

**Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn**

**Landwirtschaftliche Fakultät**

**USL**

---

**Lehr- und Forschungsschwerpunkt**

**„Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“**

## **Forschungsbericht**

**Nr. 191**

Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW

Verfasser:

Dr. Thomas Gaiser (Projektleiter), Dr. Amit Srivastava,

Dipl. Geoökologe Andreas Enders

**Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz**

**Herausgeber:** Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172 15, 53115 Bonn  
Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776  
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Bonn, April 2019

ISSN 1610-2460

**Projektleitung:** Dr. Thomas Gaiser

**Projektbearbeiter:** Dr. Amit Srivastava, Dr. Wenzhi Zeng, Andreas Enders

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz  
Katzenburgweg 5  
53115 Bonn

**Zitiervorschlag:**

GAISER, T., A. SRIVASTAVA UND A. ENDERS (2019): Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 191, 65 Seiten.

## INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung .....	1
1.1	Zielsetzung.....	1
2.	Material und Methoden .....	2
2.1	Die Modellplattform SIMPLACE .....	2
2.2	Modellbeschreibung (Solution) .....	5
2.3	Szenarienbildung .....	6
2.4	Datengrundlage.....	7
2.4.1	Wetterdaten .....	7
2.4.3	Düngeszenarien .....	11
2.4.4	Definition betriebstypischer Fruchtfolgen .....	11
2.5	Kalibrierung der Modell-Solution .....	12
2.5.1	Erträge der wichtigsten Fruchtarten .....	13
2.5.2	Stickstoffentzüge .....	14
2.6	Modellverknüpfung mit dem ökonomischen Betriebsmodell FARMDyn .....	15
2.7	Berechnung der agronomische Effizienz der Stickstoffdüngung .....	16
3.	Ergebnisse und Diskussion.....	16
3.1	Ertragsfunktionen in Abhängigkeit von der Düngeintensität .....	17
3.1.1	Silomais.....	17
3.1.2	Winterweizen .....	18
3.1.3	Zuckerrüben .....	20
3.2	Stickstoffauswaschung in Abhängigkeit von Standort und Düngeszenario in der Region 141 (Börde/Niederungslagen).....	21
3.2.1	Silomais.....	21
3.2.2	Winterweizen .....	23
3.2.3	Zuckerrüben .....	24
3.3	Stickstoffauswaschung in Abhängigkeit von Bodentyp und Fruchtart in NRW .....	26
3.4	Agronomische Effizienz der Stickstoffdüngung .....	29
3.4.1	Silomais.....	29
3.4.2	Winterweizen .....	30
3.4.3	Zuckerrüben .....	31
3.5	Bedeutung der Annahmen zum Gesamtstickstoffgehaltes im Boden für die Stickstoffaufnahme und die Auswaschungsverluste .....	32
4.	Zusammenfassung.....	35
5.	Schlußfolgerungen für die Umsetzung der Ergebnisse in der Praxis.....	36

## IV

6. Konsequenzen für weitere Forschungsaktivitäten.....	37
7. Liste der Veröffentlichungen und Vorträge .....	37
8. Liste über Pressemitteilungen .....	38
9. Liste über Posterpräsentationen, Vorführungen und Demonstrationen .....	38
10. Kurzfassung in Deutsch und Englisch .....	38
10.1 Kurzfassung .....	38
10.2 Extended Summary .....	40
11. Literaturverzeichnis.....	43
12. Anhang .....	45
12.2. Typische Fruchtfolgen in den Boden-Klima-Regionen NRW .....	60
13. Abbildungsverzeichnis .....	62
14. Tabellenverzeichnis.....	65

## **1. Einleitung**

Das Forschungsvorhaben „**Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW**“ war Teil des Clusterprojektes „Skalenübergreifende Modellierung von Änderungen der Agrarstruktur und landwirtschaftlichen Stoffflüssen in Regionen von Nordrhein-Westfalen“. Anlass für das Clusterprojekt war die im Juni 2017 verabschiedete, überarbeitete Düngeverordnung DüV2017 (BMEL, 2017) nach einem mehrjährigen Novellierungsprozess der DüV2007. Ziel des Clusters war die gekoppelte Simulation und Analyse von Nährstoffflüssen auf Ebene des Pflanzenbestandes, des landwirtschaftlichen Betriebes und der Region unter expliziter Betrachtung des Nährstoffaustausches zwischen typischen landwirtschaftlichen Betrieben. Hierbei sollten auch Auswirkungen von Politikmaßnahmen quantifiziert und soweit möglich hieraus Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, um Nährstoffüberschüsse zu reduzieren.

