls-Messprinzip mit einer Prallplatte (Isensee und Krippahl 2001).

Beim Mähdrusch können Datenpunkte mit ungültigen oder unrealistisch hohen und niedrigen Ertragswerten auftreten. Nach Steinmayr (2002) können diese durch variierende Fahrgeschwindigkeiten der Mährescher oder durch mehrmaliges Überfahren (z.B. im Vorgewende) verursacht werden. Des Weiteren können auch natürliche Gegebenheiten (Relief, Bodeneigenschaften, Unkrautbesatz etc.) zu Verzerrungen und Fehlern bei der Ertragsermittlung am Mährescher führen. Ebenso fand Steinmayr (2002), dass Abweichungen von mehr als 10 % nach oben oder nach unten vom wirklichen Ertrag die Regel sind. Bachmaier (2010) führte diesbezüglich Experimente durch, um den Einfluss von Ausreißern zu begrenzen. Hierbei verwendete er eine Paraboloidoberfläche mit der Form eines Schmetterlingsflügels, um die Werte der Ertragskarte anzupassen. Nach dieser Methode haben Ausreißer einen verminderten Einfluss auf die Berechnung des Ertrags.

Satellitendaten

Die europäische Weltraumorganisation ESA stellt mit ihrem Satellitenpaar Sentinel-2A und Sentinel-2B in kurzen regelmäßigen Abständen (5 Tage) seit Juni 2015 Satellitenbilder öffentlich zur Verfügung (ESA 2018). Die Daten enthalten neben RGB auch weitere Wellenlängen, mit denen unter anderem der Vegetationsindex NDVI berechnet werden kann. Die Auflösung beträgt 10 m x 10 m bzw. für bestimmte Wellenlängen 25 m. Die Daten liegen als ortsbezogene Rasterdaten vor. Diverse Browser (z.B. Sentinel Hub) ermöglichen eine interaktive Bereitstellung der Daten und die Erstellung von Farbbildern unterschiedlicher Indizes.

Tabelle 3 zeigt eine Auflistung der Möglichkeiten einer satellitenbasierten Bestimmung der Heterogenität und Ertragsunterschiede landwirtschaftlicher Flächen, wie sie bereits kommerziell von VISTA/FarmFacts angeboten werden. Satellitenbilder zeigen Muster und erlauben eine Abschätzung der Heterogenität sowie des Ertragspotenzials landwirtschaftlicher Flächen (Bach et al. 2016). Die Zahl der kommerziellen Anbieter ist in den letzten Jahren stark gestiegen.

Tabelle 3: Möglichkeiten zum Einsatz der Satellitenbilder nach Bach et al. (2016)

Kartenmaterial	Untersuchungsparameter/Bezug	Einheit
Basiskarte	Relative Biomasseertragsunterschiede zum Mittelwert des Schlages	%
Ertragspotenzialkarte	Maximal erreichbarer Ertrag, berechnet auf der Basis von Bodenart bzw. Bodentyp und Klimadaten. Berechnung des Ertragspotenzials mit Pflanzenwachstumsmodell in Kombination mit Satellitendaten, basierend auf mehreren Jahren (5 - 15)	dt ha ⁻¹
Blattfläche und Blattchlorophyll	Blattfläche Blattchlorophyllgehalt	m ² m ⁻² µg cm ⁻²
Biomassekarte	Aktuelle Biomasse	dt ha ⁻¹
N-Aufnahmekarte	Akkumulierte Stickstoffaufnahme	kg ha ⁻¹
Ertragskarte	Rückwirkend nach der Ernte	dt ha ⁻¹
Ertragsprognose	Zwei bis vier Wochen vor der Ernte	dt ha ⁻¹

Mithilfe von Pflanzenwachstumsmodellen kann auf der Grundlage frei verfügbarer Satellitendaten beispielsweise eine Ertragspotenzialkarte mit Modellen erstellt werden. Für solche Modelle müssen weitere Daten einbezogen werden, wie z.B. die Bodenkarte, das Digitale Geländemodell und meteorologische Daten (Bach et al. 2016).

3 Material und Methoden

3.1 Teilprojekt 1

3.1.1 Maisversuche in den Jahren 2018 und 2019

Um eine möglichst breite Datengrundlage zu erhalten, wurden für das Teilprojekt 1 in 2018 und 2019 an den Standorten Freising und Roggenstein folgende Versuche angelegt:

Freising:

- N-Optimierungsversuch Standort 1 mit 112 Parzellen (2018 und 2019)
- N-Optimierungsversuch Standort 2 mit 96 Parzellen (2019)

Roggenstein:

- N-Optimierungsversuch Hohertragsstandort mit 112 Parzellen (2018 und 2019)
- N-Optimierungsversuch Niedrigertragsstandort mit 96 Parzellen (2018 und 2019)
- Sortenversuch (auf Hohertragsstandort) mit 16 Parzellen (2018 und 2019).

3.1.2 Standortbeschreibung

Die Versuche Freising wurden auf Flächen der Versuchstation Thalhausen der TU München ca. 10 km nördlich von Freising angelegt. Der Versuchsstandort befindet sich im oberbayerischen Tertiärhügelland 450 m über NN. In der Versuchstation herrschen Braunerden vor. Die Hügelkuppen sind erodiert und bilden aufgrund des hohen Sand- und Kiesanteils ein geringes Ertragspotenzial. In den Tallagen gibt es ertragreiche Kolluvien. Wegen der hohen Bodenheterogenität der flachgründigen Böden wurden in Thalhausen nur Versuche auf den besseren Böden angelegt.

Die Versuchstation Roggenstein liegt im Voralpenraum zwischen München und Fürstenfeldbruck 508 bis 554 m über NN. Die Bodentypen sind vom Aufeinandertreffen zweier unterschiedlicher Bodenbildungsprozesse gekennzeichnet. Decklehm macht etwa 100 ha aus, anmoorige Böden und Gleye etwa 130 ha aus. Die vorwiegenden Bodenarten sind stark sandiger Lehm bis sandiger Lehm mit Ackerzahlen zwischen 27 und 62. Nachdem der Grundwasserspiegel aufgrund der Besiedlung um 50 bis 90 cm gesunken ist, liegt er heute zwischen 130 und 180 cm. Aufgrund dieser unterschiedlichen Bedingungen war es möglich, die Versuche stets auf einem Hoch- und einem Niedrigertragsstandort anzulegen, wengleich auch hier die Niedrigertragsfläche von größerer Bodenheterogenität gekennzeichnet war als der Hohertragsstandort. Tabelle 4 enthält eine Beschreibung der Versuchsflächen der Standorte Freising und Roggenstein.

Tabelle 4: Bodeneigenschaften der Versuchsfelder

Jahr	Standort	Schlag	Boden- schätzung	pH	P ₂ O ₅ [mg (100g Boden) ⁻¹]	K ₂ O [mg (100 g Bden) ⁻¹]
2018	Roggenstein	Hochertrag	sL4D 56/54	6,5	8,7	19,5
2018	Roggenstein	Niedrigertrag	sL4D 49/47	7,3	8,4	17,9
2018	Freising	Mittelertrag	L3D 68/61	5,5	14	15
2019	Roggenstein	Hochertrag	sL3D 65/62	5,9	11	18
2019	Roggenstein	Niedrigertrag	SL3D 56/54	6,3	9	14
2019	Freising	Mittelertrag 1	L4D 63/55	6,9	19	14
2019	Freising	Mittelertrag 2	L4D 64/58	6,6	20	14

3.1.3 Klimatische Bedingungen und Witterung im Untersuchungszeitraum

Zur Charakterisierung von Klima und Witterung des Untersuchungsgebietes werden Daten der Wetterstation Freising und der Wetterstation Roggenstein verwendet. Beide Standorte liegen in der alpinen warmgemäßigten immerfeuchten Klimazone.

Die Vegetationszeit beträgt in Freising 239 Tage im Jahr, wobei das Klima durch stark schwankende Witterungsabläufe gekennzeichnet ist. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,4 °C, die Jahresniederschlagssumme 791 mm, die Sonnenscheindauer 1.680 Stunden.

Die Versuchsstation Roggenstein hat eine mittlere Jahrestemperatur von 8,5 °C und mittlere Jahresniederschläge von 954 mm. Die durchschnittliche Anzahl der jährlichen Vegetationstage betrug in den letzten Jahrzehnten im Mittel 242 mit 1.694 Sonnenstunden.

Im Mittel von 30 Jahren (1981-2010) war das Klima in Roggenstein deutlich feuchter und etwas wärmer als in Freising (Tabelle 5 und Tabelle 6).

Im Jahr 2018 begann das Frühjahr nach einem frostigen Winter winterlich und endete sommerlich. Bis Anfang März herrschte Frost. Ab April begann ein sommerliches Wetter, welches bis zum Herbst anhielt. Das Frühjahr 2018 war das insgesamt zweitwärmste seit Aufzeichnungsbeginn. Die Folgemonate waren sonnig und warm, so dass das Jahr 2018 das wärmste Jahr seit Beginn flächendeckender Messungen (DWD 2018) war. Der Standort Roggenstein zeichnete sich im Jahr 2018 durch eine höhere Niederschlagsmenge sowie mehr Sonnenstunden gegenüber dem Standort Freising aus.

Auf beiden Standorten Freising und Roggenstein war das Jahr 2019 bis Ende Mai kühler als das Jahr 2018. Ab Juni waren die Temperaturen ähnlich denen von 2018. In Freising waren die Niederschläge in 2018 und 2019 identisch. In Roggenstein fielen in den für das Wachstum von Mais wichtigen Monaten Juni bis September in 2019 nur 337 mm Niederschlag, während es in 2018 543 mm waren.

Tabelle 5: Wetterdaten am Standort Freising (LfL Wetter 2018 und 2019)

	Temperatur [°C]			Sonnenstunden [h]			Niederschlag [mm]		
	2018	2019	Ø 1981-2010	2018	2019	Ø 1981-2010	2018	2019	Ø 1981-2010
Januar	3,6	-0,6	-1,1	53	44	84	88,1	86,3	41
Februar	-2,5	2,2	-0,2	103	155	82	29,1	38,3	36
März	3,3	6,3	4	133	171	130	30,1	48,5	51
April	13,1	10,2	8,2	269	235	159	8,8	12,3	48
Mai	16,3	10,6	13,2	251	170	202	79,6	118	84
Juni	17,8	19,6	16,1	238	305	209	123	79,3	89
Juli	19,2	19	17,9	287	252	234	69,1	54,3	107
August	19,8	18,7	17,4	275	222	211	66,7	98,9	88
September	14,7	13,8	13,2	225	193	169	56,9	48,4	74
Oktober	10	10,2	8,7	166	123	123	55,3	50,2	58
November	4,2	4,5	3,3	75	52	62	27,2	35,9	55
Dezember	2,7	2,2	0,1	38	88	45	100,3	54,9	61
Ø bzw. Σ	10,2	9,7	8,4	2113	2010	1680	734,2	725,3	791

Tabelle 6: Wetterdaten am Standort Roggenstein (LfL Wetter 2018 und 2019)

	Temperatur [°C]			Sonnenstunden [h]			Niederschlag [mm]		
	2018	2019	Ø 1981-2010	2018	2019	Ø 1981-2010	2018	2019	Ø 1981-2010
Januar	3,6	-0,9	-0,8	76	36	62	89,2	65	56
Februar	-2,8	2,6	0	98	103	87	41,4	22	50
März	2,9	6,3	3,8	164	148	126	29	42	69
April	13,1	9,7	8,3	311	205	171	11	19	64
Mai	15,5	10,5	13,1	278	206	208	137	73	104
Juni	17,5	19,6	16	280	305	210	128,7	49	108
Juli	19,3	19,3	18,1	324	255	235	109,6	83	118
August	20,1	18,6	17,6	294	213	217	64,6	78	105
September	14,9	13,7	13,4	252	167	158	101,7	54	79
Oktober	10,1	10,5	8,8	182	93	112	63	64	64
November	4	4,3	3,4	81	40	61	23,9	27	66
Dezember	2,5	2,1	0,3	45	36	47	64,4	39	71
Ø bzw. Σ	10,1	9,7	8,5	2385	1808	1694	863,5	615	954

3.1.3 Versuchsbeschreibung und Versuchsanlage

N-Optimierungsversuche Freising 2018 und 2019

Nach Ernte der Vorfrucht Winterweizen wurde stets eine abfrierende Zwischenfrucht angesät. Nach einer Behandlung der Verunkrautung in der abgefrorenen Zwischenfrucht mit einem nicht selektiven Herbizid und einer Kalkdüngung erfolgte zunächst eine flache Bodenbearbeitung mit einem Präzisionsgrubber. Die Saatbettbereitung fand durch eine zweimalige Überfahrt mit der Kreiselegge statt, sodass am im Jahr 2018 am 20.04. und in 2019 am 17.04. die Aussaat mit der Sorte KWS Figaro (S 250 / K 250) in einer Saatstärke von 11 Körner m^{-2} durchgeführt werden konnte. Zur Saat erfolgte stets eine Grunddüngung mit Korn-Kali ($260 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$) und eine Unterfußdüngung mit Triple Superphosphat ($115 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$).

Die Herbizidbehandlung mit Laudis Aspect wurde auf zwei Termine aufgeteilt, wobei am 22.05.2018 $1,35 \text{ l ha}^{-1}$ Laudis und 1 l ha^{-1} Aspect und am 25.05.2018 $0,65 \text{ l ha}^{-1}$ Laudis und $0,5 \text{ l ha}^{-1}$ Aspect appliziert wurden. Außerdem erfolgte am 30.05.2018 eine Maßnahme mit $0,9 \text{ l ha}^{-1}$ Callisto und $0,18 \text{ l ha}^{-1}$ Buctril zur Hirsen- und Ackerschachtelhalmbekämpfung. Am 03.07.2018 erfolgte eine Insektizidbehandlung mit 125 ml ha^{-1} Coragen.

Der randomisiert angelegte Versuch hatte 112 Parzellen mit 28 N-Düngevarianten, die jeweils viermal wiederholt wurden. Jede Parzelle war 10 Meter lang und 12 Meter breit (16 Reihen). Der Reihenabstand betrug 75 cm. In Abbildung 7 werden der Versuchsaufbau und die Düngevarianten dargestellt.

Tabelle 7: N-Varianten und N-Düngung im Maisversuch N-Optimierung, Freising 2018 und 2019

N-Variante	zur Saat [kg ha ⁻¹]	zu 20 cm Wuchshöhe [kg ha ⁻¹]	zu 50 cm Wuchshöhe [kg ha ⁻¹]	N - Summe [kg ha ⁻¹]
N 1	0	0	0	0
N 2	50	0	0	50
N 3	100	0	0	100
N 4	150	0	0	150
N 5	200	0	0	200
N 6	250	0	0	250
N 7	0	50	0	50
N 8	50	50	0	100
N 9	100	50	0	150
N 10	150	50	0	200
N 11	200	50	0	250
N 12	0	0	50	50
N 13	50	0	50	100
N 14	100	0	50	150
N 15	150	0	50	200
N 16	200	0	50	250
N 17	0	100	0	100
N 18	50	100	0	150
N 19	100	100	0	200
N 20	150	100	0	250
N 21	0	0	100	100
N 22	50	0	100	150
N 23	100	0	100	200
N 24	150	0	100	250
N 25	0	50	50	100
N 26	0	100	50	150
N 27	0	100	100	200
N 28	0	150	100	250

Parzelle	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112
Wdh	3	3	3	3	4	4	4	4
N-Variante	3	15	23	7	19	24	26	14
Parzelle	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104
Wdh	3	3	3	3	4	4	4	4
N-Variante	26	24	4	28	5	8	2	28
Parzelle	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096
Wdh	3	3	3	3	4	4	4	4
N-Variante	11	18	12	17	12	21	20	6
Parzelle	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088
Wdh	3	3	3	3	4	4	4	4
N-Variante	21	6	27	22	9	3	15	23
Parzelle	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080
Wdh	3	3	3	3	4	4	4	4
N-Variante	5	20	10	1	25	27	10	17
Parzelle	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072
Wdh	3	3	3	3	4	4	4	4
N-Variante	16	13	25	8	16	13	22	1
Parzelle	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064
Wdh	3	3	3	3	4	4	4	4
N-Variante	9	2	19	14	4	18	7	11
Parzelle	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056
Wdh	1	1	1	1	2	2	2	2
N-Variante	3	13	8	2	13	2	10	5
Parzelle	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048
Wdh	1	1	1	1	2	2	2	2
N-Variante	25	22	28	18	8	16	28	15
Parzelle	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040
Wdh	1	1	1	1	2	2	2	2
N-Variante	15	6	17	14	6	26	4	23
Parzelle	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032
Wdh	1	1	1	1	2	2	2	2
N-Variante	21	12	9	24	20	24	21	11
Parzelle	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024
Wdh	1	1	1	1	2	2	2	2
N-Variante	7	20	26	10	17	1	14	27
Parzelle	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016
Wdh	1	1	1	1	2	2	2	2
N-Variante	27	16	5	19	3	9	25	7
Parzelle	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008
Wdh	1	1	1	1	2	2	2	2
N-Variante	1	11	23	4	22	12	19	18

Abbildung 7: Versuchsplan Maisversuch N-Optimierung, Freising 2018 und 2019

N-Optimierungsversuche und Sortenversuche Roggenstein 2018 und 2019

In Roggenstein wurde in den beiden Versuchsjahren 2018 und 2019 je ein N-Optimierungsversuch auf einem Hohertragsstandort sowie auf einem Niedrigertragsstandort und ein Sortenversuch angelegt. Der Sortenversuch stand stets auf dem Hohertragsstandort.

Nach der Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug im Herbst 2017 bzw. 2018 wurde im Frühjahr eine Bearbeitung mit der Egge durchgeführt, gefolgt von einer Saatbettbereitung mit der Kreiselegge. Zur Grunddüngung wurde jeweils Korn-Kali (160 kg ha⁻¹ K₂O), Triple Superphosphat (92 kg ha⁻¹ P₂O₅) und Kieserit (25 kg ha⁻¹ MgO + 20 kg ha⁻¹ S) ausgebracht. Die Aussaat erfolgte in beiden Jahren nahezu zeitgleich. Im ersten Jahr erfolgte die Saat am 18.04.2018 und im zweiten Jahr am 16.04.2019. Als Sorte wurde KWS Figaro (S 250/K 250) gewählt. Folgende Saatstärken fanden Anwendung:

2018:

- N-Optimierung Hohertragsstandort: 9 Körner m⁻²
- N-Optimierung Niedrigertragsstandort: 11 Körner m⁻²
- Sortenversuch: 11 Körner m⁻².

2019:

- N-Optimierung Hohertragsstandort: 11 Körner m⁻²
- N-Optimierung Niedrigertragsstandort: 9 Körner m⁻²
- Sortenversuch: 11 Körner m⁻².

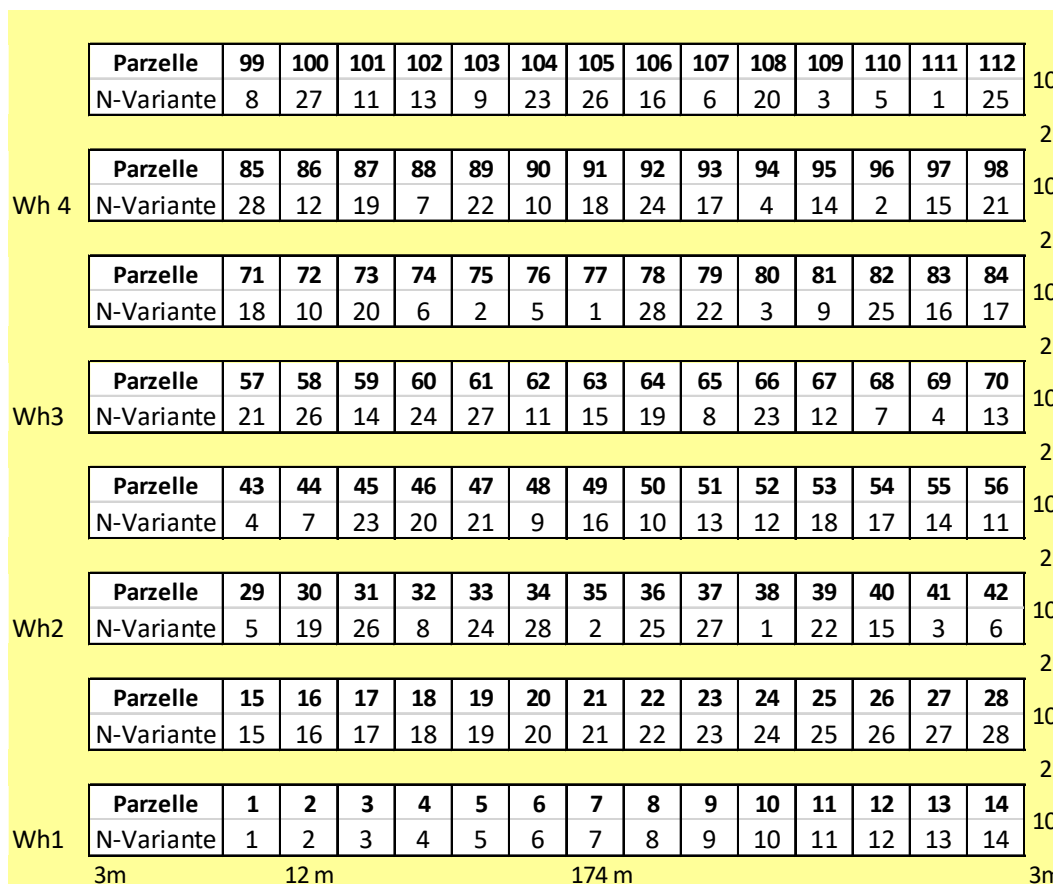


Abbildung 8: Versuchsplan Maisversuch N-Optimierung, Hohertragsstandort Roggenstein 2018

Zur Unkrautregulierung wurde am 12.05.2018 bzw. 25.05.2019 die Standardaufwandmenge des Herbizids Laudis Aspect Pack appliziert. Es fand eine Spurenelementapplikation statt, wobei am 14.05.2018 bzw. 26.5.2019 1 l ha⁻¹ Zink-Chelat (100 g ha⁻¹ Zn) + 1 l ha⁻¹ Foliarel (150 g ha⁻¹ B) und am 22.05.2018 bzw. am 03.06.2019 3 l ha⁻¹ Innofert Mais (1320 g ha⁻¹ P₂O₅ + 225 g ha⁻¹ K₂O + 201 g ha⁻¹ MgO + 138 g ha⁻¹ Zn) + 2,5 kg ha⁻¹ Bittersalz (0,4 kg ha⁻¹ MgO + 0,8125 SO₃) + 0,5 l ha⁻¹ Zink-Chelat (50 g ha⁻¹ Zn) gespritzt wurden.

Tabelle 8: N-Varianten im Maisversuch N-Optimierung, Niedrigertragsstandort Roggenstein 2018 und 2019

N-Variante	zur Saat [kg ha ⁻¹]	zu 20 cm Wuchshöhe [kg ha ⁻¹]	zu 50 cm Wuchshöhe [kg ha ⁻¹]	N - Summe [kg ha ⁻¹]
N 1	0	0	0	0
N 2	50	0	0	50
N 3	100	0	0	100
N 4	150	0	0	150
N 5	200	0	0	200
N 6	250	0	0	250
N 7	0	50	0	50
N 8	50	50	0	100
N 9	100	50	0	150
N 10	150	50	0	200
N 11	200	50	0	250
N 12	0	0	50	50
N 13	50	0	50	100
N 14	100	0	50	150
N 15	150	0	50	200
N 17	0	100	0	100
N 18	50	100	0	150
N 19	100	100	0	200
N 21	0	0	100	100
N 22	50	0	100	150
N 23	100	0	100	200
N 25	0	50	50	100
N 26	0	100	50	150
N 27	0	100	100	200

Zur Maiszünslerbekämpfung wurden in Roggenstein zweimal Trichogramma-Karten mit Schlupfwespen im Versuch ausgehängt. Dabei ist die optimale Anwendung vor Beginn des Flughöhepunkts des Zünslers, sodass der erste Termin zur Ausbringung am 20.06.2018 war, gefolgt von der zweiten Ausbringung am 03.07.2018. In 2019 wurden beide Trichogramma-Behandlungen 8 bzw. 9 Tage später durchgeführt.

Alle Versuche wurden randomisiert angelegt. Entsprechend dem Versuch in Freising hatte auch der N-Optimierungsversuch am Hohertragsstandort 112 Parzellen mit den gleichen 28 Düngevarianten, mit jeweils vier Wiederholungen. Die N-Varianten können Tabelle 8 entnommen werden; Abbildung 8 zeigt den Versuchsplan des Hohertragsstandorts in Roggenstein.

Der N-Optimierungsversuch am Niedrigertragsstandort hatte 96 Parzellen, mit 24 N-Düngevarianten und jeweils vier Wiederholungen. Nachfolgend werden der Versuchsplan und die Aufteilung der N-Düngevarianten des Niedrigertragsstandorts dargestellt.

	Parzelle	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	10	
	N-Variante	8	27	11	9	23	26	6	13	3	5	1	25	2	
Wh 4	Parzelle	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	10	
	N-Variante	7	12	19	22	10	21	17	4	14	2	15	18	2	
Wh 3	Parzelle	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	10	
	N-Variante	18	10	6	2	5	1	22	3	9	25	19	17	2	
Wh 2	Parzelle	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	10	
	N-Variante	21	26	14	27	11	15	8	23	12	7	4	13	2	
Wh 1	Parzelle	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	10	
	N-Variante	4	7	23	21	9	10	13	12	18	26	14	11	2	
Wh 1	Parzelle	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	10	
	N-Variante	5	19	17	8	25	2	27	1	22	15	3	6	2	
Wh 1	Parzelle	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	10	
	N-Variante	13	14	15	17	18	19	21	22	23	25	26	27	2	
Wh 1	Parzelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	10	
	N-Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	10	
		3m	12 m				150 m				3m				

Abbildung 9: Versuchsplan Maisversuch N-Optimierung, Niedrigertragsstandort Roggenstein 2018 und 2019

Der Sortenversuch war als einfaktorieller Versuch mit vier Sorten (KWS Figaro, ES Metronom, ES Asteroid und LG 30.258) und vier Wiederholungen angelegt. Der Aufbau des Versuchs entspricht den N-Optimierungsversuchen. Jede Parzelle war 10 m lang und 16 Reihen breit. Der Reihenabstand betrug 75 cm. Bei allen Parzellen wurden 150 kg N ha⁻¹ zur Saat und 50 kg N ha⁻¹ bei einer Wuchshöhe von 20 cm gedüngt.

Tabelle 9: Untersuchte Maissorten im Sortenversuch, Roggenstein 2018 und 2019

Variante	Sorte	Reifezahl
1	KWS Figaro	S 250 / K 250
2	ES Metronom	S 240 / K 240
3	ES Asteroid	S 250 / K 250
4	LG 30.258	S 240 / K 240

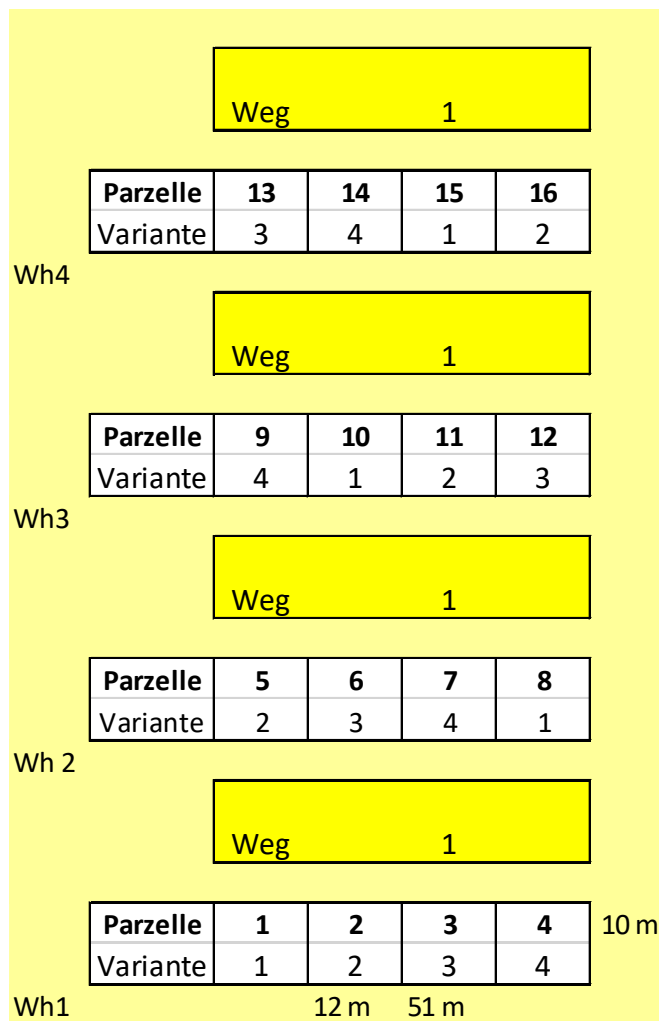


Abbildung 10: Versuchsplan Mais Sortenversuch, Roggenstein 2018 und 2019

3.1.4 Beprobung der Versuche

Wie Tabelle 10 zu entnehmen ist, wurden im Versuchsjahr in beiden Versuchsjahren sowohl in Roggenstein und Freising jeweils 11 Termine zur Beprobung/Datenerhebung festgelegt. Dabei wurden zu den Terminen T 2 bis T 7 sowie zu den Terminen T 9 und T 10 Sensormessungen durchgeführt, die Biomasse beprobt und die Wuchshöhe bonitiert. Zusätzlich zu den Biomassebeprobungsterminen wurden die Termine T 1 und T 8 aufgenommen, an denen Sensormessungen und Wuchshöhenmessungen vorgenommen wurden.

Die Biomassebeprobungen zu den Terminen T 2 bis T 7, die im Juni, also ab T 4, wöchentlich stattfanden, wurden per Handschnitt durchgeführt. Dabei wurden in jeder zu untersuchenden Parzelle zweimal 1,5 m in einer Reihe entnommen. Zu den Terminen T 9 und T 10 wurden jeweils zwei Reihen pro Parzelle mit einem Parzellenmaishäcksler geerntet. Zur Kornreife wurden ebenfalls zwei Reihen pro Parzelle mit einem Parzellenmähdrescher geerntet.

Die Biomasseproben wurden gewogen, gehäckselt und getrocknet, um den Gesamttrockenmasseertrag zu bestimmen. Außerdem wurden bei jedem Biomasseschnitttermin nach Vermahlung einer Teilprobe die Gesamt-N-Gehalte mit einem Elementaranalysator bestimmt, um so die Biomasse N-Aufnahme berechnen zu können. Zur Körnermaisernte wurden der Korntrockenmasseertrag, das Tausendkorngewicht und der Korn N-Gehalt bestimmt.

Tabelle 10: Beprobungstermine und Messungen in den Maisversuchen 2018 und 2019 in Roggenstein und Freising

Termin	Entwicklungsstadium / Zeitpunkt	Sensormessung	Wuchshöhenmessung	Biomassebeprobung
T 1	Wuchshöhe 15 cm	x	x	
T 2	Wuchshöhe 20 cm	x	x	x
T 3	T2 + 1 Woche	x	x	x
T 4	Wuchshöhe 50 cm	x	x	x
T 5	T4 + 1 Woche	x	x	x
T 6	T5 + 1 Woche	x	x	x
T 7	T6 + 1 Woche	x	x	x
T 8	Mitte Juli	x	x	
T 9	Anfang August	x	x	x
T 10	Siloreife	x	x	x
T 11	Kornreife			Mähdrusch

Bei der Wuchshöhenbonitur wurde zu den Terminen T 1 bis T 7 die Pflanzenhöhe an der obersten Stelle (Wölbung) des letzten voll entwickelten Blattes gemessen. Zu den Terminen T 8, T 9 und T 10 wurde die Bonitur an der Spitze der Fahne erhoben.

Bei den Beprobungsterminen T 1 bis T 10 wurden mit dem handgetragenen Sensorsystem Handy Spec (Tec 5) Reflexionsmessungen mit einem Messbereich von 350 bis 980 nm durchgeführt. Das System beruht auf zwei Messkanälen, wobei die eingebaute Recheneinheit unterschiedliche Tageslichtverhältnisse ausgleichen kann. So misst der Referenzkanal die Globalstrahlung, während der nach unten gerichtete Messkanal die Reflexion des Bestandes erfasst.

Bei allen Terminen, an denen auch eine Biomassebeprobung erfolgte, wurde immer genau in dem Bereich gemessen, in dem die Pflanzen geschnitten wurden (T 2 bis T 7). Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, lag die Anzahl der Reflexionsmessungen pro Parzelle bei ca. 15 - 20.

3.2 Teilprojekt 2

3.2.1 Untersuchungsbetriebe und Versuchsflächen

Die Untersuchungen im Teilprojekt 2 erfolgten in den Versuchsstationen Roggenstein (Landkreis Fürstentfeldbruck) Dürnast, Viehhausen und Thalhausen (Landkreis Freising) sowie in Praxisbetrieben in der Untersuchungsregion Hohenthann (Landkreis Landshut).

Die Versuchsstation Roggenstein (Standortbeschreibung unter 3.1.2) eignet sich für Untersuchungen zur räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften, Erträgen und N-Bilanzen aufgrund der heterogenen Böden sowie der langjährig erfassten Bewirtschaftungsdaten (z.B. Mährescher-Ertragserfassung seit 2003). Nach Roßberg et al. (2007) gehört dieser Standort zum Boden-Klima-Raum Tertiärhügelland Donau Süd. Auf rund 300 ha erzeugt der Betrieb Weizen, Gerste, Zuckerrüben, Raps und Mais.

Die Versuchsstationen im Landkreis Freising liegen im Mittel 480 m über NN. Es herrschen Braunerden vor. Die Hügelkuppen sind erodiert und haben aufgrund des hohen Sand- und Kiesanteils ein geringes Ertragspotenzial. In den Tallagen dagegen gibt es ertragreiche Kolluvien. Der Standort gehört zum Boden-Klima-Raum Tertiärhügelland Donau Süd (Roßberg et al. 2007). Weitere Angaben zu den Standortbedingungen der Versuchsstationen sind in Abschnitt 3.2.1 zu finden.

Hohenthann im Landkreis Landshut liegt ebenfalls im Tertiärhügelland durchschnittlich 437 m über NN. Vorherrschende Bodentypen sind Parabraunerden und Braunerden aus Lösslehm.

Tabelle 11: Versuchsflächen für die Analyse teilflächenbezogener Boden- und Pflanzenparameter an den Standorten Roggenstein, Freising und Hohenthann

Schlagname	Fläche [ha]	Jahr
Thalhausen 141 (Freising)	4,42	2018
Itzling 5 (Freising)	4,69	2018
Itzling 6 (Freising)	1,56	2018
D2 (Freising)	4,39	2018
Mühlacker (Freising)	3,52	2018
Heindl Acker (Freising)	7,72	2018
Schlüter Fabrik (Freising)	7,02	2018
VH 1 Bio (Freising)	5,26	2018
Bergfeld (Roggenstein)	13,10	2018
Lager links (Roggenstein)	12,00	2018
Handtuch (Roggenstein)	3,23	2018
Plörnbach (Freising)	12,46	2019
Hofacker (Hohenthann)	4,15	2019
Wiedebergacker (Hohenthann)	7,46	2019

Insgesamt wurde im Jahr 2018 auf elf Flächen eine intensive Erfassung der räumlichen Variabilität von Pflanzen- und Bodenparameter durchgeführt sowie auf drei Flächen im Jahr 2019 (Tabelle 11). Ein Kriterium für die Auswahl der Flächen war der Anbau von Weizen. Der Winterweizen wurde als Fruchtart

gewählt, da Weizen auf unterschiedliche Bodenqualitäten deutlich reagiert, die wichtigste Fruchtart mit der größten Anbaufläche in der Region ist und viele experimentelle Daten zur Ertragsbildung und N-Effizienz von Weizen an den Versuchsstandorten vorliegen. Als Versuchsflächen wurden heterogene Flächen analysiert, die eine hohe räumliche Variabilität von ertragsrelevanten Bodeneigenschaften aufweisen. Aufgrund der Bodenheterogenität war es möglich, die Eignung und den Fehlerbereich unterschiedlicher Methoden zur Erfassung der räumlichen Variabilität zu analysieren sowie einen umfassenden Datensatz zu gewinnen, um Beziehungen zwischen Messparametern zu prüfen.

Witterung im Untersuchungszeitraum

Der für die Versuchsergebnisse relevante Witterungsverlauf für 2018 und 2019 sind detailliert in Abschnitt 3.1.3 beschrieben. Trotz ausgeprägter Trockenperioden im Frühjahr 2018 mit weit unter dem langjährigen Mittel liegenden Niederschlägen (bis Mitte Mai) wurden hohe Weizenerträge erzielt. Aufgrund der relativ günstigen Niederschlagsverteilung ab Mitte Mai trat wenig Trockenstress beim Weizen auf. Erst bei der Abreife wurden die unterschiedlichen Ertragspotenziale innerhalb der Flächen sichtbar. Die ausbleibenden Niederschläge hatten dabei wenig Einfluss. Vielmehr wurden Bodenunterschiede innerhalb der Flächen erkennbar.

3.2.2 Erfassung der Heterogenität von Schlägen

Nachfolgend werden die Methoden beschrieben, die zur Charakterisierung der räumlichen Variabilität von Böden, Pflanzenbeständen und N-Bilanzparametern (N-Entzug, N-Saldo) verwendet wurden. Die Vorgehensweise wird am Beispiel des Untersuchungsschlages „Bergfeld“ vorgestellt.

Bodenanalysen

Die Verteilung der Bodenproben (100 Punkte) auf der Ackerfläche „Bergfeld“ fand nach der geostatistischen Methode „systematisch zufällig“ (Abbildung 11) statt (Thompson 2002). Zur Erfassung der Variabilität des Bodens wurden auf der Untersuchungsfläche am 01.04.2019 Bodenproben gezogen (Bodenschicht 0 – 30 cm) für die Laboranalyse von organischen Kohlenstoff (C_{org}) (VDLUFA-Methodenbuch I 2016) und Gesamt-Stickstoff (N_t) (DIN ISO 10694 1996) sowie am 09.04.2019 (Bodenschicht 0 – 60 cm) für die Bestimmung des Nitrat-N-Vorrats (VDLUFA-Methodenbuch I 2002), des Wassergehalts (VDLUFA-Methodenbuch I 1991), der Bodenart (0 - 30 cm) (VDLUFA-Methodenbuch I 1997) sowie zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität (0 - 30 cm) (Bodenkundliche Kartieranleitung 2005). Es wurden jeweils 8 Einstiche (max. 50 cm Abstand zum Punkt) um einen georeferenzierten Untersuchungspunkt durchgeführt und daraus eine Mischprobe gebildet.

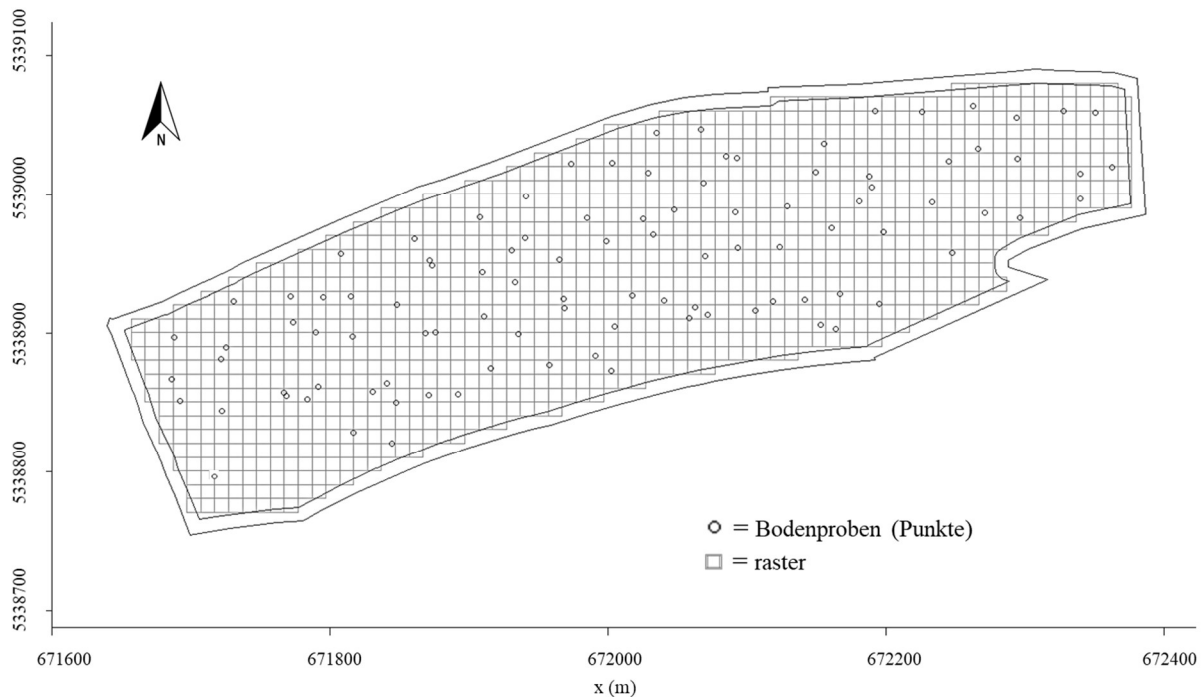


Abbildung 11: Verteilung der Bodenproben (100 Punkte) auf der Ackerfläche „Bergfeld“

Tabelle 12: Methoden für die Charakterisierung der räumlichen Variabilität von Böden

Parameter	Einheit	Datenquelle	Methode	Literatur
C _{org} -Gehalt (0-30 cm)	% TM	Bodenproben	Direktmethode – 550 °C	VDLUFA-Methodenbuch I (2016)
N _t -Gehalt (0-30 cm)	% TM	Bodenproben	Elementaranalyse	DIN ISO 10694 (1996)
Nitrat-N-Vorrat (0-60 cm)	kg ha ⁻¹	Bodenproben	N _{min} -Methode (CaCl ₂ -Extrakt)	VDLUFA-Methodenbuch I (2002)
Wassergehalt (0-60 cm)	g (100g) ⁻¹	Bodenproben	Trockenschrank	VDLUFA-Methodenbuch I (1991)
Bodenart (0-30 cm)	-	Bodenproben	Fingerprobe	VDLUFA-Methodenbuch I (1997)
Nutzbare Feldkapazität (0-30 cm)	Vol. - %	Bodenproben	Fingerprobe + Schätzrahmen (nFK) KA 5, 2005	VDLUFA-Methodenbuch I (1997); Bodenkundliche Kartieranleitung (2005)
Elektrische Leitfähigkeit (1 m Tiefe)	ms m ⁻¹	EM 38-MK-2	Elektromagnetische Messung	Geonics Limited (2019)
Höhe	m a.s.l	Drohne	RGB Kamera	DJI Matrice (2018)

Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit wurde mit einer nicht-destruktiven geophysikalischen Untersuchung, dem EM-38 MK2 (Geonics Limited 2019), bestimmt. Das EM-38 MK2-Messgerät wurde hinter einem Traktor an einem nichtmetallischen Schlitten über das Feld gezogen. Die Fahrtgeschwindigkeit betrug im Mittel 7 km h^{-1} . Es wurde auf eine gleichmäßige Geschwindigkeit geachtet, um möglichst einheitliche Ergebnisse zu erzielen. Im Sekundentakt wurden die GPS-Koordinaten zusammen mit der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit aufgezeichnet (vgl. Heil und Schmidhalter 2015). Das EM-38 MK2 wurde am 15.11.2018 und am 16.11.2018 auf den Schlag „D2“ in der Versuchsstation Dürnast eingesetzt. Am 15.11.2018 wurde in einem Abstand von drei Metern gefahren und am 16.11.2018 wurde ein breiterer Abstand (ca. 12 Meter) gewählt. Im Untersuchungsjahr 2019 wurden die Messungen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit auf dem Schlag „Bergfeld“ in der Versuchsstation Roggenstein am 03.04.2019 durchgeführt.

Einsatz von Drohnen (UAV)

Für die Untersuchungen wurde ein Quadrocopter (DJI Matrice 200) mit einer RGB- (DJI Zenmuse X5S) und einer Thermalbildkamera (DJI Zenmuse XT) genutzt. Im Untersuchungszeitraum wurden zahlreiche Drohnenflüge auf den Versuchsfeldern unternommen und Luftbilder generiert. Dabei flog die Drohne vordefinierte Pfade ab und erstellte in regelmäßigen Intervallen überlappende Einzelbilder, die anschließend zu einem georeferenzierten Gesamtbild (Orthomosaik) zusammengesetzt wurden (Abbildung 12). Für diese Berechnungen wurde eine Open Source Software (Open Drone Map 2018) auf einem Server der HSWT aufgesetzt, die den Prozess der Bilderstellung durchführte. Bei den Flügen wurde auf möglichst konstante Parametrisierung der Kamera sowie Flughöhe und Geschwindigkeit geachtet. Zusätzlich wurde mit der Drohne die Höhe (m.a.s.l.) gemessen (DJI Matrice 2018) und auf Basis dieser Daten ein digitales Geländemodell mit dem Programm Open Drone Map erstellt.

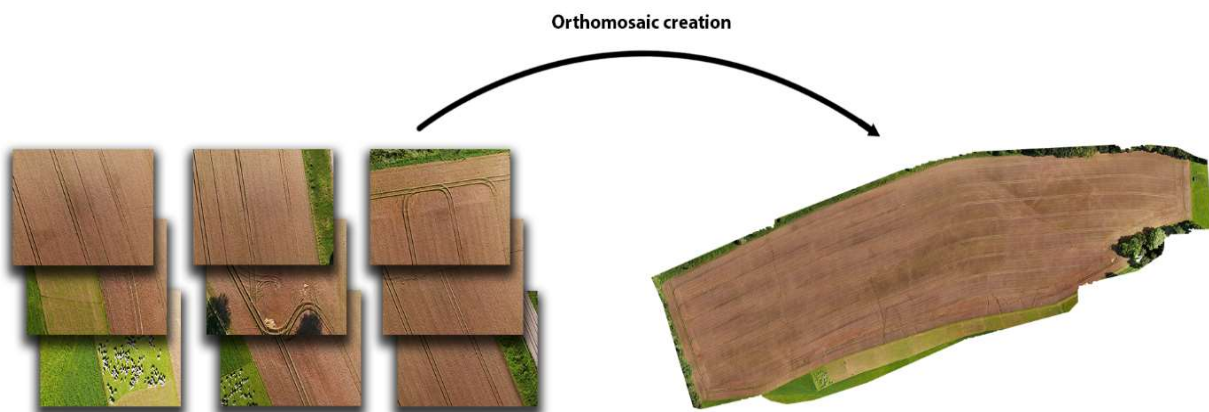


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Orthomosaikerstellung

Bestimmung teilflächenspezifischer N-Bilanzparameter

N-Input

Alle Untersuchungsschläge wurden schlageinheitlich gedüngt. Auf der Untersuchungsfläche Bergfeld wurden 193 kg ha⁻¹ Mineral-N appliziert, organische Dünger wurden nicht eingesetzt.

Bei der Anwendung satelliten- oder sensorgestützter N-Düngesysteme müssen die Dünger-N-Inputs teilflächenspezifisch erfasst werden, um die N-Salden korrekt zu berechnen.

N-Output

Die georeferenzierte Bestimmung des N-Entzugs ist eine essenzielle Größe, um teilflächenspezifische N-Bilanzen zu berechnen. Menge und Qualität der Ernteprodukte können mit unterschiedlichen Methoden bestimmt werden (vgl. Tabelle 13). In der Praxis ist die Ertragserfassung durch Volumenstrommessung am Mähdrescher weit verbreitet. Zudem wurden Satellitendaten (Mauser und Bach 2009; ESA 2018), Daten aus Reflexionsmessungen mit einem multispektralen Sensor (TEC 5 2010; Maidl et al. 2019) sowie Daten der Ertragsbestimmung durch Handschnitte verwendet.