### **1.1 Zielsetzung**

Nährstoffflüsse und -bilanzen auf landwirtschaftlichen Betrieben in Deutschland und angrenzenden Ländern hängen stark von der Betriebsstruktur, den Anbausystemen, dem Nährstoffmanagement und dem Nährstoff ab (Deike *et al.*, 2008; Happe *et al.*, 2011; Rubæk *et al.*, 2013; Gibbons *et al.*, 2014). Für Stickstoff (N) und Phosphor (P) ist bekannt, dass viehstarke Betriebe mit hoher Besatzdichte ( $>1.5$  GV pro ha) und hohem Anteil an Futtermittelzukauf häufig Nährstoffüberschüsse aufweisen, die entweder zu erhöhten N-Emissionen in gelöster Form (N-Auswaschung oder -Abtrag) oder gasförmig (Ammoniak, Stickoxide) im Falle des Stickstoffs oder bei Phosphaten zur Festlegung im Boden führen (Nielsen and Kristensen, 2005; Modin-Edman *et al.*, 2007; Rubæk *et al.*, 2013). Auf reinen Ackerbaubetrieben sind die Nährstoffüberschüsse in der Regel weit geringer, so dass das Risiko von Nährstoffemissionen kleiner ist und im Wesentlichen von den Bodenverhältnissen und der Kombination aus Düngerart, Ausbringungszeitpunkt, und Niederschlagsereignissen abhängig ist (Beaudoin *et al.*, 2005; Colomb *et al.*, 2007; Deike *et al.*, 2008; Vanden Nest *et al.*, 2014).

Ziel des Vorhabens „Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW“ war die Abschätzung von standortspezifischen Nährstoffflüssen in betriebstypischen Anbausystemen aller Boden-Klimaregionen Nordrhein-Westfalens mit Hilfe der Modellplattform SIMPLACE (Scientific Impact Assessment and Modelling Platform for Advanced Crop and Ecosystem Management). Die Definition der Betriebssysteme und die konsistente Modellierung von Erträgen und Nährstoffflüssen auf der Standort- und Landschaftsskala setzte eine enge Zusammenarbeit mit den beiden anderen

Vorhaben innerhalb des Clusters zur einzelbetrieblichen ökonomischen Modellierung FARMDYN und dem agentenbasierten Modellsystem ABMSIM voraus.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1 Die Modellplattform SIMPLACE**

Die Modellentwicklung und die Entscheidungsunterstützung, aber auch die Politikberatung ist komplex und benötigt fortgeschrittene Technologien. Wissenschaftliche Projekte sind sehr individuell in ihren Anforderungen an eine Modellierungssoftware, besonders in natürlichen oder anthropogenen Systemen und ihren Interaktionen. Zusätzlich unterscheiden sich die Anforderungen zwischen Entwicklern, Wissenschaftlern und Entscheidern erheblich. Auch die unterschiedlichen geographischen und zeitlichen Skalenebenen machen die Nutzung einer Software für unterschiedliche Anwendungen schwierig. Die Plattform SIMPLACE versucht hier die unterschiedlichen Anforderungen auszugleichen und diese Unterschiede zu überbrücken, indem es angepasste Funktionen für die unterschiedlichen Nutzergruppen zur Verfügung stellt.

SIMPLACE nutzt hierfür eine modulare Architektur unter Einbeziehung standardisierter Technologien. Dies reduziert den Entwicklungsaufwand und erleichtert die Einarbeitung. Je nach Nutzergruppe kann die Komplexität und auch die Freiheitsgrade angepasst werden. Die Architektur ermöglicht die direkte Nutzung erstellter eigener Modelle auf High Performance Clustern für Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und regionaler bzw. globaler Modellanwendung.

Für die Modellentwicklung nutzt der Wissenschaftler die Definition einer „Solution“, welche zusammengesetzt ist aus Eingangsdaten (Resources), Übersetzern (Transformers), Modellkomponenten (Components) und Ausgabeadaptoren (Outputs). Neben einer Dokumentation enthält die Solution auch Konstanten und die Verbindung zwischen den einzelnen Teilen.