Tabelle 13: Methoden zur Bestimmung von Ertrag, N-Gehalt und N-Entzug

Parameter ^a	Einheit	Datenquelle	Methode	Literatur
a) auf der Grundlage von Biomasse-Handschnitten				
Ertrag ^b	t ha ⁻¹	Biomasseschnitt	Handschnitt + Korndrusch	Wintersteiger (2018)
Korn N-Gehalt	%	Laboranalyse	DUMAS-Verbrennungsmethode	VDLUFÄ-Methodenbuch III (2004)
N-Entzug	kg ha ⁻¹	Berechnung	Ertrag x N-Gehalt	
b) auf der Grundlage von Mähdrescher-Ertragsdaten				
Ertrag ^b	t ha ⁻¹	Mähdrescher	Volumenstrommessung	Claas (2018)
Korn N-Gehalt	%	Laboranalyse	DUMAS-Verbrennungsmethode	VDLUFÄ-Methodenbuch III (2004)
N-Entzug	kg ha ⁻¹	Berechnung	Ertrag x N-Gehalt	
c) auf der Grundlage von Sensordaten				
Vegetationsindex	REIP	Sensor ^d	Reflexionsmessung + Berechnung Vegetationsindex REIP	TEC5 (2010)
N-Entzug	kg ha ⁻¹	Berechnung	Algorithmen zur Schätzung des N-Entzugs auf Grundlage des REIP	Maidl et al. (2019)
d) auf der Grundlage von Satellitendaten				
Vegetationsindex	NDVI	Satellit ^e	Reflexionsmessung + Berechnung Vegetationsindex NDVI	ESA (2018)
Ertrag ^b	t ha ⁻¹	Berechnung	PROMET-Modell, auf Grundlage des NDVI	Mauser und Bach (2009)
Korn N-Gehalt	%	Laboranalyse	DUMAS-Verbrennungsmethode	VDLUFÄ-Methodenbuch III (2004)
N-Entzug	kg ha ⁻¹	Berechnung	Ertrag x N-Gehalt	

^a Schlagränder mit 10 m beschnitten, ^b Kornertrag mit 14 % Wassergehalt, ^c Mittlerer Korn N-Gehalt aus Handschnitten,

^d Traktormontierter multispektraler Sensorkopf (350 - 1140 nm), ^e Sentinel 2

Nachfolgend werden die Methoden beschrieben, die für die Bestimmung der räumlichen Variabilität von Ertrag und N-Entzug auf den Untersuchungsflächen eingesetzt wurden.

Reflexionsmessungen mit Sensor

In den Untersuchungen wurde ein schleppergetragenes Sensorsystem (Compact Spec, Tec 5) mit einem multispektralen Sensorkopf (305 nm-1140 nm) verwendet. Die Messköpfe des Schleppersystems sind an einem Ausleger montiert und befinden sich 3 m links und rechts vom Schlepper. In der Mitte des Schlepper-Sensor-Systems befindet sich ein Referenzkanal, der die Sonneneinstrahlung erfasst. Eine Messfrequenz von bis zu 10 Messungen pro Sekunde kann eingestellt werden. Das Sensorsystem wurde mit einem hochleistungsfähigen Glonass GPS-Gerät ausgestattet, um eine georeferenzierte Aufzeichnung zu erhalten. Somit ist eine Genauigkeit unter 15 cm möglich. Auf der Grundlage der Messung verschiedener Wellenlängen können Vegetationsindizes berechnet werden.

Tabelle 14: Datum und EC-Stadium der Reflexionsmessungen mit dem schleppergetragenen Sensorsystem

Schlagname	Datum	EC-Stadium
Thalhausen 141	04.06.2018	65
Itzling 5	01.06.2018	65
Itzling 6	01.06.2018	65
D2	29.05.2018	65
Mühlacker	05.06.2018	65
Heindl Acker	05.06.2018	65
Schlüter Fabrik	05.06.2018	65
Bergfeld 2/3	07.06.2018	65
Lager links/rechts	07.06.2018	65
Handtuch	07.06.2018	65
Plörnbach	31.05 und 13.06.2019	49 und 65
Hofacker	27.05 und 13.06.2019	49 und 65

Beim hochauflösenden multispektralen Sensorsystem wurden die Wellenlängen zur Berechnung des Vegetationsindex REIP verwendet:

$$REIP = 700 + 40 * ((0.5 * (wl670 + wl780) - wl701) / (wl740 - wl701)) \quad (Gl. 3)$$

(*wl steht für die gemessene Intensität an der angegebenen Wellenlänge in Nanometer)

Die Daten des Sensors liegen als georeferenzierte Punktdaten vor und wurden mittels Kriging-Verfahren in das Zielraster interpoliert. Die N-Aufnahme wurde über den Vegetationsindex REIP mit einem Algorithmus berechnet (Maidl et al. 2019).

Satellitendaten

Bei den Satellitendaten wurden die Rohdaten der Banden Rot B4 (RED) und Nahinfrarot B8 (NIR) der Raumfahrtmission Sentinel-2 verwendet, um den Vegetationsindex NDVI zu berechnen:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (\text{Gl. 4})$$

Die Erträge wurden mit dem Modell „PROMET“ (Mauser und Bach 2009) auf der Grundlage des NDVI berechnet. Die Daten liegen als georeferenzierte Rasterdaten vor, sie wurden mittels Downsampling-Verfahren in das Zielraster interpoliert. Der Kornertrag wurde mit dem N-Gehalt der Biomassehandschnitte multipliziert und die N-Aufnahme berechnet (VDLUFA-Methodenbuch III 2004).

Ertragsbestimmung durch Handschnitte

In definierten Ertragszonen erfolgten Biomasseschnitte zur Bestimmung des Ertrags. Die Messdaten dienen als Referenzwerte für den Vergleich mit den auf der Basis von Sensor-/Satellitendaten ermittelten Werten. Es wurden auf zehn Flächen Biomasse-Handschnitte zu EC 89 durchgeführt. Je Schnitt wurden vier Reihen Weizen (je 8 Meter) mit einer handelsüblichen Akku-Rasenkantenschere bodennah geschnitten. Die Weizenreihen lagen direkt nebeneinander. Auf Basis der Bodenschätzung wurde eine Einteilung in Ertragszonen vorgenommen. Pro Zone wurden vier Biomassehandschnitte (je 4 Reihen je 8 m) gelegt, um eine ausreichende Probengröße zu gewinnen (Tabelle 15). Mithilfe von GPS wurden die Beprobungspunkte eingemessen. Das Korn wurde im Standdrescher (Korndrusch) gedroschen und die Kornmasse mittelt (Wintersteiger 2018). Es wurde der Trockenmassegehalt im Trockenschrank (60 °C) bestimmt und der Kornertrag in t ha⁻¹, bezogen auf 86 % TM, berechnet. Der N-Gehalt im Korn wurde durch die DUMAS-Verbrennungsmethode bestimmt (VDLUFA-Methodenbuch III 2004).

Tabelle 15: Anzahl Biomassehandschnitte zur Ertragsbestimmung

Schlagname	Ertragszonen	Handschnitte	EC- Stadium
Thalhausen 141	4	16	89
Itzling 5	3	12	89
Itzling 6	3	12	89
D2	-	56	89
Mühlacker	2	8	89
Heindl Acker	3	12	89
Schlüter Fabrik	3	12	89
Bergfeld 2/3	-	50	89
Lager links/rechts	4	8	89
Handtuch	2	8	89
Plörnbach	4	16	89
Hofacker	3	12	89
Wiedebergacker	4	16	89

Parzellenmähdrescher

Der Parzellenmähdrescher (Tabelle 16) wurde auf den Ackerflächen „D2“, „Bergfeld 2/3“ und „Plörnbach“ eingesetzt. Aufgrund zahlreicher langjähriger Voruntersuchungen (z.B. Untersuchungen der Bodenheterogenität) fiel die Wahl auf diese Flächen.

Tabelle 16: Parameter der eingesetzten Parzellenmähdrescher

Schlagname	Schnittbreite [m]	Parzellenlänge [m]	Parzellengröße [m ²]	Anzahl	Druschdatum
D2	1,50	15,00	22,50	94	26.07.2018
Bergfeld 2/3	1,50	20,00	30,00	141	30.07.2018
Plörnbach	1,50	20,00	30,00	127	06.08.2019

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden Parzellen gedroschen, die auf mehrere Fahrspuren verteilt waren. Auf dem Schlag „D2“ wurden fünf Fahrspuren gedroschen, auf dem Schlag „Bergfeld 2/3“ vier Fahrspuren, auf dem Schlag Plörnbach 6 Fahrspuren. Die Parzellen wurden vorab mit einem GPS-Gerät mit RTK eingemessen. Für die Sichtbarkeit wurden Stäbe gesetzt, die jeweils den Anfang und das Ende der Parzellen markierten. Der Drusch wurde im Parzellenmähdrescher im Wiegebehälter gewogen (Wintersteiger 2019). Pro Parzelle wurde der Kornertrag in kg und die Feuchtigkeit in Prozent ermittelt. Für die weitere Untersuchung im Labor wurden dem Erntegutstrom nach jeder Parzelle Proben in der Kabine entnommen. Die ausgegebenen Rohdaten des Parzellenmähdreschers lagen in Textformat vor und konnten somit für die weitere Verwendung aufbereitet werden. Anhand des gemessenen Gewichts in kg, der Schnittbreite und der Parzellenlänge konnte der Ertrag in dt ha⁻¹ berechnet werden, um so eine Vergleichbarkeit mit anderen Methoden zu erreichen. Mithilfe der Nahinfrarotspektroskopie wurde der Korn-Stickstoffgehalt pro Parzelle anhand der entnommenen Proben bestimmt. Es folgte eine Berechnung der Stickstoffaufnahme und des Proteingehalts.

Mähdrescherertragskartierung

Es wurden drei unterschiedliche Mähdreschersysteme auf den Versuchsflächen eingesetzt. Die Ertragskartierung wurde auf den in Tabelle 17 angegebenen Flächen durchgeführt. Auf den Schlägen „D2“, „Bergfeld 2/3“ und „Plörnbach“ erfolgte ein koordinierter Mähdrusch, bei dem vorab festgelegt wurde, in welcher Reihenfolge die Fahrspuren gedroschen werden.

Auf dem Schlag „D2“ wurden am 26.07.2018 mit dem Parzellenmähdrescher fünf Fahrspuren mit einer Schnittbreite von 1,5 m gedroschen. Am 27.07.2018 erfolgte der Mähdrusch mit dem New Holland, der eine Schnittbreite von 5,80 m besitzt. Um einen möglichst genauen Vergleich zwischen Mähdrescher und Parzellenmähdrescher zu erreichen, fuhr der Mähdrescher genau nach den Fahrspuren des Parzellenmähdreschers, so dass die bereits gedroschene Druschbreite direkt in der Mitte der Arbeitsbreite des Mähdreschers lag. Der Mähdrescher konnte somit, nach Abzug der Parzellenmähdrescherbreite, mit 4,30 m die fünf Fahrspuren dreschen. Der gemessene Ertrag im Mähdrescher wurde dann auf die Schnittbreite von 4,30 m umgerechnet. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine Auswertung der fünf Fahrspuren auf engstem Raum und einen Vergleich der beiden Methoden. Der restliche Schlag wurde gedroschen, ohne eine definierte Schnittbreite einzuhalten. Die selbe Vorgehensweise wurde am Schlag „Plörnbach“ angewandt.

Tabelle 17: Druschdatum und Mähdreschersystem auf den Untersuchungsflächen

Schlagname	Mähdrescher	Druschdatum
Thalhausen 141	New Holland	28.07.2018
Itzling 5	New Holland	28.07.2018
Itzling 6	New Holland	28.07.2018
D2	New Holland	27.07.2018
Mühlacker	New Holland	20.07.2018
Heindl Acker	New Holland	20.07.2018
Schlüter Fabrik	New Holland	20.07.2018
VH 1 Bio	New Holland	19.07.2018
Bergfeld 2/3	Claas	30.07.2018
Lager links/rechts	Claas	27.07.2018
Plörnbach	New Holland	06.08.2019
Hofacker	Case	02.08.2019

Auf der Ackerfläche „Bergfeld 2/3“ wurde ein anderes System angewandt. Hierbei lag die Schnittbreite des Claas-Mähdreschers direkt neben der des Parzellenmähdreschers. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass der Mähdrescher eine volle Schnittbreite drischt und keine Umrechnungen vorgenommen werden müssen. Der Nachteil ist jedoch, dass die räumliche Variabilität für einen Vergleich der beiden Methoden zunimmt.

Die ausgegebenen Rohdaten lagen bei dem New Holland-Mähdrescher als Textformat vor, bei dem Claas-Mähdrescher als ESRI Shapefile Format. Um unrealistische, extreme Werte (sehr niedrige oder sehr hohe Erträge) für die weitere Berechnung auszuschließen, wurden Ausreißer eliminiert. Hierbei wurden die Ränder mit 10 m bzw. 20 m beschnitten, da dort viele fehlerbehaftete Messergebnisse vorliegen (Hank 2013). Weitere Auswertungen erfolgten in Excel, QGIS und „R“.

Der N-Entzug wurde bestimmt durch Kornertrag (Mähdrescher) multipliziert mit dem Korn-N-Gehalt (VDLUFA-Methodenbuch III 2004).

3.2.3 Programmiertechnische Umsetzung

Da das Modell REPRO (Hülsbergen 2003) durch die neu entwickelte und auf REPRO aufbauende Software „webBESyD/Web-Man“² abgelöst wird, wird die teilflächenspezifische N-Bilanzierung als ein neues Modul dieser Software realisiert.

² Entwicklung der Software „webBESyD“ wurde im Projekt: „Betriebliches Nährstoffmanagement zur Umsetzung der Düngeverordnung“, Laufzeit: 2016 bis 2019, gefördert durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) begonnen und derzeit im Projekt „Webbasiertes Nährstoff-Management im ökologischen Landbau“ (Web-Man), gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft, fortgesetzt. Web-Man wird bei Fertigstellung alle Komponenten, Modellparameter und Algorithmen zur N-Bilanzierung des Modells REPRO enthalten, teilweise in weiterentwickelter Form.

Zur Erarbeitung des Moduls „Teilflächenspezifische N-Bilanzierung“ wurde eine Entwicklungsumgebung in der Programmiersprache R aufgesetzt, um die benötigten Daten und Kartenmaterialien für die Algorithmen-Entwicklung innerhalb einer Plattform bereitzustellen. R ist weitverbreitet bei den statistischen Programmiersprachen und ermöglicht als Skriptsprache schnelle Anpassungen des Programmablaufs. Daher ist es prädestiniert für diese Aufgabe.

Bibliotheken

Für räumliche Operationen und das Laden von Vektor- oder Rasterdateien werden die R-Bibliotheken *rgdal*, *rgeos* und *raster* genutzt.

Karten

Folgende Karten können in der Entwicklungsumgebung importiert und georeferenziert (auch überlagert) angezeigt werden:

- Ackerschlag
- Bodenkarte, davon Bodenzahl, Ackerzahl und Bodenart
- Höhenlinien
- Drohnenbild
- Satellitenbild
- Mähdrescherertragskarten
- Parzellenmähdrescherertragskarten
- EM-38 (Elektrische Leitfähigkeit)
- Reflexionsmessungen mit Sensor REIP
- Ertragsbestimmung - Handschnitte

Datenverarbeitung

Das bereits bestehende R-Projekt zur Visualisierung und Bereitstellung der vorhandenen Daten wurde neu aufgesetzt und um die in der Datenakquise aufgelisteten Datenquellen erweitert. Dazu wurden entsprechende Importskripte erstellt, um die unterschiedlichen Datensätze in einheitliche Datentypen zu überführen. Dies ermöglichte eine standardisierte Weiterverarbeitung der Daten. Ziel ist es, die Güte der einzelnen Datenquellen für die Berechnung der N-Salden zu ermitteln. Dabei spielt auch der Aufwand der Datenerzeugung, die Bereitstellung und die Umwandlung bis zu deren Verwendbarkeit eine wichtige Rolle. Zudem wurde ein georeferenziertes Regressionsmodell erstellt, um mögliche Zusammenhänge der georeferenzierten Daten ableiten zu können. Die Datensätze wurden nach statistischen und geostatistischen Methoden berechnet. Die Güte der einzelnen Methoden kann mithilfe der Korrelationen geprüft werden und eine Empfehlung gegeben werden, welche Methoden am besten geeignet sind für die Bestimmung des N-Entzugs für weitere Berechnungen im N-Managementtool.

Referenzdaten

Als Referenzdaten zur Bestimmung der Güte der Datensätze wurden für die optischen Datenquellen die Messungen mit dem multispektralen Sensor verwendet. Bei den direkt gemessenen Erträgen wurden dafür die Handschnitte ausgewertet.

Datenklassen

Unabhängig vom Datentyp variieren die Daten stark in der Auflösung und Anordnung. Luftbilder und Satellitendaten liegen als flächendeckende Rasterdaten vor, multispektrale Sensor- und Mähdrescherdaten sowie Handschnitte als verteilte Punktdaten. Um eine georeferenzierte Vergleichbarkeit, z.B. Korrelationen, zwischen den Datenquellen herstellen zu können, wurden die Daten in identische Raster gleicher Auflösung überführt. Das wurde mit Rastereingangsdaten durch Abstratenkonvertierung durch Skalierung (Downsampling) und bei Punkteingangsdaten durch Interpolation auf das Raster durch das Kriging Verfahren realisiert.

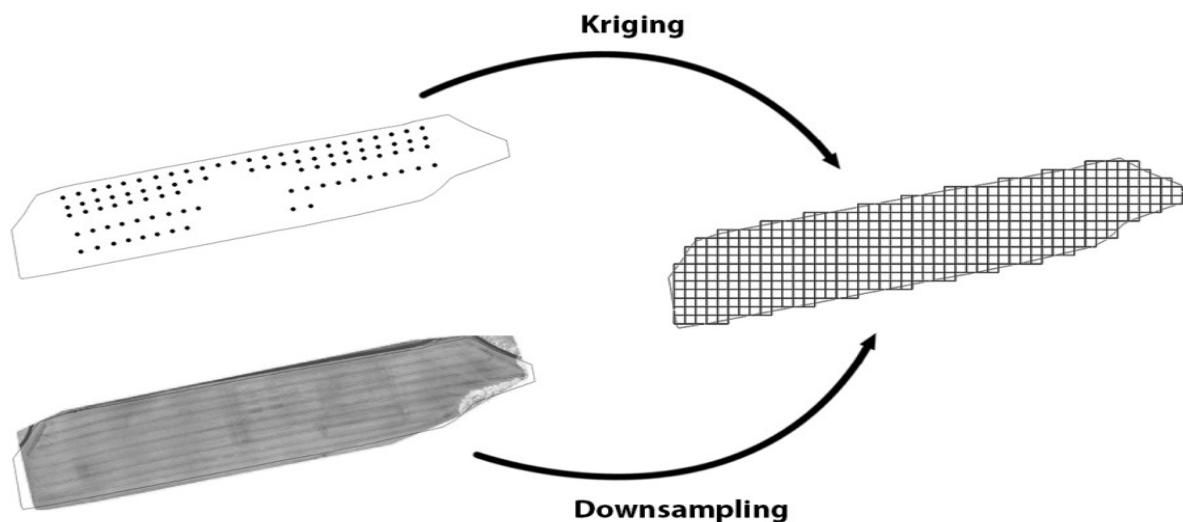


Abbildung 13: Uniformierung der Daten

Kriging

Als Interpolationsverfahren wird Ordinary Kriging verwendet (Matheron 1963). Hierbei wird zuerst ein Variogram (Varianz der Daten nach Distanzklassen) der Daten erstellt, das den räumlichen Zusammenhang der Variable (Spatial auto-correlation effect) zeigt. Daran wird ein Modell gefittet, das bei der Gewichtung der interpolierten Daten miteinfließt (Hengl 2007). Diese Methoden werden mit Hilfe der R-Bibliothek `gstat` umgesetzt.

Gütebestimmung

Die Messdaten konnten nun mit räumlichem Bezug miteinander verglichen werden, da Auflösung und Position der Karten einheitlich sind. Die Güte der jeweiligen Datentypen wurde anhand von Regressionsanalysen mit den Referenzdaten ermittelt.

3.2.4 Entwicklung eines N-Managementtools zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung und Modellvalidierung

Die Entwicklung eines N-Managementtools zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung stellt ein Teilziel des Forschungsprojektes dar. Die Innovation liegt darin, die N-Bilanzierung georeferenziert – und nicht mehr schlageneinheitlich und damit unabhängig von der Schlaggröße – durchführen zu können.

Die bereits vorhandenen REPRO-Algorithmen der flächenbezogenen N-Bilanzierung (vgl. Abschnitt 3.2.4.1) und des Moduls N-Umsatz (vgl. Abschnitt 3.2.4.2) zur Berechnung von Sickerwassermengen (vgl. Abschnitt 3.2.4.3) und Nitratkonzentrationen im Sickerwasser (vgl. Abschnitt 3.2.4.4) bilden die methodische Grundlage für die Umsetzung des *N-Managementtools*.

3.2.4.1 Flächenbezogene N-Bilanzierung

Aus fachlicher sowie programmiertechnischer Sicht macht es keinen Unterschied, ob eine N-Bilanz für einen Schlag, einen Teilschlag oder eine beliebige Fläche (z.B. Raster, Polygon) erstellt wird. Sowohl die N-Input-Flüsse als auch N-Output-Flüsse bleiben identisch, allerdings mit einer unterschiedlich hohen räumlichen Auflösung.

Zu den N-Inputflüssen zählen dabei die mineralische und organische Düngung, die N₂-Fixierung der Leguminosen sowie der Stickstoffeintrag über Saatgut und über die Deposition aus der Atmosphäre (N-Immission). Auf der Output-Seite der Fläche stehen der Stickstoffentzug der geernteten Haupt- und Nebenprodukte sowie etwaige Stickstoffverluste (vgl. Abbildung 14).

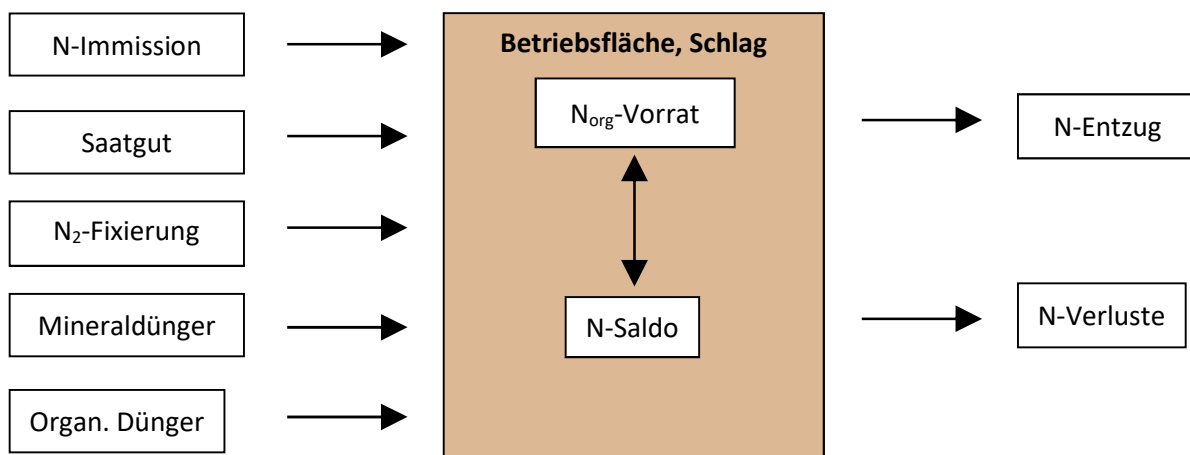


Abbildung 14: Berücksichtigte Größen bei der Berechnung des Stickstoffsaldos

Das Berechnungsverfahren der flächenbezogenen Stickstoffbilanzierung ist in Gleichung 5 dargestellt. Der N-Saldo stellt dabei einen Indikator für potenzielle N-Verluste dar. Dabei können die Stickstoffverluste sowohl gasförmig (Ammoniak, Lachgas) als auch über Nitrat in das Grundwasser entweichen.

$$S_N = N_I + N_{SYM} + N_{SG} + N_{SD} + N_{OD} + N_{MD} - N_E \quad (\text{Gl. 5})$$

Symbol	Einheit	Beschreibung
S_N	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	N-Saldo
N_I	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	N-Immission
N_{SYM}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	N-Zufuhr über symbiotische N-Fixierung
N_{SG}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	N-Zufuhr über Saatgut
N_{SD}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	N-Zufuhr über Stroh- und Gründüngung
N_{OD}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	N-Zufuhr über Wirtschaftsdüngern
N_{MD}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	N-Zufuhr über Mineraldüngern
N_E	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	N-Entzug

Die Erfassung der N-Zufuhren über die symbiotische N_2 -Fixierung, Saatgut, N-Immission und organische Düngung werden im Modul Teilflächenspezifische N-Bilanzierung vorerst noch schlageinheitlich und nicht georeferenziert berücksichtigt.

3.2.4.2 Modul N-Umsatz

Um unter Berücksichtigung der N-Inputs, N-Entzüge und des N-Umsatzes im Boden die Höhe der Nitratverluste berechnen zu können, wird im Modell REPRO (Hülsbergen 2003) das Modul N-Umsatz verwendet (Abraham 2001). Dieses Modul wird derzeit grundlegend überarbeitet und in das webbasierte Nährstoffmanagementsystem Web-Man integriert. Es steht dann auch für eine teilflächenspezifische Modellierung der Nitratausträge zur Verfügung.

Der zeitliche Rahmen des Moduls N-Umsatz ist das Kalenderjahr (Januar – Dezember); die Berechnung erfolgt künftig in Tagesschritten. Im Vergleich zu Stickstoffbilanzen von Fruchtarten (zeitlicher Rahmen: Beginn des Produktionsverfahren bis zur Ernte) können daher Verschiebungen auftreten. Im Modul N-Umsatz wird der Boden-Stickstoff in einen mineralischen, einen organischen und einen Humus-N-Pool (vgl. Abbildung 15) aufgeteilt, die verschiedenen Umsetzungsprozessen unterliegen.

Der Umsatz des Humus-N-Pool ist an die dynamische Humusbilanzierung (Hülsbergen 2003) gekoppelt. Die N-Freisetzung aus dem Humus-Pool wird in Abhängigkeit von den angebauten Fruchtarten, Anbauverfahren und Standortbedingungen (z.B. Bodenart) modelliert. Der im Humus-Pool gebundene Stickstoff wird als nicht verlustgefährdet betrachtet. Nach Abzug des Stickstoffs, der im Humus-Pool gespeichert wird, fließt der organische gebundene Stickstoff aus Wirtschaftsdüngern, Stroh- und Gründüngung in den Organischen N-Pool. Dieser wird Stickstoff wird in Abhängigkeit von den Standortbedingungen (Witterung, Bodenart) zeitlich differenziert mineralisiert. Dazu wird mittels einer empirischen Formel die maximale Mineralisation aus dem Stickstoff im organischen Pool berechnet. Hierbei geht die „wirksame Mineralisierungszeit“ (WMZ) nach Franko et al. (1993) ein, die von der Bodentextur (dem Gehalt an Feinschluff und Ton), der mittleren Lufttemperatur sowie dem Jahresniederschlag abhängig ist.

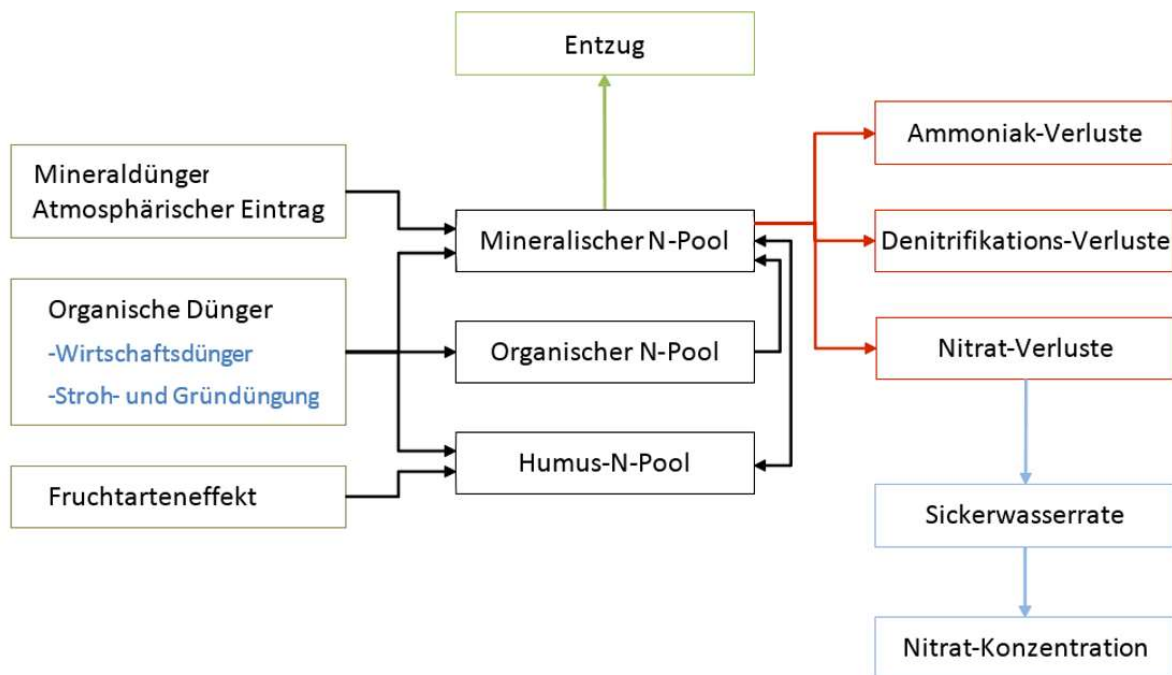


Abbildung 15: Schema des Moduls N-Umsatz (nach Abraham 2001)

Bei einer Düngerausbringung im Untersuchungsjahr wird mithilfe einer empirisch abgeleiteten Funktion der Anteil der Mineralisation aus dem organischen N-Pool berechnet (Abraham 2001). Der freigesetzte Stickstoff fließt in den mineralischen N-Pool, der im organischen Pool verbleibende Stickstoff wird ins Folgejahr transferiert. Die N-Zufuhr in den mineralischen Stickstoffpool erfolgt über die Mineraldüngung, die N-Immission, Saatgut, die mineralische N-Fraktion in Wirtschaftsdüngern (Ammoniumgehalt), die Mineralisierung des organischen Düngerstickstoffs und die Stickstofffreisetzung aus dem Humus. Als einziger N-Pool unterliegt er den Prozessen N-Entzug, N-Immobilisierung, Denitrifikation und N-Auswaschung sowie Ammoniakverlusten.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Teilprojekt 1

In der landwirtschaftlichen Praxis wird Mais derzeit fast ausschliesslich zur Saat mit Stickstoff gedüngt. Für die Entwicklung eines Verfahrens zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Mais nach dem Verfahren Online + Map-Overlay sind folgende Schritte zu klären:

- a) Wie reagiert Mais auf eine spätere Terminierung der Stickstoffdüngung?
- b) Hat die Jugendentwicklung Einfluss auf die spätere Ertragsbildung von Mais?
- c) Lässt sich das Wachstum von Mais in frühen Entwicklungsstadien mittels Reflexionsmessungen charakterisieren?

4.1.1 Wirkung differenzierter Stickstoffdüngung Düngung auf die Ertragsbildung und die N-Effizienz bei Mais

Die N-Düngermenge in den Versuchen wurde von 0 bis 250 kg ha⁻¹ in 50 kg N-Schritten gestaffelt. Als Düngungszeitpunkte wurden gewählt: zur Saat, bei 20 cm Wuchshöhe und 50 cm Wuchshöhe.

Silomais

Mit steigender N-Düngermenge zur Saat war stets eine Zunahme des Silomaisertrags zu beobachten (Abbildung 16 und 17). Im Jahr 2018 wurde bei ausschliesslicher N-Düngung zur Saat der Maximalertrag in der N-Stufe 200 kg ha⁻¹ erreicht. Im Folgejahr 2019 genügten 50 kg ha⁻¹ weniger. Späte N-Düngergaben ohne eine N-Düngung zur Saat führten immer zu geringeren Ertragsleistungen (Varianten 25 bis 28). Bei einer teilweisen Düngung zur Saat konnte die ergänzende N-Düngung bei 20 cm (Varianten 12 bis 16) oder 50 cm Wuchshöhe (Varianten 17 bis 20) ausgebracht werden.

Bei den N-Gehalten von Silomais waren zum Erntezeitpunkt keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten feststellbar (Abbildung 19). Weder die N-Düngermenge noch der Zeitpunkt der N-Düngung zeigte entsprechende Effekte.

Demzufolge folgte der Stickstoffentzug zur Siloreife dem Verlauf der Erträge (vgl. Abbildung 19 mit Abbildung 20). Steigende N-Düngermengen bis 200 kg ha⁻¹ zur Saat führten zu einer starken Zunahme der N-Aufnahme. Bei weiterer Erhöhung der N-Menge auf 250 kg ha⁻¹ konnte keine Zunahme der N-Aufnahme beobachtet werden.

Interessant ist die sehr hohe N-Aufnahme der ungedüngten Parzellen von ca. 190 kg ha⁻¹ (Abbildung 20). Die maximale N-Aufnahme in der Variante 5 (N-Düngung 200 kg ha⁻¹) betrug ca. 280 kg ha⁻¹. Zunehmende N-Düngung führte demzufolge zu einer starken Abnahme der N-Aufnahme aus dem Boden.

Betrachtet man die N-Bilanz von Silomais (Abbildung 21) so waren in allen Varianten negative N-Salden zu beobachten, d.h. es wurde stets mehr Stickstoff aufgenommen als gedüngt wurde. Auch späte N-Düngergaben (Varianten 25 bis 28) führten zu keinen erhöhten N-Salden.

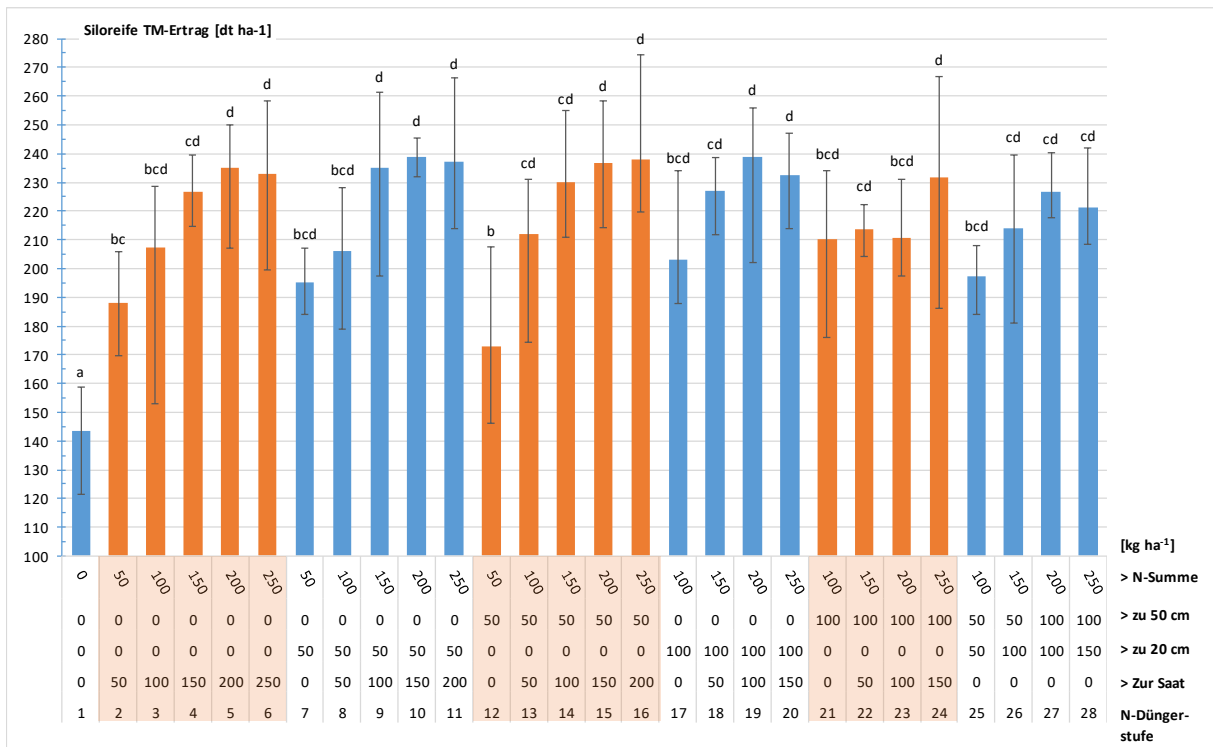


Abbildung 16: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf den Silomaisertrag, Freising 2018

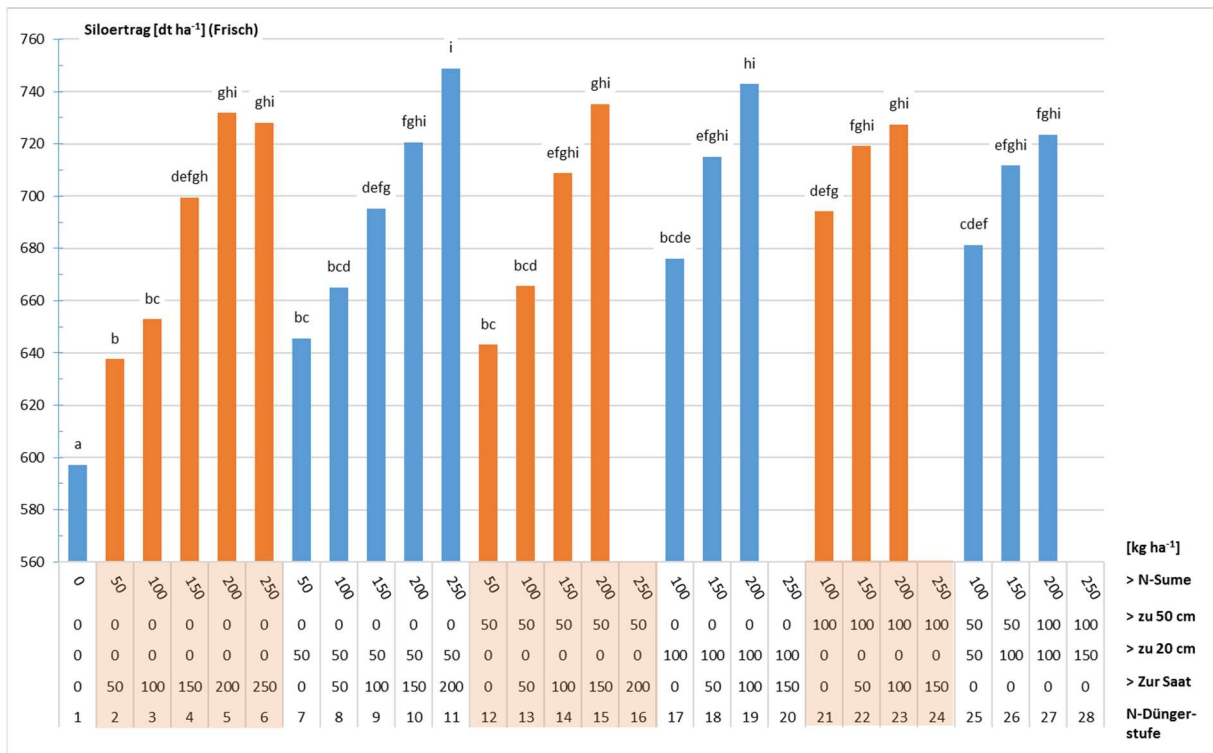


Abbildung 17: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf den Silomaisertrag, Roggenstein und Freising 2019

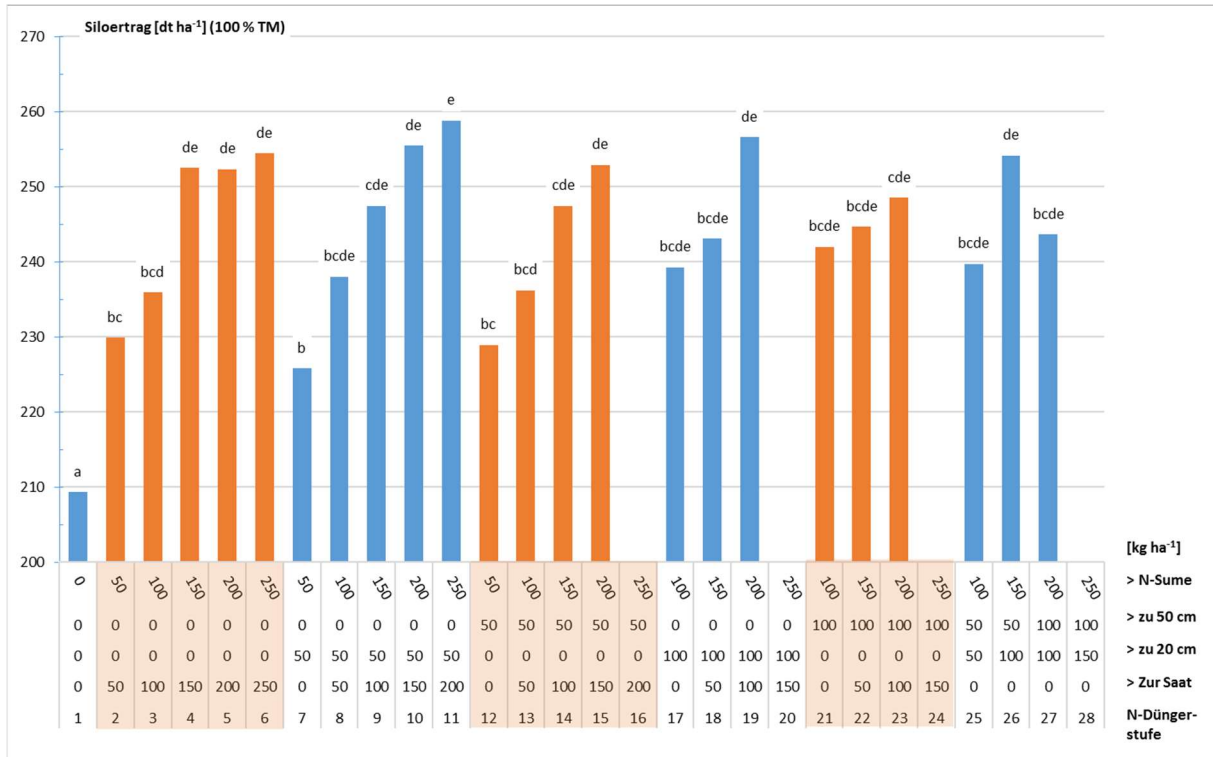


Abbildung 18: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf den Silomaisertrag im Mittel der Versuche in Roggenstein und Freising 2018 und 2019

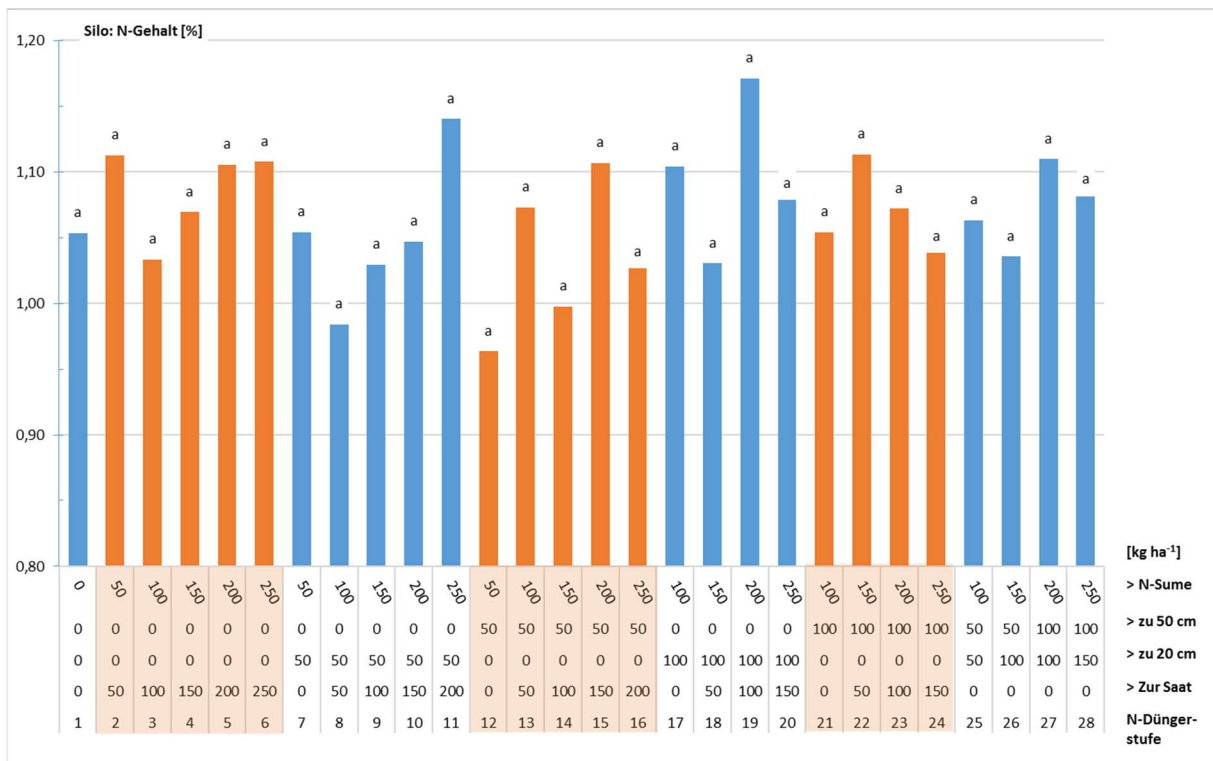


Abbildung 19: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf den N-Gehalt in der oberirdischen Biomasse zur Siloreife, Mittel der Versuche in Roggenstein und Freising 2018 und 2019

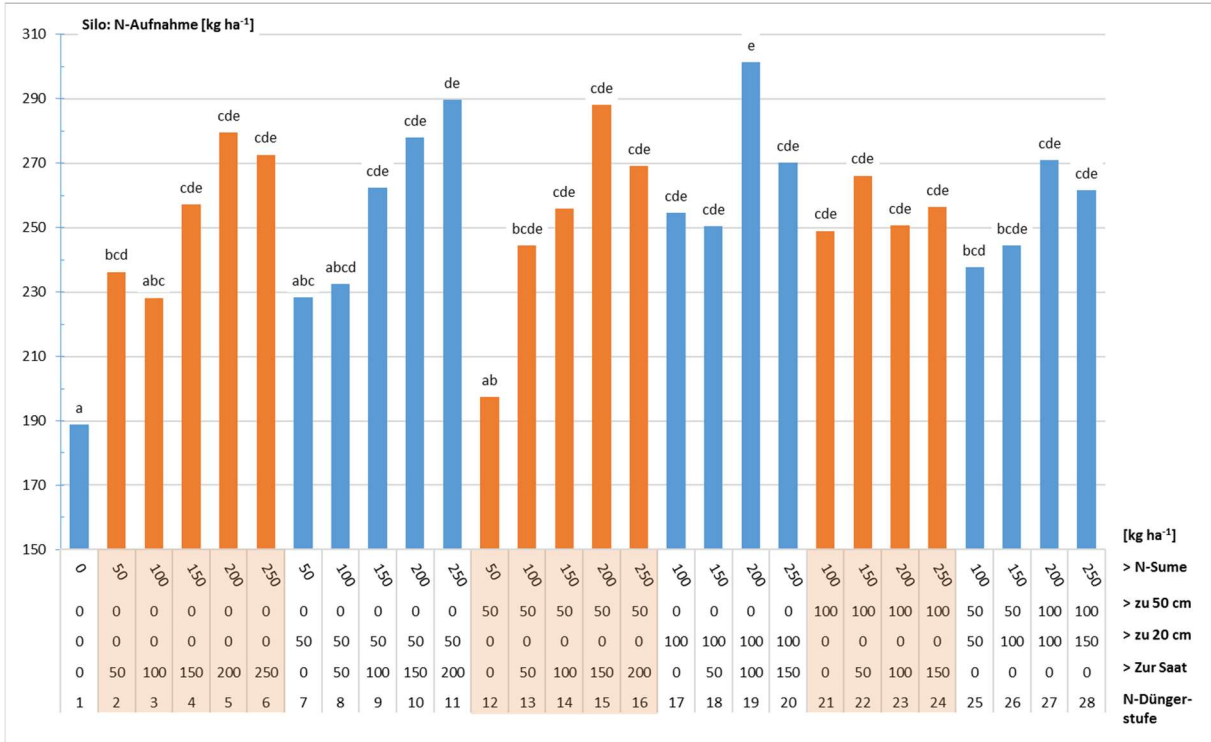


Abbildung 20: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf die Stickstoffaufnahme in die oberirdische Biomasse zur Siloreife, Mittel der Versuche in Roggenstein und Freising 2018 und 2019

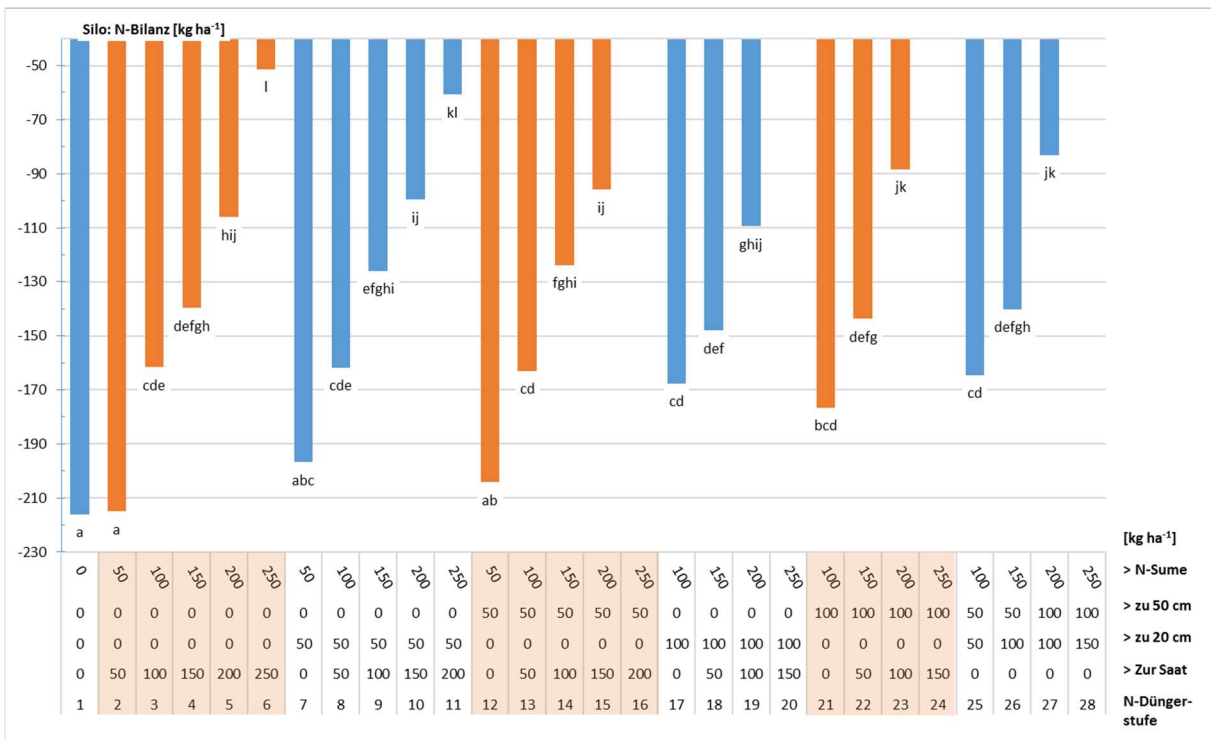


Abbildung 21: Wirkung zeitlich und mengenmäßig gestaffelter Stickstoffdüngung auf die N-Bilanz bei Silomais, Mittel der Versuche in Roggenstein und Freising 2018 und 2019

Körnermais

Beim Körnertrag war bis zur höchsten N-Stufe von 250 kg ha⁻¹ in beiden Jahren auf beiden Standorten eine Ertragszunahme zu beobachten (Abbildung 22 und 23). Ähnlich wie beim Silomais ertrag zeigten sich auch beim Körnermais die Varianten mit ausschliesslicher N-Düngung zur Saat als sehr ertragsstark (Varianten 2 bis 6). Ein Splitten der N-Gaben zur Saat und bei 20 cm Wuchshöhe (Varianten 7 bis 11 bzw. 17 bis 20) oder ein Splitten zur Saat und bei 50 cm Wuchshöhe (Varianten 12 bis 16) zeigten keine Ertragsnachteile gegenüber ausschließlicher N-Düngung zur Saat.

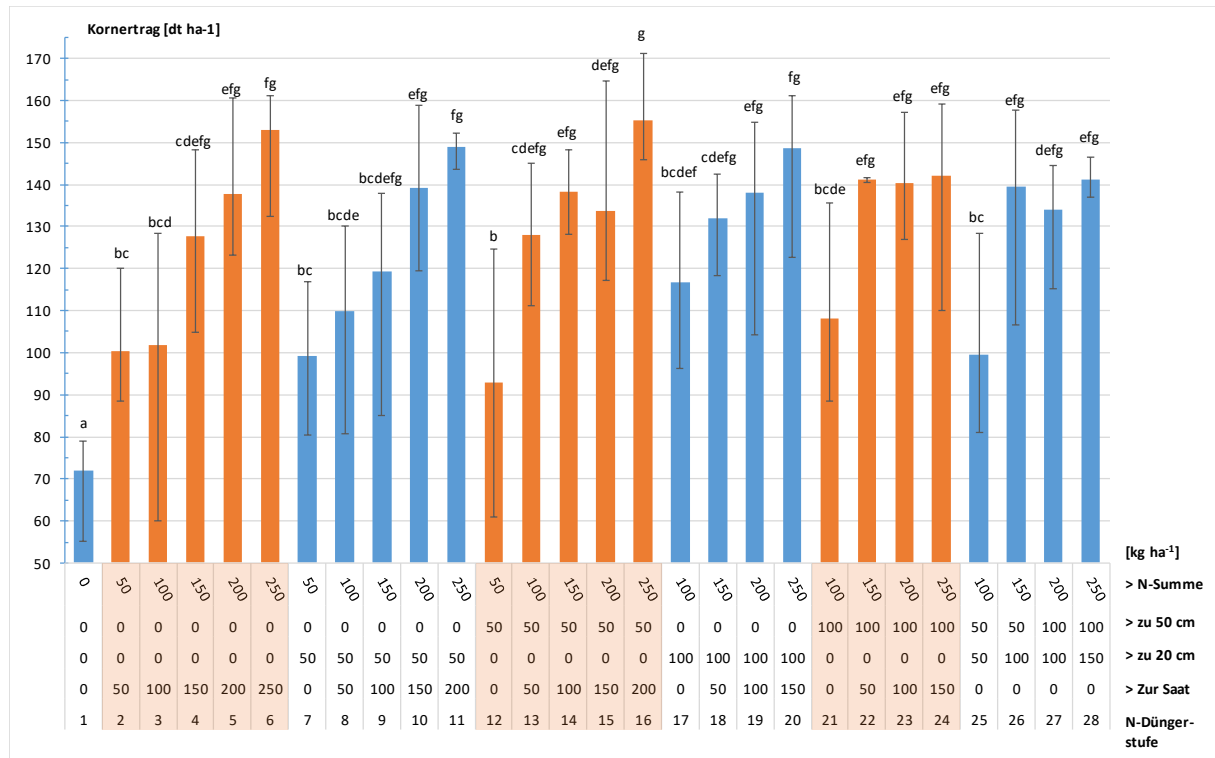


Abbildung 22: Wirkung differenzierter Stickstoffdüngung auf den Mais-Körnertrag, Freising 2018

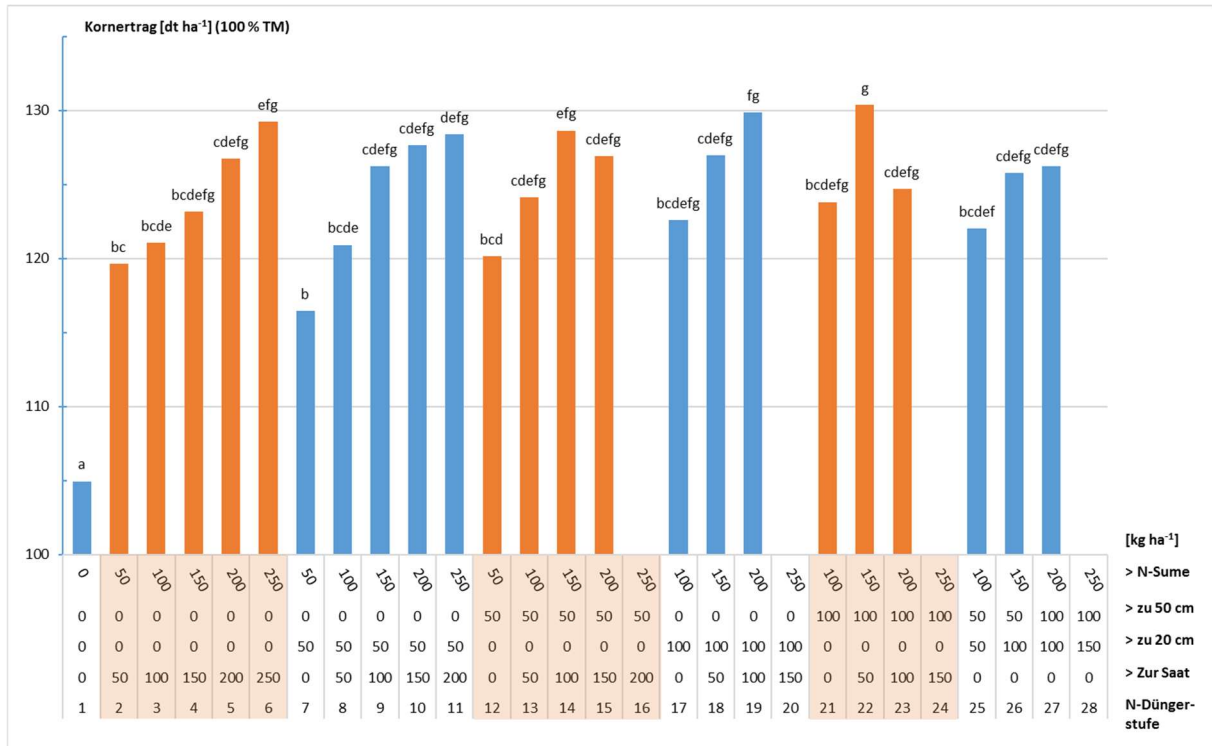


Abbildung 23: Wirkung differenzierter Stickstoffdüngung auf den Mais-Kornertrag, Mittelwerte aus Freising und Roggenstein 2018 und 2019

In Abbildung 23 ist die Korn-N-Aufnahme der verschiedenen Varianten im Mittel aller Standorte und Jahre dargestellt. Die Korn-N-Aufnahme steigt mit der N-Düngermenge unabhängig vom Düngungstermin. Bei gleicher N-Düngermenge nimmt jedoch die N-Einlagerung in das Korn mit späterer N-Düngung leicht ab.

Auch die N-Salden bei Körnermais sind weitgehend negativ (Abbildung 24). Dies gilt nicht für Varianten mit sehr hoher N-Düngung von 250 kg ha⁻¹. Allerdings sind die Salden bei Körnermais ca. 60 kg ha⁻¹ höher als die N-Salden von Silomais. Dies bedeutet, im Körnermaisstroh normal gedüngter Maisbestände werden etwa 60 kg ha⁻¹ Stickstoff eingelagert.

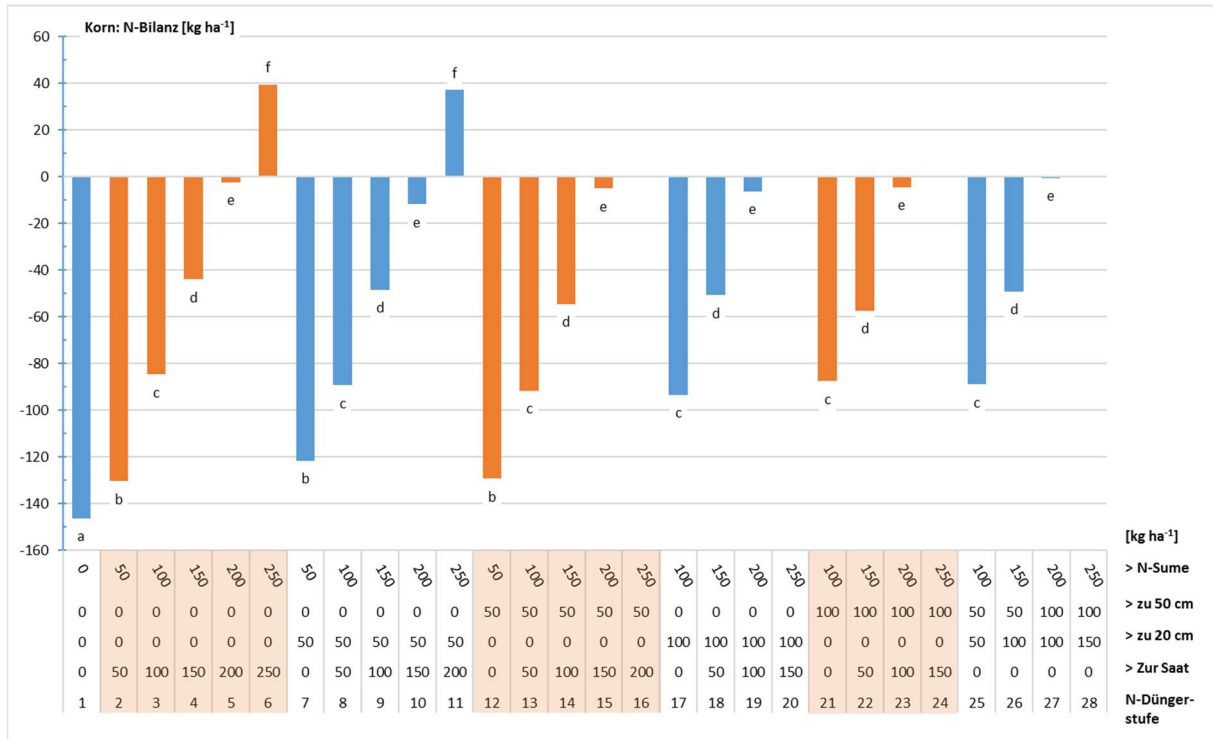


Abbildung 24: Wirkung differenzierter Stickstoffdüngung auf den N-Saldo von Körnermais, Mittelwerte aus Freising und Roggenstein 2018 und 2019

4.1.2 Zusammenhänge von Pflanzenparametern zu frühen Entwicklungsstadien und dem Trockenmasseertrag zur Siloreife

Die Düngung eines Maisbestandes ist aufgrund technischer Gegebenheiten nur bis zu einem Entwicklungsstadium von ca. 50 cm möglich. Für die Düngung ist zudem von Bedeutung, ob aus der Pflanzenentwicklung in frühen Entwicklungsstadien Rückschlüsse auf die Ertragsbildung und den N-Düngerbedarf möglich sind. Aus diesem Grunde wurde untersucht, welche Zusammenhänge zwischen Pflanzenparametern zu frühen Entwicklungsstadien und dem Ertrag von Silo- und Körnermais bestehen. Hierzu wurden quadratische Regressionen von Biomasseaufwuchs, N-Gehalt und N-Aufnahme der ersten drei Pflanzenbeprobungstermine T 2 (20 cm Wuchshöhe), T 3 (30 cm Wuchshöhe) und T 4 (50 cm Wuchshöhe) und dem Trockenmasseertrag zur Siloreife bzw. Körnerreife berechnet. Zum Termin T 1 wurden nur Sensormessungen durchgeführt.

Erwartungsgemäß ergaben sich keine Unterschiede in den Beziehungen verschiedener Pflanzenparameter während der frühen Jugendentwicklung und der Ertragsbildung von Silomais und Körnermais, weshalb nachfolgend nur die Daten für die Ertragsbildung von Silomais dargestellt sind. Als Maß für die Bedeutung von Pflanzenparametern in frühen Entwicklungsstadien und dem späteren Ertrag wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 der Regressionsrechnungen der Pflanzenparameter Biomasseaufwuchs, N-Gehalt und Stickstoffaufnahme bei 20 cm, 30 cm und 50 cm Wuchshöhe gewählt (Tabelle 18).

Zwischen dem Ertrag von Mais zur Siloreife und dessen Entwicklung in frühen Entwicklungsstadien ist ein Zusammenhang erkennbar. Die R^2 -Werte zwischen Biomasseaufwuchs, N-Gehalt und N-Aufnahme sind bei 20 cm und 30 cm Wuchshöhe sehr niedrig. Auch sind in diesen frühen Entwicklungsstadien große Schwankungen der R^2 -Werte zwischen den einzelnen Versuchsstandorten und Jahren festzustellen. Mit zunehmender Wuchshöhe werden jedoch die Zusammenhänge enger, wie die Zunahme der R^2 -Werte bei 50 cm Wuchshöhe zeigt.

Tabelle 18: Bedeutung von Pflanzenparametern zu frühen Entwicklungsstadien für den Siloreife-Trockenmasseertrag von Mais, dargestellt als Bestimmtheitsmaß R^2 quadratischer Regressionen

Termin	Wuchshöhe	Jahr	Ort	Versuch	Biomasseaufwuchs	N-Gehalt	N-Aufnahme
					Bestimmtheitsmaße		
2	20 cm	2018	Freising	Schlag I	0,15	0,77	0,39
			Roggenstein	Hohertrag	0,18	0,18	0,30
			Roggenstein	Niedrigertrag	0,12	0,38	0,06
		2019	Freising	Schlag I	0,31	0,29	0,31
			Freising	Schlag II	0,21	0,28	0,23
			Roggenstein	Hohertrag	0,62	0,66	0,67
			Roggenstein	Niedrigertrag	0,26	0,34	0,31
3	30 cm	2018	Freising	Schlag I	0,41	0,72	0,62
			Roggenstein	Hohertrag	0,48	0,09	0,51
			Roggenstein	Niedrigertrag	0,22	0,11	0,27
		2019	Freising	Schlag I	0,20	0,19	0,22
			Freising	Schlag II	0,28	0,15	0,32
			Roggenstein	Hohertrag	0,59	0,52	0,65
			Roggenstein	Niedrigertrag	0,42	0,22	0,49
4	50 cm	2018	Freising	Hohertrag	0,70	0,78	0,81
			Roggenstein	Hohertrag	0,56	0,52	0,71
			Roggenstein	Niedrigertrag	0,56	0,25	0,61
		2019	Freising	Hohertrag	0,48	0,44	0,56
			Freising	Niedrigertrag	0,37	0,32	0,42
			Roggenstein	Hohertrag	0,55	0,25	0,59
			Roggenstein	Niedrigertrag	0,41	0,21	0,44

Bei 50 cm Wuchshöhe zeigen besonders der Biomasseaufwuchs und die N-Aufnahme enge Beziehungen zum Silomaisertrag. Die R^2 -Werte liegen dabei je nach Standort und Jahr im Bereich von 0,41 bis 0,70 (Tabelle 18). Die N-Aufnahme weist dabei stets höhere R^2 -Werte auf als die Biomassebildung. Dieser Effekt zeigte sich auch bereits bei der Wuchshöhe 30 cm. Zwischen der N-Aufnahme bei 50 cm Wuchshöhe und dem Silomaisertrag wurden für die Einzelversuche R^2 -Werte von 0,42 bis 0,81 berechnet. Dabei wurden die niedrigeren R^2 -Werte stets auf den Niedrigertragsstandorten ermittelt. Die Niedrigertragsstandorte sind gekennzeichnet durch eine größere Bodenheterogenität, so dass innerhalb der Versuche größere Unterschiede zu beobachten waren. Betrachtet man nur die Hohertragsstandorte, also Standorte mit geringen Unterschieden zwischen den Wiederholungen, so ergaben sich für die Beziehung N-Aufnahme bei 50 cm Wuchshöhe und Silomaisertrag R^2 -Werte von 0,56 bis 0,81 (Tabelle 18).

In den Abbildungen 25 bis 28 sind die funktionalen Zusammenhänge ausgewählter Biomasseparameter bei 20 cm, 30 cm und 50 cm Wuchshöhe zum Ertrag von Silomais in den Jahren 2018 und 2019 dargestellt.

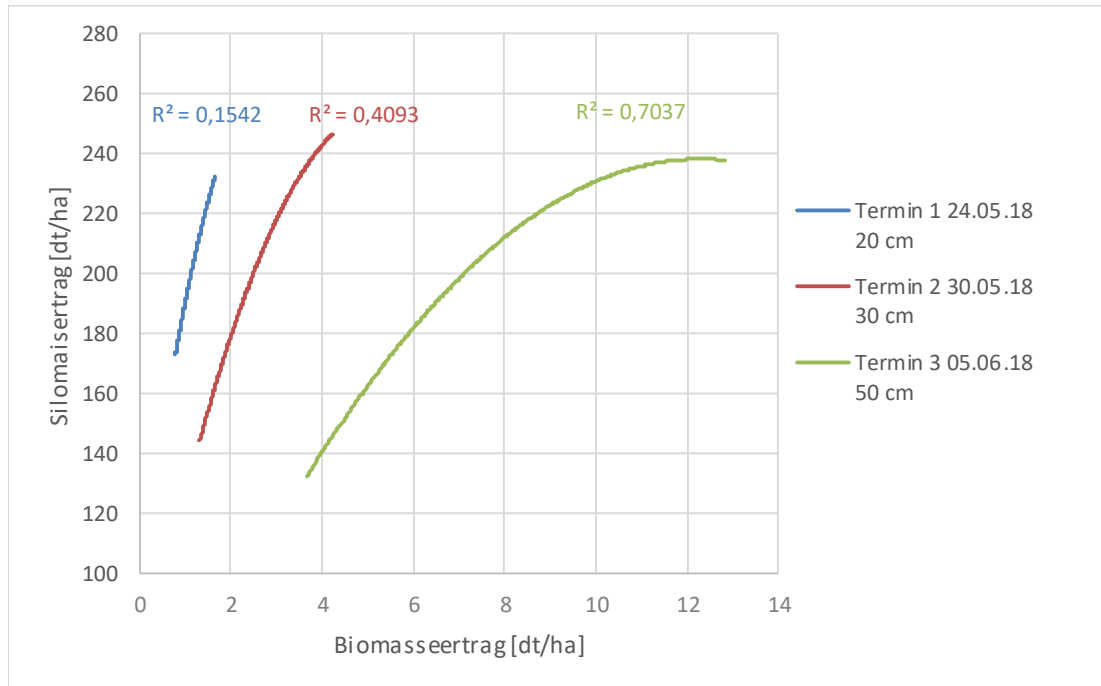


Abbildung 25: Beziehung zwischen dem Biomasseertrag zu frühen Entwicklungsstadien und dem Silomais-TM-Ertrag (Freising 2018)

Im Maisversuch Freising 2018 hatte der Biomasseertrag bei der ersten Beprobung bei 20 cm Wuchshöhe die geringste Bedeutung für den Ertrag zur Siloreife ($R^2 = 0,15$). Bei einer Wuchshöhe von 30 cm lagen die Bestimmtheitsmaße bei Werten von 0,40 und bei 50 cm Wuchshöhe erreichte das Bestimmtheitsmaß Werte von 0,7. Die Kurvenverläufe in sehr frühen Entwicklungsstadien sind nahezu linear, während bei 50 cm Wuchshöhe eine Optimumskurve zu erkennen ist (Abbildung 25). Sehr ähnliche Kurvenverläufe zwischen Biomassebildung in frühen Entwicklungsstadien und dem Ertrag von Silomais ergaben sich auch für 2019 (Abbildung 26). Auch in 2019 zeigten die Beziehungen zwischen Silomaissertrag und Biomassebildung bei 20 cm und 30 cm Wuchshöhe nahezu einen linearen Verlauf, während bei 50 cm Wuchshöhe ein Optimumskurve zu erkennen ist. In beiden Jahren wurden maximale Silomaisserträge dann erreicht, wenn in 50 cm Wuchshöhe bereits 12 dt ha^{-1} Trockenmasse gebildet waren.

Der Zusammenhang zwischen N-Gehalt in der Pflanze zu frühen Entwicklungsstadien und dem Ertrag von Silomais ist exemplarisch in Abbildung 27 dargestellt. Mit steigendem N-Gehalt steigt der Silomaissertrag. Jedoch ist die Spanne der N-Gehalte zwischen niedrigen und hohen Erträgen sehr gering. Auch wird der N-Gehalt nur wenig vom N-Angebot bestimmt. Der N-Gehalt wird in erster Linie bestimmt durch die Pflanzenentwicklung. Mit fortschreitender Pflanzenentwicklung sinkt der N-Gehalt in der TM (nicht dargestellt). Die Beziehung N-Gehalt in der Biomasse und TM-Ertrag von Silomais zeigt jedoch zu keinem Zeitpunkt ein Optimum. Die geringe Variabilität der N-Gehalte, der starke Einfluss des Entwicklungsstadiums lassen den N-Gehalt als wenig hilfreichen Parameter für die Abschätzung der späteren Ertragsbildung erscheinen. Dies kommt auch in den stets niedrigeren R^2 -Werten zwischen N-Gehalt und Ertrag im Vergleich zu Biomasse und Ertrag bzw. N-Aufnahme und Ertrag in Tabelle 18 zum Ausdruck. Ferner fehlt als wichtiges Kriterium eine Optimumsbeziehung zwischen N-Gehalt in der Biomasse und dem Ertrag. Wegen des Fehlens eines Optimums lässt sich kein N-Gehalt für den Maximalertrag ableiten.

Den funktionalen Zusammenhang zwischen N-Aufnahme in frühen Entwicklungsstadien und Ertrag von Silomais zeigt Abbildung 28. Die Kurvenverläufe gleich stark denen mit der Biomassebildung (vgl. Abbildung 28 mit Abbildung 26 und Abbildung 27). Ursache ist, dass die N-Aufnahme in erster Linie durch die TM-Bildung und weniger durch den N-Gehalt bestimmt wird. Da die N-Aufnahme aus dem Produkt Trockenmasse und N-Gehalt berechnet wird und diese beiden Parameter gleichgerichtet positiv auf den Ertrag wirken, ergeben sich für die N-Aufnahme die höchsten R^2 -Werte (Tabelle 18, Abbildung 28). Ist die Schwankung der N-Aufnahme zwischen einem niedrigen und hohen Silomaisertrag bei 20 cm Wuchshöhe besonders gering, so wird diese mit zunehmender Wuchshöhe immer größer (Abbildung 28). Die große Spreizung, das hohe R^2 zwischen N-Aufnahme und Silomaisertrag sowie die in allen Versuchen beobachtete Optimumskurve lassen diesen Parameter als Maß für die Ableitung der Höhe der N-Düngung besonders geeignet erscheinen.

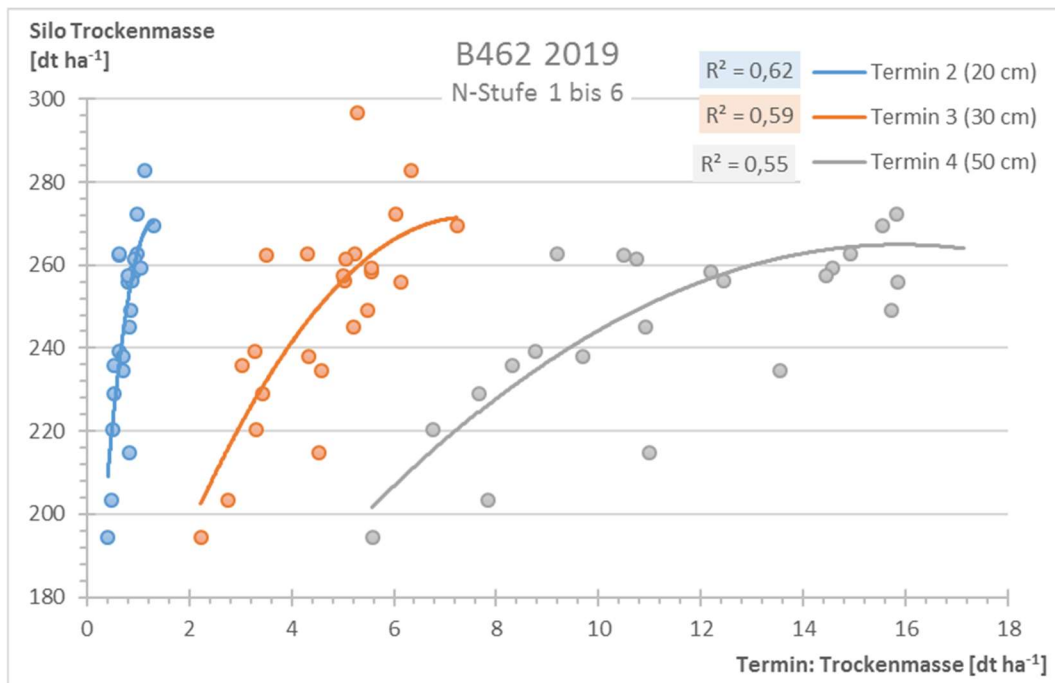


Abbildung 26: Beziehung zwischen der Trockenmassebildung bei 20 cm, 30 cm und 50 cm Wuchshöhe und dem Ertrag zur Siloreife, Versuche Freising und Roggenstein 2019

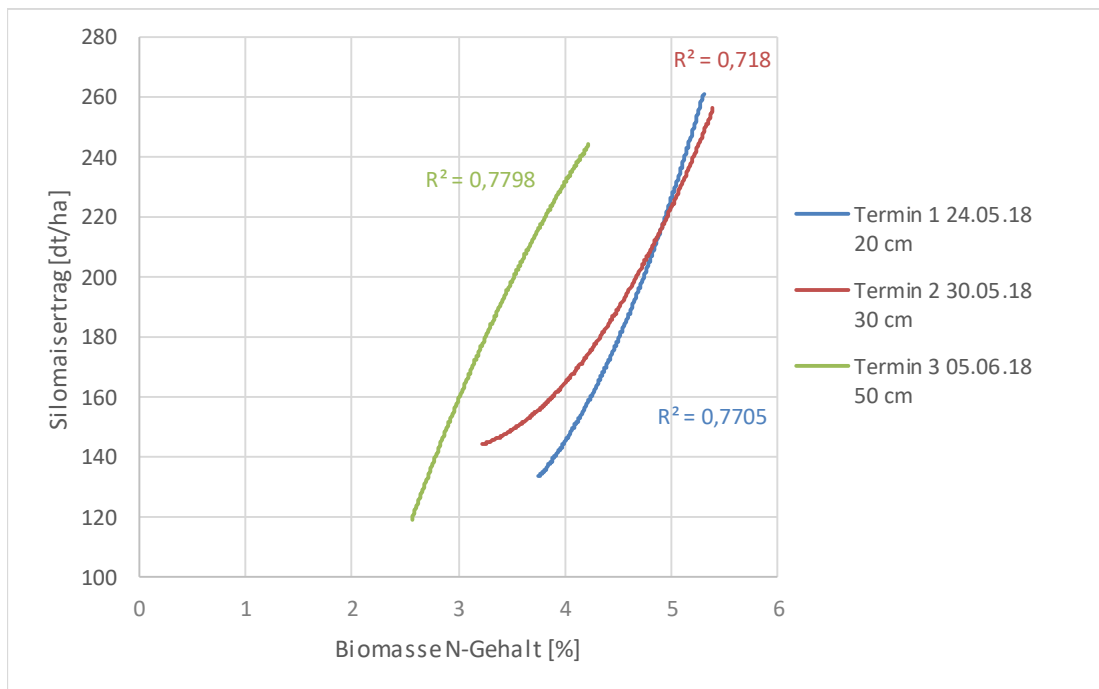


Abbildung 27: Beziehung zwischen dem N-Gehalt in der Biomasse zu frühen Entwicklungsstadien und dem Silomais-
TM-Ertrag (Freising 2018)

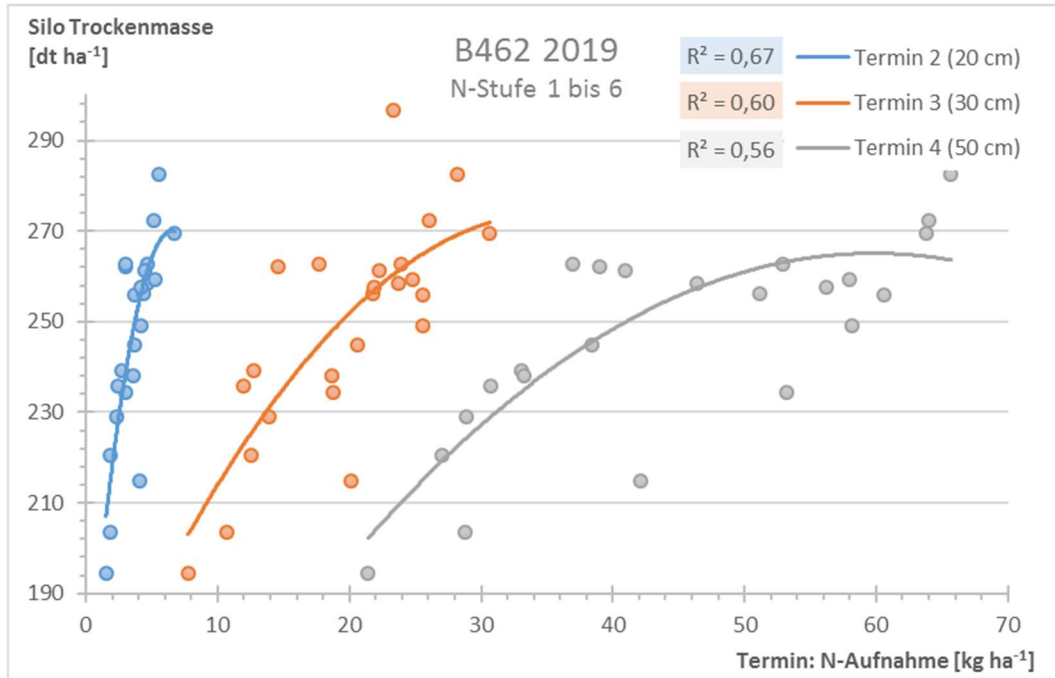


Abbildung 28: Beziehung zwischen der Stickstoffaufnahme bei 20 cm, 30 cm und 50 cm Wuchshöhe und dem
Ertrag zur Siloreife, Versuche Freising und Roggenstein 2019

4.1.3 Möglichkeiten der Charakterisierung des Wachstums von Mais in frühen Entwicklungsstadien durch Reflexionsmessungen

Nachfolgend soll aufgezeigt werden, wie gut wichtige Pflanzenparameter zu frühen Entwicklungsstadien mit Reflexionsmessungen bestimmt werden können. In den folgenden Säulendiagrammen und Tabellen werden hierzu die Beziehungen verschiedener Vegetationsindizes und der Biomassebildung, dem N-Gehalt und der N-Aufnahme für verschiedene Entwicklungsstadien als R^2 -Werte linearer Regressionen dargestellt. Wie die Ausführungen oben gezeigt haben, ist für die Stickstoffdüngung die N-Aufnahme der wichtigste Parameter. Aus wissenschaftlichen Gründen sollen jedoch auch die Parameter Biomassebildung und N-Gehalt mit betrachtet werden.

Jahr 2018

Zunächst werden die Ergebnisse aus den im Jahr 2018 durchgeführten Versuchen dargestellt.

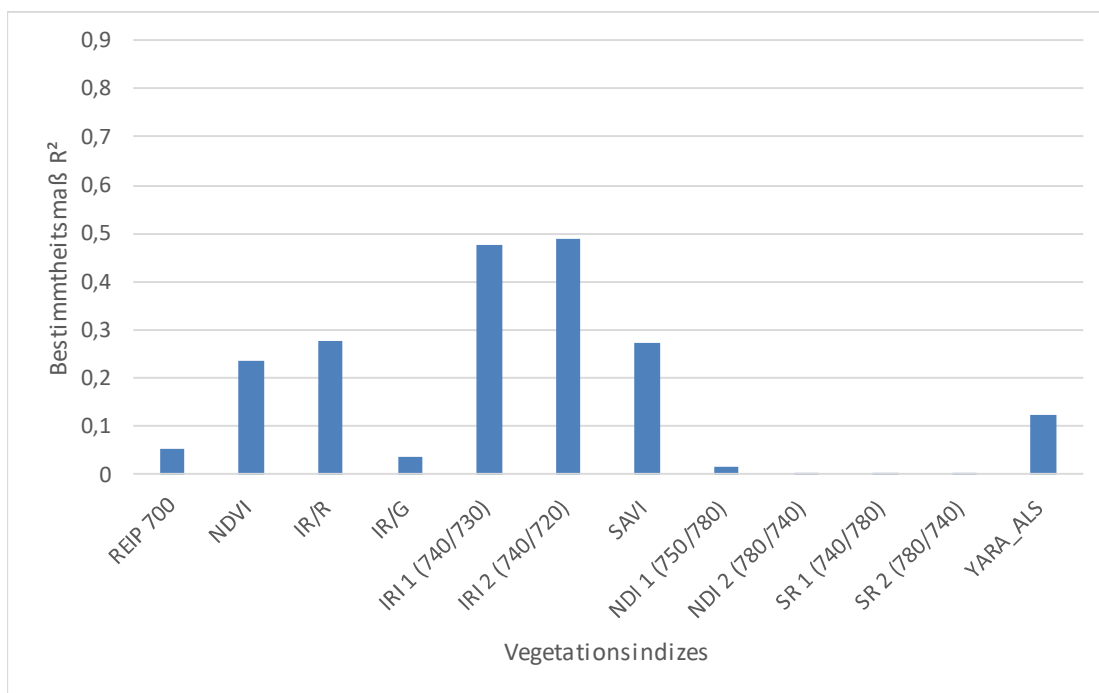


Abbildung 29: Indexvergleich: R^2 -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und dem N-Gehalt in der Biomasse zu Termin 1, 2018

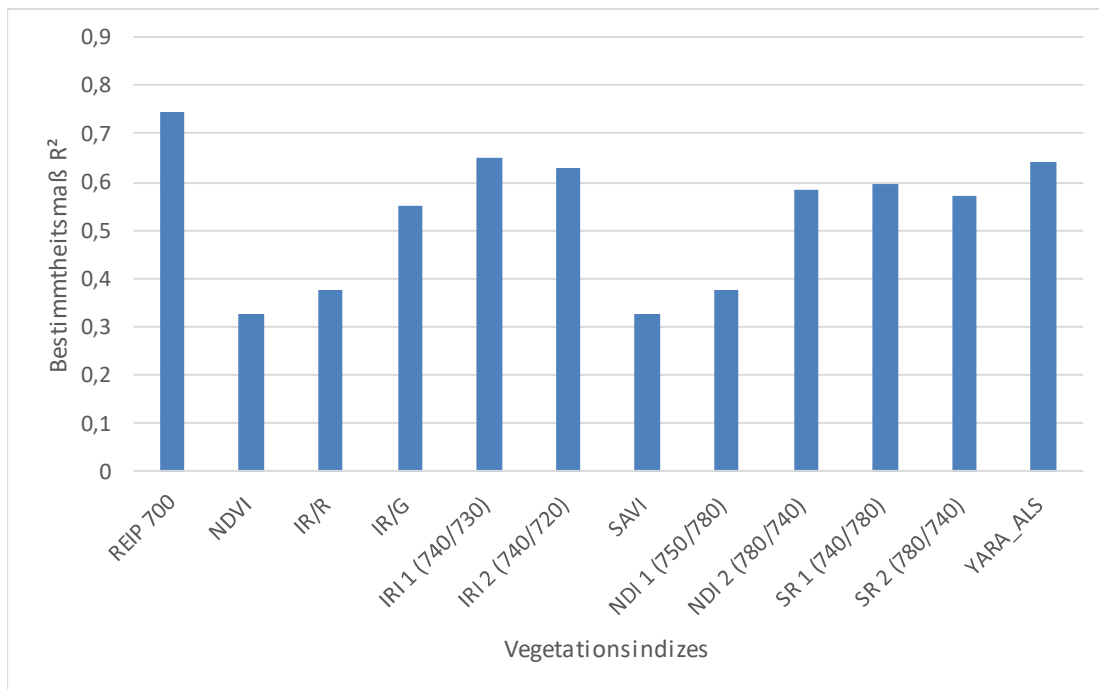


Abbildung 30: Indexvergleich: R^2 -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und dem N-Gehalt in der Biomasse zu Termin 2, 2018

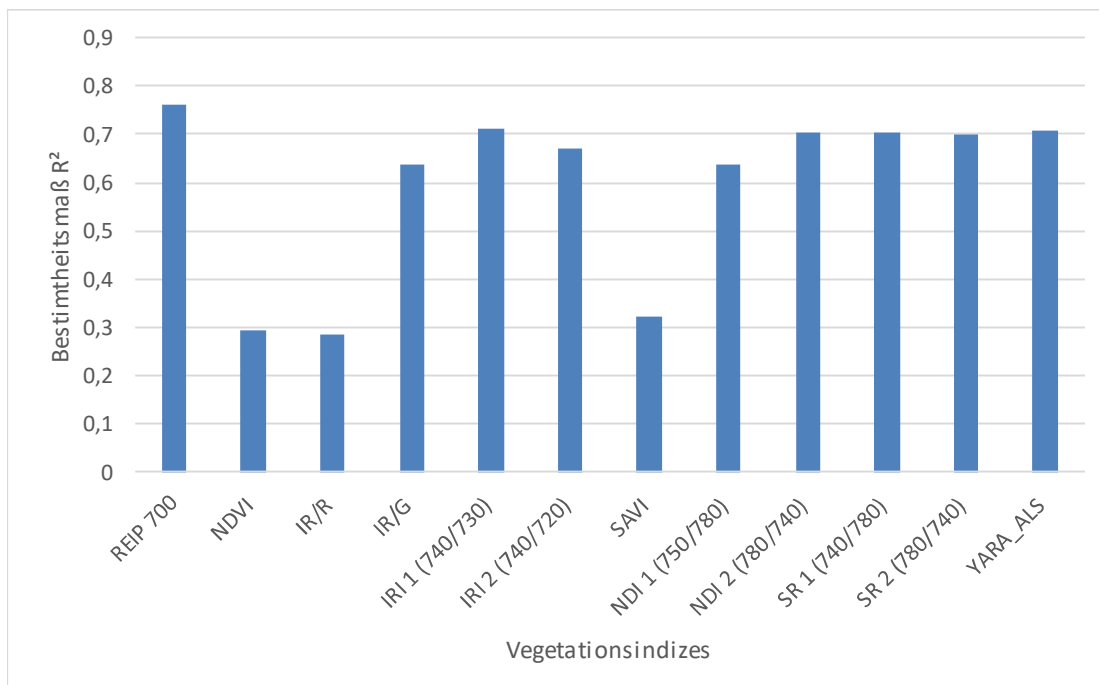


Abbildung 31: Indexvergleich: R^2 -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und dem N-Gehalt zu Termin 3, 2018

Zu Termin 1 liegen nur der Vegetationsindex IRI 1 (740/730) und der Vegetationsindex IRI 2 (740/720) bei R^2 -Werten von über 0,40. Bei den Terminen 2 und 3 eignet sich zur Messung des N-Gehalts am besten der REIP 700 (Bestimmtheitsmaße von 0,75 bzw. 0,76). Betrachtet man alle drei Termine der frühen Pflanzenentwicklung, so lässt sich mit dem Index IRI 1 (740/730) am besten auf den N-Gehalt der Biomasse schließen.

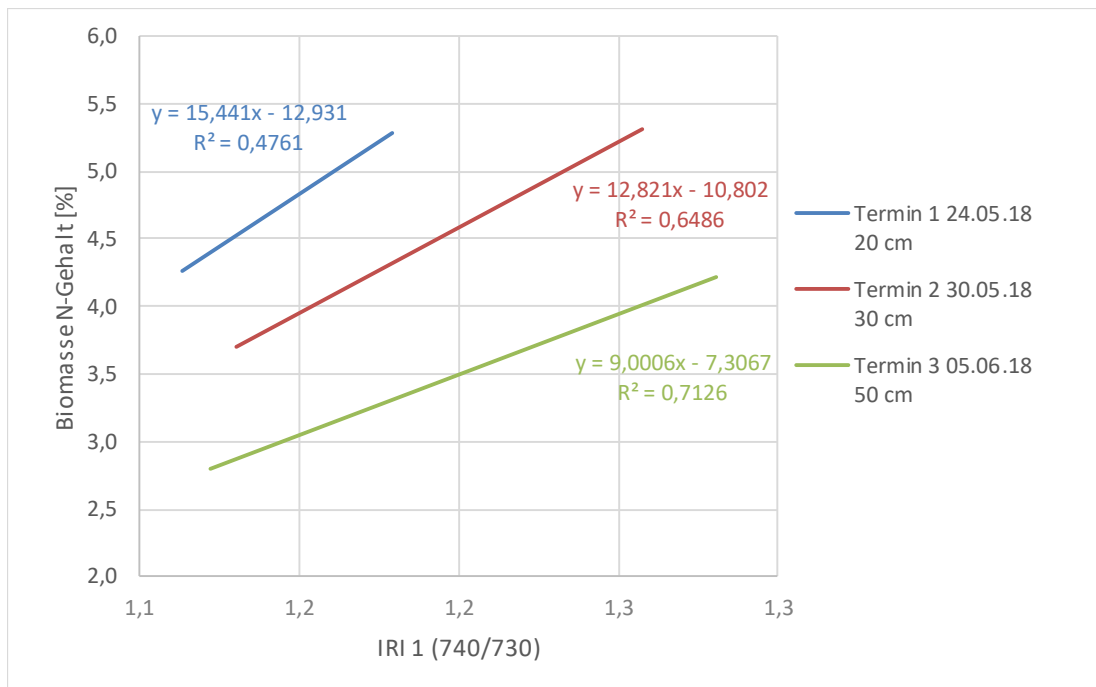


Abbildung 32: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex IRI 1 (740/730) und dem N-Gehalt zu frühen Entwicklungsstadien, 2018

Anhand der verschiedenen Kurvenverläufe zu den drei Terminen wird die Stadienabhängigkeit deutlich. Im dargestellten Beispiel misst der Sensor zu Termin 1 bei einem IRI 1 Wert von 1,2 einen N-Gehalt von ca. 4,7 %. Zu Termin 2 und 3 bedeutet dieser Indexwert einen N-Gehalt von knapp 4 % bzw. 3 % in der Pflanzenbiomasse.

Vegetationsindizes – Trockenmasseertrag

Die R^2 -Werte der Beziehung zwischen Vegetationsindizes und Biomasseertrag in der Jugendentwicklung weisen bessere Bestimmtheitsmaße auf, als die der linearen Regressionen von Vegetationsindizes und N-Gehalt in der Biomasse. Zu Termin 1 liegen nur die Indizes IR/R und IRI 2 (740/720) bei einem R^2 -Wert über 0,5. Bei den Terminen 2 und 3 verbessern sich die Beziehungen, wobei zum 2. Beprobungstermin sechs Indizes ein Bestimmtheitsmaß größer 0,7 aufweisen und zum 3. Biomasseschnitt sogar neun Vegetationsindizes mit Werten über 0,8 aufzuführen sind.

Verglichen über alle drei Termine zeigt der Index IRI 2 (740/720) die besten Bestimmtheitsmaße.