In Abbildung 1 wird die für die Simulation der Düngeszenarien in allen Fruchtfolgen verwendete Solution in der graphischen Oberfläche angezeigt. Erkennbar sind die komplexen Verbindungen zwischen den zur Berechnung verwendeten Komponenten. Diese Oberfläche ist vor Allem für Entscheider und Stake-Holder entwickelt. Sie soll eine Nutzung mit limitierter Komplexität und maximalem Nutzerkomfort ermöglichen. Neben der Selektion und Veränderung der Konfiguration sind auch die Berechnung und die flexible Ausgabe der Ergebnisse möglich. Abbildung 2 zeigt eine beispielhafte Ausgabe einer selektierten Parameterkombination, wie sie nach der Berechnung dem Nutzer angeboten wird.

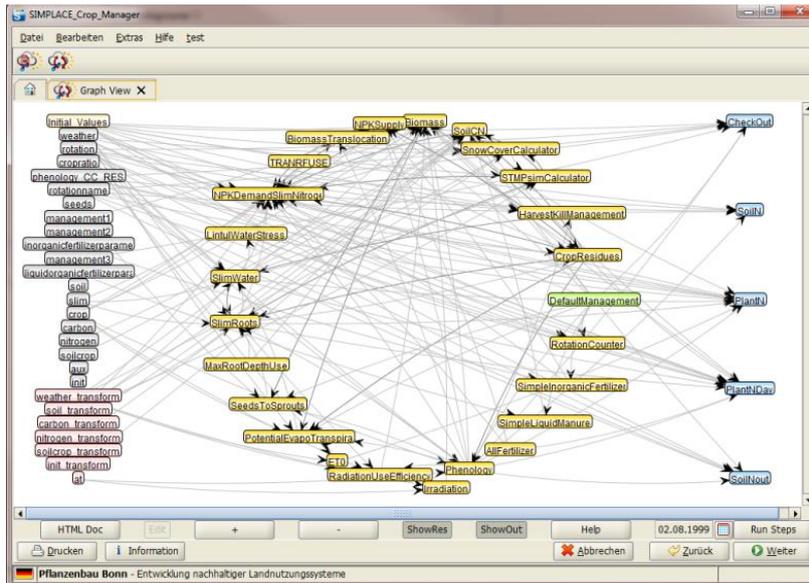


Abbildung 1: SIMPLACE Oberfläche am Beispiel der Modelling Solution „Düngeszenarien für Fruchtfolgen“

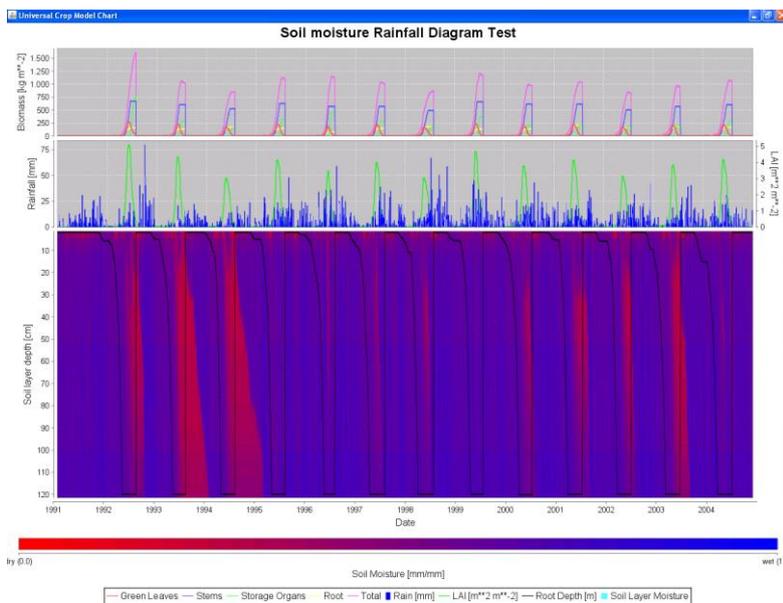


Abbildung 2: Beispielhafte Ausgabe der SIMPLACE Oberfläche.