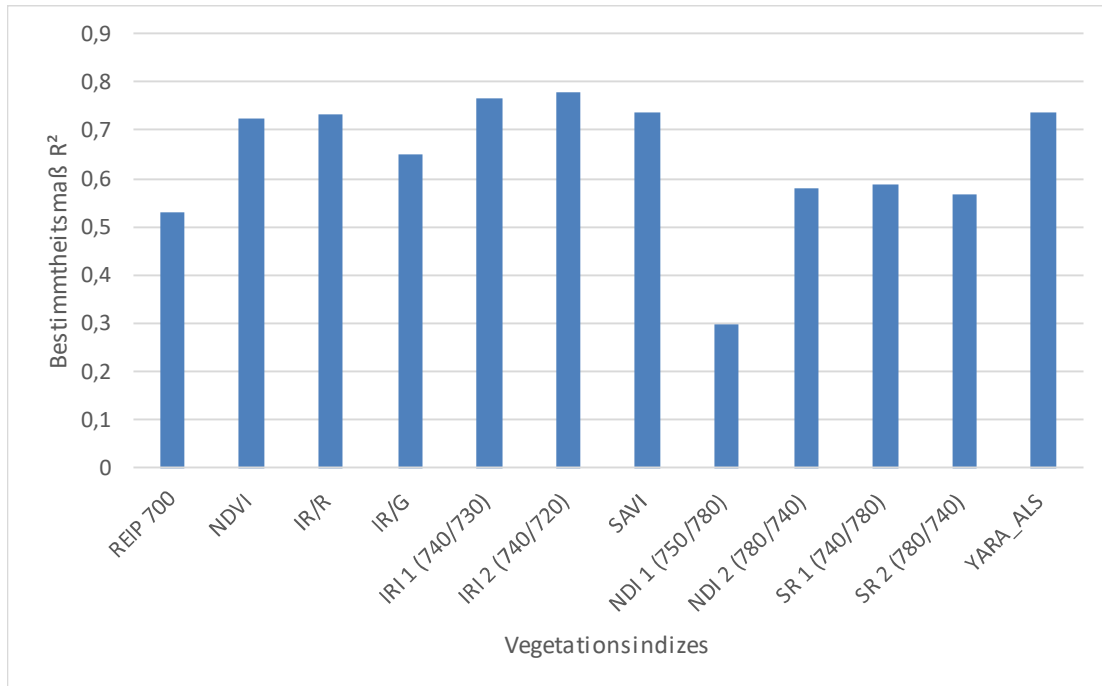


Abbildung 33: Indexvergleich: R^2 -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und dem Biomassertrag zu Termin 2, Jahr 2018

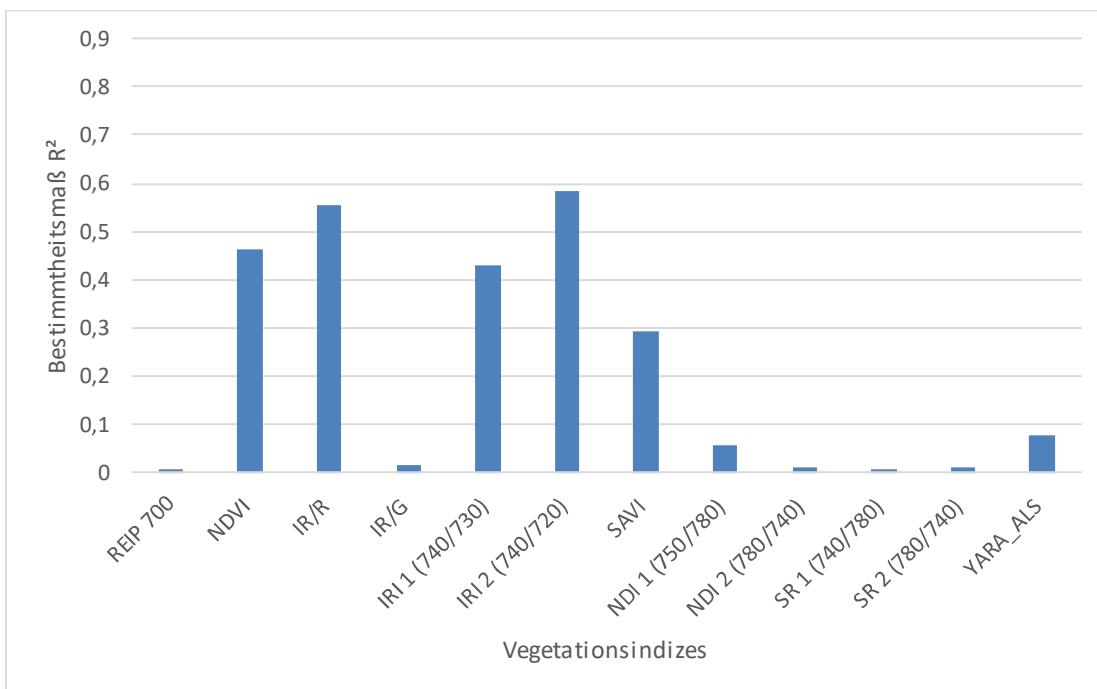


Abbildung 34: Indexvergleich: R^2 -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und dem Biomassertrag zu Termin 1, 2018

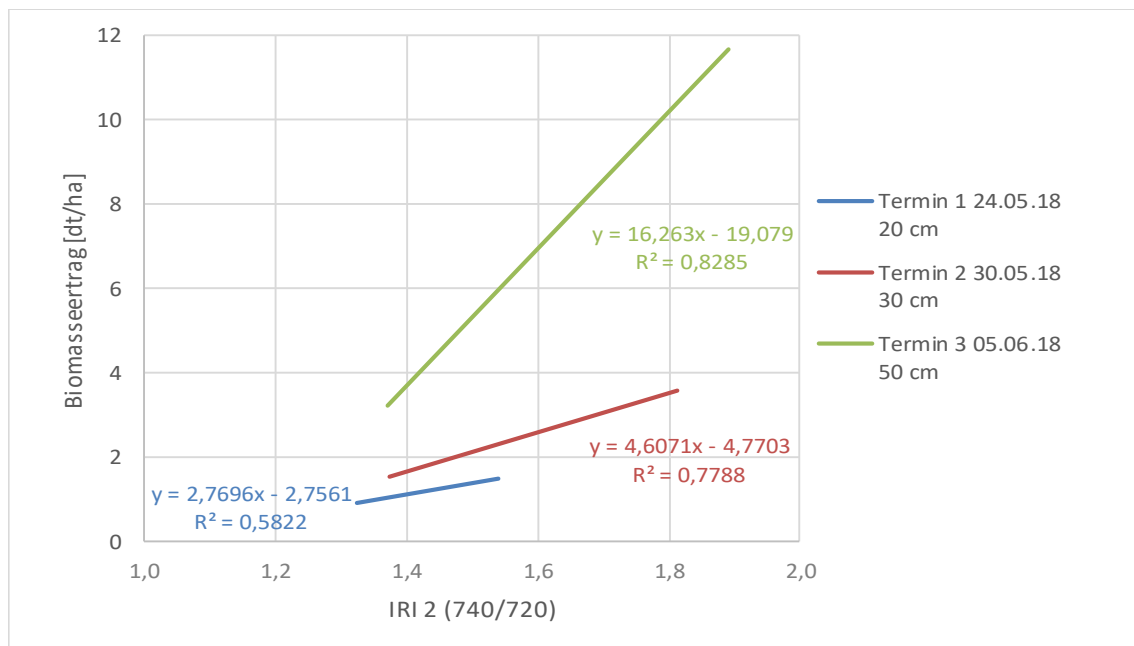


Abbildung 35: Indexvergleich: R²-Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und dem Biomasseertrag zu Termin 3, Jahr 2018

Auch zwischen dem Vegetationsindex IRI2 und dem Biomasseertrag zeigt die grafische Darstellung der linearen Regression eine deutliche Stadienabhängigkeit, wobei sich vor allem der dritte Termin von den beiden ersten Beprobungsterminen absetzt (Abbildung 35).

Vegetationsindizes - N-Aufnahme

Die Abbildungen 36 bis 38 zeigen mit fortschreitendem Wachstum von Mais eine Zunahme der Bestimmtheitsmaße für die Beziehungen zwischen den verschiedenen Vegetationsindizes und der Biomasse N-Aufnahme. Zu Termin 1 lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Indizes feststellen, wobei zu REIP 700, IR/G, NDI 1 (750/780), NDI 2 (780/740), SR 1 (740/780), SR 2 (780/740), und YARA ALS kein Zusammenhang feststellbar ist. Mit 0,72 weist der Index IRI 2 (740/720) den besten R²-Wert auf. Deutlich besser erfassbar wird die N-Aufnahme zu Termin 2 und 3. Zum zweiten Beprobungstermin erreichen 9 der 12 berechneten Indizes ein R² von 0,7 oder höher. Nur der NDI 1 (750/780) fällt hier mit 0,38 deutlich ab. Zu Termin 3 erreichen 9 der 12 Indizes sogar einen R²-Wert zwischen 0,8 und 0,9. Die Indizes NDVI, IR/R und SAVI haben mit Werten von 0,50 bis 0,53 die schlechtesten Beziehungen.

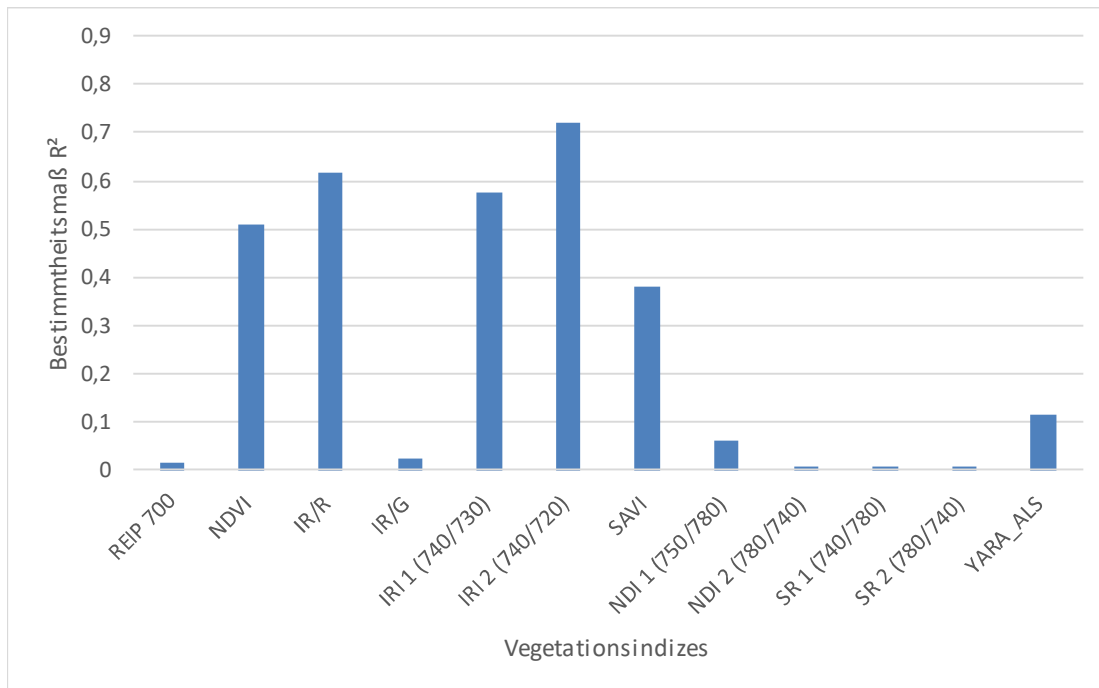


Abbildung 36: Indexvergleich: R^2 -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und der N-Aufnahme in der Biomasse zu Termin 1, Jahr 2018

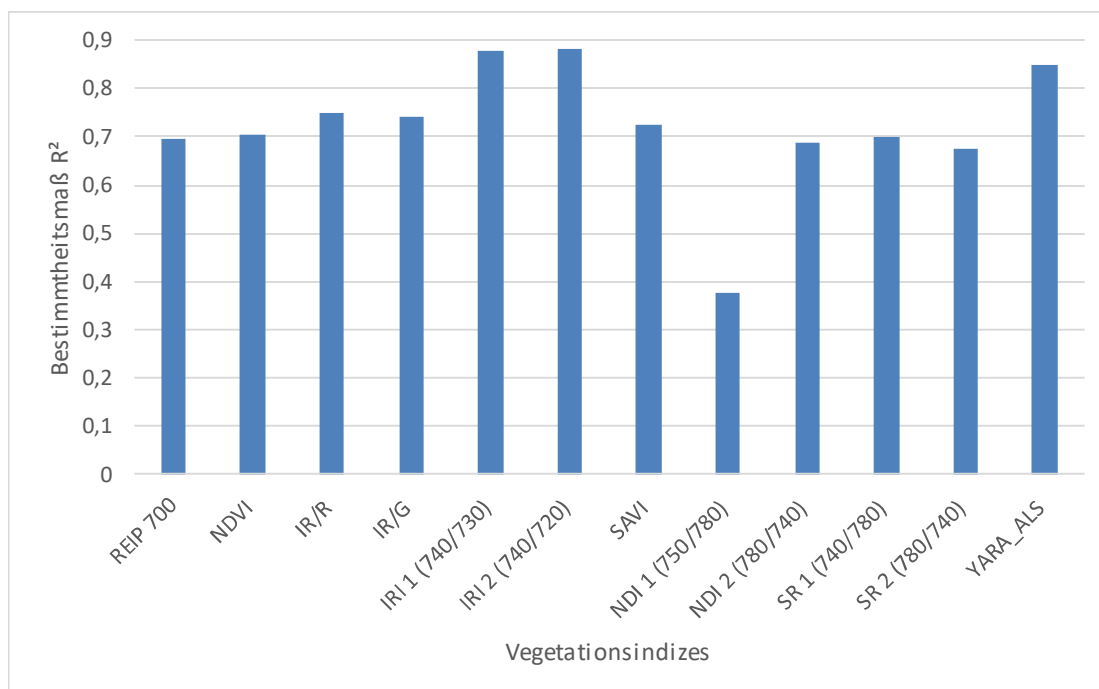


Abbildung 37: Indexvergleich: R^2 -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und der N-Aufnahme in der Biomasse zu Termin 2, Jahr 2018

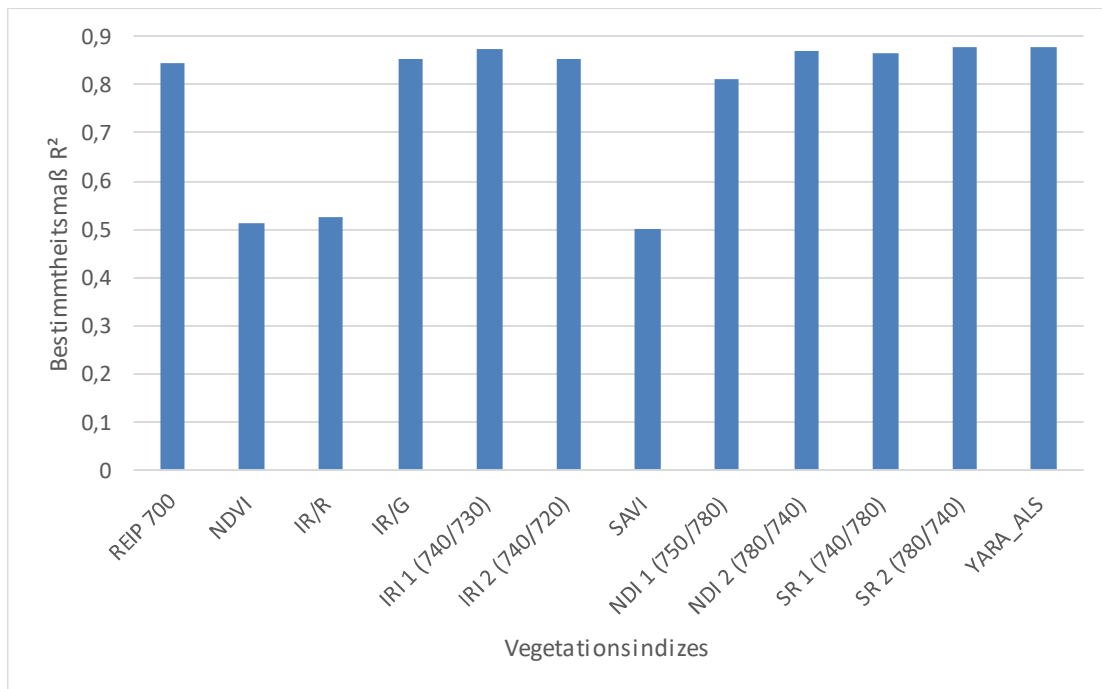


Abbildung 38: Indexvergleich: R^2 -Werte der linearen Regressionen für die Beziehungen zwischen den Vegetationsindizes und der N-Aufnahme in der Biomasse zu Termin 3, Jahr 2018

Zusammenfassend für alle drei Termine erwies sich im Jahr 2018 der Index IRI 2 (740/720) zur Ermittlung der Biomasse N-Aufnahme als der am besten geeignete Vegetationsindex. Es folgt daher die Darstellung der quantitativen Beziehung zwischen N-Aufnahme und Vegetationsindex (Abbildung 39). Interessant sind dabei die sehr ähnlichen Kurvenverläufe zu Termin 1 und 2 im Vergleich zu Termin 3. Ein wichtiger Grund hierfür dürfte in der kleinen Blattmasse von Mais in diesen frühen Stadien sein. Bei geringen Biomassemenen tragen alle Blatt- und Stängelteile in etwa ähnlichem Umfang zur Reflexion bei. Zu Termin 3 ist der Biomasseaufwuchs schon deutlich weiter und der Spektrometer erfasst vor allem die oberen Blattoberflächen, was sich wiederum in einem veränderten Kurvenverlauf (Steigung und y-Achsenabschnitt) widerspiegelt.

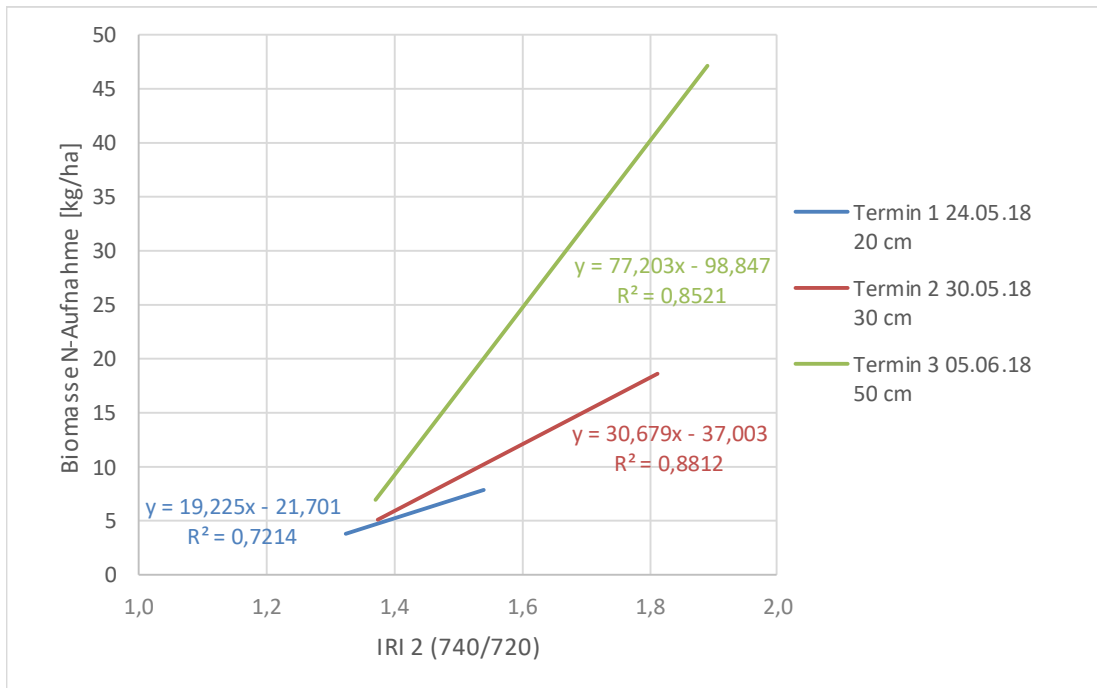


Abbildung 39: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex IRI 2 (740/720) und dem Biomasseertrag zu frühen Entwicklungsstadien, Jahr 2018

Jahr 2019

Die Beziehungen der Pflanzenparameter Biomassebildung, Stickstoffaufnahme und Wuchshöhe bei 20 cm, 30 cm und 50 cm Wuchshöhe zu den Vegetationsindices REIP und SR2 im Jahr 2019 ist in den Abbildungen 40-43 dargestellt. Auf die weiteren ebenfalls berechneten Vegetationsindices wird bei der Betrachtung beider Jahre eingegangen.

Die Abbildungen 40 und 41 zeigen den Zusammenhang zwischen N-Aufnahme und den Vegetationsindices REIP bzw. SR2 bei 20 cm, 30 cm und 50 cm Wuchshöhe. Es ist jeweils eine sehr enge Beziehung des Parameters Stickstoffaufnahme zu den angegebenen Vegetationsindices erkennbar. Die jeweiligen Kurven der verschiedenen Termine laufen dabei ineinander über. Während für den Vegetationsindex REIP bei N-Aufnahmen > 50 kg ha⁻¹ eine leichte Sättigung feststellbar ist, gilt dies für SR2 nicht. Für den Vegetationsindex SR2 ergibt sich für den Bereich der N-Aufnahme von 10 kg ha⁻¹ bis 60 kg ha⁻¹ nahezu ein linearer Kurvenverlauf. Hierdurch lassen sich auch hohe N-Aufnahmemengen besonders gut detektieren.

Bei der Betrachtung der Biomassebildung (Abbildung 42 und Abbildung 43) sind erwartungsgemäß die R² zu den jeweiligen Vegetationsindices etwas niedriger. Besonders auffällig ist jedoch die Zunahme der Sättigung bei hohen Biomassewerten. Letzteres gilt nicht nur für den Vegetationsindex REIP, sondern auch für den Index SR2.

Da im Gegensatz zu Getreide bei Mais die EC-Stadien schwer zu bestimmen sind, war die Überlegung, die Maisentwicklung über die Wuchshöhe zu definieren.

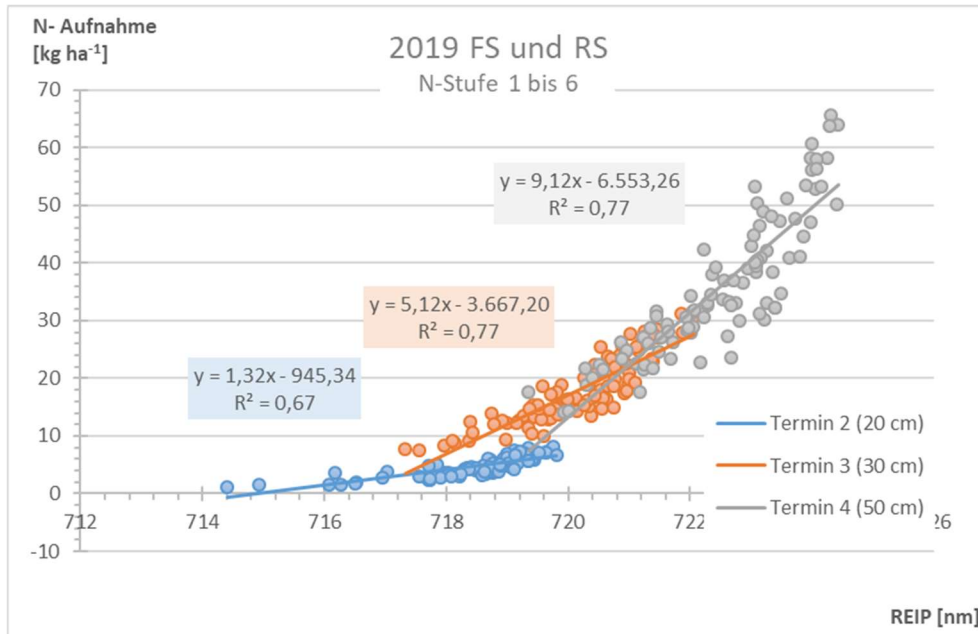


Abbildung 40: Beziehung zwischen der N-Aufnahme von Mais und dem Vegetationsindex REIP in frühen Entwicklungsstadien der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2019

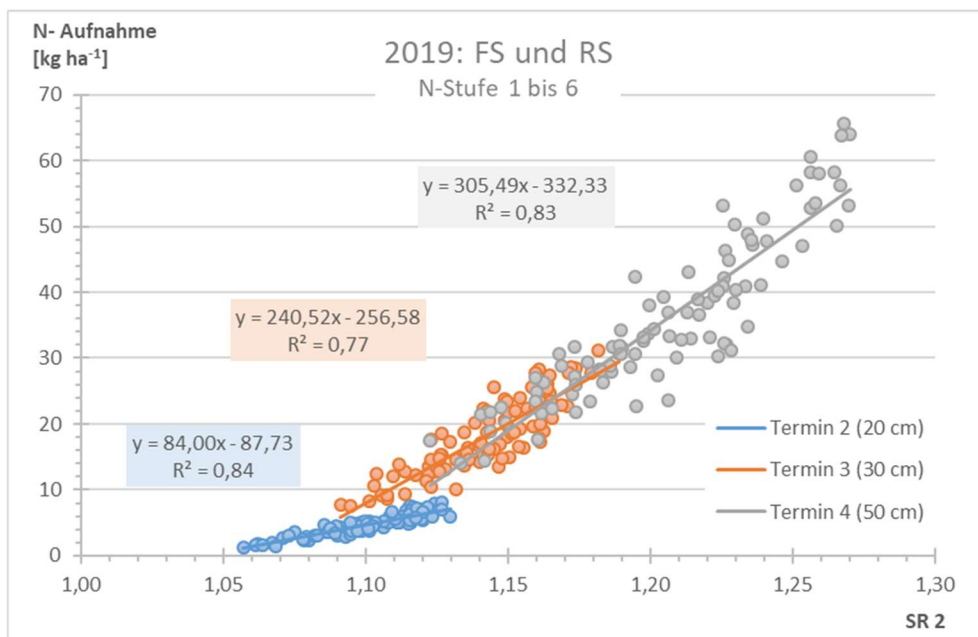


Abbildung 41: Beziehung zwischen der N-Aufnahme von Mais und dem Vegetationsindex SR 2 in frühen Entwicklungsstadien der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2019

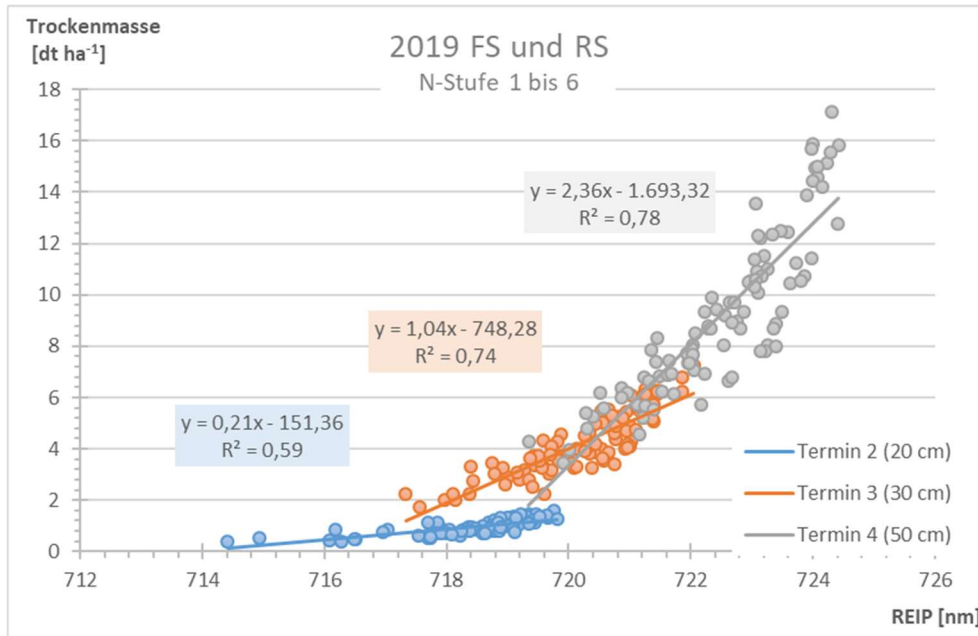


Abbildung 42: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex REIP und der Trockenmassebildung in frühen Entwicklungsstadien der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2019

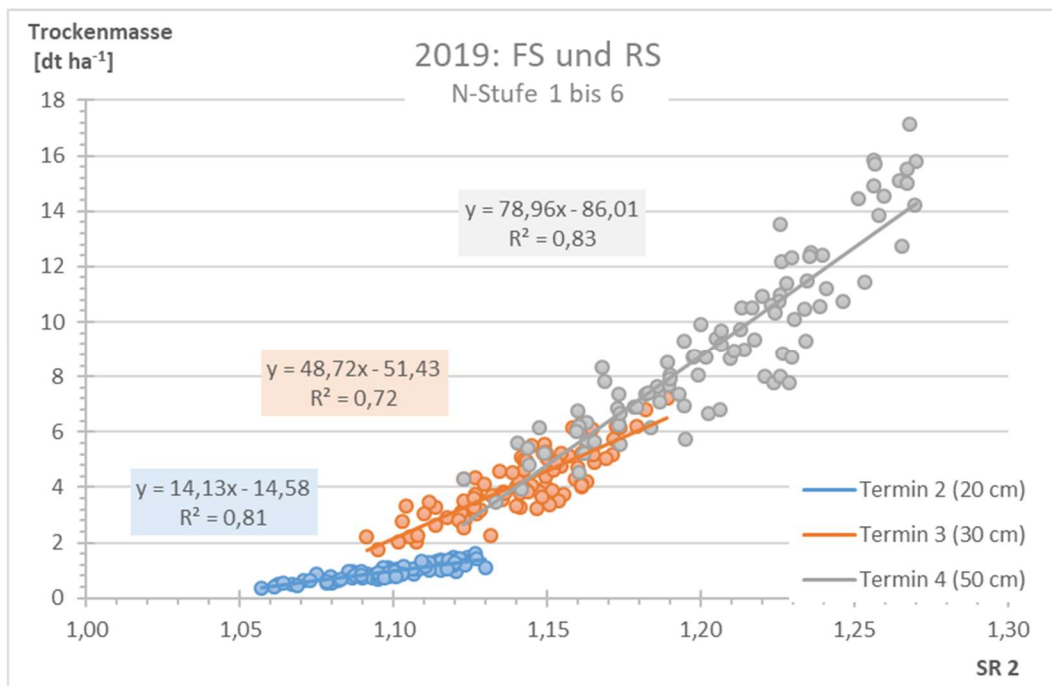


Abbildung 43: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex SR2 und der Trockenmassebildung in frühen Entwicklungsstadien der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2019

Zusammenfassung der Jahre 2018 und 2019

Während des Wachstums von Mais wurden in beiden Versuchsjahren in allen sieben Feldversuchen zu 11 Terminen Reflektionsmessungen mit einem 2-Kanal-Spektrometer durchgeführt mit dem Ziel, die Biomassebildung und Stickstoffaufnahme von Mais mittels berührungsloser Messungen zu charakterisieren. Aus diesen Reflexionsdaten wurden in der Literatur häufig verwendete Vegetationsindices berechnet (Tabellen 19, 20 und 21).

In Tabelle 19 sind die R²-Werte ausgewählter Vegetationsindices zur Biomassebildung von 20 cm bis 100 cm Wuchshöhe dargestellt. Grün hinterlegt sind R²-Werte > 0,70. Bei 20 cm Wuchshöhe lässt sich die Biomassebildung nur sehr schwer mittels Reflexionsmessungen charakterisieren, wie die niedrigen R²-Werte zeigen. Lediglich auf dem Standort Roggenstein in 2019 konnten bei so niedriger Wuchshöhe bereits brauchbare Beziehungen berechnet werden. Ab 40 cm Wuchshöhe wurden auf allen Standorten in allen Jahren mehrere Vegetationsindices mit R²-Werten > 0,70 zur Biomassebildung berechnet. Die Vegetationsindices NDVI, IRR und Savi allerdings erreichten diesen Wert im Bestimmtheitsmaß selten. Als besonders geeignete Vegetationsindices erwiesen sich der REIP, der NDI1, der NDI2, SR1, SR2 und Yara. Die drei zuletzt genannten erwiesen sich von den sechs guten Vegetationsindices als besonders geeignet (Tabelle 19). Ab einer Wuchshöhe von 100 cm wurde bei allen Vegetationsindices stets eine Abnahme der Bestimmtheitsmaße festgestellt. Die Ursache hierfür dürfte in der starken gegenseitigen Beschattung der Blätter ab dieser Wuchshöhe liegen, die nur eine geringe Differenzierung in der Reflexion des eingestrahlenen Lichts ermöglicht.

Tabelle 19: Bestimmtheitsmaße ausgewählter Vegetationsindices zur Biomassebildung von Mais in frühen Entwicklungsstadien in verschiedenen Jahren auf unterschiedlichen Standorten

R ² aus linearer Regression (X = Biomasse Parameter; Y = Vegetationsindex)																		
Parameter	Jahr	Versuchsnummer	Ort	Versuch	Termin	mittlere Wuchshöhe [cm]	REIP	NDVI	IRR	IRG	740/730	740/720	SAVI	NDI1	NDI2	SR1	SR2	YARA
Biom TMErtrag	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	2	20	0,56	0,28	0,28	0,47	0,51	0,52	0,29	0,00	0,23	0,23	0,23	0,53
Biom TMErtrag	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	2	20	0,60	0,34	0,36	0,57	0,39	0,45	0,34	0,49	0,55	0,55	0,54	0,51
Biom TMErtrag	2019	B212	Freising	Grafenfeld	2	20	0,62	0,44	0,49	0,67	0,64	0,65	0,44	0,48	0,64	0,64	0,65	0,68
Biom TMErtrag	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	2	20	0,38	0,27	0,33	0,38	0,38	0,41	0,27	0,35	0,39	0,39	0,39	0,40
Biom TMErtrag	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	2	20	0,79	0,72	0,77	0,80	0,83	0,82	0,72	0,74	0,82	0,82	0,82	0,84
Biom TMErtrag	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	2	20	0,61	0,77	0,76	0,80	0,78	0,80	0,77	0,90	0,84	0,84	0,85	0,81
Biom TMErtrag	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	3	40	0,71	0,78	0,79	0,86	0,85	0,86	0,76	0,81	0,83	0,83	0,83	0,84
Biom TMErtrag	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	3	40	0,88	0,62	0,57	0,86	0,82	0,83	0,62	0,79	0,85	0,85	0,85	0,87
Biom TMErtrag	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	3	40	0,72	0,65	0,68	0,77	0,63	0,69	0,63	0,74	0,75	0,74	0,75	0,73
Biom TMErtrag	2019	B212	Freising	Grafenfeld	3	40	0,78	0,64	0,62	0,81	0,83	0,83	0,64	0,73	0,80	0,80	0,81	0,83
Biom TMErtrag	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	3	40	0,81	0,45	0,44	0,79	0,79	0,79	0,45	0,78	0,82	0,82	0,82	0,82
Biom TMErtrag	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	3	40	0,90	0,64	0,68	0,86	0,89	0,87	0,64	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90
Biom TMErtrag	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	3	40	0,92	0,65	0,63	0,86	0,90	0,87	0,65	0,93	0,93	0,93	0,93	0,91
Biom TMErtrag	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	4	60	0,79	0,52	0,58	0,85	0,85	0,84	0,50	0,83	0,85	0,85	0,86	0,85
Biom TMErtrag	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	4	60	0,83	0,70	0,76	0,83	0,85	0,84	0,70	0,79	0,84	0,84	0,85	0,86
Biom TMErtrag	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	4	60	0,73	0,37	0,40	0,65	0,72	0,69	0,38	0,73	0,74	0,74	0,74	0,72
Biom TMErtrag	2019	B212	Freising	Grafenfeld	4	60	0,77	0,54	0,61	0,78	0,78	0,77	0,54	0,77	0,80	0,79	0,80	0,80
Biom TMErtrag	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	4	60	0,77	0,56	0,57	0,75	0,77	0,75	0,56	0,79	0,79	0,79	0,79	0,77
Biom TMErtrag	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	4	60	0,90	0,73	0,84	0,91	0,90	0,89	0,73	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91
Biom TMErtrag	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	4	60	0,88	0,83	0,89	0,93	0,88	0,90	0,83	0,92	0,91	0,91	0,92	0,91
Biom TMErtrag	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	5	100	0,71	0,49	0,51	0,76	0,80	0,77	0,48	0,76	0,79	0,79	0,79	0,80
Biom TMErtrag	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	5	100	0,85	0,70	0,80	0,87	0,88	0,88	0,65	0,83	0,87	0,87	0,88	0,89
Biom TMErtrag	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	5	100	0,47	0,08	0,10	0,32	0,43	0,40	0,08	0,43	0,46	0,45	0,46	0,46
Biom TMErtrag	2019	B212	Freising	Grafenfeld	5	100	0,55	0,00	0,02	0,17	0,30	0,20	0,00	0,49	0,45	0,45	0,45	0,36
Biom TMErtrag	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	5	100	0,62	0,12	0,11	0,31	0,46	0,41	0,11	0,56	0,55	0,55	0,55	0,50
Biom TMErtrag	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	5	100	0,62	0,37	0,42	0,62	0,67	0,66	0,38	0,65	0,65	0,64	0,65	0,67
Biom TMErtrag	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	5	100	0,86	0,42	0,50	0,82	0,83	0,81	0,43	0,88	0,87	0,87	0,88	0,84

In Tabelle 20 sind die R²-Werte ausgewählter Vegetationsindices zur Stickstoffaufnahme bei 20 cm bis 100 cm Wuchshöhe für verschiedene Vegetationsindices für die jeweiligen Feldversuche von 2018 und 2019 dargestellt. Grün hinterlegt sind R²-Werte > 0,7. Ein Vergleich der Tabellen 19 und 20 zeigt, dass die grünen Flächen in Tabelle 20 häufiger und die R²-Werte höher sind. Niedrige R²-Werte sind bei 20 cm Wuchshöhe und ab 100 cm Wuchshöhe festzustellen. Bezüglich der Güte der Vegetationsindices ergibt sich das gleich Bild wie in Tabelle 19. NDVI, IRR und Savi sind keine guten Vegetationsindices zur Charakterisierung der Stickstoffaufnahme von Mais. Die Indices REIP, NDI1, NDI2 sowie SR1, SR2 und Yara erwiesen sich dabei als besonders geeignet. Wobei zu den drei zuletzt genannten Indices jeweils leicht höher R²-Werte berechnet wurden.

Auf eine ausführliche Darstellung der Bestimmtheitsmaße ausgewählter Vegetationsindices zum N-Gehalt in der Pflanze bei verschiedener Wuchshöhe wird hier einerseits aus Platzgründen verzichtet. Zum anderen ist zu sagen, dass nur sehr selten R²-Werte > 0,7 berechnet wurden.

Tabelle 20: Bestimmtheitsmaße ausgewählter Vegetationsindices zur Stickstoffaufnahme von Mais in frühen Entwicklungsstadien in verschiedenen Jahren auf unterschiedlichen Standorten

R ² aus linearer Regression (X = Biomasse Parameter; Y = Vegetationsindex)																		
Parameter	Jahr	Versuchsnummer	Ort	Versuch	Termin	mittlere Wuchshöhe [cm]	REIP	NDVI	IRR	IRG	740/730	740/720	SAVI	NDI1	NDI2	SR1	SR2	YARA
Biom N-Aufnahme	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	2	20	0,67	0,43	0,41	0,63	0,62	0,63	0,44	0,09	0,45	0,45	0,45	0,64
Biom N-Aufnahme	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	2	20	0,54	0,36	0,39	0,55	0,43	0,49	0,37	0,28	0,47	0,47	0,47	0,52
Biom N-Aufnahme	2019	B212	Freising	Grafenfeld	2	20	0,73	0,46	0,48	0,71	0,69	0,70	0,46	0,59	0,72	0,72	0,73	0,74
Biom N-Aufnahme	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	2	20	0,53	0,37	0,43	0,53	0,51	0,54	0,37	0,51	0,55	0,55	0,56	0,54
Biom N-Aufnahme	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	2	20	0,82	0,67	0,71	0,77	0,81	0,79	0,67	0,76	0,81	0,81	0,82	0,82
Biom N-Aufnahme	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	2	20	0,70	0,76	0,75	0,82	0,83	0,84	0,76	0,92	0,89	0,88	0,89	0,86
Biom N-Aufnahme	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	3	40	0,85	0,73	0,77	0,91	0,90	0,91	0,71	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91
Biom N-Aufnahme	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	3	40	0,79	0,54	0,50	0,77	0,73	0,74	0,55	0,70	0,76	0,76	0,76	0,79
Biom N-Aufnahme	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	3	40	0,70	0,58	0,61	0,71	0,58	0,64	0,56	0,69	0,70	0,70	0,70	0,69
Biom N-Aufnahme	2019	B212	Freising	Grafenfeld	3	40	0,75	0,60	0,58	0,78	0,79	0,79	0,60	0,72	0,78	0,78	0,78	0,80
Biom N-Aufnahme	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	3	40	0,77	0,41	0,39	0,75	0,75	0,75	0,41	0,74	0,78	0,78	0,78	0,78
Biom N-Aufnahme	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	3	40	0,92	0,62	0,65	0,85	0,89	0,87	0,62	0,93	0,93	0,93	0,93	0,91
Biom N-Aufnahme	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	3	40	0,91	0,63	0,62	0,86	0,89	0,87	0,63	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91
Biom N-Aufnahme	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	4	60	0,86	0,48	0,53	0,87	0,89	0,87	0,47	0,87	0,90	0,89	0,90	0,89
Biom N-Aufnahme	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	4	60	0,80	0,69	0,74	0,81	0,82	0,81	0,69	0,83	0,85	0,85	0,85	0,83
Biom N-Aufnahme	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	4	60	0,75	0,37	0,40	0,67	0,74	0,72	0,38	0,75	0,76	0,76	0,76	0,75
Biom N-Aufnahme	2019	B212	Freising	Grafenfeld	4	60	0,72	0,51	0,57	0,73	0,74	0,73	0,51	0,73	0,75	0,75	0,75	0,76
Biom N-Aufnahme	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	4	60	0,77	0,56	0,57	0,75	0,77	0,75	0,56	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78
Biom N-Aufnahme	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	4	60	0,89	0,70	0,83	0,89	0,88	0,87	0,69	0,91	0,90	0,90	0,91	0,89
Biom N-Aufnahme	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	4	60	0,86	0,82	0,87	0,91	0,86	0,88	0,82	0,90	0,89	0,89	0,90	0,89
Biom N-Aufnahme	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	5	100	0,81	0,39	0,42	0,74	0,80	0,75	0,38	0,84	0,85	0,85	0,85	0,83
Biom N-Aufnahme	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	5	100	0,76	0,65	0,76	0,80	0,80	0,80	0,64	0,73	0,78	0,77	0,78	0,80
Biom N-Aufnahme	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	5	100	0,54	0,08	0,11	0,36	0,48	0,45	0,08	0,49	0,51	0,51	0,51	0,52
Biom N-Aufnahme	2019	B212	Freising	Grafenfeld	5	100	0,51	0,01	0,03	0,17	0,29	0,21	0,01	0,46	0,43	0,43	0,43	0,35
Biom N-Aufnahme	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	5	100	0,60	0,11	0,10	0,30	0,44	0,40	0,11	0,55	0,53	0,53	0,53	0,48
Biom N-Aufnahme	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	5	100	0,63	0,29	0,30	0,59	0,66	0,63	0,30	0,66	0,64	0,64	0,65	0,66
Biom N-Aufnahme	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	5	100	0,85	0,43	0,50	0,81	0,83	0,81	0,44	0,87	0,86	0,86	0,87	0,84

Tabelle 21: Bestimmtheitsmaße ausgewählter Vegetationsindices zur Wuchshöhe von Mais in frühen Entwicklungsstadien in verschiedenen Jahren auf unterschiedlichen Standorten

R ² aus linearer Regression (X = Biomasse Parameter; Y = Vegetationsindex)																		
Parameter	Jahr	Versuchsnummer	Ort	Versuch	Termin	mittlere Wuchshöhe [cm]	REIP	NDVI	IRR	IRG	740/730	740/720	SAVI	NDI1	NDI2	SR1	SR2	YARA
Biom Wuchshöhe	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	2	20	0,73	0,45	0,42	0,63	0,72	0,72	0,46	0,01	0,33	0,33	0,33	0,74
Biom Wuchshöhe	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	2	20	0,59	0,42	0,48	0,62	0,47	0,54	0,43	0,32	0,54	0,54	0,54	0,60
Biom Wuchshöhe	2019	B212	Freising	Grafenfeld	2	20	0,47	0,41	0,34	0,58	0,51	0,54	0,41	0,45	0,54	0,54	0,54	0,57
Biom Wuchshöhe	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	2	20	0,30	0,37	0,39	0,39	0,39	0,43	0,37	0,34	0,36	0,36	0,36	0,40
Biom Wuchshöhe	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	2	20	0,87	0,73	0,73	0,79	0,83	0,82	0,73	0,81	0,85	0,85	0,85	0,84
Biom Wuchshöhe	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	2	20	0,72	0,78	0,74	0,82	0,84	0,84	0,78	0,90	0,88	0,88	0,88	0,86
Biom Wuchshöhe	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	3	40	0,64	0,77	0,75	0,83	0,81	0,81	0,77	0,78	0,79	0,79	0,80	0,79
Biom Wuchshöhe	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	3	40	0,71	0,45	0,40	0,71	0,61	0,63	0,45	0,62	0,65	0,65	0,65	0,67
Biom Wuchshöhe	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	3	40	0,77	0,67	0,66	0,78	0,72	0,74	0,65	0,78	0,80	0,80	0,80	0,78
Biom Wuchshöhe	2019	B212	Freising	Grafenfeld	3	40	0,76	0,52	0,47	0,72	0,73	0,72	0,52	0,70	0,74	0,74	0,74	0,75
Biom Wuchshöhe	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	3	40	0,33	0,18	0,15	0,30	0,29	0,29	0,18	0,36	0,33	0,33	0,33	0,31
Biom Wuchshöhe	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	3	40	0,92	0,61	0,61	0,81	0,86	0,84	0,62	0,88	0,89	0,89	0,88	0,88
Biom Wuchshöhe	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	3	40	0,90	0,60	0,57	0,80	0,85	0,83	0,59	0,89	0,89	0,89	0,89	0,87
Biom Wuchshöhe	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	4	60	0,67	0,47	0,49	0,72	0,73	0,72	0,47	0,69	0,72	0,72	0,72	0,72
Biom Wuchshöhe	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	4	60	0,82	0,76	0,77	0,82	0,84	0,84	0,76	0,75	0,82	0,82	0,81	0,84
Biom Wuchshöhe	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	4	60	0,70	0,42	0,50	0,71	0,72	0,72	0,43	0,70	0,72	0,72	0,72	0,73
Biom Wuchshöhe	2019	B212	Freising	Grafenfeld	4	60	0,51	0,24	0,27	0,43	0,44	0,42	0,24	0,51	0,50	0,50	0,50	0,47
Biom Wuchshöhe	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	4	60	0,57	0,55	0,58	0,64	0,63	0,64	0,55	0,59	0,61	0,61	0,61	0,63
Biom Wuchshöhe	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	4	60	0,91	0,71	0,78	0,86	0,88	0,86	0,70	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90
Biom Wuchshöhe	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	4	60	0,81	0,76	0,77	0,83	0,81	0,81	0,76	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Biom Wuchshöhe	2018	B213	Freising	Niedrigertrag	5	100	0,70	0,44	0,43	0,70	0,75	0,72	0,44	0,75	0,77	0,77	0,77	0,76
Biom Wuchshöhe	2018	B462	Roggenstein	Hohertrag	5	100	0,82	0,76	0,85	0,87	0,86	0,87	0,70	0,78	0,83	0,83	0,84	0,87
Biom Wuchshöhe	2018	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	5	100	0,52	0,14	0,18	0,42	0,50	0,51	0,14	0,49	0,52	0,52	0,53	0,55
Biom Wuchshöhe	2019	B212	Freising	Grafenfeld	5	100	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Biom Wuchshöhe	2019	B213	Freising	Thalhausen 147	5	100	0,16	0,04	0,05	0,11	0,13	0,12	0,03	0,16	0,15	0,15	0,16	0,14
Biom Wuchshöhe	2019	B462	Roggenstein	Hohertrag	5	100	0,73	0,36	0,39	0,69	0,76	0,73	0,36	0,76	0,76	0,75	0,76	0,76
Biom Wuchshöhe	2019	B467	Roggenstein	Niedrigertrag	5	100	0,47	0,22	0,24	0,42	0,44	0,42	0,23	0,48	0,47	0,47	0,47	0,45

4.1.4 Messgleichungen zur Abschätzung der Biomassebildung und der Stickstoffaufnahme von Mais aus Reflexionsmessungen

Zur Abschätzung der Biomassebildung und der N-Aufnahme von Mais erwies sich der Vegetationsindex SR2 als der geeignetste Index. Gründe hierfür sind die stets sehr hohen R²-Werte im Bereich von 20 cm bis 50 cm Wuchshöhe und der geringe Sättigungseffekt bei hohen Biomassebildungen und N-Aufnahmewerten (Abbildung 44 und Abbildung 45). Auch der bei Weizen und Gerste immer häufiger verwendete Vegetationsindex REIP lässt sich bei Mais verwenden (Abbildung 46 und Abbildung 47). Es ist jedoch festzustellen, dass die R²-Werte zwischen REIP und Biomassebildung und N-Aufnahme im Vergleich zum SR2 stets niedriger sind. Auch zeigt der REIP im Vergleich zu SR2 bei Mais einen erheblich stärkeren Sättigungseffekt. Beim SR2 wird ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß zur Stickstoffaufnahme von R² = 0,91 über eine sehr lange Messperiode von 20 cm bis 50 cm Wuchshöhe erreicht.

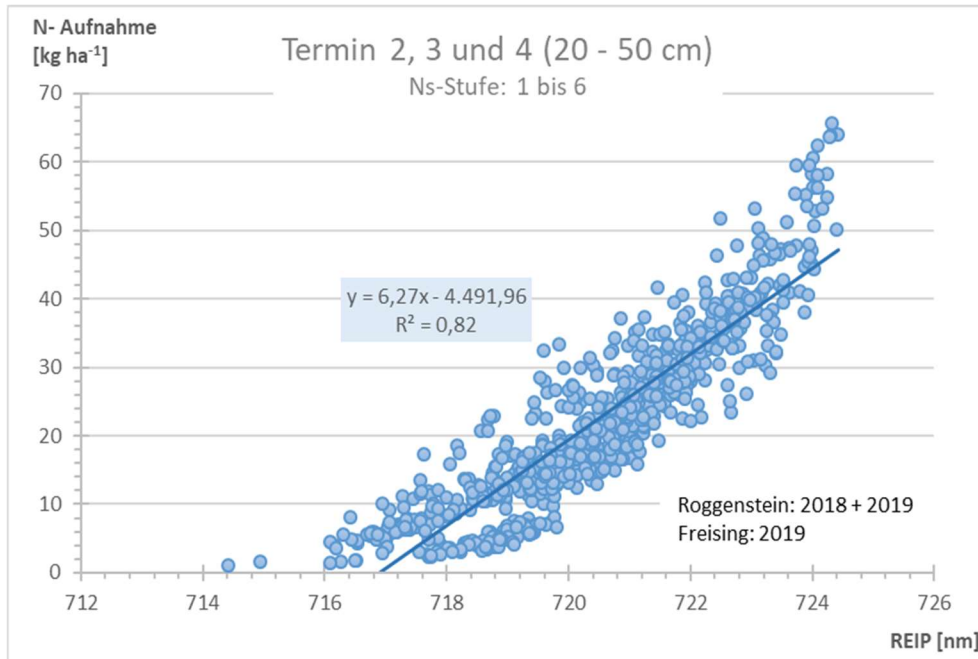


Abbildung 44: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex REIP und der N-Aufnahme in frühen Entwicklungsstadien im Mittel der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2018 und 2019

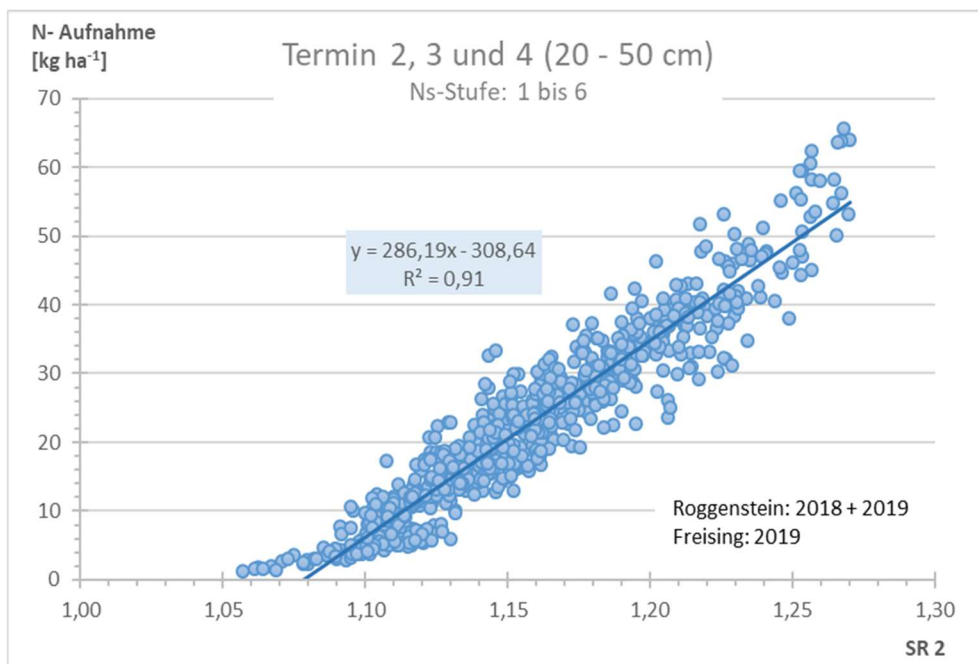


Abbildung 45: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex SR2 und der N-Aufnahme in frühen Entwicklungsstadien im Mittel der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2018 und 2019

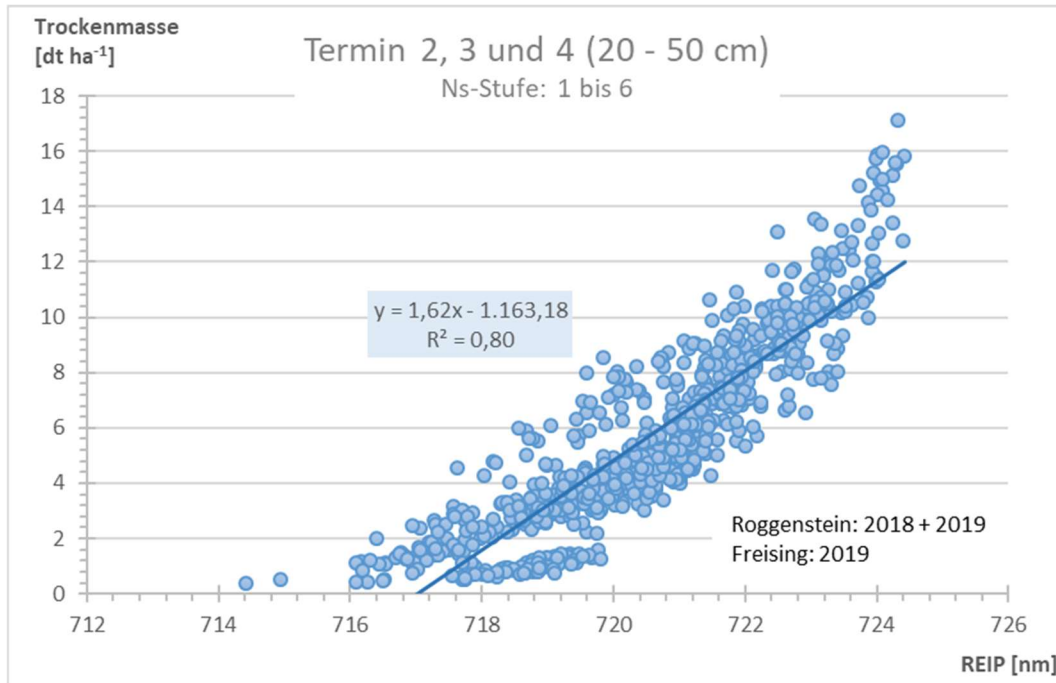


Abbildung 46: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex REIP und der Trockenmassebildung in frühen Entwicklungsstadien im Mittel der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2018 und 2019

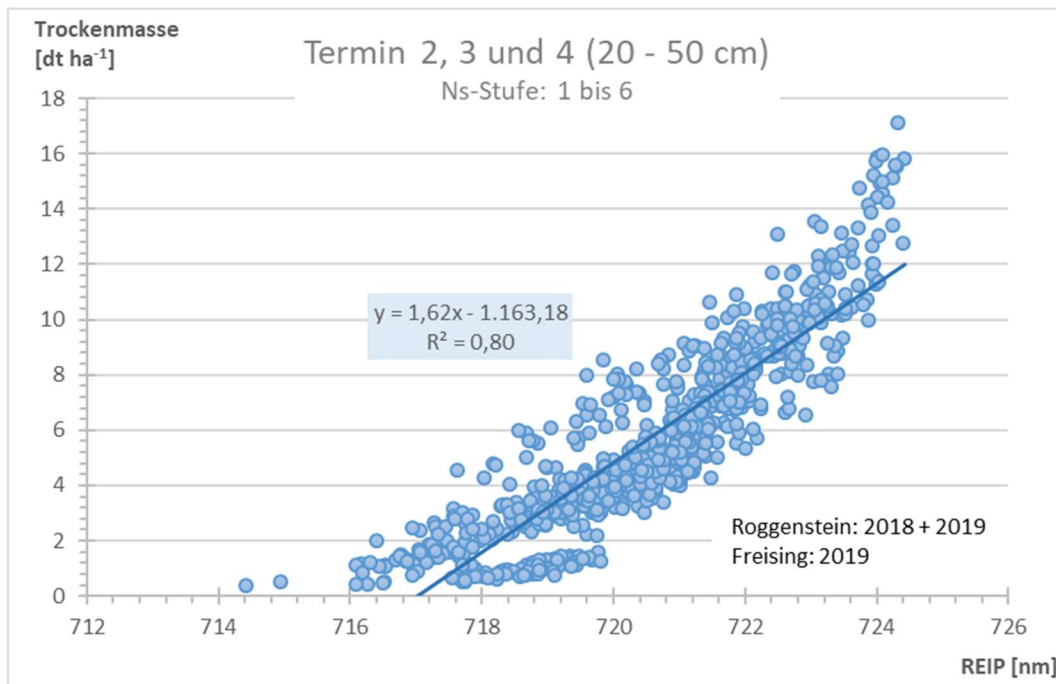


Abbildung 47: Beziehung zwischen dem Vegetationsindex SR2 und der Trockenmassebildung in frühen Entwicklungsstadien im Mittel der Standorte Freising (FS) und Roggenstein (RS), 2018 und 2019

4.2 Teilprojekt 2

Zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung können aufgrund der großen Anzahl an Untersuchungsschlägen nachfolgend nur ausgewählte Ergebnisse vorgestellt werden, die auf den Ackerschlägen „D2“ und „Itzling“ (Freising), „Bergfeld“ und „Lager“ (Roggenstein) sowie „Hofacker“ (Hohenthann) erzielt wurden. Sie zeigen die Zusammenhänge zwischen räumlich variablen Boden-, Pflanzen- und N-Bilanzparametern sowie die Beziehungen zwischen den mit unterschiedlichen Methoden gewonnenen Daten. Anhand der Ergebnisse werden das Potenzial der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung bewertet und die Genauigkeit verschiedener Analysemethoden eingeschätzt.

4.2.1 Räumliche Variabilität des Untersuchungsschlages „D2“ (Freising)

Einen Schwerpunkt der Untersuchungen zur räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern sowie den auf der Grundlage dieser Daten berechneten teilflächenspezifischen N-Bilanzen bildete im Jahr 2018 der Ackerschlag „D2“ (4,39 ha) am Standort Freising.

4.2.1.1 Charakterisierung der Untersuchungsfläche

Anhand der Bodenschätzungskarte (Abbildung 48) ist die Ackerfläche „D2“ als relativ homogen einzuschätzen; im südlichen Teil der Fläche sind etwas höhere Boden- und Ackerzahlen angegeben.



Abbildung 48: Bodenschätzungskarte, Klassenzeichen, Bodenzahl und Ackerzahl, Schlag D2 (4,39 ha, Freising)

Messungen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit mit dem EM 38 zeigen jedoch eine größere Bodenheterogenität an (Abbildung 49). Die scheinbare Leitfähigkeit des Bodens hängt von verschiedenen Parametern ab, z.B. der Bodentextur, dem Wassergehalt, dem Humusgehalt und der Bodenverdichtung (Heil und Schmidhalter 2015). Insbesondere die Bodenart, der Wasser- und Humusgehalt sind wichtige Einflussgrößen auf das Ertragspotenzial der Teilfläche, und das Wissen über deren räumliche Verteilung kann wertvolle Informationen für ein teilflächenspezifisches Management liefern.

Auf dem Ackerschlag D2 zeigten sich im Untersuchungsjahr aber nur schwache Beziehungen der elektrischen Leitfähigkeit zum Mähdrescherertrag ($R^2 = 0,03$) und Parzellenmähdrescherertrag ($R^2 = 0,01$).

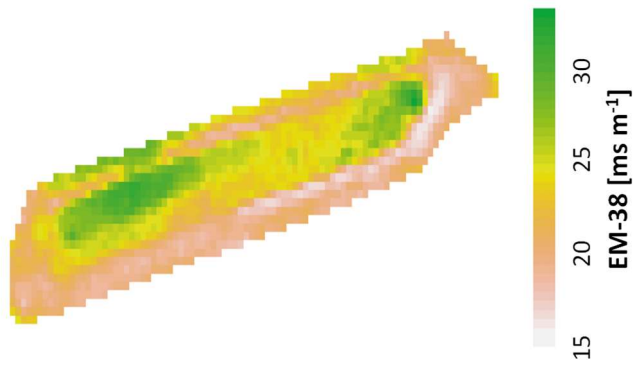


Abbildung 49: Räumliche Variabilität der elektrischen Leitfähigkeit, bestimmt mit dem EM-38, Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018

4.1.2.2 Räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge

Von der Genauigkeit der teilflächenspezifischen Ertragsbestimmung hängt ab, wie präzise die N-Entzüge und N-Salden ermittelt werden können. Daher wurde analysiert, ob die mit Volumenstrommessung am Mähdrescher ermittelten teilflächenspezifischen Erträge in Beziehung zu den mit einem Parzellenmähdrescher auf Teilflächen bestimmten Erträgen stehen (Abbildung 50). Prinzipbedingt sind die Erträge mit dem Parzellenmähdrescher sehr genau zu erfassen.

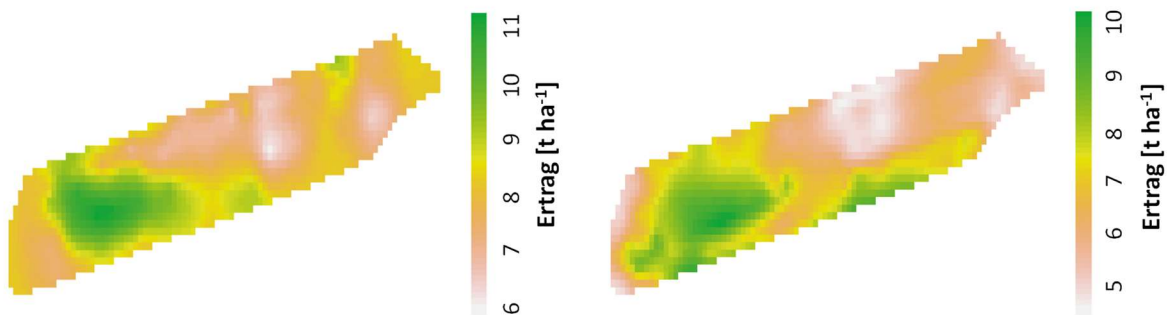


Abbildung 50: Räumliche Variabilität der Winterweizenerträge, bestimmt mit Mähdrescher (links) und Parzellenmähdrescher (rechts), Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018

Es konnten Hohertragszonen (Kornertrag von 9 bis über 10 t ha⁻¹, je nach Ertragserfassungsmethode) und Niedrigertragszonen (Kornertrag von 5 bis über 6 t ha⁻¹) identifiziert werden (Abbildung 50). Zudem liegen Ertragsdaten von Handschnitten georeferenziert vor mit einem mittleren Ertrag von 6,5 t ha⁻¹. In der Hohertragszone wurden Erträge von 7,8 bis 8,9 t ha⁻¹, in der Niedrigertragszone zwischen 4,1 und 6 t ha⁻¹ gemessen.

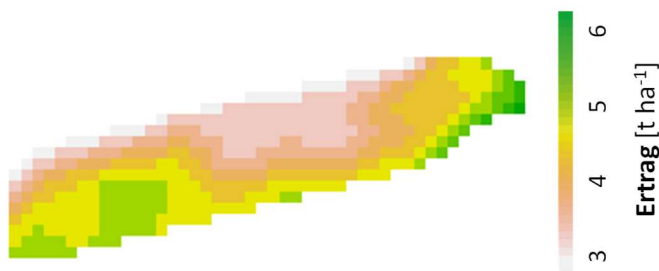


Abbildung 51: Räumliche Variabilität der Winterweizenerträge, bestimmt auf der Grundlage von Satellitendaten, Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018

Die auf der Grundlage von Satellitendaten mit dem Modell PROMET berechneten Kornerträge (Abbildung 51) zeigen ein ähnliches Muster der Hoch- und Niedrigertragszonen wie die mit dem Mähdrescher bestimmten Ertragskarten. Allerdings ist das Ertragsniveau mit Kornerträgen von 4,2 (2,4 – 6,6) t ha⁻¹ deutlich niedriger.

Für Managemententscheidungen im Precision Farming, insbesondere für die Ermittlung des teilflächenspezifischen N-Düngebedarfs, ist nicht nur die richtige räumliche Verteilung der Ertragspotenziale mit der Unterscheidung von Ertragszonen wichtig, sondern auch das absolute Ertragsniveau. Hiervon hängen auch die berechneten N-Entzüge und N-Salden (vgl. 4.1.2.3) ab. Eine Unterschätzung des teilflächenspezifischen Ertragspotenzials führt zur Unterschätzung des N-Düngebedarfs und Überschätzung der N-Salden und N-Verluste.

Auf dem Untersuchungsschlag D2 wurden bei der Analyse einzelner Fahrspuren relativ enge Beziehungen zwischen den mit unterschiedlichen Methoden ermittelten Erträgen gefunden ($R^2 = 0,75$ bzw. $0,70$, Abbildung 52); für den gesamten Schlag wurde ein Korrelationskoeffizient von $R^2 = 0,55$ ermittelt (Tabelle 22).

Beim Ertragsvergleich ist zu beachten, dass die Ernteflächen von Parzellenmähdrescher und Mähdrescher nicht exakt übereinstimmen (siehe Material und Methoden). Eine Voraussetzung für die möglichst exakte Ertragsbestimmung am Mähdrescher ist die Kalibrierung des Messsystems, die möglichst gleichmäßige Fahrt des Mähdreschers sowie die Ernte mit voller Schnittbreite.

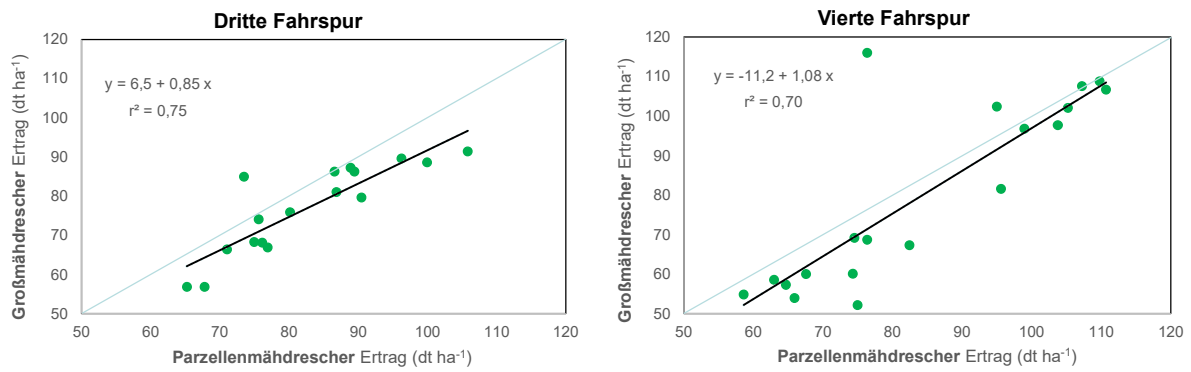


Abbildung 52: Beziehung zwischen den mit Großmährescher und Parzellenmährescher bestimmten Weizenertrengen, Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018

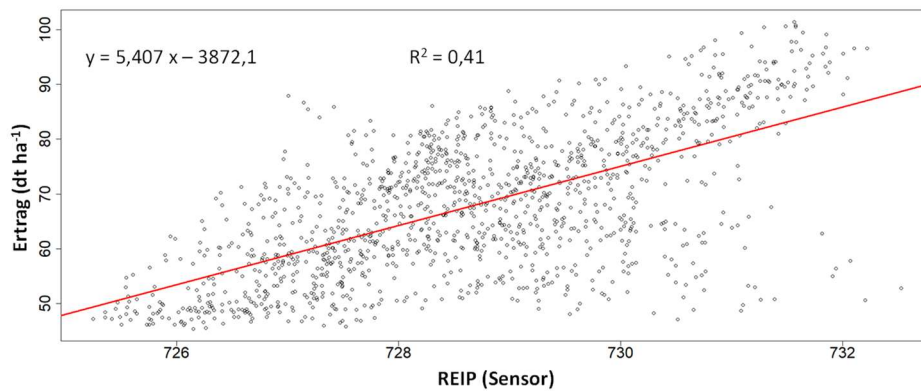


Abbildung 53: Beziehung zwischen REIP (Sensormessung am 04.06.2018) und Kornertrag (Mährescher), Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018

Der auf der Grundlage multispektraler Sensordaten berechnete Vegetationsindex REIP (gemessen zu EC 65) steht in Beziehung zum Kornertrag (Mährescher: $R^2 = 0,41$, Abbildung 53, Parzellenmährescher: $R^2 = 0,52$) und dem auf Basis von Satellitendaten berechneten Vegetationsindex NDVI (Abbildung 54).

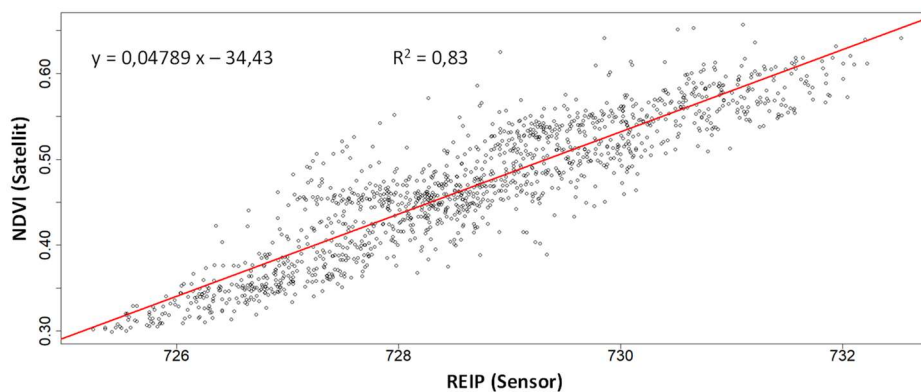


Abbildung 54: Beziehung zwischen REIP (Sensor) und NDVI (Satellit), Schlag D2 (4,39 ha, Freising), 2018

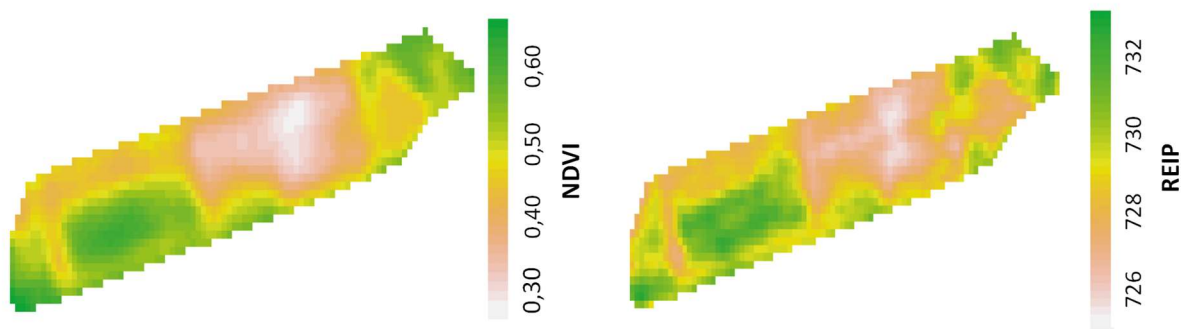


Abbildung 55: Räumliche Variabilität der Vegetationsindices NDVI (Satellit, aufgenommen Anfang Juni 2018) und REIP (Sensor, gemessen am 04. Juni 2018), Schlag D2 (4,39 ha, Freising)

Eine Gegenüberstellung von Karten zur räumlichen Variabilität der Vegetationsindices NDVI und REIP (Abbildung 55), lässt ähnliche Verteilungsmuster erkennen, die zudem eine gute Übereinstimmung zu den Ertragskarten (Abbildung 50) zeigen. So sind Hohertrags und Niedrigertragszonen gut zu unterscheiden (niedrige NDVI- und REIP-Werte zeigen niedrige Erträge an). Diese visuelle Einschätzung wird durch entsprechende Korrelationskoeffizienten (Tabelle 22) bestätigt.

Tabelle 22: Korrelationsmatrix (Korrelationskoeffizienten R^2) auf der Ackerfläche D2 (Freising)

Parameter	Ertrag Mähdre- scher	Sensor REIP	Satellit NDVI
Ertrag (Parzellenmähdescher)	0,55	0,52	0,43
Ertrag (Mähdescher)		0,41	0,33
Sensor (REIP)			0,83

N-Entzüge

Analog zum Kornertrag (Abbildung 50 und Abbildung 51) unterschieden sich auch die mit verschiedenen Methoden bestimmten Korn-N-Entzüge (Abbildung 56) beträchtlich. So betragen die N-Entzüge nach Mährescherertragsdaten 125 (56 bis 185) kg ha⁻¹, die N-Entzüge auf der Grundlage von Satellitendaten 92 (51 bis 144) kg ha⁻¹.

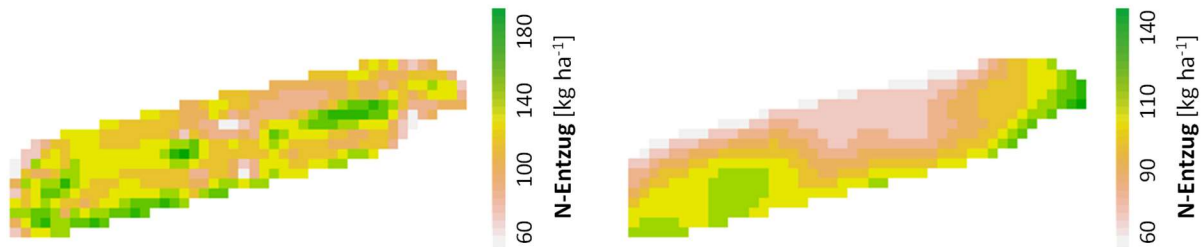


Abbildung 56: Räumliche Variabilität N-Entzüge, links: auf der Grundlage von Mährescherertragsdaten, rechts: auf der Grundlage von Satellitendaten, Schlag D2 (4,39 ha, Freising)

Der nach Mährescherertragsdaten berechnete N-Entzug steht in Beziehung zum Vegetationsindex REIP ($R^2 = 0,31$) und dem N-Entzug, berechnet nach Satellitendaten ($R^2 = 0,24$). Der Vegetationsindex REIP korreliert relativ eng mit dem N-Entzug nach Satellitendaten ($R^2 = 0,65$).

4.1.2.3 Räumliche Variabilität der N-Salden

Die auf der Grundlage der Mährescherertragsdaten berechneten N-Salden variieren zwischen -20 und 100 kg ha⁻¹ (Abbildung 57). Da der Schlag einheitlich gedüngt wurde, ergeben sich deutliche Unterschiede der N-Salden, die in den Hohertragszonen leicht negativ (-20 bis 0 kg ha⁻¹) und den Niedrigertragszonen positiv (20 bis 100 kg ha⁻¹) waren. Der mittlere N-Saldo des Schlages (35 kg ha⁻¹) zeigt nicht das tatsächliche N-Verlustpotenzial an. In den Niedrigertragszonen ist mit Nitratausträgen zu rechnen, auf den Hohertragszonen wird möglicherweise das Ertragspotenzial nicht ausgeschöpft bzw. der Boden-N-Vorrat vermindert. Der mittlere N-Saldo, berechnet anhand von Satellitendaten, beträgt 60 kg ha⁻¹, anhand der Parzellenmähreschererergebnisse 15 kg ha⁻¹.

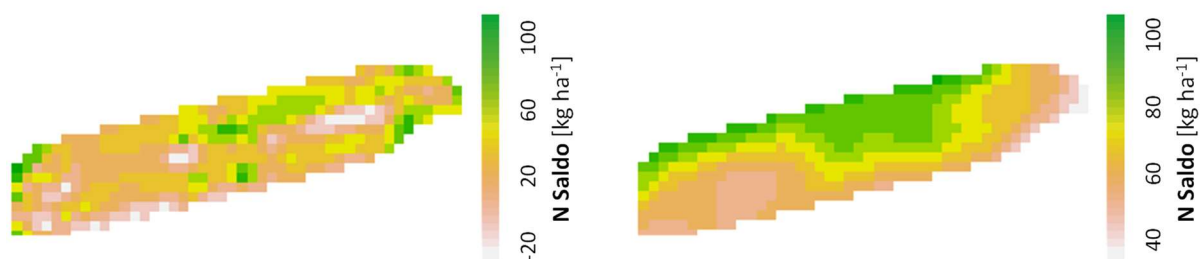


Abbildung 57: Teilflächenspezifische N-Salden, Schlag D2 (4,39 ha, Freising), Fruchtart Winterweizen (2018), berechnet auf der Basis von links: Mährescherertragsdaten, rechts: Satellitendaten

Insgesamt zeigen die Untersuchungen auf dem Ackerschlag D2, dass auch auf Flächen, die nach der Bodenschätzung als weitgehend homogen klassifiziert sind, bedeutende teilflächenspezifische Unterschiede der Erträge, der N-Entzüge und der N-Salden auftreten können.

4.2.2 Räumliche Variabilität des Untersuchungsschlages „Bergfeld“ (Roggenstein)

4.2.2.1 Räumliche Variabilität der Bodenparameter

Die Bodenschätzungskarte (Abbildung 58) zeigt für die Ackerfläche „Bergfeld“ größere Bodenunterschiede; die Ackerzahlen betragen 42 bis 62.

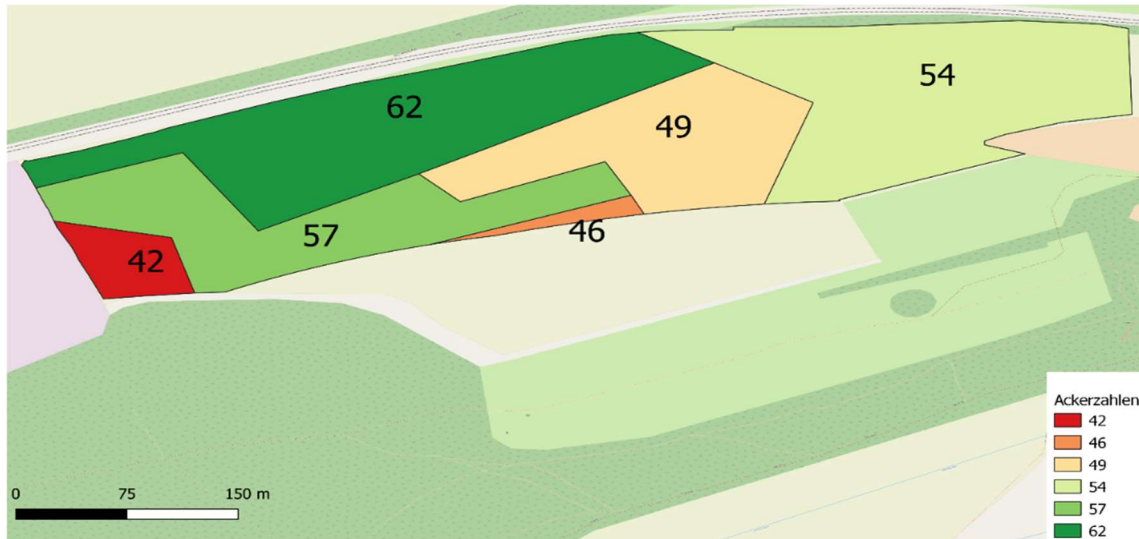


Abbildung 58: Bodenschätzungskarte, Klassenzeichen, Bodenzahl und Ackerzahl, Schlag Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein)

Bei allen untersuchten Bodenparametern auf der Ackerfläche „Bergfeld“ zeigte sich eine große Variabilität innerhalb des Schlages (Tabelle 23). Der C_{org} -Gehalt betrug 1,09 (0,67 – 1,49) %, der N_t -Gehalt 0,11 (0,07 – 0,17) % und der Nitrat N-Vorrat 40,1 (25,3 – 63,6) $kg\ ha^{-1}$. Der in den Bodenproben ermittelte Wassergehalt betrug 32,9 (25,7 – 38,4) $g\ (100\ g)^{-1}$ Boden, die nutzbare Feldkapazität 70,7 (63,0 – 78,0) Vol.-% und die elektrische Leitfähigkeit 11,64 (5,22 – 35,19) $ms\ m^{-1}$. Der Phosphorgehalt betrug 6,6 (3,5 – 14,9) $mg\ (100\ g)^{-1}$; der Kaliumgehalt 20,1 (10,3 – 37,7) $mg\ (100\ g)^{-1}$.

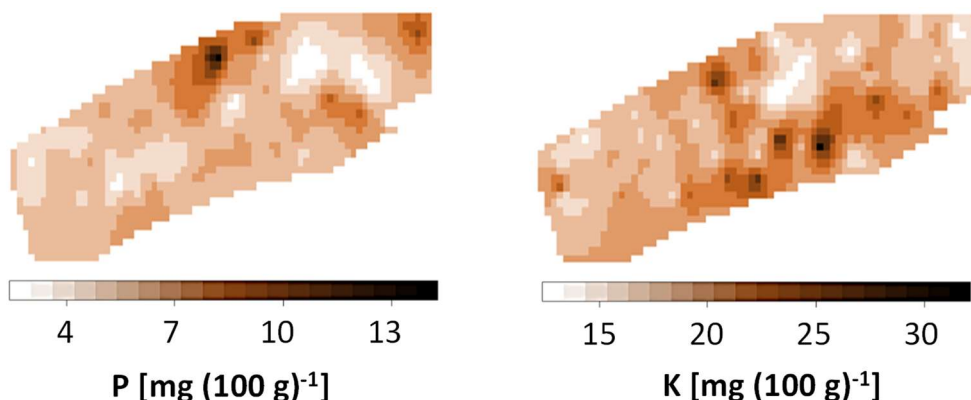


Abbildung 59: P- und K-Gehalt, Ap-Horizont (0 – 30 cm), Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein)

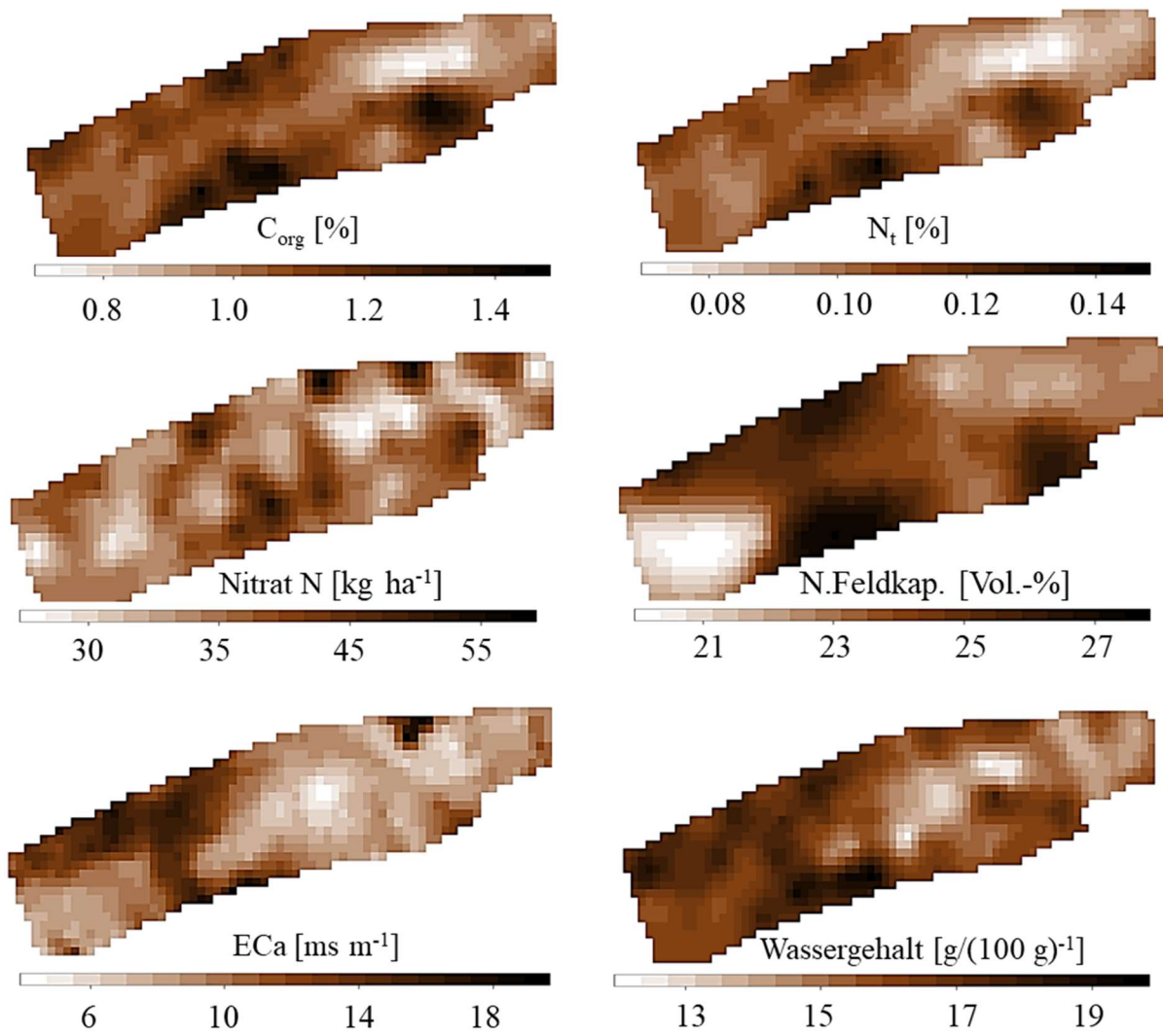


Abbildung 60: Bodenparameter, Ap-Horizont (0 – 30 cm), Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein)

Tabelle 23: Bodenparameter, Ertrag und N-Bilanz der Ackerfläche "Bergfeld"

Parameter	Datenquelle	Methode	Jahr	Einheit	Mittel	Median	min	max	sd
Bodenparameter									
C _{org} -Gehalt (0 – 30 cm)	Bodenproben	Direktmethode – 550 °C	2019	% TM	1,09	1,08	0,67	1,49	0,16
N _t -Gehalt (0 – 30 cm)	Bodenproben	Elementaranalyse	2019	% TM	0,11	0,11	0,07	0,17	0,02
Nitrat-N (0 – 60 cm)	Bodenproben	N _{min} -Methode (CaCl ₂ -Extrakt)	2019	kg ha ⁻¹	40,1	39,0	25,3	63,6	7,9
Phosphor (0 – 30 cm)	Bodenproben	CAL-Methode	2019	mg (100 g) ⁻¹	6,6	6,2	3,5	14,9	1,7
Kalium (0 – 30 cm)	Bodenproben	CAL-Methode	2019	mg (100 g) ⁻¹	20,1	18,6	10,3	37,8	5,8
Wassergehalt (0 – 60 cm)	Bodenproben	Trockenschrank	2019	g (100 g) ⁻¹	16,4	16,5	9,2	19,2	1,6
Nutzbare Feldkapazität (0-30 cm)	Bodenproben	Fingerprobe + Schätzrahmen (nFK) KA 5, 2005	2019	Vol.-%	23,6	23,0	21,0	26,0	4,7
Elektrische Leitfähigkeit (1 m)	EM 38-MK2	Elektromagnetische Messung	2019	ms m ⁻¹	11,64	10,65	5,22	35,19	3,1
Höhe	Drohne	RGB-Kamera	2019	m.a.s.l.	530,3	530,1	519,1	540,6	4,8
Pflanzenparameter									
Ertrag	Mähdrescher	Volumenstrommessung	2003	t ha ⁻¹	8,2	8,3	5,7	11,5	0,9
Ertrag	Mähdrescher	Volumenstrommessung	2012	t ha ⁻¹	10,1	10,3	5,7	14,8	1,2
Ertrag	Mähdrescher	Volumenstrommessung	2018	t ha ⁻¹	9,4	9,3	6,2	16,0	1,3
Ertrag	Handschnitt	Korndrusch	2018	t ha ⁻¹	9,9	10,0	6,3	12,9	1,4
Ertrag	Satellit	Reflexionsmessung + PROMET-Modell	2018	t ha ⁻¹	6,7	6,6	5,2	10,3	0,7
N-Bilanz									
N-Entzug	Mähdrescher + Laboranalyse	Volumenstrommessung + DUMAS-Verbrennungsmethode	2018	kg ha ⁻¹	182,5	181,2	121,0	309,9	25,61
N-Entzug	Handschnitt	DUMAS-Verbrennungsmethode	2018	kg ha ⁻¹	190,1	191,6	142,4	256,7	26,3
N-Entzug	Sensor	Algorithmen zur Schätzung des N-Entzugs	2018	kg ha ⁻¹	169,0	166,7	101,7	269,4	20,7
N-Entzug	Satellit + Laboranalyse	Reflexionsmessung + PROMET-Modell + DUMAS-Verbrennungsmethode	2018	kg ha ⁻¹	130,8	128,0	101,6	199,2	12,7
N-Saldo	Mähdrescher	N-Bilanz	2018	kg ha ⁻¹	10,5	11,8	-116,9	72,0	25,6
N-Saldo	Sensor	N-Bilanz	2018	kg ha ⁻¹	24,0	26,3	-76,4	91,3	20,7
N-Saldo	Satellit	N-Bilanz	2018	kg ha ⁻¹	62,2	64,9	-6,3	91,4	12,7

Einige der untersuchten Bodenparameter zeigen ähnliche Verteilungsmuster, z.B. der C_{org} -Gehalt, der N_t -Gehalt und die nutzbare Feldkapazität (Abbildung 60), im Nordosten und Westen der Fläche sind Areale mit niedrigen Werten, im Süden sowie im Norden sind Bereiche mit hohen Messwerten ermittelt worden. Besonders eng korrelierten die C_{org} - und N_t -Gehalte ($R^2 = 0,94$, Tabelle 24). Eine mittlere Beziehung wies der Boden-Wassergehalt mit der elektrischen Leitfähigkeit ($R^2 = 0,50$), dem C_{org} -Gehalt ($R^2 = 0,42$) und dem N_t -Gehalt ($R^2 = 0,51$) auf. Die nutzbare Feldkapazität korrelierte mit dem C_{org} -Gehalt ($R^2 = 0,47$), dem N_t -Gehalt ($R^2 = 0,47$) und der elektrischen Leitfähigkeit ($R^2 = 0,25$). Der Nitrat-N-Vorrat zeigte hingegen schlechtere oder keine Zusammenhänge mit den anderen Bodenparametern.

4.2.2.2 Räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge

Der mit dem Mährescher durch Volumenstrommessung ermittelte Weizen-Kornertrag (Mittelwert: $9,4 \text{ t ha}^{-1}$) der Ackerfläche „Bergfeld“ zeigte eine ausgeprägte Variabilität (Ertragsschwankung von $6,2$ bis $16,0 \text{ t ha}^{-1}$) (Abbildung 61). Der mit der Fuhrwerkswaage bestimmte mittlere Weizen-Kornertrag ($7,9 \text{ t ha}^{-1}$) war 16 % niedriger als der mit dem Mährescher ermittelte Ertrag. Allerdings ging in die Ertragsbestimmung mit der Fuhrwerkswaage der gesamte Schlag einschließlich des Randbereiches ein, während bei der Auswertung der Mährescherdaten 10 m am Schlagrand unberücksichtigt blieben. Der mit Handschnitten an 50 Messpunkten ermittelte mittlere Kornertrag war mit $10,3 \text{ t ha}^{-1}$ deutlich höher als der mit dem Mährescher und der Fuhrwerkswaage bestimmte Ertrag. Auffallend niedrig ist der mittlere Ertrag von $6,7 \text{ t ha}^{-1}$, der auf der Grundlage von Satellitendaten mit dem Modell PROMET berechnet wurde.

Somit ist festzustellen, dass mit unterschiedlichen Verfahren und in unterschiedlicher räumlicher Auflösung bestimmte Erträge zu deutlich unterschiedlichen mittleren Erträgen, unterschiedlichen Verteilungsmustern und unterschiedlicher Variabilität führen.

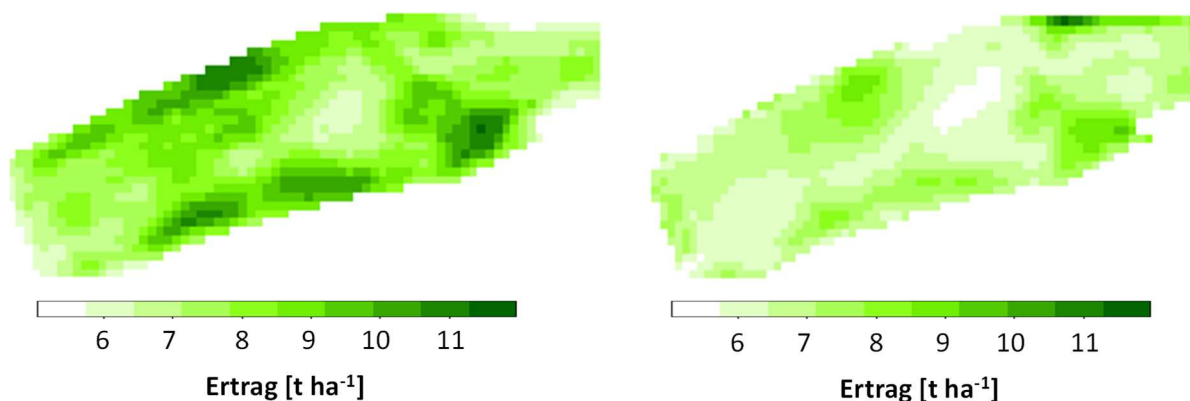


Abbildung 61: Winterweizen-Ertrag (2018) auf der Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein), links: Volumenstrommessung am Mährescher, rechts: Satellitendaten und Berechnungen mit dem Modell PROMET.