Die Plattform ist entwickelt, um eine „Solution“ als Modellsystem zu interpretieren und somit dem Nutzer die Möglichkeit zu geben, ein an seine Fragestellung angepasstes Modell zu entwickeln. Die simulierten Systeme bilden i.d.R. Pflanzenbestände auf Schlagebene ab. Abbildung 3 zeigt schematisch einen solchen modellierten Ausschnitt der Landschaft als Punkt-Modell. SIMPLACE bietet als modulares System die Möglichkeit, verschiedene Systemkomponenten für den eigenen Einsatz anzupassen bzw. vollständig zu modifizieren. Im Fall der biophysikalischen Modellierung im vorliegenden USL-Forschungsprojekts ist dies an unterschiedlichen Stellen in der SIMPLACE PlugIn Struktur (Abbildung 4) geschehen. Hierzu wurden neue Komponenten im Bereich Rotationen und Ernterückstände erzeugt

(SimComponent), die Management Component, der Resource Transformer und das Resource Interface erweitert und ein zusätzlicher Simulation Generator implementiert. Die detailliertere Beschreibung des Modellsystems wird im nächsten Abschnitt gegeben.

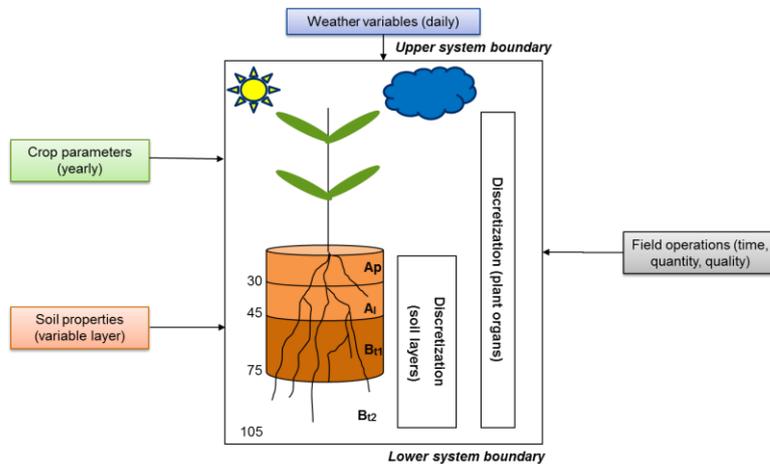


Abbildung 3: Typische Systemumgebung des SIMPLACE Modellersystems

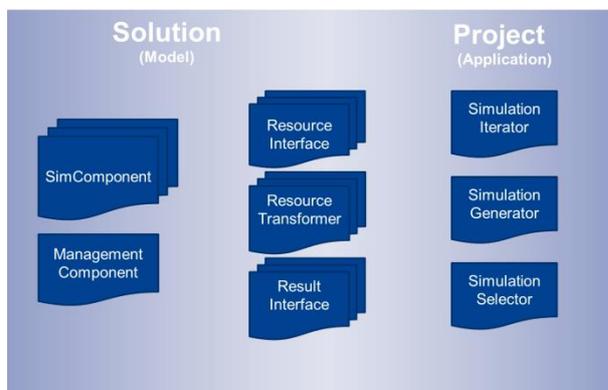


Abbildung 4: SIMPLACE Plug-In Struktur

Um das Modellsystem auf dem Rechencluster für verschiedene Standorte und Düngeszenarien anzupassen muss die Konfiguration für jeden Simulationslauf neu erstellt werden. Dies geschieht wie im Ablaufdiagramm (Abbildung 5) zu erkennen im sogenannten „project setup“. Für jeden Standort werden automatisiert aus den Rohdaten verschiedene Parameterkombinationen erstellt und aus den angehängten Datenbanken (Sorte, Boden, Wetter, Düngeszenario, Anbaumaßnahmen) mit Inhalten gefüllt. Die detaillierte Beschreibung der simulierten Freiheitsgrade wird im nächsten Unterkapitel gegeben.