4.2.2.3 Räumliche Variabilität der N-Entzüge und N-Salden

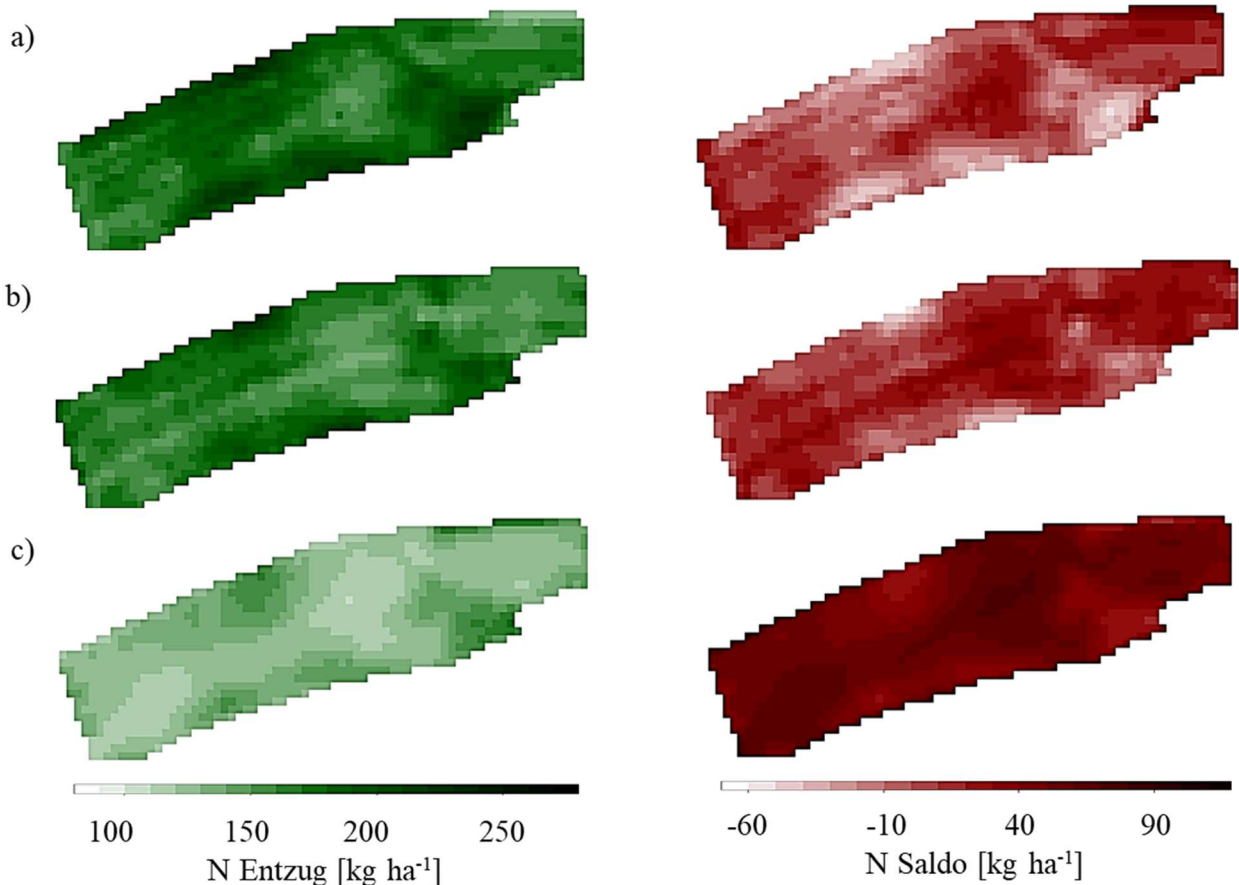
Die im Jahr 2018 mit verschiedenen Methoden bestimmten N-Entzüge auf der Ackerfläche „Bergfeld“ (Abbildung 62) zeigen unterschiedliche Ergebnisse. Der mit Sensormessungen bestimmte N-Entzug betrug 169 (101 - 269) kg ha⁻¹, der anhand von Mähdrescherertragsdaten berechnete N-Entzug 182 (121 – 309) kg ha⁻¹, der mit Satellitendaten berechnete N-Entzug 130 (101 – 199) kg ha⁻¹; hierbei ist auch die unterschiedliche Zahl der Messpunkte und die unterschiedliche Vorgehensweise bei der Bestimmung des N-Entzugs zu beachten. Der auf Grundlage des gemessenen Ertrages (ermittelt mit der Fuhrwerkswaage) berechnete mittlere N-Saldo betrug 157 kg ha⁻¹. Die höchsten N-Entzüge wurden an den Rändern im Norden und Süden der Fläche, die niedrigsten N-Entzüge in der Mitte der Fläche ermittelt. Zwischen den N-Entzügen nach Sensor- und Mähdrescherdaten wurde eine Beziehung von $R^2 = 0,58$ ermittelt, zwischen Sensor- und Satellitendaten von $R^2 = 0,47$, zwischen Mähdrescher- und Satellitendaten von $R^2 = 0,33$.

Die N-Entzüge zeigen Zusammenhänge mit den Bodenparametern. Der N-Entzug (bestimmt anhand von Mähdrescher-Ertragsdaten) steht in Beziehung zum C_{org} -Gehalt ($R^2 = 0,36$); N_t -Gehalt ($R^2 = 0,40$), Wassergehalt der Bodenproben ($R^2 = 0,30$), zur nutzbaren Feldkapazität ($R^2 = 0,40$); elektrischen Leitfähigkeit ($R^2 = 0,22$). Der Nitrat N-Vorrat zu Vegetationsbeginn hatte keinen Einfluss auf den N-Entzug, war also für die Ertragsbildung und N-Aufnahme des Weizenbestandes irrelevant ($R^2 = 0,02$).

Der N-Entzug auf der Grundlage von Sensormessungen weist ähnliche Beziehungen zu den Bodenparametern auf – zum C_{org} -Gehalt von $R^2 = 0,31$; zum N_t -Gehalt von $R^2 = 0,36$; dem Wassergehalt der Bodenproben von $R^2 = 0,37$, der nutzbaren Feldkapazität von $R^2 = 0,29$, der elektrischen Leitfähigkeit von $R^2 = 0,31$. Auch hier hatte der zu Vegetationsbeginn bestimmte Nitrat-N-Vorrat keinen Einfluss ($R^2 = 0,00$). Die N-Entzug anhand von Satellitendaten wies geringere Beziehungen bei allen untersuchten Bodenparametern auf.

Somit ist zu konstatieren, dass hohe Weizen-N-Entzüge bei hohen Humus- und Gesamtstickstoffgehalten (C_{org} , N_t), bei hoher nutzbarer Feldkapazität und hohen Bodenwassergehalten (abhängig u.a. von der Bodenart und dem Humusgehalt) auftraten. Da diese Bodenparameter relativ stabil (nur langfristig veränderbar) sind, ist zu erwarten, dass auch die davon abhängigen Ertrags- und N-Entzugsmuster relativ stabil sind, wobei letztere auch von der Witterung in der Vegetationsperiode beeinflusst werden.

Der N-Saldo nach Mähdrescher-Ertragsdaten betrug 10 (-116 bis + 72) kg ha⁻¹, der N-Saldo nach Sensormessungen 24 (-76 bis + 91) kg ha⁻¹ und der N-Saldo nach Satellitendaten 62 (-6 bis + 91) kg ha⁻¹; hierbei ist auch die unterschiedliche Zahl der Messpunkte zu beachten. Der mit der Fuhrwerkswaage ermittelte mittlere N-Saldo erreichte 36 kg ha⁻¹. Demnach stimmte der nach Sensormessungen berechnete mittlere N-Saldo am besten mit dem nach Fuhrwerkswaage bestimmten mittleren N-Saldo des Schlages überein. Bei der Verwendung von Satellitendaten wurden aufgrund der relativ geringen Erträge und N-Entzüge deutlich höhere N-Salden ausgewiesen.



- a) Volumenstrommessung und Dumas Verbrennungsmethode
- b) Reflexionsmessung (Sensor) und Algorithmus für N-Aufnahme
- c) Reflexionsmessung (Satellit), „PROMET“ und Dumas Verbrennungsmethode

Abbildung 62: N-Entzug und N-Saldo auf der Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein)

In der Mitte der Fläche (in den Bereichen mit geringem Ertrag) sind die höchsten N-Salden, an den Rändern im Norden und Süden der Fläche sowie im südöstlichen Teil der Fläche sind die niedrigsten N-Salden ermittelt worden. Die N-Effizienz nach Mährescherdaten erreichte 95 (63 – 161) %, nach Sensordaten 87 (52 – 140) % und nach Satellitendaten 68 (52 – 103) %; die nach der Fuhrwerkswaage ermittelte mittlere N-Effizienz betrug 81 %. Auch bei diesem Parameter war die Übereinstimmung zwischen Sensordaten und Messdaten (Fuhrwerkswaage) am besten.

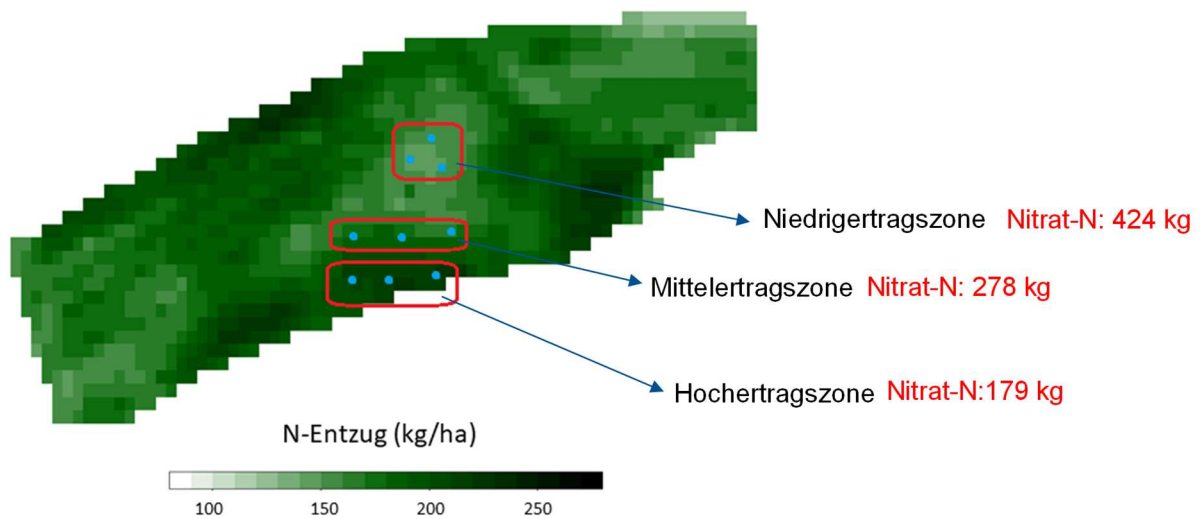


Abbildung 63: Nitratvorräte in verschiedenen Ertragszonen, Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein), ermittelt mit Rammkernsondierung bis 9 m Tiefe

Die Analyse von Nitrattiefenprofilen mit Rammkernsondierung ergab unterschiedliche Nitratvorräte in den Ertragszonen (Abbildung 63). Demnach bestehen hohe Nitrataustragspotenziale in den Niedrigertragszonen, geringe Nitrataustragspotenziale in den Hohertragszonen. Zwischen den bilanzierten N-Salden und den gemessenen Nitratvorräten besteht eine Beziehung von $R^2 = 0,68$.

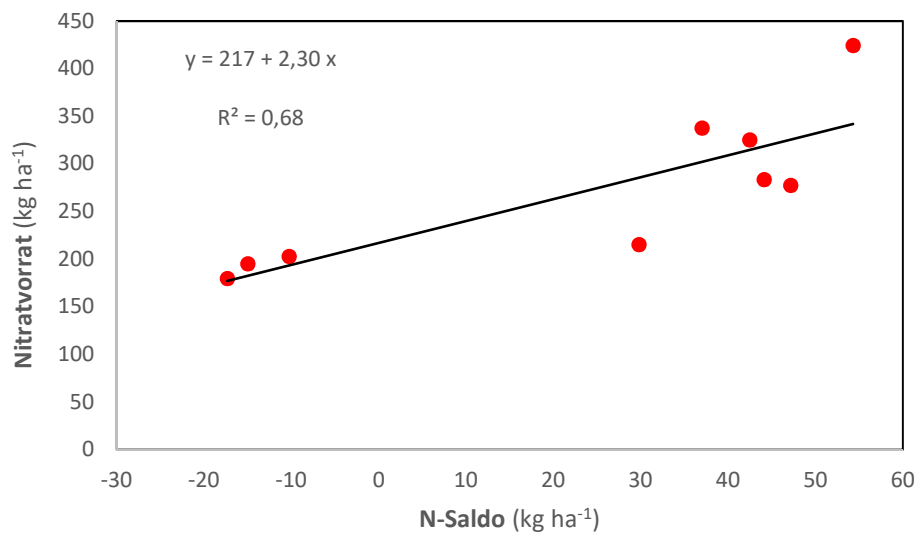


Abbildung 64: Beziehung zwischen N-Saldo und Nitratvorräten bis 9 m Tiefe, Ackerfläche Bergfeld (13,1 ha, Roggenstein)

4.2.3 Räumliche Variabilität des Untersuchungsschlages „Hofacker“ (Hohenthann)

Neben Ackerschlägen in den Versuchsstationen der TU München wurden in den letzten beiden Untersuchungsjahren zahlreiche Praxisschläge in die Analysen der räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern sowie zur Berechnung teilflächenspezifischer N-Verlustpotenziale einbezogen.

Modellregion Hohenthann

Nachfolgend werden beispielhaft Ergebnisse aus der Modellregion Hohenthann dargestellt. Die Region ist durch intensiven Ackerbau und hohe Tierkonzentrationen gekennzeichnet. Der langjährig sehr hohe Einsatz organischer Dünger (Schweinegülle, Biogasegülle) führte zu hohen N-Mineralisierungs- und Verlustpotenzialen der Böden. Aus Voruntersuchungen³ ist bekannt, dass die Böden sehr heterogen sind mit kleinräumig wechselnden Hoch- und Niedrigertragszonen (Hülsbergen et al. 2017). Insgesamt liegen somit ideale Bedingungen für die Analyse teilflächenspezifischer N-Bilanzen vor. Die ausgewählte Untersuchungsfläche Hofacker ist hinsichtlich der Bodenbedingungen und der langjährigen Nutzung charakteristisch für die Region.

4.2.3.1 Räumliche Variabilität der Bodenparameter

Die Untersuchungsfläche Hofacker wurde anhand zahlreicher Bodenparameter umfassend charakterisiert (Abbildungen 65 bis 67). Die an 40 Bodenproben im Ap-Horizont (0 – 30 cm) ermittelten N_t -Gehalte des Bodens variieren zwischen 0,10 bis 0,16 %, die C_{org} -Gehalte zwischen 1,0 und 1,6 %. Das Muster der räumlichen Verteilung der Stickstoffgehalte ist nahezu identisch mit dem der Kohlenstoffgehalte (Abbildung 65). Zwischen beiden Parametern besteht eine enge Beziehung von $R^2 = 0,95$.

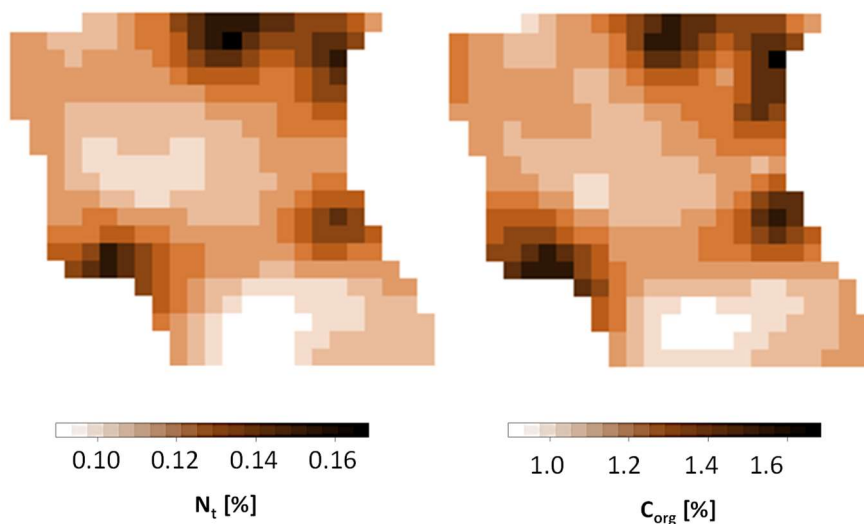


Abbildung 65: Räumliche Variabilität der Gehalte an Gesamt-Stickstoff (N_t) (links) und organischem Kohlenstoff (C_{org}), Ap-Horizont (0 bis 30 cm), Schlag Hofacker (4,15 ha, Hohenthann)

³ FE-Projekt „Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement am Beispiel der Gemeinde Hohenthann (Niederbayern)“, gefördert von 2014 bis 2017 durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.

Die nutzbare Feldkapazität beträgt 17 bis 20 Vol % (Abbildung 66). Mit der nutzbaren Feldkapazität korrelieren die N_t -Gehalte ($R^2 = 0,65$) und die C_{org} -Gehalte ($R^2 = 0,63$).

Die Kaliumgehalte des Ackerschlagens sind sehr einheitlich und auf hohem Niveau, möglicherweise eine Folge der langjährig intensiven Gülledüngung. Die K-Gehalte können der Gehaltklasse C (anzustreben) und D (hoch) zugeordnet werden.

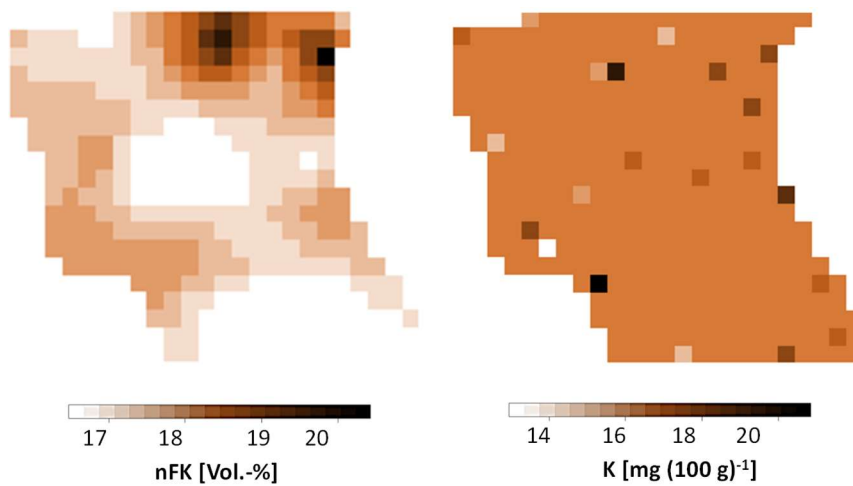


Abbildung 66: Räumliche Variabilität der nutzbaren Feldkapazität (links) und des Gehalts an pflanzenverfügbarem Kalium (rechts), Ap-Horizont (0 bis 30 cm), Schlag Hofacker (4,15 ha, Hohenthann)

Stärker räumlich differenziert sind die Gehalte an pflanzenverfügbarem P sowie die pH-Werte (Abbildung 67). Zwischen P-Gehalten und pH-Werten besteht eine Beziehung von $R^2 = 0,39$.

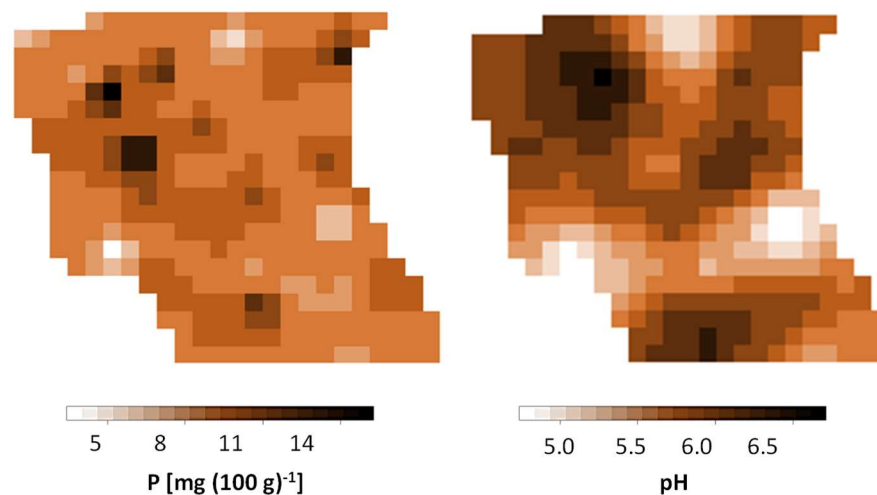


Abbildung 67: Räumliche Variabilität des Gehalts an pflanzenverfügbarem Phosphor (links) und der pH-Werte (rechts), Ap-Horizont (0 bis 30 cm), Schlag Hofacker (4,15 ha, Hohenthann)

Tabelle 25: Bodenparameter, Ertrag und N-Bilanz der Ackerfläche "Hofacker"

Parameter	Einheit	Mittel	Median	min	max	sd
Bodenparameter						
C _{org} -Gehalt (0 – 30 cm)	% TM	1,28	1,23	0,96	1,75	0,20
N _t -Gehalt (0 – 30 cm)	% TM	0,12	0,12	0,09	0,17	0,02
Nutzbare Feldkapazität (0-30 cm)	Vol.-%	17	17	16	21	1,2
P _{CAL} -Gehalt (0 – 30 cm)	mg (100 g) ⁻¹	10,2	10,0	2,6	17,9	3,2
K _{CAL} -Gehalt (0 – 30 cm)	mg (100 g) ⁻¹	17,8	17,5	10,5	30,8	3,8
pH		6,07	6,24	4,65	6,79	0,48
Pflanzenparameter						
Ertrag (Mähdrescher, Volumenstrommessung)	t ha ⁻¹	9,0	9,2	4,7	12,9	1,7
Ertrag (Satellit, Reflexionsmessung)	t ha ⁻¹	8,7	8,8	6,6	10,3	0,8
N-Bilanz						
N-Entzug (Mähdrescher + Laboranalyse)	kg ha ⁻¹	149,3	151,8	78,5	213,3	28,0
N-Entzug (Satellit + Laboranalyse)	kg ha ⁻¹	142,9	144,6	108,3	169,2	13,2
N-Entzug (Sensor + Algorithmen)	kg ha ⁻¹	147,1	147,9	53,7	213,2	20,7
N-Saldo (Mähdrescher + Laboranalyse)	kg ha ⁻¹	59,6	57,1	-4,3	130,4	28,0
N-Saldo (Satellit + Laboranalyse)	kg ha ⁻¹	66,0	64,4	39,7	100,7	13,2
N-Saldo (Sensor + Algorithmen)	kg ha ⁻¹	61,8	61,0	-22,2	155,3	20,7

4.2.3.2 Räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge

Die durch Volumenstrommessung am Mährescher ermittelten Weizenerträge zeigen eine hohe räumliche Variabilität (Abbildung 68). Im Mittel des Schlages wurden $9,0 \text{ t ha}^{-1}$ Korn-Ertrag gemessen mit einer Schwankung von $4,7$ bis $12,9 \text{ t ha}^{-1}$. Die auf der Grundlage von Satellitendaten berechneten Erträge betragen $8,7 \text{ t ha}^{-1}$ ($6,6 - 10,3 \text{ t ha}^{-1}$).

Die auf unterschiedlicher Datengrundlage berechneten N-Entzüge stimmen im Mittel gut überein; sie zeigen aber unterschiedliche Schwankungsbreiten:

- Mährescherdaten: 149 kg ha^{-1} ($78 - 213 \text{ kg ha}^{-1}$),
- Sensordaten: 147 kg ha^{-1} ($54 - 231 \text{ kg ha}^{-1}$),
- Satellitendaten: 143 kg ha^{-1} ($108 - 169 \text{ kg ha}^{-1}$).

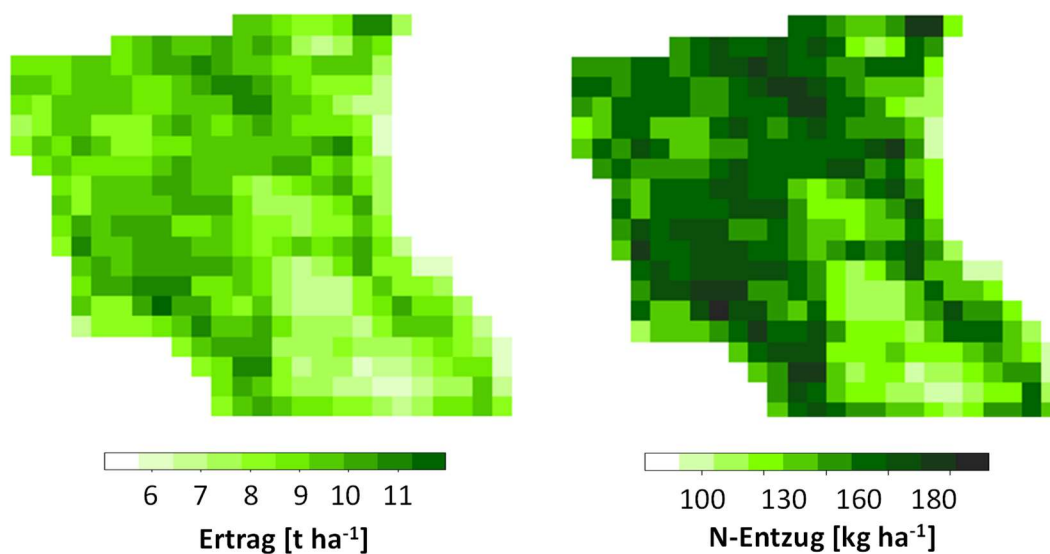


Abbildung 68: Teilflächenspezifische Erträge und N-Entzüge, Hofacker (4,15 ha, Hohenthann), Fruchtart Winterweizen (2019), auf der Basis von Mährescherertragsdaten

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist auch die abweichende Messdichte der Verfahren zu beachten. Bei der Mährescherertragserfassung lagen 4984 Messpunkte vor, bei der Sensormessung 2939 Messpunkte und bei den Satellitendaten 516 Punkte.

4.2.4 Räumliche Variabilität weiterer Untersuchungsschläge

4.2.4.1 Schlag Lager, links (Roggenstein)

Die N_t -Gehalte der Oberböden (0 bis 30 cm) der humosen Ackerfläche Lager, links (Roggenstein) sind auf hohem Niveau und zugleich räumlich sehr variabel (N_t -Gehalte von 0,29 bis 0,88 %, Abbildung 70).

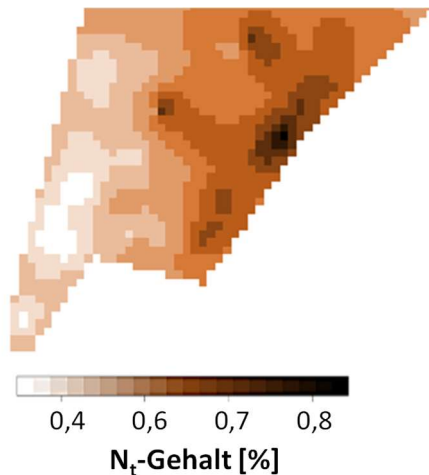


Abbildung 70: Teilflächenspezifische N_t -Gehalte, Bodenschicht 0 bis 30 cm, Schlag Lager, links (12,0 ha, Roggenstein)

Auch die N-Entzüge zeigen eine hohe räumliche Variabilität (Tabelle 27). Nach Mähdrescherdaten betragen die N-Entzüge 156 (111 bis 195) kg ha^{-1} , nach Sensordaten 152 (73 bis 224) kg ha^{-1} . Auf Basis des mittleren Ertrages, ermittelt an der Fuhrwerkswaage, beträgt die N-Aufnahme 146 kg ha^{-1} .

Die Boden- N_t -Gehalte stehen in Beziehung zu den N-Entzügen ($R^2 = 0,12$ (Mähdrescher), $R^2 = 0,35$ (Sensor)). Auch beim Schlag Lager zeigt sich, dass die Beziehung zwischen N_t -Gehalten und N-Entzügen nach Sensordaten enger ist als nach Mähdrescherdaten.

Tabelle 27: N-Entzüge und N-Salden der Ackerfläche Lager, links (12,0 ha, Roggenstein), 2018

Parameter	Einheit	Mittel	Median	min	max	Sd
N_t -Gehalt	%	0,56	0,56	0,29	0,88	0,14
Ertrag (Mähdrescher)	t ha^{-1}	7,9	8,1	5,6	9,9	0,8
N-Entzug (Mähdrescher + Laboranalyse)	kg ha^{-1}	156,3	158,4	110,6	195,0	15,9
N-Entzug (Sensor + Algorithmen)	kg ha^{-1}	151,9	150,9	72,7	224,1	17,7
N-Saldo (Mähdrescher + Laboranalyse)	kg ha^{-1}	8,7	6,6	-29,9	54,4	15,9
N-Saldo (Sensor + Algorithmen)	kg ha^{-1}	13,1	14,1	-59,1	92,3	17,7

Die N-Salden sind im Mittel des Schlages weitgehend ausgeglichen (8,7 kg ha^{-1} nach Mähdrescherertragsdaten, 13,1 kg ha^{-1} nach Sensordaten (Tabelle 27)).

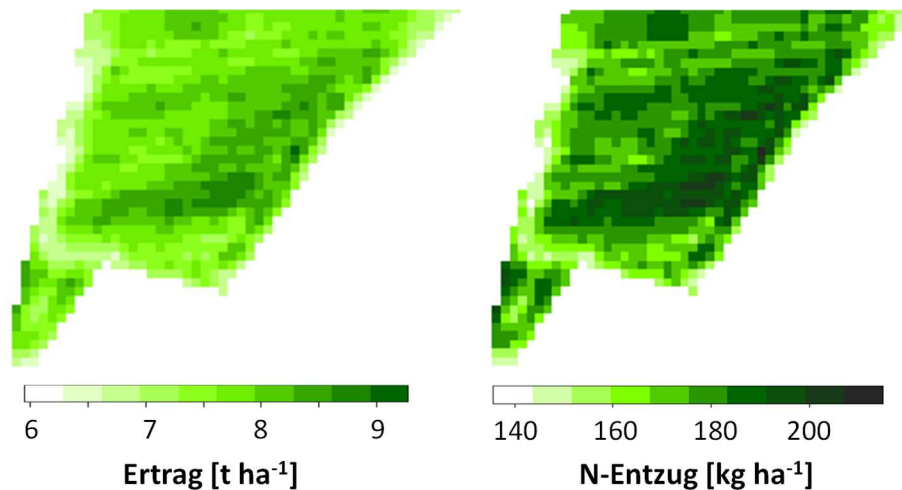


Abbildung 71: Teilflächenspezifische Erträge und N-Entzüge auf der Grundlage von Mähdrescherertragsdaten, Schlag Lager, links (12,0 ha, Roggenstein)

Auch auf diesem Schlag ist eine deutliche Differenzierung zu erkennen in Teilflächen mit negativen N-Salden und Teilflächen mit hohen N-Überschüssen (Abbildung 72). Der mittlere N-Saldo, berechnet auf der Grundlage des mittleren Ertrages (Fuhrwerkswaage) beträgt 19 kg ha^{-1} .

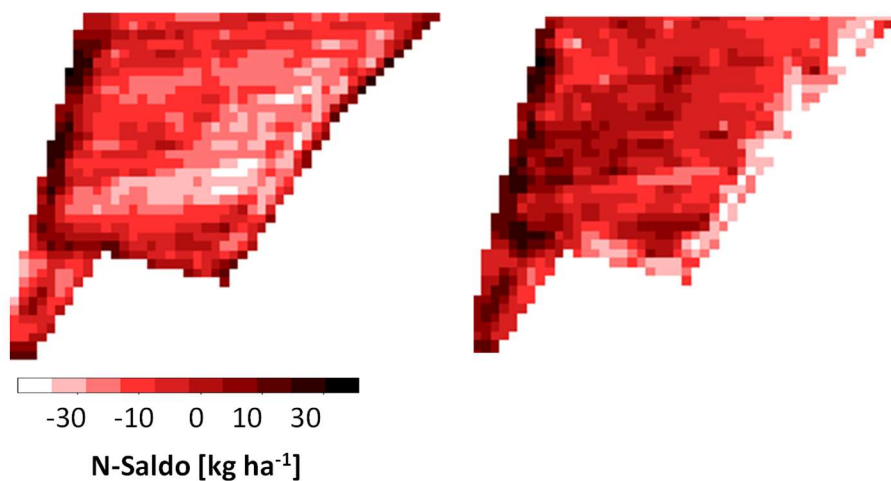


Abbildung 72: Teilflächenspezifische N-Salden, Schlag Lager, links (12,0 ha, Roggenstein), links: berechnet auf der Basis von Mähdrescherertragsdaten, rechts: berechnet anhand von REIP-Daten (Sensormessungen)

Die N-Salden sind negativ mit den Boden- N_t -Gehalten korreliert (Tabelle 28). Die mit verschiedenen Verfahren ermittelten N-Salden stehen nur in schwacher Beziehung ($R^2 = 0,07$).

Tabelle 28: Korrelationsmatrix (Korrelationskoeffizienten R^2) auf Schlag Lager, links (12,0 ha, Roggenstein)

Parameter	N-Saldo Sensor	N_t -Gehalt
N-Saldo (Mähdrescher)	0,07	-0,12
N-Saldo (Sensor)		-0,35

4.2.4.2 Schlag Itzling (Freising)

Die N_t -Gehalte der Oberböden (0 bis 30 cm) des Schlages Itzling variieren trotz langjährig einheitlicher Flächennutzung zwischen 0,12 und 0,22 % (Abbildung 73). Dies weist auf unterschiedliche teilflächenspezifische Ertragspotenziale und Zonen mit differenzierter N-Nachlieferung hin.

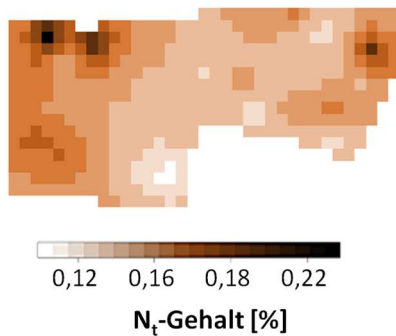


Abbildung 73: Teilflächenspezifische N_t -Gehalte, Bodenschicht 0 bis 30 cm, Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising)

Abbildung 74 zeigt die mit unterschiedlichen Verfahren ermittelten teilflächenspezifischen Erträge. Während die Ertragsmuster relativ gut übereinstimmen, weicht das absolute Ertragsniveau deutlich ab. Das Messverfahren am Mähdrescher (Volumenstrommessung) führt zu deutlich höheren Erträgen als die Ertragsmodellierung auf der Grundlage von Satellitendaten.

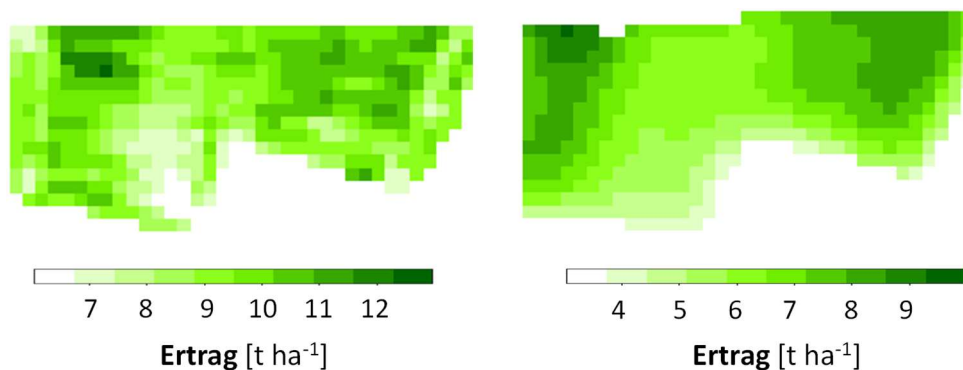


Abbildung 74: Teilflächenspezifische Erträge, Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising), Fruchtart Winterweizen (2018), links: Mähdrescherertragsdaten, rechts: Satellitendaten + Modell PROMET

Die N-Entzüge der Untersuchungsfläche sind mit drei verschiedenen Verfahren ermittelt worden (Abbildung 75, Tabelle 29). Nach Mähdrescherdaten betragen die N-Entzüge 166 (105 bis 218) kg ha⁻¹, nach Sensordaten 172 (89 bis 276) kg ha⁻¹, nach Satellitendaten jedoch nur 106 (52 bis 147) kg ha⁻¹. Ausgehend von dem an der Fuhrwerkswaage bestimmten mittleren Ertrag des Schlages erreichte der mittlere N-Entzug 153 kg ha⁻¹, was sehr gut mit den N-Entzügen nach Mähdrescher- und Sensordaten übereinstimmt.

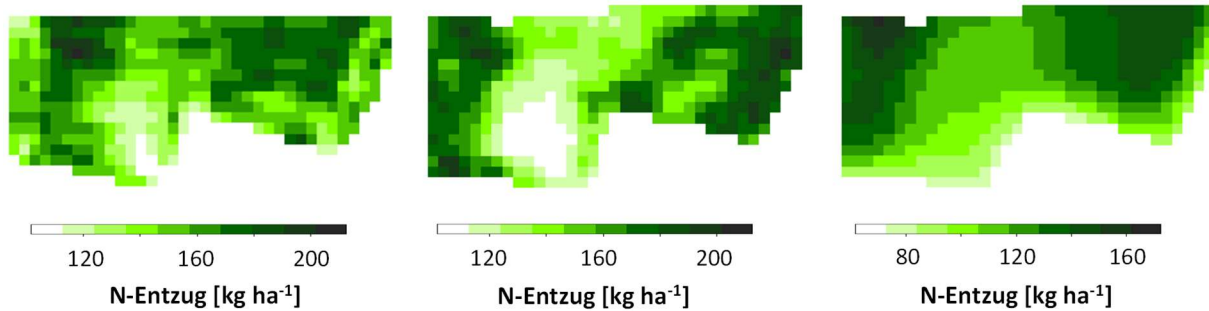


Abbildung 75: Teilflächenspezifische N-Entzüge, Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising), Fruchtart Winterweizen (2018), auf der Grundlage von links: Mährescherdaten, Mitte: Sensordaten, rechts: Satellitendaten

Am Untersuchungsschlag Itzling zeigt sich, wie bereits bei den Schlägen D2 (Freising) und Lager, links (Roggenstein), eine Unterschätzung der N-Entzüge auf Grundlage der Satellitendaten und des Modells PROMET. Die relativen N-Entzüge (N-Entzug nach Ertrag an der Fuhrwerkswaage = 100 %) betragen:

- nach Mährescherertragsdaten: 108 %
- nach Sensordaten: 112 %
- nach Satellitendaten: 69 %.

Bei der Interpretation der Ertrags- und N-Entzugsdaten ist zu beachten, dass bei den Mährescher-, den Sensor- und den Satellitendaten jeweils 10 m am Schlagrand aus methodischen Gründen (vgl. Abschnitt 3.2) bei den Auswertungen unberücksichtigt bleiben. Bei der Ertragsbestimmung an der Fuhrwerkswaage hingegen wird immer der mittlere Ertrag des gesamten Schlages einschließlich des Schlagrandbereichs ermittelt. Häufig werden am Schlagrand geringere Erträge als im Mittel des Schlages erzielt aufgrund von Bodenschadverdichtungen und Bodengefügeschäden durch häufigere Überrollung (Brunotte et al. 2011).

Die Korrelationsanalysen zeigen, dass die Boden- N_t -Gehalte in Beziehung zu den N-Entzügen stehen ($R^2 = 0,13$ (Mährescher), $R^2 = 0,17$ (Sensor), $R^2 = 0,27$ (Satellit)). Auch dieser Zusammenhang wurde auf den anderen Untersuchungsschlägen gefunden. Offenbar sind die N_t -Gehalte und die damit eng korrelierten C_{org} -Gehalte gute Indikatoren für die Ertragsfähigkeit einer Teilfläche.

Daraus ergibt sich, dass auch auf dem Schlag Itzling, die N_t -Gehalte (aufgrund der positiven Ertragswirkung) in negativer Beziehung zu den N-Salden stehen (Tabelle 30).

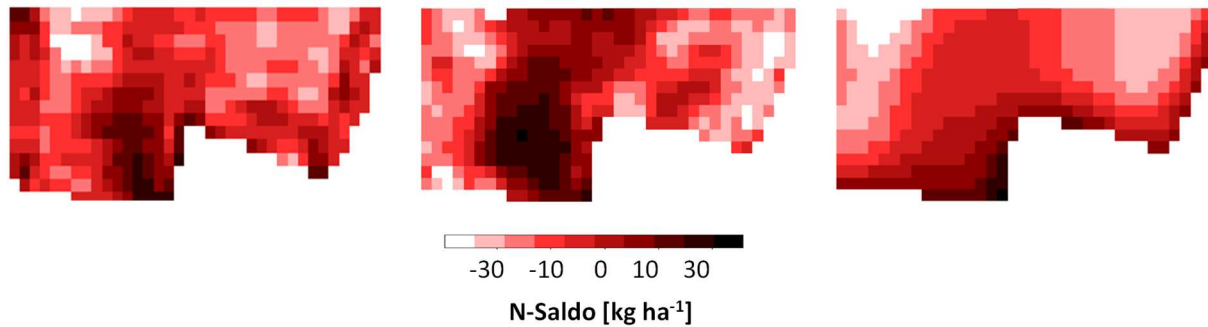


Abbildung 76: Teilflächenspezifische N-Salden, Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising), links: Mährescherertragsdaten, Mitte: Sensordaten, rechts: Satellitendaten

Die N-Salden sind im Mittel des Schlages negativ nach Mährescherdaten (-7 kg ha^{-1}) und Sensordaten (-12 kg ha^{-1}), jedoch deutlich positiv nach Satellitendaten (53 kg ha^{-1} , Tabelle 29)). Der mittlere N-Saldo, berechnet auf der Grundlage des mittleren Ertrages (Fuhrwerkswaage) beträgt 7 kg ha^{-1} .

Tabelle 29: N-Entzüge und N-Salden der Ackerfläche Itzling 5 (4,69 ha, Freising)

Parameter	Einheit	Mittel	Median	min	max	Sd
N _t -Gehalt	%	0,16	0,15	0,11	0,23	0,10
Ertrag (Mährescher)	t ha ⁻¹	10,2	10,3	6,4	13,4	1,4
N-Entzug (Mährescher + Laboranalyse)	kg ha ⁻¹	166,2	168,1	105,3	218,3	22,8
N-Entzug (Sensor + Algorithmen)	kg ha ⁻¹	172,1	169,4	89,5	275,7	28,6
N-Entzug (Satellit)	kg ha ⁻¹	106,5	106,1	51,9	146,7	19,2
N-Saldo (Mährescher + Laboranalyse)	kg ha ⁻¹	-7,0	8,9	-69,1	53,9	22,8
N-Saldo (Sensor + Algorithmen)	kg ha ⁻¹	-12,0	-9,4	-115,7	70,5	28,6
N-Saldo (Satellit)	kg ha ⁻¹	52,6	53,1	12,5	107,2	19,2

Auch auf dem Schlag Itzling sind Teilflächen mit negativen N-Salden und Teilflächen mit hohen N-Überschüssen zu identifizieren, deren Muster relativ gut übereinstimmt (Abbildung 76). Die Korrelationen der mit unterschiedlichen Verfahren ermittelten N-Salden betragen 0,26 bis 0,36 (Tabelle 30).

Tabelle 30: Korrelationsmatrix (Korrelationskoeffizienten R^2), Schlag Itzling 5 (4,69 ha, Freising)

Parameter	N-Saldo Sensor	N-Saldo Satellit	N _t -Gehalt
N-Saldo (Mährescher)	0,26	0,36	-0,13
N-Saldo (Sensor)		0,27	-0,17
N-Saldo (Satellit)			-0,27

4.2.5 Modellgestützte Analyse betrieblicher Stickstoffkreisläufe

Nachfolgend werden Ergebnisse der Modellierung betrieblicher N-Kreisläufe am Beispiel der Modellregion Hohenthann dargestellt, interpretiert und zu den Ergebnissen der teilschlagspezifischen N-Bilanzierung (Abschnitt 4.2.1 bis 4.2.4) in Beziehung gesetzt. Die Region Hohenthann war aufgrund der hohen Viehdichte, der steigenden Nitratgehalte im Grundwasser sowie des dadurch ausgelösten Interesses der Öffentlichkeit bereits Untersuchungsregion unterschiedlicher Forschungsprojekte (Hülserbergen et al. 2017; Wendland 2018; LFU 2019)

Die Modellierung der N-Kreisläufe erfolgte mit den Modellen REPRO und Web-Man (vgl. Abschnitt 2.2.2. und 3.2.4) auf unterschiedlichen räumlichen Systemebenen: Schlag – Fruchtart – Betrieb. Ziel ist es, eine Verbindung zwischen den gesamtbetrieblichen, fruchtarten- und schlagspezifischen N-Bilanzen sowie den auf Teilflächen erfassten N-Bilanz-Parametern herzustellen.

4.2.5.1 Stickstoffkreislauf eines konventionell-intensiven Schweinemastbetriebes

Als Untersuchungsbetrieb wurde ein konventioneller-intensiver Betrieb mit Schweinehaltung gewählt. Der Tierbesatz stieg von 3,12 GV ha⁻¹ (2016/17) auf 3,44 GV ha⁻¹ (2018/19). Aufgrund des hohen Tierbesatzes gibt der Betrieb an kooperierende Ackerbaubetriebe im Umkreis von 3 bis 20 km Gülle ab. Dem gegenüber steht ein relativ hoher Futterzukauf; dabei handelt es sich hauptsächlich um Nebenprodukte der Lebensmittelverarbeitung (Bierhefe, Frischmolke, Weizenschlempe) sowie Sojaextraktionschrot.

Tabelle 31: Monatliche Durchschnittstemperaturen [°C] und Niederschläge [mm] im Mittel der Jahre 2004 – 2019, Wetterstation Schönbrunn der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL 2019)

Monat	Durchschnittstemperaturen [°C]	Niederschläge [mm]
Januar	-0,8	56,8
Februar	-0,1	34,5
März	4,1	42,5
April	9,6	46,1
Mai	13,5	92,6
Juni	17,5	100,9
Juli	19,2	94,1
August	18,0	94,8
September	13,7	62,1
Oktober	8,8	50,9
November	4,0	44,8
Dezember	0,5	47,6
Mittel	9,0	767,6

Der Betrieb liegt im Landkreis Landshut im bayerischen Tertiärhügelland, im Mittel 437 m über NN. Vorherrschenden Bodentypen sind Parabraunerden und Braunerden aus Lösslehm. Charakteristisch für das Tertiärhügelland sind relativ inhomogene Böden, die innerhalb kurzer Distanzen stark variieren können. Diese Tatsache zeigt sich unter anderem in der Bodenschätzung. Die Ackerzahlen schwanken im Betrieb zwischen 36 und 70 und betragen im Mittel 57.

Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 9,0 °C, der mittlere Jahresniederschlag 768 mm (2004 – 2019, Wetterstation Schönbrunn, Tabelle 31). Im Untersuchungszeitraum 2016 bis 2019 kam es zum Teil zu deutlichen Abweichungen des Witterungsverlaufs vom langjährigen Mittel. Insbesondere das Jahr 2018 war durch Hitze- und Trockenstressperioden gekennzeichnet, die zu deutlichen Ertragsminderungen und höheren N-Salden führten (siehe Tabelle 33 und Abbildung 78).

Die vorherrschende Fruchtfolge des Betriebes ist Mais – Winterweizen – Wintergerste. Auf etwa 25 % der Ackerfläche werden Zwischenfrüchte angebaut – bis 2018 Senf, ab 2019 Senf und Leguminosen/Nichtleguminosengemenge. Die landwirtschaftliche Nutzfläche beträgt 70 ha.

Der Ackerschlag „Hofacker“ (Abschnitt 4.2.3) gehört zum Untersuchungsbetrieb.

N-Bilanzen und N-Kreisläufe

Tabelle 32 zeigt die fruchtartenspezifische N-Bilanz des Untersuchungsjahres 2016/17.

Aufgrund der hohen Erträge wurden auch sehr hohe N-Entzüge erzielt – im Mittel des Betriebes 237 kg ha⁻¹, bei Körnermais sogar 245 kg ha⁻¹. Allerdings wurden auch sehr hohe Dünger-N-Mengen eingesetzt. Im Mittel des Betriebes wurden 164 kg ha⁻¹ Gülle-N, damit wurde die Grenze der Düngeverordnung erreicht. Auch die Zwischenfrucht Senf wurde intensiv mit Gülle gedüngt; diese hohen Gaben sind nach novellierter Düngeverordnung nicht mehr zulässig. Trotz hoher Güllegaben wurden im Mittel 100 kg ha⁻¹ Mineral-N appliziert.

Unter Berücksichtigung der standortspezifischen N-Immissionen betrugen die N-Salden 113 kg ha⁻¹ und waren somit auf sehr hohem Niveau. Die geringsten N-Salden wurden bei der Fruchtart Mais (19 kg ha⁻¹), die höchsten bei der Fruchtart Wintergerste (182 kg ha⁻¹) ermittelt.