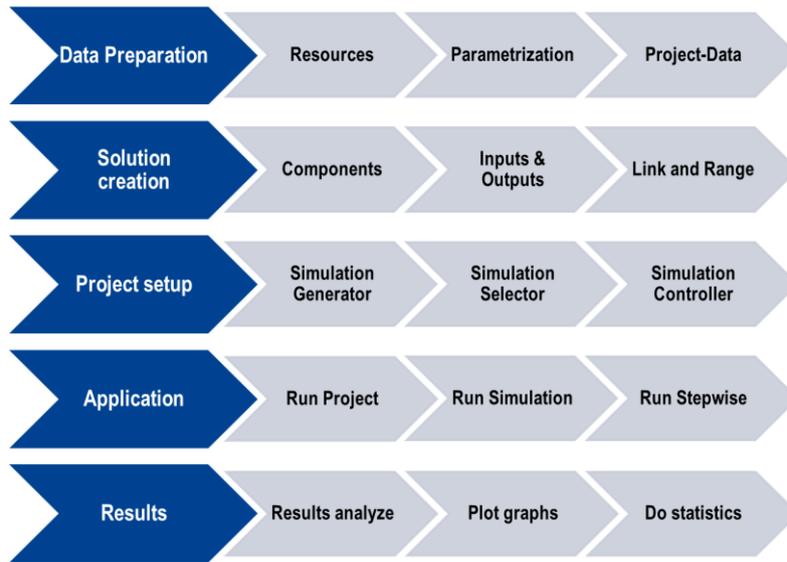


Abbildung 5: Struktureller Ablauf der Modellsimulation incl. Vor- und Nachbereitung

## 2.2 Modellbeschreibung (Solution)

Wie in Abbildung 1 deutlich wird ist das für die Simulation des Agrarökosystems verwendete Modell (hier modelling solution - Modellsystembeschreibung) sehr komplex. Insgesamt 24 Modellkomponenten sind mit ca. 200 Verknüpfungen verbunden.

Im Überblick enthält die Solution für die einzelnen Prozesse folgende SimComponents (in Klammer):

- Pflanzenwachstum (Lintul5 (Wolf, 2012)), Evapotranspiration (Hargreaves and Samani, 1985)
- Bodenwasser (SLIMWater, SLIMRoots (Addiscott *et al.*, 1986))
- Stickstoffumsatz im Boden (SoilCN (Corbeels *et al.*, 2005), SlimNitrogenNPKdemand)
- Bodentemperatur (SoilTemp, SnowCover (Williams and Izaurralde, 2005))
- Management Components (Fertilizer, Sow, Harvest)

Das potenzielle Biomassewachstum basiert auf der Absorption der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) nach Monsi-Saeki (Hirose, 2005) und der Lichtnutzungseffizienz, die in Abhängigkeit von der Fruchtart und der Entwicklungsphase variiert. Je nach Entwicklungsphase wird es auf die unterschiedlichen Pflanzenorgane verteilt. In der vorliegenden Anwendung für Fruchtfolgen und Düngezenarien wird das potenzielle Biomassewachstum durch die Faktoren Wasserstress (Dürre) und das Düngenniveau (Nährstoffarmut) begrenzt. Diese Faktoren wiederum hängen neben den Klimabedingungen von der Bodenqualität und Düngermenge ab.

Die Bodenwasserberechnung basiert auf dem „Tipping Bucket“ Ansatz. Der Boden wird hierfür unter Einbeziehung der Bodenparameter in 40 x 3 cm Schichten aufgeteilt. Das Wurzelwachstumsmodell SlimRoots trägt hierbei die vertikale Verteilung der Wurzeln bei.

Ergänzt wird dies durch das detaillierte Kohlenstoff – Stickstoff Modell (SoilCN) und die zur Berechnung der Nährstoffaufnahme und -abbauraten notwendigen Bodentemperaturkomponenten.

In der Entwicklungsphase der modifizierten SimComponents wurde klar, dass in Abhängigkeit von der gewählten Düngestrategie und der initialen Stickstoffmenge in den Speichern der Aufbau bzw. Abbau der organischen Stickstoffspeicher in den ersten Simulationsjahren einen nicht kontrollierbaren Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Deshalb wurden neben der Einbeziehung von Ernterückständen und Zwischenfrüchten auch der Einfluss einer Einschwingphase (spin up) auf die Simulationsergebnisse untersucht. Die hier dargestellten Ergebnisse beruhen also auf dem Einschwingen der Bodenstickstoff, -kohlenstoff und des Bodenwasserspeichers nach einer Simulationsperiode von 18 Jahren.