Die modellierte N_{org}-Vorratsänderung war je nach Fruchtart und Düngung sehr unterschiedlich (-45 bis 39 kg ha⁻¹), im Betriebsmittel wurde nur eine geringe Veränderung des N_{org}-Vorrats (- 2 kg ha⁻¹) berechnet. Die N-Effizienz erreichte im Pflanzenbau 68 %. Eine hohe N-Effizienz (81 %) wurde beim Körnermais, eine geringe N-Effizienz bei der Zwischenfrucht Senf (54 %) ermittelt.

Insgesamt ist zu konstatieren, dass die N-Flüsse des Untersuchungsbetriebs sehr stark durch die Tierhaltung (hoher Tierbesatz und Futterzukauf) und den hohen Gülleanfall geprägt waren. Der Gülleanfall übertraf den N-Bedarf der angebauten Kulturarten. Aus der Darstellung des betrieblichen N-Kreislaufs (Abbildung 77) geht hervor, dass der Betrieb im Untersuchungsjahr 61 kg ha⁻¹ Gülle-N in andere Betriebe abgegeben hat. Dennoch bestand dringender Optimierungsbedarf im N-Management, um die N-Salden zu reduzieren und die N-Effizienz zu steigern.

Tabelle 32: Fruchtartenspezifische N-Bilanz, konventioneller Schweinemastbetrieb, Hohenthann, 2016/17

Parameter	ME	Gesamt- betrieb	Mais (Körner)	Winter- weizen (C)	Winter- gerste	Senf
Gesamtfläche	ha	70,2	23,5	27,1	19,6	23,5
Ernteprodukt			Korn	Korn + Stroh	Korn + Stroh	
N-Entzug	kg ha ⁻¹	237	245	196	192	77
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	181	148	160	157	77
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹	56	97	36	36	0
N-Immission	kg ha ⁻¹	23	23	23	23	0
Nährstoffzufuhr Saatgut	kg ha ⁻¹	2	0	3	3	1
Organische Düngung	kg ha ⁻¹	223	229	102	181	169
Strohdüngung	kg ha ⁻¹	33	97	1	0	0
Gründüngung	kg ha ⁻¹	26	0	0	0	77
Gülle	kg ha ⁻¹	164	133	101	181	91
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	100	50	122	130	0
N-Zufuhr gesamt	kg ha ⁻¹	348	303	249	337	169
Änderung Boden-N-Vorrat	kg ha ⁻¹	-2	39	-45	-38	39
N-Saldo	kg ha ⁻¹	113	19	98	182	54
N-Verwertung (%)		68	81	79	57	46

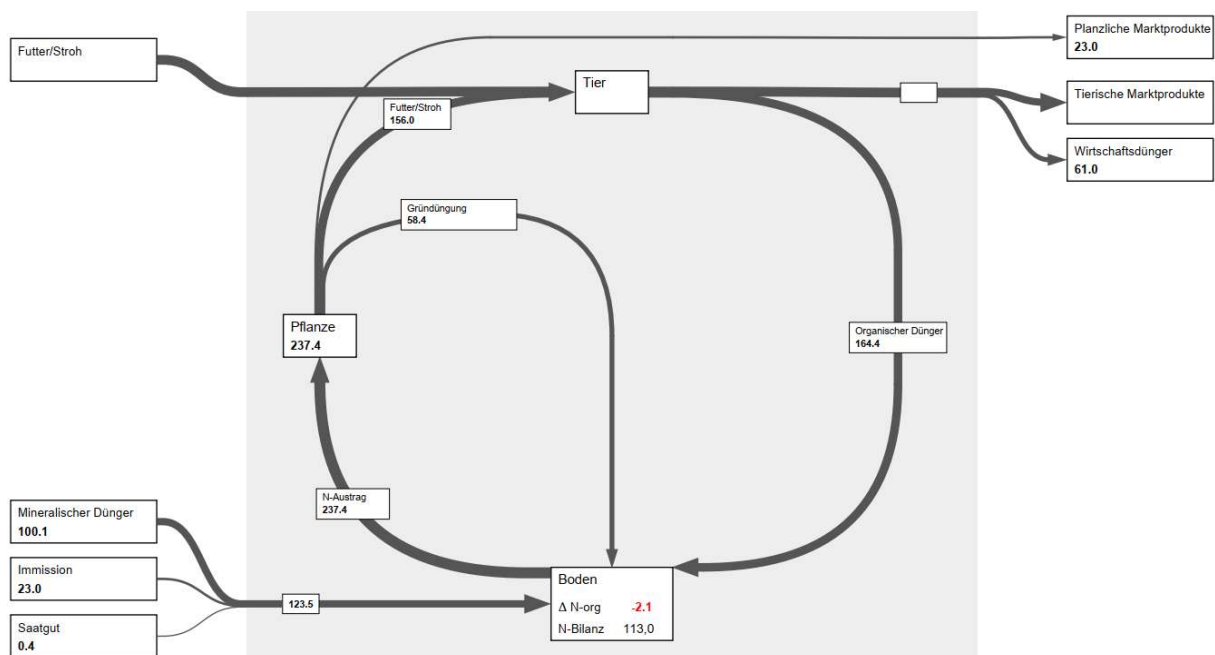


Abbildung 77: Stickstoffkreislauf eines konventionell-intensiven Schweinemastbetriebes, Modellregion Hohenthann, Untersuchungsjahr 2016/17 (Vilser, 2020)

Tabelle 33: Fruchtartenspezifische N-Bilanz, konventioneller Schweinemastbetrieb, Hohenthann, 2017/18

Parameter	ME	Gesamt- betrieb	Mais (Körner)	Winter- weizen (C)	Winter- gerste	Senf
Gesamtfläche	ha	70,2	26,3	23,5	20,4	26,3
Ernteprodukt			Korn	Korn + Stroh	Korn + Stroh	
N-Entzug	kg ha ⁻¹	209	213	171	150	77
<i>Hauptprodukt</i>	kg ha ⁻¹	160	129	139	124	77
<i>Nebenprodukt</i>	kg ha ⁻¹	49	84	31	26	0
N-Immission	kg ha ⁻¹	28	28	28	28	0
Nährstoffzufuhr Saatgut	kg ha ⁻¹	2	0	3	3	1
Symb. N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹	0	0	0	0	0
Organische Düngung	kg ha ⁻¹	231	215	120	179	156
<i>Strohdüngung</i>	kg ha ⁻¹	31	84	0	0	0
<i>Gründüngung</i>	kg ha ⁻¹	29	0	0	0	77
<i>Gülle</i>	kg ha ⁻¹	171	131	120	179	79
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	81	66	87	93	0
N-Zufuhr gesamt	kg ha ⁻¹	342	309	238	302	157
Änderung Boden-N-Vorrat	kg ha ⁻¹	0	28	-45	-34	37
N-Saldo	kg ha ⁻¹	133	69	112	186	43
N-Verwertung (%)		61	69	72	50	49

Im Jahr 2017/18 waren die Erträge und N-Entzüge witterungsbedingt (ausgedehnte Hitze- und Trockenperioden) geringer als im Vorjahr, wodurch die N-Salden auf 133 kg ha⁻¹ im Betriebsmittel stiegen. Ein besonders starker Anstieg der N-Salden war aufgrund der Ertragsminderungen beim Körnermais zu verzeichnen. Der Gülle-N-Einsatz war mit 171 kg ha⁻¹ sogar noch etwas höher als im Vorjahr, der Mineral-N-Einsatz mit 81 kg ha⁻¹ etwas geringer. Der Gülleexport in andere Betriebe der Region stieg auf 75 kg ha⁻¹.

Insgesamt zeigt das Beispiel des Jahres 2017/18 wie stark sich die Witterungsbedingungen auf die N-Effizienz und die N-Salden auswirken können. Nicht immer ist es möglich, bei der Düngung entsprechend zu reagieren, weil die N-Dünger bereits vor oder unmittelbar nach der Aussaat (Mais) oder in relativ frühen Vegetationsstadien (Wintergetreide) appliziert werden, die ertragsrelevanten Trockenperioden aber oftmals erst später einsetzen.

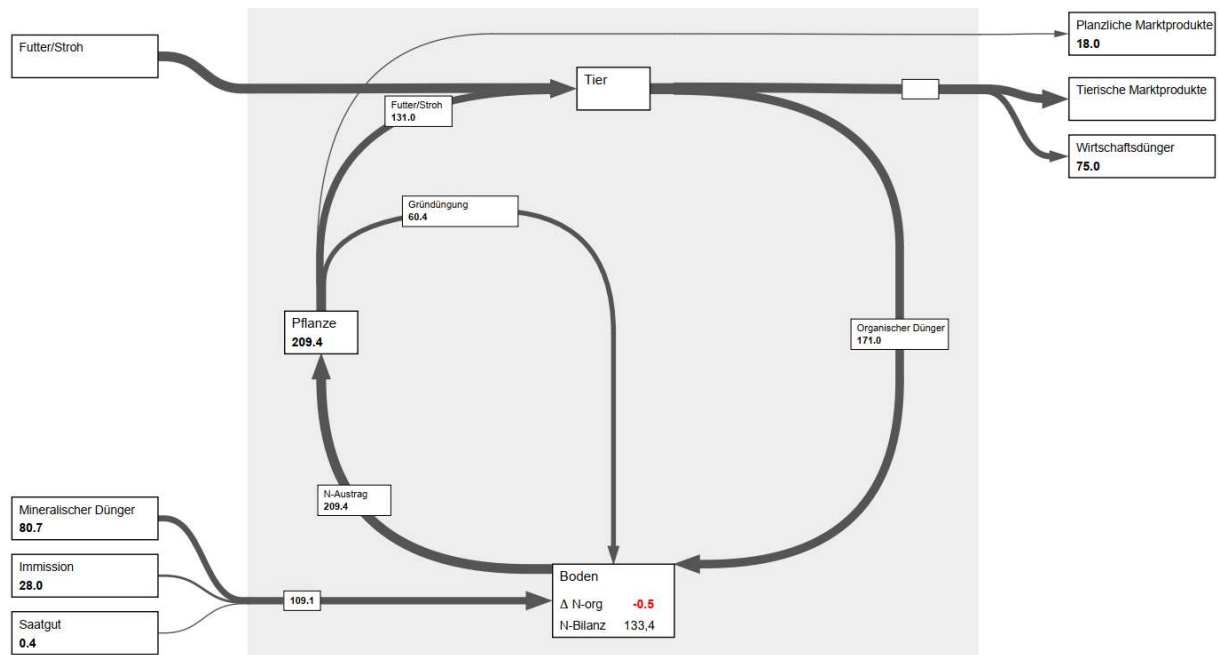


Abbildung 78: Stickstoffkreislauf eines konventionell-intensiven Schweinemastbetriebes, Modellregion Hohenthann, Untersuchungsjahr 2017/18 (Vilser, 2020)

Die N-Bilanz im Jahr 2018/18 zeigt eine deutliche Reduzierung des Mineral-N-Einsatzes auf 63 kg ha⁻¹ (Tabelle 34), was auch auf die vorgeschriebene N-Düngebedarfsermittlung in Umsetzung der novellierten Düngeverordnung (nov. DüV) zurückzuführen ist. Entsprechend den Vorgaben der nov. DüV wurde auch die Gülledüngung zu den Zwischenfrüchten reduziert. Der Betrieb war durch die Vorgaben der DüV gezwungen, noch mehr Gülle abzugeben als in den Vorjahren (82 kg ha⁻¹ Gülle-N).

Im Jahr 2018/19 wurde die geringsten N-Salden (87 kg ha⁻¹) und die höchste N-Effizienz (72 %) im Untersuchungszeitraum festgestellt. Aber auch in diesem Jahr zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Fruchtarten; die größten N-Überschüsse (136 kg ha⁻¹) wurden wie in den Vorjahren bei der Wintergerste identifiziert. Bei der Wintergerste ist es auch nach nov. DüV noch möglich, Güllegaben im Herbst auszubringen, obwohl die Gerste nur relativ eine geringe N-Aufnahme vor Wintereintritt hat. Da diese Güllegaben bei der Berechnung des N-Düngebedarfs im Frühjahr zu wenig berücksichtigt werden, werden zu hohe Mineral-N-Gaben appliziert.

Eine mögliche Strategie, die Mineral-N-Gaben besser an die N-Nachlieferung der Gülledüngung und der Boden-N-Nachlieferung anzupassen, besteht in der sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung (siehe Teilprojekt 1). In der Untersuchungsregion Hohenthann wurde in umfangreichen N-Düngeversuchen auf Praxisschlägen nachgewiesen, dass durch sensorgestützte N-Düngung bei Verwendung wissenschaftlich begründeter N-Düngealgorithmen ohne Ertragsminderung erhebliche Mineral-N-Mengen eingespart werden können (Hülsbergen et al. 2017; Prücklmaier 2020)

Tabelle 34: Fruchtartenspezifische N-Bilanz, konventioneller Schweinemastbetrieb, Hohenthann, 2018/19

Parameter	ME	Gesamt- betrieb	Mais (Kör- ner)	Winter- weizen (C)	Winter- gerste	Senf	Zwischen- frucht ^a
Gesamtfläche	ha	70,2	26,5	26,3	17,4	11,4	15,1
Ernteprodukt			Korn	Korn + Stroh	Korn + Stroh		
N-Entzug	kg ha ⁻¹	238	251	176	178	77	97
Hauptprodukt	kg ha ⁻¹	181	152	143	147	77	97
Nebenprodukt	kg ha ⁻¹	57	99	30	32	0	0
N-Immission	kg ha ⁻¹	25	25	25	25	0	0
Nährstoffzufuhr Saatgut	kg ha ⁻¹	2	0	3	3	1	1
Symb. N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹	10	0	0	0	0	47
Organische Düngung	kg ha ⁻¹	228	221	153	138	126	150
Strohdüngung	kg ha ⁻¹	37	99	0	0	0	0
Gründüngung	kg ha ⁻¹	33	0	0	0	77	97
Gülle	kg ha ⁻¹	157	122	153	138	49	53
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	63	49	49	106	0	0
N-Zufuhr gesamt	kg ha ⁻¹	328	296	229	272	127	197
Änderung Boden-N-Vorrat	kg ha ⁻¹	3	40	-41	-42	34	38
N-Saldo	kg ha ⁻¹	87	5	95	136	16	62
N-Verwertung (%)		72	85	76	66	61	49

^a Zwischenfrucht: Leguminosen-Nichtleguminosengemenge

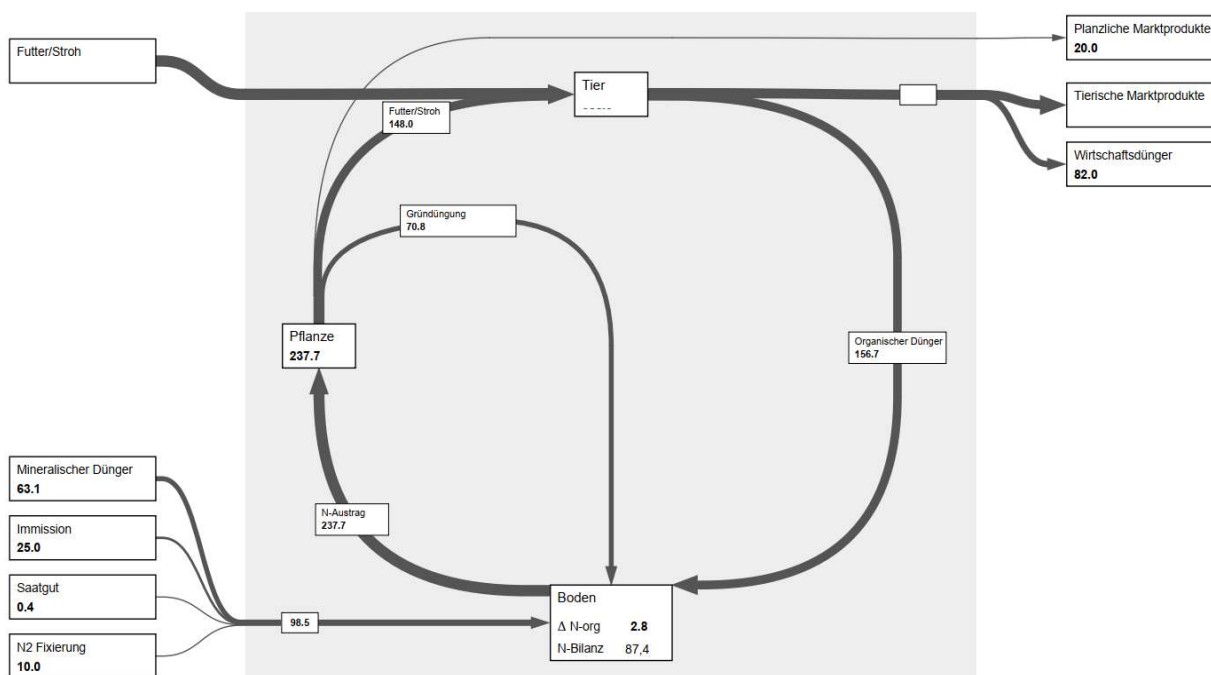


Abbildung 79: Stickstoffkreislauf eines konventionell-intensiven Schweinemastbetriebes, Modellregion Hohenthann, Untersuchungsjahr 2018/19 (Vilser, 2020)

Tabelle 35: N-Bilanz, Hofacker, konventioneller Schweinemastbetrieb, Hohenthann, 2018/19

Parameter	ME	Winterweizen
Gesamtfläche	ha	4,15
Ernteprodukt		Korn + Stroh
N-Entzug	kg ha ⁻¹	179
<i>Hauptprodukt</i>	kg ha ⁻¹	143
<i>Nebenprodukt</i>	kg ha ⁻¹	37
N-Immission	kg ha ⁻¹	25
Nährstoffzufuhr Saatgut	kg ha ⁻¹	3
Symb. N ₂ -Fixierung	kg ha ⁻¹	0
Organische Düngung	kg ha ⁻¹	152
<i>Strohdüngung</i>	kg ha ⁻¹	0
<i>Gründüngung</i>	kg ha ⁻¹	0
<i>Gülle</i>	kg ha ⁻¹	152
Mineraldünger	kg ha ⁻¹	49
N-Zufuhr gesamt	kg ha ⁻¹	229
Änderung Boden-N-Vorrat	kg ha ⁻¹	-41
N-Saldo	kg ha ⁻¹	91
N-Verwertung (%)		79

^a Zwischenfrucht: Leguminosen-Nichtleguminosengemenge

Tabelle 35 zeigt die N-Bilanz des Ackerschlages Hofacker im Jahr 2018/19 mit der Fruchtart Winterweizen, berechnet mit dem Modell REPRO. Der mittlere N-Saldo des Schlages ist mit 91 kg ha⁻¹ deutlich höher als der mit der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung ermittelte N-Saldo. Je nach verwendeter Methode (vgl. Abschnitt 4.2.3.3) wurden bei der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung 60 (-4 bis 130) kg ha⁻¹ (Mähdrescherdaten), 62 (-22 bis 155) kg ha⁻¹ (Sensordaten), 66 (40 bis 101) kg ha⁻¹ (Satellitendaten) und 43 kg ha⁻¹ (Fuhrwerkswaage) berechnet. Abweichungen ergeben sich dadurch, dass bei der Bilanzierung mit REPRO N-Flüsse einbezogen werden, die derzeit (noch) nicht in der teilschlagbezogenen N-Bilanzierung berücksichtigt sind. Bezogen auf den Untersuchungsschlag und -betrieb sind dies die standortspezifischen N-Immissionen (25 kg ha⁻¹) und die Boden-N-Vorratsänderung (- 41 kg ha⁻¹).

Für die Untersuchungsregion Hohenthann stehen aktuelle Messwerte zu N-Immissionen zur Verfügung. Die Nicht-Berücksichtigung der N-Immissionen kann zur Unterschätzung der N-Verluste, z.B. der Nitratausträge führen. Deshalb sollten die N-Immissionen künftig schlageinheitlich als N-Input bei der teilschlagspezifischen N-Bilanzierung angerechnet werden. Eine teilschlagspezifische Differenzierung der N-Immissionen scheint derzeit weder umsetzbar noch notwendig. Die Boden-N-Vorratsänderung kann teilschlagspezifisch modelliert werden, sofern alle notwendigen Eingangsdaten vorliegen. Dies ist aber mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Alternativ können auch die von REPRO/Web-Man berechneten Werte schlageinheitlich verwendet werden.

4.2.5.2 Stickstoffkreisläufe in Abhängigkeit von der Betriebsstruktur

Nachfolgend werden weitere mit dem Modell REPRO berechnete betriebliche Stickstoffkreisläufe der Untersuchungsregionen Hohenthann dargestellt. Sie zeigen exemplarisch den Einfluss der Betriebsstruktur auf die Intensität der betrieblichen N-Flüsse, die N-Salden und die N-Effizienz. Mit dem N-Umsatz-Tool des Modells REPRO wurden in den Untersuchungsbetrieben neben den N-Salden auch die N-Verluste quantifiziert.

Stickstoffkreisläufe von Marktfruchtbetrieben

Abbildung 80 zeigt den Stickstoffkreislauf eines Marktfruchtbetriebs mit ca. 80 ha Fläche, der in größerem Umfang Gülle von einem Schweinemastbetrieb erhält. Die Böden haben eine mittlere Ackerzahl von 64 (48 bis 71). Die dominierende Fruchtart in diesem Betrieb ist Winterweizen, der in der Fruchtfolge Raps / Zuckerrüben / Körnermais – Winterweizen – Winterweizen angebaut wird. Der im Betrieb produzierte Mais wird von den kooperierenden Schweinemästern abgenommen.

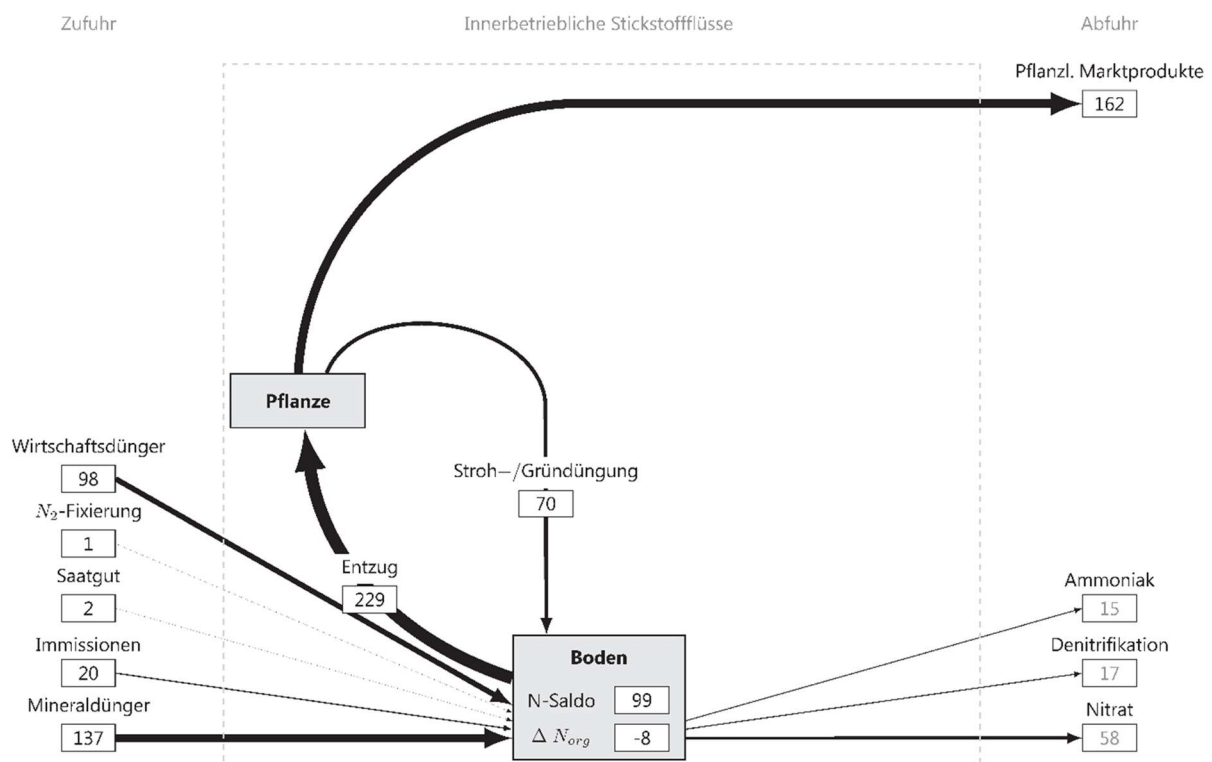


Abbildung 80: Stickstoffkreislauf eines Marktfruchtbetriebes, Modellregion Hohenthann (Forster und Hülsbergen, 2017)

Charakteristisch für die Untersuchungsregion Hohenthann ist der Einsatz relativ hoher Güllemengen auch in den Marktfruchtbetrieben. Die N-Salden (99 kg ha^{-1}) und die modellierten Nitrat-N-Austräge (58 kg ha^{-1}) sind relativ hoch. Ursachen für die hohen N-Verlustpotenziale sind die unzureichende Berücksichtigung der Gülle-N-Wirkungen und der Boden-N-Nachlieferung bei der Ermittlung des Mineral-N-Düngebedarfs sowie die schlageinheitliche Düngung, auch auf heterogenen Schlägen mit deutlich ausgeprägten Hoch- und Niedrigertragszonen. Mehrjährige N-Düngungsversuche zeigen das Mineral-N-Einsparpotenzial durch die teilflächenspezifische sensorgestützte N-Düngung auf diesem Standort (Prücklmaier 2020).

Stickstoffkreisläufe in Biogasbetrieben

Die Stickstoffkreisläufe in Biogasbetrieben der Untersuchungsregion sind sehr komplex, mit intensiven N-Flüssen. Typisch für die Region ist die Kombination von Tierhaltung (Schweinemast) und Biogasproduktion (Beispiel in Abbildung 81). Der Tierbesatz (Mastschweine, 2,3 GV ha⁻¹) des über 400 ha großen Untersuchungsbetriebes ist so hoch, dass die Futtermittellieferung nur durch hohen Futterzukauf (225 kg ha⁻¹ Futter-N-Zukauf, vor allem proteinreiche Futtermittel) zu gewährleisten ist. Andererseits ist der Betrieb gezwungen, Gärreste in Marktfruchtbetriebe abzugeben, um die Vorgaben der Düngeverordnung einzuhalten. Hier zeigen sich Analogien zu dem unter 4.2.5.1 beschriebenen Schweinemastbetrieb (hinsichtlich des Futterzukaufs und der Gülleabgabe).

Die berechneten N-Salden (95 kg ha⁻¹) und die Nitrat-N-Verluste (46 kg ha⁻¹) sind etwas niedriger als im Marktfruchtbetrieb mit Gülleinsatz, weil die Mineral-N-Gaben dem Einsatz organischer Dünger besser angepasst sind und relativ hohe Gärrest-N-Mengen exportiert werden. Der Betrieb setzt einen Sensor zur teilflächenspezifischen N-Düngung ein. Aus ökologischer Sicht sind die N-Salden aber immer noch zu hoch; unter den gegebenen Boden- und Klimabedingungen müssen die N-Salden auf unter 50 kg ha⁻¹ reduziert werden, um Nitratkonzentrationen unter 50 mg l⁻¹ zu erreichen (Forster und Hülsbergen 2017).

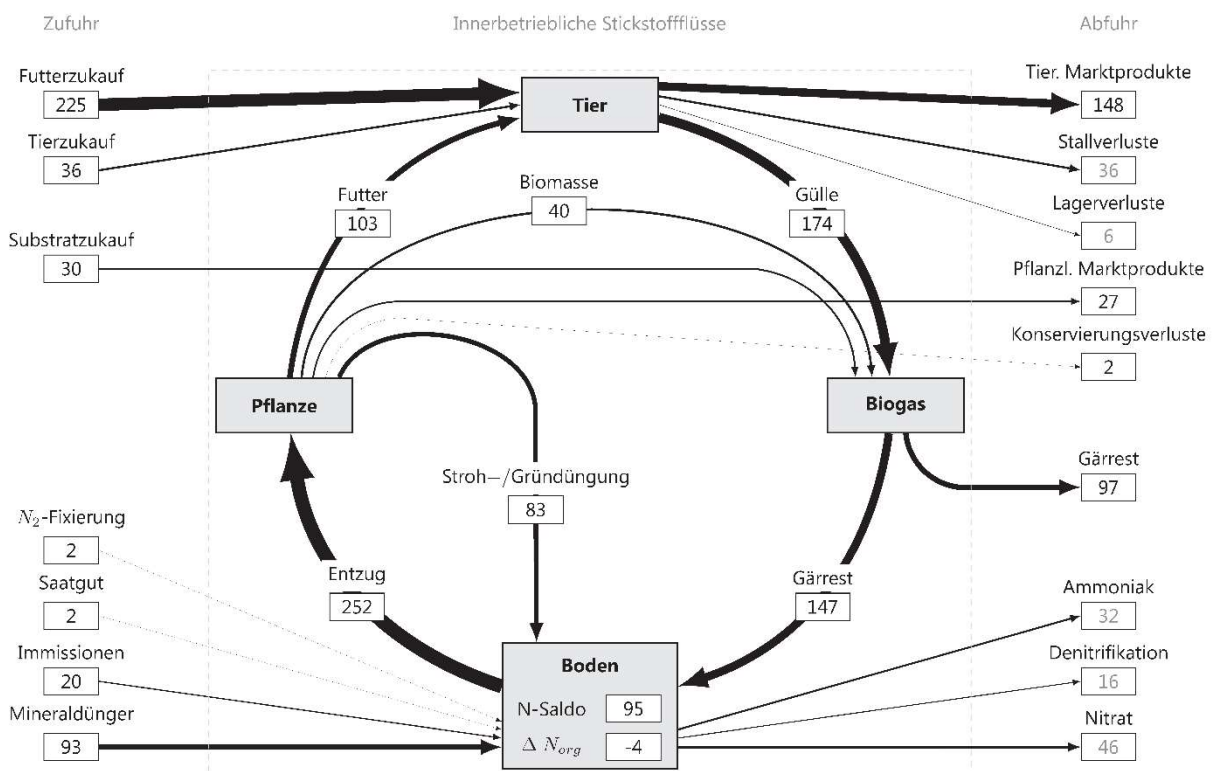


Abbildung 81: Stickstoffkreislauf eines Schweinemast- und Biogasbetriebes, Modellregion Hohenthann (Forster und Hülsbergen, 2017)

Insgesamt zeigen diese (und weitere) Betriebsbeispiele, dass es in der Region intensive überbetriebliche Stoffströme (Futter- und Gülletransfer zwischen Veredlungs- und Marktfruchtbetrieben) gibt. Für die Optimierung des Stickstoffmanagements ist daher die einzelbetriebliche Analyse der Stickstoffflüsse nicht ausreichend; vielmehr sollten künftig auch überbetriebliche und regionale Stickstoffflüsse quantifiziert und optimiert werden. Ein Nährstoffausgleich zwischen Betrieben mit hohem Gülle- und Gärrestanfall und Marktfruchtbetrieben ist vor allem dann ökologisch sinnvoll, wenn bei einer diversen regionalen Betriebsstruktur kurze Entfernungen für Futter- und Gülletransporte eingehalten werden können. Übersteigt allerdings das Gülleaufkommen die Möglichkeiten der effizienten Verwertung einer ganzen Region, kommt auch dieser Ansatz an Grenzen, und hohe Transportentfernungen müssen in Kauf genommen werden. Langfristig ist eine Umstrukturierung zu einer flächengebundenen Tierhaltung ein erfolversprechender Weg, um hohe N-Überschüsse zu reduzieren.

Stickstoffkreisläufe in Veredlungsbetrieben mit hohem Tierbesatz

In der Untersuchungsregion Hohenthann gibt es Veredlungsbetriebe (Schweinemast) mit extrem hohem Tierbesatz. Im Beispielsbetrieb (Abbildung 82) beträgt der Tierbesatz $5,7 \text{ GV ha}^{-1}$. Die Futtermittelerzeugung der Tierbestände erfordert einen massiven Futterzukauf (das entspricht einer N-Zufuhr von über 700 kg ha^{-1}). Die im Betrieb eingesetzten Gülle-N-Mengen erreichen etwa den Grenzwert der Düngeverordnung⁴. Der Betrieb hat hohe N-Exporte durch den Verkauf tierischer Marktprodukte (375 kg ha^{-1}) sowie die Gülleabgabe (201 kg ha^{-1}).

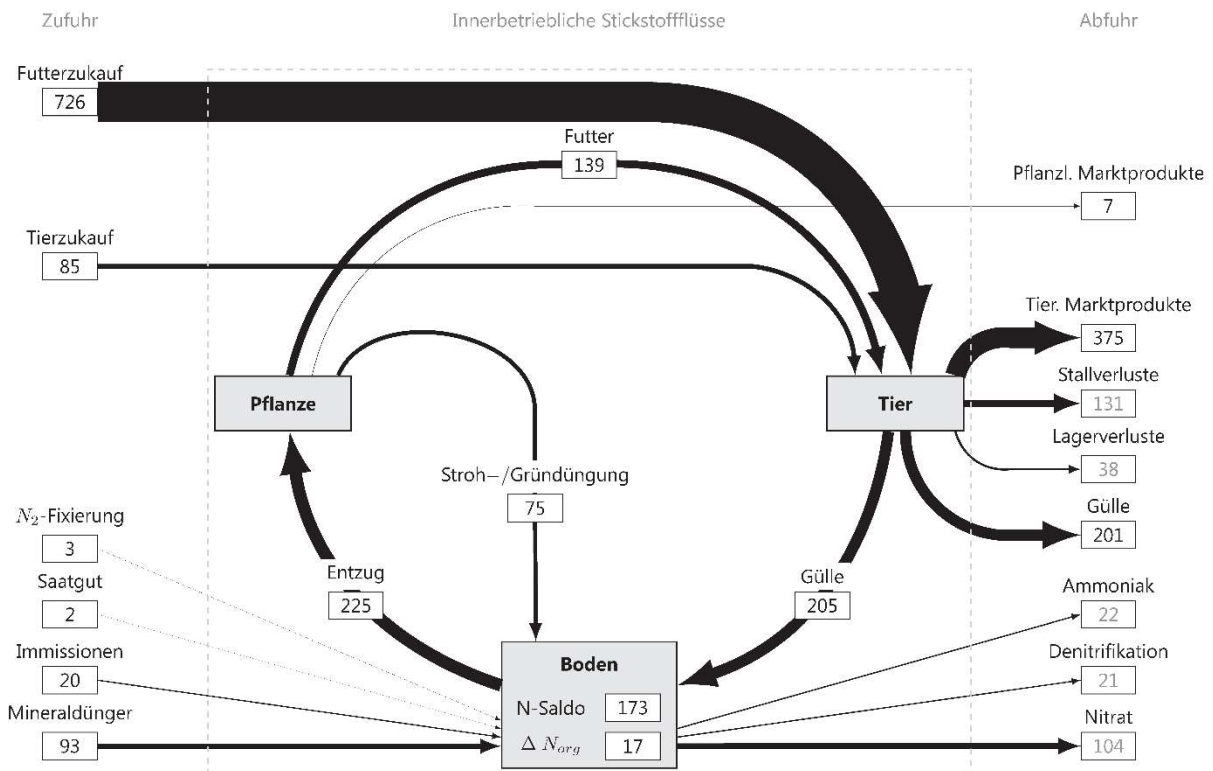


Abbildung 82: Stickstoffkreislauf eines Schweinemastbetriebes mit sehr hohem Tierbesatz, Modellregion Hohenthann (Forster und Hülsbergen, 2017)

⁴ Die Obergrenze für den Einsatz organischer Dünger nach DüV beträgt 170 kg ha^{-1} Stickstoff im Mittel der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Der Betrieb setzt nach Berechnungen mit dem Modell REPRO (andere Methodik als DüV) 205 kg ha^{-1} Gülle-Stickstoff ein, allerdings werden in REPRO andere Emissionsfaktoren verwendet und die sog. „unvermeidbaren“ N-Ausbringungsverluste nach DüV nicht abgezogen, sondern als umweltrelevante N-Flüsse ausgewiesen.

Die berechneten Nitrat-N-Verluste (104 kg ha^{-1}) sind so hoch, dass mit sehr hohen Nitratgehalten im Sickerwasser unterhalb der durchwurzelten Zone zu rechnen ist.

Bewertung der betrieblichen Stoffkreisläufe

Die Stickstoffkreisläufe in Abbildung 80 bis 82 zeigen beispielhaft den Einfluss der Betriebsstruktur (Tierbesatz, Biogasanlagen), der N-Importe (Futter- und Biomassezukauf) und N-Exporte (Gülleabgabe) auf die betrieblichen Stoffströme und N-Emissionspotenziale. Dargestellt sind die Stoffströme im Mittel des Betriebes, im Modell werden aber auch fruchtarten- und schlagbezogene Bilanzen berechnet.

Mit dem Modell REPRO und dem darauf aufbauenden Modell Web-Man wird ein Systemansatz verfolgt. Die verschiedenen Subsysteme (Betriebszweige) sind durch Stoffströme verbunden. Mit dem Modellansatz können Stickstoffflüsse analysiert, bewertet und optimiert werden.

Um die Ursachen von N-Verlusten aufzuklären und Potenziale zur Steigerung der N-Effizienz aufzuzeigen, müssen die innerbetrieblichen Stoffströme durch die Vernetzung der Bilanzen modelliert werden. Dabei sind die N-Outputs des einen Subsystems die N-Inputs des anderen Subsystems, sodass es zu einer durchgängigen Modellierung der N-Flüsse kommt. Es gibt nur wenige N-Bilanz-Modelle, die die Teilbilanzen zu einem schlüssigen Gesamtsystem verbinden (Küstermann et al. 2010).

Mit dem N-Umsatz-Tool des Modells REPRO können auf der Grundlage der Stickstoffflüsse schlagbezogene mittlere Nitratverluste modelliert werden. Mit diesem Modellansatz wurden in der Region Hohenthann für zahlreiche Ackerschläge mehrjährige N-Bilanzen und potenzielle Nitratverluste berechnet. Die Modellwerte wurden mit Messwerten (dem Nitratgehalt und den Nitratvorräten in Bodenschichten bis 9,0 m Tiefe, ermittelt durch Rammkernsondieren) in Beziehung gesetzt (Beispiel in Abbildung 83, Forster und Hülsbergen 2017).

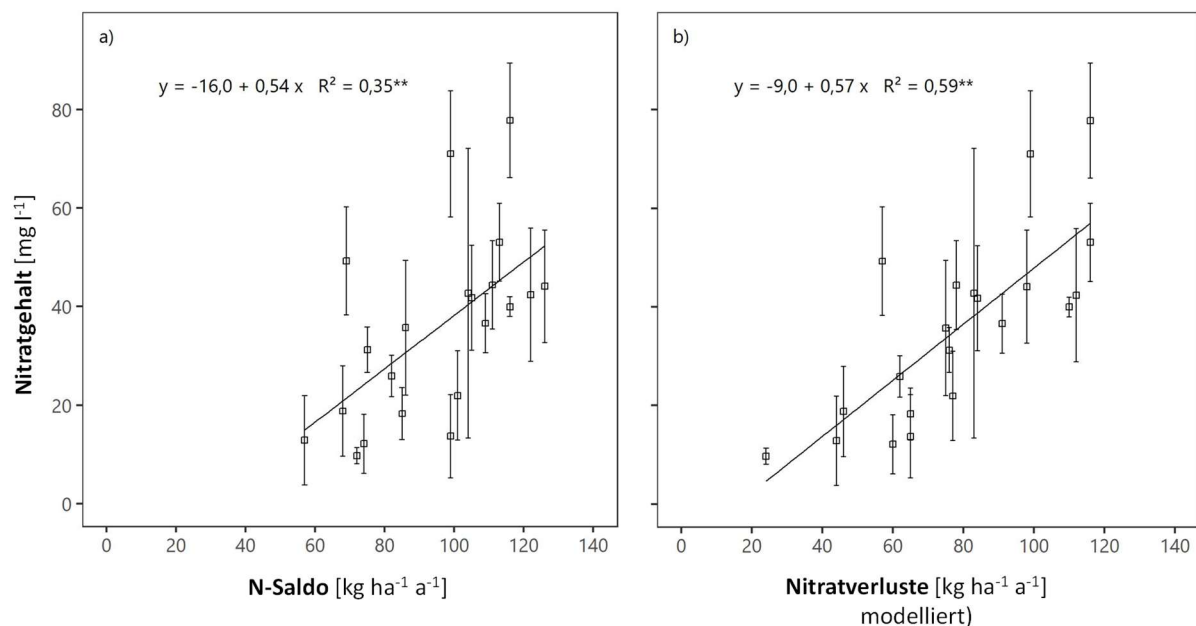


Abbildung 83: Beziehung zwischen Modellwerten (N-Saldo, Nitratverlusten) und gemessenen Nitratgehalten im Bodenwasser, Modellregion Hohenthann (Forster und Hülsbergen, 2017)

Es konnten signifikante Beziehungen zwischen N-Salden bzw. den modellierten Nitratverlusten und den gemessenen Nitratgehalten nachgewiesen werden, obwohl die Modellierung im Mittel des Schlags erfolgte (ohne Differenzierung nach Ertragszonen oder räumlich variablen Bodeneigenschaften), während die Tiefenbohrungen an definierten Punkten in Hoch- und Niedrigertragszonen durchgeführt wurden. Mit der neuen Methodik zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung ist es hingegen möglich, die potenziellen Nitratverluste für unterschiedliche Ertragszonen zu berechnen (siehe Abschnitt 4.2.2.3). In weiteren Untersuchungen ist zu prüfen, ob dies die Aussagegenauigkeit des Modells gegenüber der schlageneinheitlichen Bilanzierung wesentlich verbessert.

4.2.5.3 Vernetzung der Stoffkreislaufanalysen mit der teilschlagbezogenen N-Bilanzierung

Das Modell REPRO arbeitet auf unterschiedlichen räumlichen Systemebenen – Schlag, Fruchtfolge, Betrieb; bisher ist der Schlag die kleinste Betrachtungsebene.

Das neue Modell Web-Man enthält eine GIS-Komponente (Abbildung 84). Web-Man ist so konzipiert, dass Daten der teilflächenspezifischen Düngung, Mähdrescher-, Sensor- und Satellitendaten genutzt werden können, um teilschlagbezogene N-Bilanzen zu berechnen (Prinzipdarstellung in Abbildung 85).

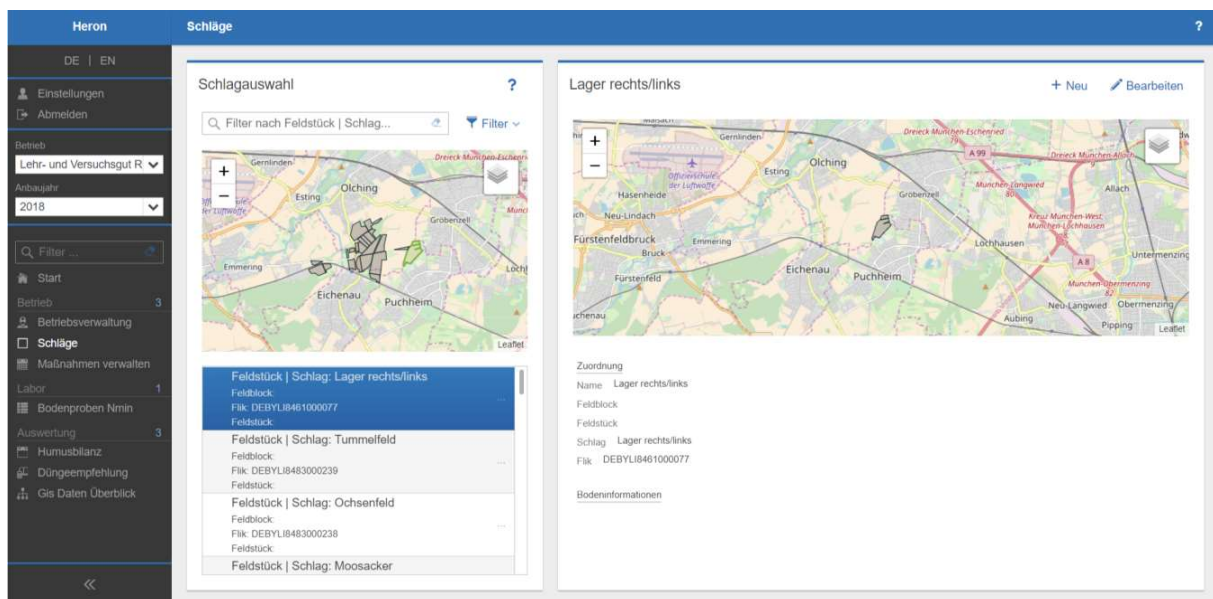


Abbildung 84: Verwaltung von Schlagdaten und GIS-Darstellung von Schlägen im Modell Web-Man

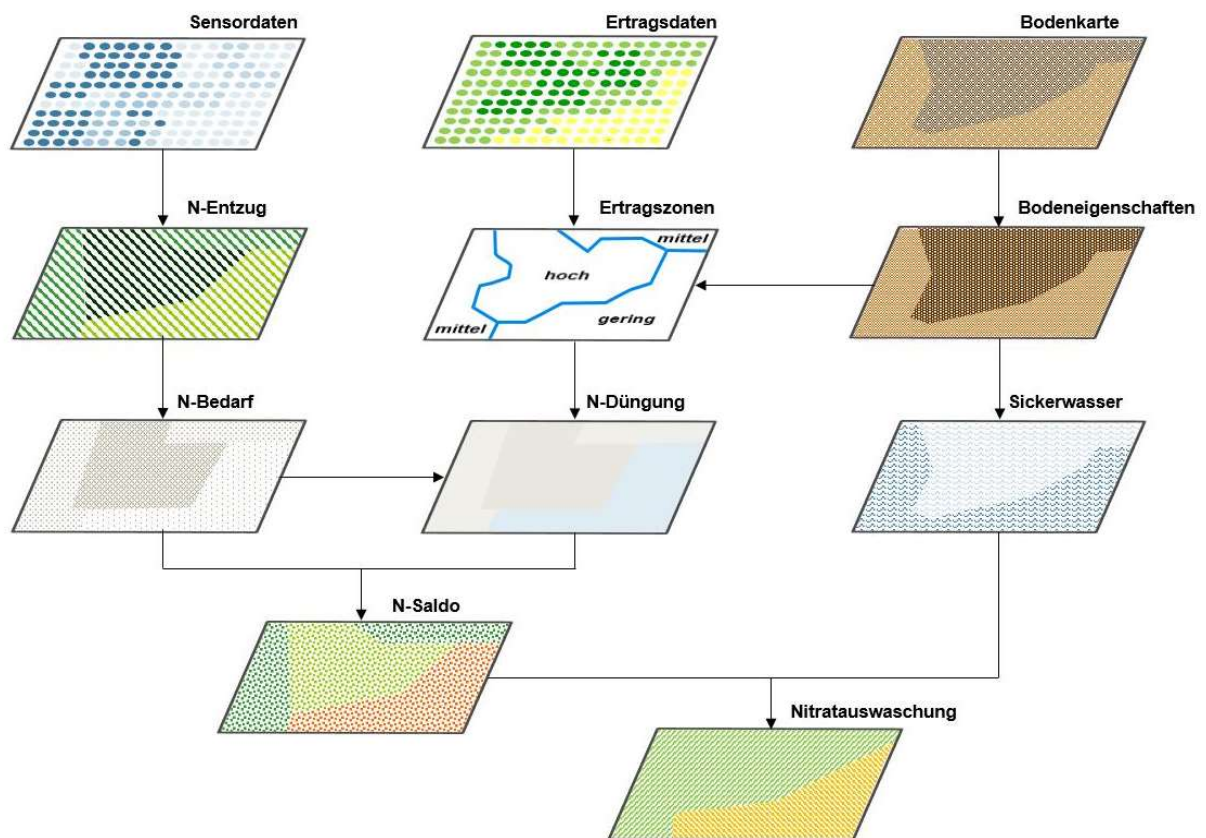


Abbildung 85: Prinzip-Darstellung zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung. Verwendung unterschiedlicher Datenquellen und Analysemethoden zur Bestimmung von N-Entzug, N-Düngung und N-Salden. Die Modellierung der Sickerwasserbildung und Nitratauswaschung setzt die Verfügbarkeit georeferenzierter Standortdaten voraus.

Von entscheidender Bedeutung für die teilflächenspezifische N-Bilanzierung ist die Verfügbarkeit georeferenzierter Daten zur hochauflösenden Quantifizierung der Stickstoffzufuhr (N-Düngung) und der Stickstoffabfuhr (N-Entzug) der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Im Abschnitt 4.2.1 bis 4.2.4. wurde gezeigt, welche Datenquellen (Mähdrescher-, Satelliten- und Sensordaten) und Methoden (Vegetationsindices, Algorithmen, Modelle) genutzt werden können, um teilflächenspezifische N-Salden zu berechnen.

In weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geht es darum, das digitale N-Managementsystem Web-Man mit dem sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngesystem zu verbinden. In mehreren FE-Vorhaben⁵, die auf den Ergebnissen des von der Deutschen Bundestiftung Umwelt geförderten Forschungsprojektes aufbauen, wird daran gearbeitet, die Komponenten zu einem Gesamtsystem zu verknüpfen; dies schließt den effizienten Datentransfer zwischen den Komponenten ein.

⁵ Es handelt sich u.a. um das Projekt „Minderung von Nitratausträgen durch digitales Stickstoffmanagement und sensorgestützte Düngung in der Modellregion Burghausen/Burgkirchen (digisens)“, Laufzeit 2020 bis 2022, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und das Projekt „Webbasiertes Nährstoff-Management im ökologischen Landbau (Web-Man)“, Laufzeit 2019 bis 2021, gefördert durch die Bundeinstanz für Ernährung und Landwirtschaft.

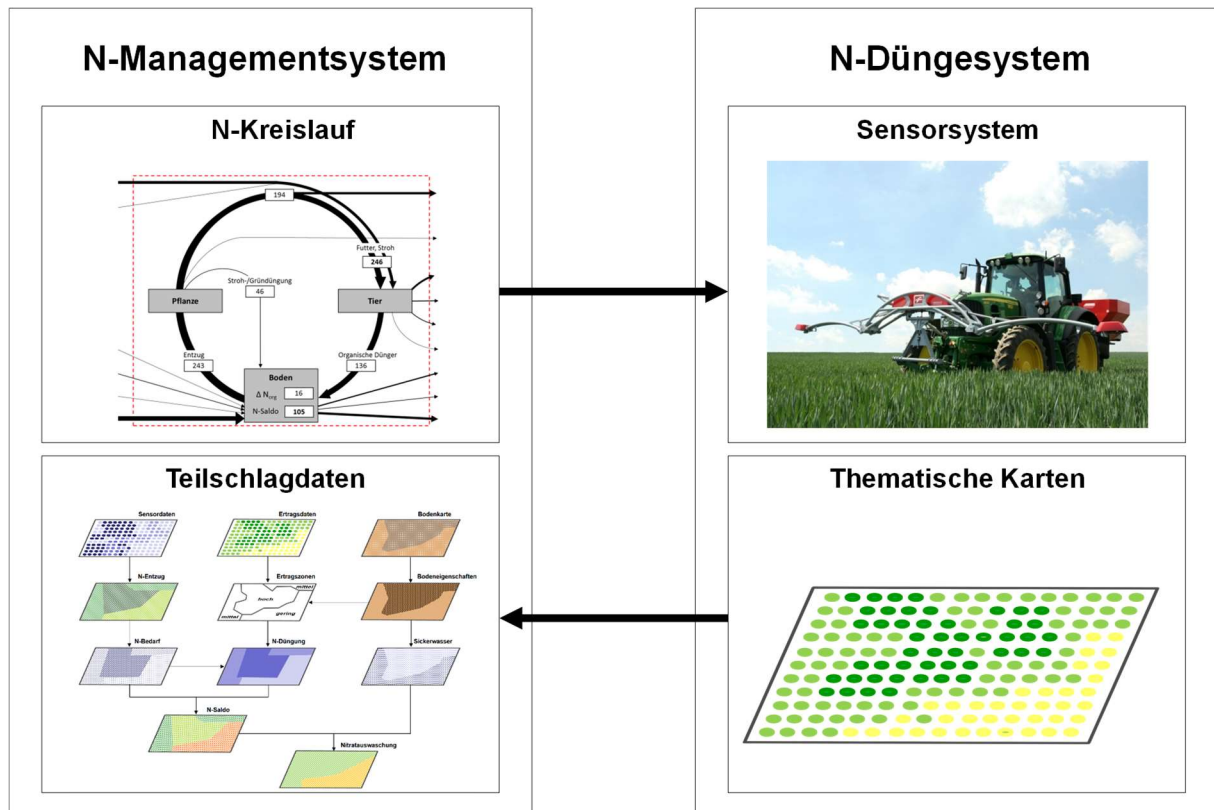


Abbildung 86: Konzept der Modellkopplung und des Datenaustauschs zwischen digitalem (webbasiertem) N-Managementssystem und sensorgestütztem N-Düngesystem.

Aus dem digitalen Nährstoffmanagementsystem können düngungsrelevante Daten (z.B. schlag- und teilschlagbezogene Erträge, Ertragspotenzialkarte, Vorfrüchte, organische Düngung zu Vorfrüchten) bereitgestellt werden, die im Düngungssystem nach dem Prinzip Online + Map-Overlay für die N-Düngebedarfsermittlung verwendet werden. Andererseits können Sensordaten des Düngesystems (z.B. Düngerapplikationsmengen, REIP-Werte, teilschlagspezifische N-Entzüge) an das Nährstoffmanagementsystem übergeben werden.

5 Generaldiskussion und Fazit

Sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung

Wie im Abschnitt 4.2 beschrieben, konnte aus den Daten der umfangreichen mehrjährigen Maisversuche in den Versuchsstationen Roggenstein und Freising die Abhängigkeit der Ertragsbildung von Mais von der Pflanzenentwicklung zu frühen Entwicklungsstadien nachgewiesen werden. Die Pflanzeigenschaften während der Jugendentwicklung konnten mithilfe von Reflexionsmessungen gut charakterisiert werden. Zudem wurde dargestellt, wie durch die Düngung Einfluss auf die Pflanzenentwicklung genommen werden kann.

In der Praxis erfolgt derzeit die komplette N-Düngung bei Mais meist zur Saat. Wie die Versuchsergebnisse jedoch zeigen, ist eine N-Düngung bis 50 cm ohne Ertragsverluste möglich und somit die Voraussetzung für eine teilflächenspezifische sensorgestützte N-Düngung gegeben.

Die umfangreichen experimentellen Daten aus den Maisversuchen bilden eine wichtige Grundlage, um optimale Ziel-Stickversorgungszustände von Mais für verschiedene Ertragspotentiale abzuleiten und Düngealgorithmen für Mais zu entwickeln.

Systeme zur teilschlagspezifischen Düngung haben besonders auf heterogenen Standorten und in High-Input-Systemen Vorteile (McBratney et al. 2018). Sie dienen (a) der Erhöhung der N-Effizienz, (b) der Einsparung bzw. verbesserten Verteilung von Düngermitteln und damit der Erreichung (c) niedrigerer N-Salden. In Niedrigertragszonen können N-Überdüngung und N-Verluste vermieden, in Hochertragszonen das Ertragspotenzial ausgeschöpft werden ohne dabei die Boden-N-Vorräte abzureichern. Dadurch kommt es zu gleichmäßigeren Beständen und einer homogeneren (d) Abreife (Mähdruscherleichterung) und (e) Produktqualität. Die teilflächenspezifischen Systeme lassen sich je nach räumlicher Auflösung und zeitlicher Dynamik in Offlineverfahren (Mapping-Ansatz), Onlineverfahren (Sensoransatz) und kombinierte Systeme einteilen (Ludowicy et al. 2002).

Im Mapping-Ansatz werden auf der Basis digitaler Bodendaten (z.B. auf der Grundlage von Bodenkarten, Bodentextur, elektrischer Leitfähigkeit, Nährstoffgehalten und/oder historischer Ertragsdaten N-Applikationskarten erzeugt (Schmidhalter et al. 2008). Von Dienstleistern werden auch Ertragspotenzial- und N-Applikationskarten angeboten, die aufgrund der aktuellen bzw. prognostizierten Wetterentwicklung und unter Berücksichtigung weiterer Faktoren und Düngealgorithmen die Düngeempfehlungen in der Vegetationsperiode präzisieren (VISTA 2020).

Eine Alternative sind am Markt verfügbare Sensor-gestützte Echtzeit-Systeme. Diese zumeist schleppergetragenen Sensorsysteme (z.B. Yara N-Sensor, YARA 2020 und ISARIA, Fritzmeier Umwelttechnik 2020) erfassen auf der Basis von Vegetationsindices die N-Aufnahme von Pflanzenbestände in Echtzeit, um den Düngebedarf teilflächenspezifisch abschätzen und steuern zu können. In einigen Systemen ist dabei an einer repräsentativen Stelle des Feldbestandes eine Messung des N-Ernährungszustandes des Pflanzenbestands nötig (Spot-Kalibrierung), um damit die Zu- und Abschläge (je nach Bestandesentwicklung) zu definieren, die dann auf die Fläche übertragen werden.

Das Map-Overlay-System ist die Kombination des Mapping- und des Sensor-Systems. Dieses kann die höchste Präzision erreichen aufgrund der Berücksichtigung der räumlichen Variabilität von Ertragspotenzial und aktueller Pflanzenentwicklung. Dieses System hat jedoch auch den größten Anspruch an die Datenbereitstellung und die Anwenderqualifikation.

Bei den sensor- und satellitengestützten N-Düngesystemen bestehen aber noch Nachteile und Unzulänglichkeiten. Vergleiche der einzelnen Systeme zeigen eine unterschiedliche Leistungsfähigkeit, abhängig von der Produktionsintensität und den Jahreseffekten (Ramm und Reckleben 2019). Dabei können im Detail unterschiedliche Düngestrategien verfolgt werden. Die Komplexität der Regelsysteme bedeutet auch, dass Landwirte aufgrund der zum Teil mangelnden Transparenz der Entscheidungsregeln und Algorithmen Vertrauen in den Steuerungsprozess haben müssen.

Methodischer Ansatz der Untersuchungen der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung

Im Projekt wurden auf heterogenen Ackerschlägen georeferenzierte Boden- und Pflanzenparameter bestimmt, Beziehungen zwischen räumlich variablen Boden-, Pflanzen- und Umweltparameter analysiert und Stickstoffsalden mit unterschiedlichen Datenquellen und Methoden berechnet. Die Untersuchungen wurden auf Praxisschlägen von Landwirten und Versuchsflächen der Technischen Universität München durchgeführt. Die georeferenzierte Erfassung der räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern erfolgte mit den in Abschnitt 3.2 dargestellten Methoden. Anhand der Versuchsergebnisse wurde gezeigt, dass die Bodenheterogenität und die Ertragspotenziale von Ackerflächen auf Grundlage verschiedener Datenquellen und Methoden analysiert werden können.

Die Erfassung der Boden- und Pflanzenparameter erfolgte im Projekt mit unterschiedlichen Methoden (Probenahme im Feld und Laboranalysen, Messung der elektrischen Leitfähigkeit, Drohnenflug für die Höhenmessung, Reflexionsmessung mit Sensor und Satellit, Mährescherertragserfassung). Für Anwendungen im Precision Farming stehen generell sehr unterschiedliche Daten aus unterschiedlichen Quellen und Erfassungsmethoden zur Verfügung, die teilweise kostenfrei verfügbar sind (Satellitendaten), zum Teil aufwändige und/oder kostenintensive Analysen (z.B. Sensorsysteme, Drohne, Mährescherertragserfassung) erfordern (Finger et al. 2019).

Im Projekt wurden georeferenzierte teilflächenspezifische Stickstoffbilanzen auf der Grundlage verfügbarer Mess- und Modelldaten (Ertrag, Korn-N-Entzug) berechnet; die Mineral-N-Düngung wurde schlageinheitlich durchgeführt. Die Differenz zwischen N-Entzug (N-Output) und N-Düngungsmenge (N-Input) ist die einfachste Methode, den N-Saldo zu berechnen. Weitere Einflussfaktoren wie z.B. die N-Mineralisierung und N-Immobilisierung bleiben bei dieser Bilanzierungsmethode ebenso wie die N-Deposition unberücksichtigt. Es wäre aber prinzipiell möglich, künftig auch diese Prozesse räumlich differenziert zu erfassen, z.B. durch die Anwendung von Bodenprozessmodellen und Satellitendaten (Mauser und Bach 2009). Die Boden-N-Dynamik, insbesondere die N-Mineralisierung aus dem Boden-N-Pool kann teilflächenspezifisch stark variieren und somit die Biomassebildung, die N-Entzüge und letztlich auch die N-Salden und N-Effizienz deutlich beeinflussen (Prücklmaier 2020).

Der Vergleich der Ergebnisse hat gezeigt, dass die Schlaggröße ausreichend groß (> 4 ha) gewählt werden muss, um fundierte Aussagen zu treffen. So sind Ertragskarten des Mähreschers bei kleineren Schlägen (< 4 ha) sehr fehlerbehaftet, da hier besonders viele Wendevorgänge auftreten und die Teilbreitenerfassung sowie die variierenden Anfahrsgeschwindigkeiten zu unrealistischen Ertragswerten führen (Steinmayr 2002). Des Weiteren hat sich gezeigt, dass eine zu geringe Datendichte der Biomassehandschnitte zu Verzerrungen beim Vergleich mit anderen Methoden führt. Beim Drusch mit dem Parzellenmährescher sowie bei der Probenahme mit den Biomasse-Handschnitten müssen mit geostatistischen Methoden die Parzellen vorab gleichmäßig verteilt werden, um so den Schätzfehler beim Interpolationsverfahren möglichst gering zu halten (Auerswald 2019).

Bewertung der Ergebnisse

Im Forschungsprojekt hat sich gezeigt, dass ein enormes Potenzial in der georeferenzierten Stickstoffbilanzierung liegt. Aus dem weiterhin sehr rasch fortschreitenden Digitalisierungsprozess in der Landwirtschaft (schleppergetragene Düngesysteme, Drohnen, Satelliten, Softwareentwicklung etc.) kann für die hier gestellten Forschungsfragen davon ausgegangen werden, dass die Verfügbarkeit teilflächenspezifischer Daten weiter steigen wird. Durch Kopplung der verschiedenen Standort- und Bewirtschaftungsdaten bietet das in diesem Forschungsprojekt entwickelte Modul zur teilflächenspezifischen N-Bilanzierung einen neuen Ansatz zur ressourcenschonenden Stickstoffdüngung.

Ein mögliches Anwendungsgebiet der neuen Methodik ist der Trinkwasserschutz. In Trinkwassereinzugsgebieten kann es erforderlich sein, Teilschläge mit hohem N-Verlustpotenzial georeferenziert zu erfassen, um zielgerichtete Maßnahmen zur Minderung von Nitratausträgen abzuleiten. Bei Nitratverlusten spielen nicht nur die Art und Intensität der Flächennutzung eine wichtige Rolle, sondern auch die standortbedingten Nitrataustragspotenziale (abhängig von der Niederschlagsmenge, dem Oberflächenabfluss und der Verdunstung sowie der Wasserspeicherkapazität der Böden, der Wasseraustauschrate und der daraus resultierenden Sickerwassermenge) sowie der Nitratabbau im Aquifer und die Verweilzeit des Wassers im Trinkwasserleiter bis zur Förderung. Die Ableitung von wirksamen Maßnahmen und Optimierungsstrategien zur Minderung von Nitratausträgen setzt die Aufklärung der zugrundeliegenden Prozesse der Nitratauswaschung voraus.

Die Heterogenität von Ackerflächen wurde an mehreren Standorten auf zahlreichen Ackerschlägen mit unterschiedlichen Methoden erfasst. Um den N-Saldo auf den Ackerflächen teilflächenspezifisch zu berechnen, wurde die räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge ermittelt. Hierbei dient der N-Saldo als Indikator, um das Verlustpotenzial an reaktiven N-Verbindungen anzuzeigen. Bei einem positiven N-Saldo kann es zu umweltschädlichen N-Emissionen, bei einem negativen N-Saldo zum Nährstoffabbau des Bodens kommen. Durch die Bestimmung von Bodenparametern an georeferenziert gewonnenen Bodenproben wurden Einflussfaktoren auf die variierenden N-Salden beschrieben.

Obwohl es viele ertragsbeeinflussende Faktoren gibt, so hatten auf dem Untersuchungsschlag „Bergfeld“ von den geprüften Bodenparametern der C_{org} -Gehalt ($R^2 = 0,36$), der N_t -Gehalt ($R^2 = 0,40$) und die nFK ($R^2 = 0,40$) den stärksten Einfluss auf den Ertrag. Dies bestätigte sich auch auf anderen Schlägen (siehe 4.2.1, 4.2.3, 4.2.4). Der C_{org} -Gehalt charakterisiert näherungsweise den Humusgehalt des Bodens; dieser beeinflusst zahlreiche Bodenprozesse und Bodeneigenschaften (z.B. Bodengefüge, Bodenbiologie, Nährstoffgehalte) positiv, wie in zahlreichen Analysen gefunden wurde (Tiessen et al. 1994; FAO 2001; Pan et al. 2009). Der C_{org} -Gehalt korrelierte auf dem Bergfeld eng mit dem N_t -Gehalt ($R^2 = 0,94$), sowie relativ eng mit der nutzbaren Feldkapazität ($R^2 = 0,47$) und dem Bodenwassergehalt ($R^2 = 0,42$). Insbesondere in trockenen Jahren, wie im Jahr 2018, hat die Bodenwasserspeicherung erheblichen Einfluss auf die Ertragsbildung; oft ist das verfügbare Wasser ertragslimitierend (Godwin und Miller 2003).

Die Bestimmung der Nitrat-Vorräte zu Vegetationsbeginn ist in Deutschland in der Düngeverordnung (BGBl. I S. 1305 Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2017) gefordert, um die N-Düngebedarfsermittlung zu präzisieren. Allerdings zeigte sich in unseren Untersuchungen, z.B. unter den Bedingungen des Jahres 2018 auf dem Bergfeld, dass die N_{min} -Vorräte keinen Einfluss auf den Ertrag und den N-Entzug hatten ($R^2 = 0,02$).

Anhand der Untersuchungsergebnisse ist einzuschätzen, dass sich die angewandten Technologien grundsätzlich für die Bestimmung von Ertrag und N-Entzug eignen; dies zeigen die Korrelationen auf der Ackerfläche „Bergfeld“ zwischen Mährescher und Sensor ($R^2 = 0,58$), Mährescher und Satellit ($R^2 = 0,33$) sowie Sensor und Satellit ($R^2 = 0,47$). Ähnliche Ergebnisse erzielten Kaivosoja et al. (2017) beim Vergleich zwischen traktormontiertem Sensor, Mährescherertragserfassung und Sentinel 2 Satellitendaten. Auf Ackerflächen, die eine höhere räumliche Variabilität aufweisen, als der in dieser Arbeit untersuchte Schlag, können unter Umständen noch engere Korrelationen zwischen Boden- und Pflanzenparametern gefunden werden. Auf den weiteren in die Untersuchungen einbezogenen Acker schläge wurden vergleichbare Beziehungen gefunden.

Die Untersuchungen zeigten eine hohe Variabilität der N-Salden auf einheitlich gedüngten Schlägen. Das bedeutet, dass auch bei einer ausgeglichenen N-Bilanz umweltrelevante N-Verluste (z.B. Nitrat-austräge) auf Teilflächen auftreten können, die bei einer schlageinheitlichen Bilanzrechnung nicht sichtbar werden. Dies wird z.B. an den räumlich variablen N-Salden auf dem Bergfeld deutlich; Mährescherdaten: 10 (- 116 bis + 72) kg ha⁻¹, Sensordaten: 24 (-76 bis + 91) kg ha⁻¹ und Satellitendaten: 62 (-6 bis + 91) kg ha⁻¹. Mit der Mährescher-Ertragserfassung wurden die höchsten mittleren Korn-N-Entzüge (182 kg ha⁻¹) und niedrigsten N-Salden (10 kg ha⁻¹) ermittelt, anhand der Satellitendaten die niedrigsten mittleren Korn-N-Entzüge (130 kg ha⁻¹) und höchsten N-Salden (62 kg ha⁻¹). Die auf der Grundlage von Sensordaten ermittelten N-Salden von 24 kg ha⁻¹ stimmen am besten mit den Messergebnissen (Fuhrwerkswaage) in Höhe von 36 kg ha⁻¹ überein. Die hohen Korn-N-Entzüge, ermittelt anhand der Mährescherertragsdaten, können durch eine fehlerhafte Kalibrierung und Ertragsmessung verursacht sein (Steinmayr 2002). Insgesamt bestätigen die Untersuchungsergebnisse der anderen Untersuchungsschläge prinzipiell die auf dem Bergfeld gewonnenen Ergebnisse.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Abschließend ist zu konstatieren, dass eine teilflächenspezifische N-Bilanzierung auf der Basis moderner Technologien möglich ist und diese für eine Minderung von umweltrelevanten N-Emissionen (z.B. im Trinkwasserschutz) eingesetzt werden können. In weiteren Untersuchungen wird analysiert, ob die in dieser Arbeit verwendeten Datenquellen und Methoden auch bei mehrjährigen Analysen und bei abweichenden Bedingungen in Bezug auf Fruchtart, Klima und Bewirtschaftung zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

Die teilflächenspezifische Bewirtschaftung kann den ökologischen Fußabdruck der Landwirtschaft verringern (Walter et al. 2017). Unsere Untersuchungen zur räumlichen Variabilität von N-Salden auf einheitlich gedüngten Schlägen unterstreichen die Notwendigkeit der standortangepassten teilflächenspezifischen N-Düngung.

In weiteren Untersuchungen sollte analysiert werden, ob

- a) die N-Salden auch bei anderen Fruchtarten, Boden- und Klimabedingungen eine hohe kleinräumige Variabilität aufweisen,
- b) bei einer sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung im Vergleich zur schlageinheitlichen N-Düngung eine geringere Variabilität der N-Salden (und geringere N-Verluste) auftritt,
- c) die Beziehungen zwischen N-Salden und Nitratausträgen bei georeferenzierter und teilschlagbezogener Analyse enger sind als bei einer schlagbezogenen Auswertung.

Beide Teilprojekte und Untersuchungsansätze – die teilflächenspezifische N-Düngung und die teilflächenspezifische N-Bilanzierung sind eng vernetzt. Beide Ansätze sind in digitale, webbasierte Stickstoffmanagementsysteme integrierbar.

Die Kombination der sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung und der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung führt zu Synergieeffekten und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen hinsichtlich einer ressourcenschonenden Düngung.

Die neuen digitalen N-Managementtools können dazu beitragen, die Nitratausträge (z.B. in Trinkwasserschutzgebieten) wirksam zu vermindern.

6 Öffentlichkeitsarbeit

Im Laufe des Projektes haben die Projektmitarbeiter an zahlreichen Tagungen und Workshops teilgenommen und mitgewirkt:

2017 und 2018:

- Teilnahme und Projektvorstellung auf *129. VDLUFA-Kongress* vom 12. bis 15. September in Freising (Böswirth et al. 2017; Maidl et al. 2017)
- Vorstellung und Diskussion der Projektziele zum Trinkwasserschutz bei den städtischen Abgeordneten von Burghausen und Burgkirchen am 20. Juli 2017
- Teilnahme am *8. Agrarwissenschaftlichen Symposium* am 21. September 2017 in Freising (Böswirth 2017a)
- Teilnahme und Projektvorstellung am *EU-Workshop Smart AKIS* der DLG am 24. Oktober 2017 in Grub (Thema: Digitale Technik in kleinstrukturierten Agrarregionen)
- Besuch der Agrarmesse *Agritechnica* in Hannover im Herbst 2017 und Teilnahme am pflanzenbaulichen Fachforum (Thema: Innovative Düngesysteme).
- Klausurtagung am TUM-Akademiezentrum Raitenhaslach vom 29. bis 30. Juni 2018
- Teilnahme an der 61. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbau vom 25. bis 27. September 2018

2019:

- Teilnahme und Vorstellung der Ergebnisse beim HEFagrar PhD Symposium am 10. April 2019
- Teilnahme und Vorstellung der Ergebnisse bei der 62. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbau vom 10. bis 12. September 2019 in Berlin
- Besuch der Agrarmesse *Agritechnica* in Hannover im Herbst 2019 und Teilnahme am pflanzenbaulichen Fachforum (Thema: Protecting yield and nature).

2020:

- Teilnahme und Vorstellung der Ergebnisse an der GIL-Tagung in Weihenstephan (18.02-19-02.2019)

Publikation der Ergebnisse

- Mittermayer M, Gilg A, Maidl F-M, Nätscher L, Hülsbergen K-J (2020): Site-specific nitrogen balances based on spatially variable soil and plant parameters. *Precision Agriculture* (eingereicht).

7 Literaturverzeichnis

- Abraham, J. (2001): Auswirkungen von Standortvariabilitäten auf den Stickstoffhaushalt ackerbaulich genutzter Böden unter Berücksichtigung der Betriebsstruktur, der standortspezifischen Bewirtschaftung und der Witterungsbedingungen. Aachen: Shaker (Berichte aus der Agrarwissenschaft).
- Anglade, J.; Billen, G.; Garnier, J.; Makridis, T.; Puech, T.; Tittel, C. (2015): Nitrogen soil surface balance of organic vs conventional cash crop farming in the Seine watershed. In: *Agricultural Systems* 139, S. 82–92. DOI: 10.1016/j.agsy.2015.06.006.
- Auerswald, Karl (2019): Geostatistik. Vorlesung 2018/2019 TU München, 2019.
- Bach, Heike; Migdall, Silke; Brohmeyer, Franziska; Brüggemann, Lena; Buddeberg, Marion; VISTA GmbH (2016): LfULG-Schriftenreihe, Heft 21/2016 "Satellitengestützte Ertragshebung", S. 76–82.
- Bachmaier, Martin (2010): Yield Mapping Based on Moving Butterfly Neighborhoods and the Optimization of their length and width by Comparing with Yield Data from a Combine Harvester. In: *Recent Advances in Energy & Environment*, S. 76–82.
- Bellvert, J.; Zarco-Tejada, P. J.; Girona, J.; Fereres, E. (2013): Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. In: *Precision Agric* 15 (4), S. 361–376. DOI: 10.1007/s11119-013-9334-5.
- BGBl. I S. 1305 Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung-DüV).
- Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 103 Tabellen und 31 Listen. Unter Mitarbeit von Herbert Sponagel. 5., verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller).
- Böswirth, T. (2017a): Energie- und Treibhausgasbilanzierung landwirtschaftlicher Biogassysteme – Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells. 8. Agrarwissenschaftliches Symposium.
- Böswirth, T. (2017b): Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Energie- und Treibhausgasbilanzierung landwirtschaftlicher Biogassysteme. 1. Auflage. Berlin: Verlag Dr. Köster (Weihenstephaner Schriften Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme, Band 6).
- Böswirth, T.; Maidl, F.-X.; Hülsbergen, K. J. (2017): Digital basiertes Stickstoffmanagement in landwirtschaftlichen Betrieben. Emissionsminderung durch optimierte Stickstoffkreisläufe und sensorgestützte teilflächenspezifische Düngung. In: F. Wiesler, K.-H. Südekum und T. Ebertseder (Hg.): 129. VDLUFA-Kongress. Standortgerechte Landnutzung - umweltverträglich und wirtschaftlich. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten.
- Claas (2018): LEXION 670-620. Online verfügbar unter https://www.claas.de/produkte/maehdrescher/lexion670-620-2018?subject=D00951115_de_DE, zuletzt geprüft am 24.09.2019.
- Crutzen, P. J.; Mosier, A. R.; Smith, K. A.; Winiwarter, W. (2008): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. In: *Atmos. Chem. Phys.* 8 (2), S. 389–395. DOI: 10.5194/acp-8-389-2008.
- Dalgaard, T.; Bienkowski, J. F.; Bleeker, A.; Dragosits, U.; Drouet, J. L.; Durand, P. et al. (2012): Farm nitrogen balances in six European landscapes as an indicator for nitrogen losses and basis for improved management. In: *Biogeosciences* 9 (12), S. 5303–5321. DOI: 10.5194/bg-9-5303-2012.
- DIN ISO 10694, 1996-08 (1996): Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).
- DJI Matrice (2018): 200 Series. DJI Inspire 2 | Zenmuse X4S. Online verfügbar unter <https://www.dji.com/de/products>, zuletzt geprüft am 28.11.2019.
- Doolittle, James A.; Brevik, Eric C. (2014): The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. In: *Geoderma* 223-225, S. 33–45. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.01.027.

- Dourmad, J.Y.; Sève, B.; Latimier, P.; Boisen, S.; Fernández, J.; van der Peet-Schwering, C.; Jongbloed, A.W (1999): Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. In: *Livestock Production Science* 58 (3), S. 261–264. DOI: 10.1016/S0301-6226(99)00015-9.
- Eckert, Hans; Breitschuh, Gerhard; Sauerbeck, Dieter R. (2000): Criteria and standards for sustainable agriculture. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163 (4), S. 337–351. DOI: 10.1002/1522-2624(200008)163:4<337::AID-JPLN337>3.0.CO;2-3.
- Eichler, Franziska; Schulz, Dietrich (1998): The nitrogen reduction programme in the Federal Republic of Germany. In: *Environmental Pollution* 102 (1), S. 609–617. DOI: 10.1016/S0269-7491(98)80089-4.
- ESA (2018): European Space Agency. Sentinel - 2. Online verfügbar unter <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 21.02.2020.
- FAO (2001): Soil carbon sequestration for improved land management. Unter Mitarbeit von Michel Robert. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (World soil resource reports, 96).
- Finger, Robert; Swinton, Scott; El Benni, Nadja; Walter, Achim (2019): Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. In: *Annu. Rev. Resour. Econ.* 11 (1), S. 313–335. DOI: 10.1146/annurev-resource-100518-093929.
- Fnr (2017): Entwicklung der Maisanbaufläche in Deutschland. Fachagentur NACHwachsende Rohstoffe e.V.
- Forster, Felix; Hülsbergen, Kurt-Jürgen (2017): Analyse des Nitratbelastungspotenzials und Nitrat-Minderungsstrategien. In: Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement am Beispiel der Gemeinde Hohenthann (Niederbayern) mit intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung. Forschungsbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Technische Universität München. ((available online at: https://www.lfu.bayern.de/wasser/gw_gefaehrdung_schutz/gwschutz_landwirtschaft/projekte_hohenthann/doc/tum_bericht_hohenthann.pdf)), S. 14–113. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/wasser/gw_gefaehrdung_schutz/gwschutz_landwirtschaft/projekte_hohenthann/doc/tum_bericht_hohenthann.pdf, zuletzt geprüft am 27.02.2017.
- Frank, Helmut (2014): Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Energie- und Treibhausgasbilanzierung landwirtschaftlicher Betriebssysteme mit Milchviehhaltung. 1. Aufl. Berlin: Köster Berlin (Weihenstephaner Schriften Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme, Bd. 2).
- Franke, U.; Oelschlägel, B.; Schenk, S. (1993): Modellierung von Bodenprozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen. UFZ-Bericht 3/1995,. Bad Lauchstädt.
- Geonics Limited (2019): Ground Conductivity Meters (EM38-MK2). ON, Canada. Online verfügbar unter <http://www.geonics.com/html/em38.html>, zuletzt geprüft am 27.11.2019.
- Godwin, R. J.; Miller, P.C.H. (2003): A Review of the Technologies for Mapping Within-field Variability. In: *Bio-systems Engineering* 84 (4), S. 393–407. DOI: 10.1016/S1537-5110(02)00283-0.
- Godwin, R. J.; Wood, G. A.; Taylor, J. C.; Knight, S. M.; Welsh, J. P. (2003): Precision Farming of Cereal Crops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. In: *Biosystems Engineering* 84 (4), S. 375–391. DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00031-X.
- Goodlass, G.; Halberg, N.; Verschuur, G. (2003): Input output accounting systems in the European community—an appraisal of their usefulness in raising awareness of environmental problems. In: *European Journal of Agronomy* 20 (1-2), S. 17–24. DOI: 10.1016/S1161-0301(03)00068-6.
- Halberg, Niels; Verschuur, Gerwin; Goodlass, Gillian (2005): Farm level environmental indicators; are they useful? In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105 (1-2), S. 195–212. DOI: 10.1016/j.agee.2004.04.003.
- Hank, Klaus (2013): Precision Farming, Stickstoffdüngung aber wie? . Verbesserung der Effizienz der Stickstoffdüngung in Hinblick auf Umweltbelastung und Wirtschaftlichkeit durch den Einsatz Künstlich neuronaler Netze.
- Hatfield, Jerry (2000): Precision Agriculture and Environmental Quality; Challenges for research and education: U.S. Department of Agriculture’s Natural Resources Conservation Service. Online verfügbar unter www.arborday.org, zuletzt geprüft am 20.12.2018.

-
- Heil, K.; Schmidhalter, U. (2015): Comparison of the EM38 and EM38-MK2 electromagnetic induction-based sensors for spatial soil analysis at field scale. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 110, S. 267–280. DOI: 10.1016/j.compag.2014.11.014.
- Hengl, Tomislav (2007): A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables.
- Hinck, Stefan; Kloepfer, Florian; Schuchmann, Georg (Hg.) (2016): Precision Farming. Bodeneigenschaften erfassen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V (KTBL-Heft, 111).
- Hou, Yong; Bai, Zhaohai; Lesschen, Jan Peter; Staritsky, Igor G.; Sikirica, Natasa; Ma, Lin et al. (2016): Feed use and nitrogen excretion of livestock in EU-27. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 218, S. 232–244. DOI: 10.1016/j.agee.2015.11.025.
- Hülsbergen, K. J. (2009): Ein Modell zur Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebssysteme. In: C. Grimm und K. J. Hülsbergen (Hg.): Nachhaltige Landwirtschaft - Indikatoren, Bilanzierungsansätze, Modelle. Berlin: Erich Schmidt Verlag, S. 13–28.
- Hülsbergen, K. J.; Küstermann, B. (2007): Das Modell REPRO – Möglichkeiten der Anwendung in Betrieben des Ökologischen Landbaus. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hg.): Bewertung ökologischer Betriebssysteme. KTBL Schrift 458, S. 184–206.
- Hülsbergen, Kurt-Jürgen (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Aachen: Shaker (Berichte aus der Agrarwissenschaft).
- Hülsbergen, Kurt-Jürgen; Maidl, Franz-Xaver; Forster, Felix; Prücklmaier, Josef (2017): Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement am Beispiel der Gemeinde Hohenthann (Niederbayern) mit intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung. Forschungsbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Technische Universität München. ((available online at: https://www.lfu.bayern.de/wasser/gw_gefaehrdung_schutz/gwschutz_landwirtschaft/projekte_hohenthann/doc/tum_bericht_hohenthann.pdf)). Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/wasser/gw_gefaehrdung_schutz/gwschutz_landwirtschaft/projekte_hohenthann/doc/tum_bericht_hohenthann.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2020.
- Isensee, Edmund; Krippahl, Stefan (2001): Online-Vergleich von Ertragsmesssystemen im Mähdrescher.
- Isermann, K. (1990): Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication. In: *Fertilizer Research* 26 (1-3), S. 253–269. DOI: 10.1007/BF01048764.
- Isermann, K. (1994): Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share. In: *Environmental Pollution* 83 (1-2), S. 95–111. DOI: 10.1016/0269-7491(94)90027-2.
- Kaivosoja, Jere; Näsi, Roope; Hakala, Teemu; Viljanen, Niko; Honkavaara, Eija (2017): Different Remote Sensing Data in Relative Biomass Determination and in Precision Fertilization Task Generation for Cereal Crops. In: International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food & Environment, Bd. 953, S. 164–176.
- Keller, Thomas; Sutter, Janine A.; Nissen, Knud; Rydberg, Tomas (2012): Using field measurement of saturated soil hydraulic conductivity to detect low-yielding zones in three Swedish fields. In: *Soil and Tillage Research* 124, S. 68–77. DOI: 10.1016/j.still.2012.05.002.
- Köhler, Kai; Duynisveld, Wilhelmus H. M.; Böttcher, Jürgen (2006): Nitrogen fertilization and nitrate leaching into groundwater on arable sandy soils. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169 (2), S. 185–195. DOI: 10.1002/jpln.200521765.
- Küstermann, Björn; Christen, Olaf; Hülsbergen, Kurt-Jürgen (2010): Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135 (1-2), S. 70–80. DOI: 10.1016/j.agee.2009.08.014.

-
- Leip, Adrian; Britz, Wolfgang; Weiss, Franz; Vries, Wim de (2011): Farm, land, and soil nitrogen budgets for agriculture in Europe calculated with CAPRI. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 159 (11), S. 3243–3253. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.01.040.
- LFU (2019): Landwirtschaft und Grundwasserschutz in den Gebieten Hohenthann, Pfeffenhausen und Rottenburg an der Laaber - Abschlussbericht Projektphase I. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Limbrunner, B.; Maidl, F.-X. (2009): Vergleich verschiedener Systeme zur teilflächenspezifischen Stickstoff-Düngung. 52. Jahrestagung der GPW. 01. bis 03. September 2009 in Halle/Saale.
- Ludowicy, Christof; Schwaiberger, Reinhart; Leithold, Peer (2002): Precision farming. Handbuch für die Praxis. 1. Aufl. Frankfurt am Main: DLG-Verl.
- Lussem, U.; Bolten, A.; Gnyp, M. L.; Jasper, J.; Bareth, G. (2018): Evaluation of RGB-Based Vegetation Indices from UAV Imagery to Estimate Forage Yield in Grassland. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-3, S. 1215–1219. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018.
- Maes, Wouter H.; Steppe, Kathy (2019): Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. In: *Trends in plant science* 24 (2), S. 152–164. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.11.007.
- 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, Proc. 7. Int. Conf. On Prec. Agriculture, Minnesota/USA*, S. 1938–1948.
- Maidl, F.-X. (2011): Verfahren zur Bestimmung des Düngebedarfs, insbesondere des Stickstoff-Düngebedarfs und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Dt. Patentamt 2011060618544100DE.
- Maidl, F.-X. (2012): Einsatz von N-Sensoren zur Maisdüngung. Mais 1/2012, S. 18–20.
- Maidl, F.-X.; Spicker, A.; Prücklmaier, J. Hülsbergen, K.-J. (2017): Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch sensorgestützte N-Düngung. In: F. Wiesler, K.-H. Südekum und T. Ebertseder (Hg.): 129. VDLUFA-Kongress. Standortgerechte Landnutzung - umweltverträglich und wirtschaftlich. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten.
- Maidl, Franz-Xaver; Spicker, Andreas; Weng, Jonas; Hülsbergen, Kurt-Jürgen (2019): Ableitung des teilflächenspezifischen Kornertrags von Getreide aus Reflexionsdaten. In: A. Meyer-Aurich et al.: Digitalisierung in kleinstrukturierten Regionen, Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, Bonn 2019, 131–134., S. 131–134, zuletzt geprüft am 27.02.2019.
- Matheron, Georges (1963): Principles of geostatistics. In: *Economic Geology* 58 (8), S. 1246–1266. DOI: 10.2113/gsecongeo.58.8.1246.
- Mausser, Wolfram; Bach, Heike (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. In: *Journal of Hydrology* 376 (3-4), S. 362–377. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.046.
- McBratney, Alex. B.; Minasny, Budiman; Stockmann, Uta (Hg.) (2018): *Pedometrics*. Cham: Springer International Publishing (Progress in Soil Science).
- McKinnon, Tom; Hoff, Paul (2017): Comparing RGB-Based Vegetations Indices with NDVI for Drone Bases Agricultural Sensing.
- Mittermayer, Martin; Gilg, August; Maidl, Franz-Xaver; Hülsbergen, Kurt-Jürgen (2020): Erfassung der räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern: Grundlage für die teilflächenspezifische N-Bilanzierung. In: Andreas Meyer-Aurich, Markus Gandorfer, Heinz Bernhardt, Franz Xaver Maidl, Georg Fröhlich, Helga Floto und Bonn Bonn Gesellschaft für Informatik e.V. (Hg.): GI Edition Proceedings Band 299 Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. 40. GIL-Jahrestagung 17.-18. Februar 2020 Campus Weihenstephan, Freising, Bd. 299. Bonn: Köllen (GI-Edition. Proceedings, 299), S. 181–186. Online verfügbar unter https://gil-net.de/wp-content/uploads/2020/02/GIL_2020FK_LNI-gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 28.06.2020.
- Oenema, Oene; Kros, Hans; Vries, Wim de (2003): Approaches and uncertainties in nutrient budgets. Implications for nutrient management and environmental policies. In: *European Journal of Agronomy* 20 (1-2), S. 3–16. DOI: 10.1016/S1161-0301(03)00067-4.

-
- Open Drone Map (2018): Drone Mapping Software. Online verfügbar unter <https://www.opendronemap.org/>, zuletzt geprüft am 30.01.2019.
- Pan, Genxing; Smith, Pete; Pan, Weinan (2009): The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 129 (1-3), S. 344–348. DOI: 10.1016/j.agee.2008.10.008.
- Perner, Jörg; Reinsch, Felix (2017): Drohnenbasierte Datenerfassung in Feldversuchen - Fallbeispiele mit Ansätzen statistischer Auswertungen.
- Powell, J. M.; Gourley, C.J.P.; Rotz, C. A.; Weaver, D. M. (2010): Nitrogen use efficiency. A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. In: *Environmental Science & Policy* 13 (3), S. 217–228. DOI: 10.1016/j.envsci.2010.03.007.
- Prücklmaier, Josef (2020): Feldexperimentelle Analysen zur Ertragsbildung und Stickstoffeffizienz bei organisch-mineralischer Düngung auf heterogenen Standorten und Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung durch computer- und sensorgestützte Düngesysteme. 1. Auflage. Berlin: Verlag Dr. Köster (Weihenstephaner Schriften Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme, (in print)).
- Ramm, Sebastian; Reckleben, Yves (2019): Sensor- und satellitengestützte Stickstoffdüngung. Ein Weg zu mehr N-Effizienz? Hg. v. Getreidemagazin.
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, A.; Chapin, F. S.; Lambin, E.; Lenton, T. M. (2009): A safe operating space for humanity. In: *Nature* 461, S. 472–475.
- Roßberg, Dietmar; Michel, Volker; Graf, Rudolf; Neukampf, Ralf (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland.
- Ruijter, F. J. de; Boumans, L. J. M.; Smit, A. L.; van den Berg, M. (2007): Nitrate in upper groundwater on farms under tillage as affected by fertilizer use, soil type and groundwater table. In: *Nutr Cycl Agroecosyst* 77 (2), S. 155–167. DOI: 10.1007/s10705-006-9051-9.
- Schmidhalter, U.; Maidl, F.-X.; Heuwinkel, H.; Demmel, M.; Auernhammer, H.; Noack, P. O. (2008): Precision Farming – Adaptation of Land Use Management to Small Scale Heterogeneity. In: *Perspectives for Agroecosystem Management*: Elsevier, S. 121–199.
- Schröder, J. J.; Aarts, H.F.M.; Berge, H.F.M. ten; van Keulen, H.; Neeteson, J. J. (2003): An evaluation of whole-farm nitrogen balances and related indices for efficient nitrogen use. In: *European Journal of Agronomy* 20 (1-2), S. 33–44. DOI: 10.1016/S1161-0301(03)00070-4.
- Siebrecht, Norman (2009): Indikatoren gestützte Analyse der Erosionsgefährdung und des Biodiversitätspotenzials als Grundlage des Nachhaltigkeitsmanagements landwirtschaftlicher Betriebssysteme.
- Steinmayr, Thomas (2002): Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mähdröschler zur Ableitung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung. Hg. v. PhD thesis. TU München. Online verfügbar unter http://ikb.weihenstephan.de/ikb2/downloads/diss/Steinmayr_Dissertation.pdf, zuletzt geprüft am 28.02.2020.
- TEC5 (2010): Mobile Spectroscopy, Version 2.13. tec5 AG Oberursel. Online verfügbar unter <https://www.tec5.com/en/our-solutions/mobile-spectroscopy>, zuletzt geprüft am 19.12.2019.
- Thompson, Steven K. (2002): On sampling and experiments. In: *Environmetrics* 13 (5-6), S. 429–436. DOI: 10.1002/env.532.
- Tiessen, H.; Cuevas, E.; Chacon, P. (1994): The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. In: *Nature* 371 (6500), S. 783–785. DOI: 10.1038/371783a0.
- van der Ploeg, R. R.; Ringe, H.; Machulla, Galina; Hermsmeyer, D. (1997): Postwar Nitrogen Use Efficiency in West German Agriculture and Groundwater Quality. In: *Journal of Environment Quality* 26 (5), S. 1203. DOI: 10.2134/jeq1997.00472425002600050003x.

- VDLUFA-Methodenbuch I (1991): Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA); Methode A 2.1.1 Bestimmung des Wassergehaltes (bzw. der Trockenmasse) durch Trocknen im Trockenschrank In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik. Darmstadt (VDLUFA-Methodenbuch, Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., 2. Teillieferung).
- VDLUFA-Methodenbuch I (1997): Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA); Methode D 2.1 Bestimmung der Bodenart des Feinbodens mit der Fingerprobe. In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik. Bestimmung der Bodenart des Feinbodens mit der Fingerprobe. Darmstadt (VDLUFA-Methodenbuch, Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., 2. Teillieferung, VDLUFA-Verlag).
- VDLUFA-Methodenbuch I (2002): Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA); Methode A 6.1.4.1 Bestimmung von mineralischem Stickstoff (Nitrat und Ammonium) in Bodenprofilen (Nmin-Labor-methode). In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik. Darmstadt (VDLUFA-Methodenbuch, Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., 3. Teillieferung VDLUFA-Verlag).
- VDLUFA-Methodenbuch I (2016): Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA); Methode A 4.1.3.2 Direkte Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung bei 550°C und Gasanalyse. In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik. Direkte Bestimmung von organischen Kohlenstoff durch Verbrennung von 550 °C und Gasanalyse. Darmstadt (VDLUFA-Methodenbuch, Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., 7. Teillieferung).
- VDLUFA-Methodenbuch III (2004): Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA); Methode 4.1.2 Bestimmung von Rohprotein mittels DUMAS-Verbrennungsmethode. In: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik. Darmstadt (VDLUFA-Methodenbuch, Bd. III Die Untersuchung von Futtermitteln, 3. Aufl., 5. Erg.).
- Walter, Achim; Finger, Robert; Huber, Robert; Buchmann, Nina (2017): Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114 (24), S. 6148–6150. DOI: 10.1073/pnas.1707462114.
- Watson, C. A.; Bengtsson, H.; Ebbesvik, M.; Løes, A-K.; Myrbeck, A.; Salomon, E. et al. (2002): A review of farm-scale nutrient budgets for organic farms as a tool for management of soil fertility. In: *Soil Use and Management* 18, S. 264–273. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2002.tb00268.x.
- Wechsung, G. (2002): N-Düngung aus Umweltsicht - eine Herausforderung für die Landwirtschaft. Tagung N-Effizienz im Spannungsfeld. 1. - 2. März 2002.
- Wendland, Matthias (2018): Grundwasserschonende Landbewirtschaftung. in den Gebieten Hohenthann, Pfeffenhausen und Rottenburg a.d. Laaber.
- Wintersteiger (2018): Laboratory thresher. Online verfügbar unter <https://www.wintersteiger.com/us/Plant-Breeding-and-Research/Products/Product-Range/Stationary-thresher>, zuletzt geprüft am 25.09.2019.
- Wintersteiger (2019): Delta Parzellenmähdrescher. Online verfügbar unter <https://www.wintersteiger.com/de/Pflanzenzucht-und-Forschung/Produkte/Produktprogramm/Parzellenmähdrescher/36-Delta>, zuletzt geprüft am 25.01.2019.
- Zhang, Xin; Davidson, Eric A.; Mauzerall, Denise L.; Searchinger, Timothy D.; Dumas, Patrice; Shen, Ye (2015): Managing nitrogen for sustainable development. In: *Nature* 528 (7580), S. 51–59. DOI: 10.1038/nature15743.