### **2.3 Szenarienbildung**

Die Dünge- und Fruchtfolgeszenarien sollten den Großteil der Fruchtfolgen in NRW in Kombination mit einem möglichst breiten Spanne von Düngeoptionen (Menge, Art und Zeitpunkt der Ausbringung) abdecken. Für die Szenarienbildung wurden deshalb folgende Einflüsse einbezogen:

- 27 Standorte in 9 Regionen mit unterschiedlicher Boden – Klima Ausstattung (Abbildung 6)
- 9 Regionen mit insgesamt 86 unterschiedlichen Rotationen
- Stickstoffdüngeraten aus den Düngeempfehlungen der KTBL (KTBL, 2009) zur Kalibrierung und Validierung im Düngezenario F0
- 108 Stickstoffdüngeszenarien
- 4 Kombinationen aus Anbau einer Winterzwischenfrucht (Zwischenfrucht ja/nein) und dem Verbleib der Ernterückstände auf dem Feld (Ernterückstände ja/nein)

Zusammen mit den unterschiedlichen Rotationsanfangsjahren ergeben sich ca. 3.000.000 Simulation für je 9 Jahre + 18 Jahre Einschwingzeit. In der Kalibrierung wurden 4 der 9 Jahre einbezogen. Die restlichen Jahre wurden für die Validierung der Ergebnisse verwendet.

Die Simulationen wurden auf dem lehrstuhleigenen Rechencluster ausgeführt.

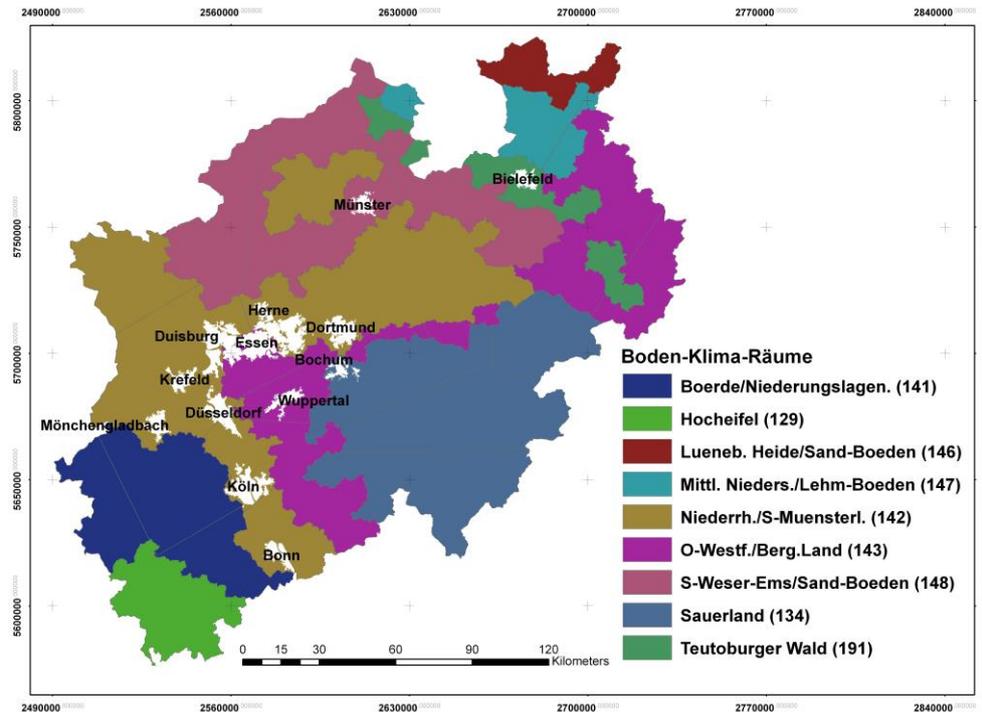


Abbildung 6: Übersicht die Boden-Klima-Regionen in Nordrhein-Westfalen (nach Roßberg *et al.* 2007)

## 2.4 Datengrundlage

Als Datengrundlage für die Simulation des Agrarökosystemmodells wurden Boden-Klima-Regionen nach Roßberg *et al.* (2007) spezifiziert, die in ihrer naturräumlichen Ausstattung relativ homogen sind (Abbildung 6). Hierbei wurden neben klimatischen Bedingungen auch Bodeninformationen und Relief mit einbezogen.

### 2.4.1 Wetterdaten

Im Simulationsmodell werden die täglichen Wetterinformationen Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit benötigt. Entsprechende Daten für NRW werden auf Basis von Stationsdaten (Temperatur, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit) bzw. auf Basis von Satelliteninformationen (Niederschlag – DWD-REGNIE (Dietzer 2000)) durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt. Für den Simulationszeitraum 1999 – 2009 wurden die täglichen Punktdaten durch eine geographische Interpolation unter Einbeziehung unterschiedlicher Faktoren wie beispielsweise Höhe ü.NN und Exposition in tägliche Rasterdaten 1x1 km umgewandelt. Die Daten wurden mit Hilfe der Hargraeves-Methode (Allen *et al.*, 1998) um die potentielle Evapotranspiration ergänzt. Die Strahlung wurde über Angstroem-Koeffizienten aus der Sonnenscheindauer abgeleitet und an physikalische Gegebenheiten angepasst. Die Windinformation wurde aus den Stationsdaten auf eine Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe normiert und ein Mittelwert über die Stationen verwendet.

Für die 27 Standorte wurden die standortspezifischen Wetterdaten für den Zeitraum 2000-2008 am entsprechenden 1x1 km Rasterpunkt selektiert und verwendet. Zur Einschätzung der Unterschiede zwischen den Regionen ist in Abbildung 7a eine Übersicht der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge zu finden.

#### 2.4.2 Auswahl dominanter Bodentypen in den einzelnen Boden-Klima-Regionen

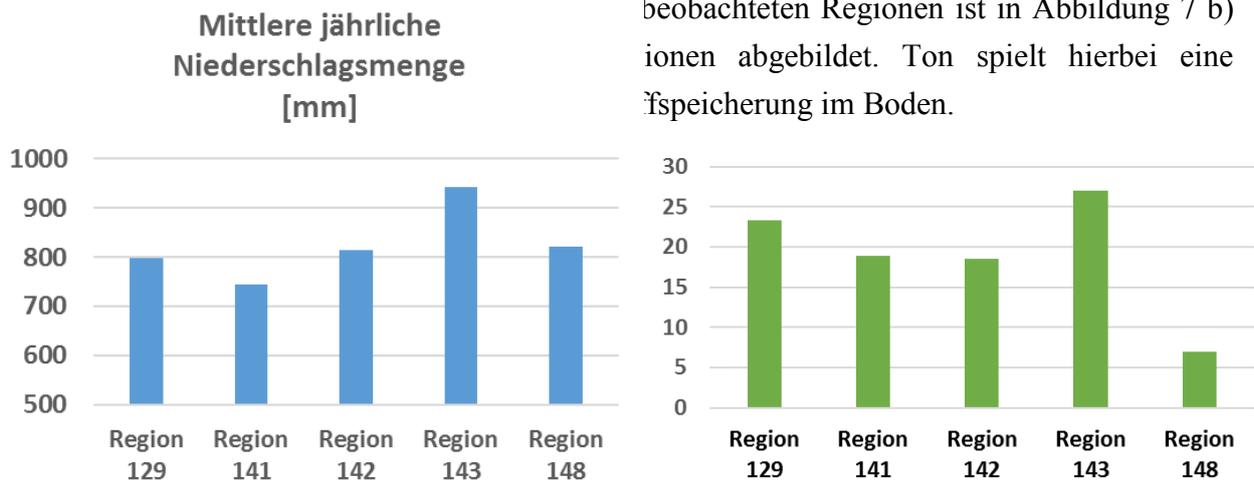
Die Bodendaten werden nach der Definition der Boden-Klima-Räume – BKR (Roßberg *et al.*, 2007) spezifiziert und vom geologischen Dienst NRW bezogen. Somit werden die einzelnen BKR als bodenphysikalisch homogen angenommen. Die entsprechenden Bodenparameter wurden durch die Nutzung von Pedotransferfunktionen (Wösten *et al.*, 1999) in die benötigten physikalischen Parameter übersetzt (Angulo *et al.*, 2013). Das Oberboden C:N-Verhältnis wurde auf 10 gesetzt und der Skelettgehalt und die Lagerungsdichte abgeschätzt nach (Poesen and Lavee, 1994; Torri *et al.*, 1994).

Auf der Grundlage der Auswertung der Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen (BK 1:50.000) und der Verschneidung der Karte der Bodennutzung (Basis-DLM, 2017) wurden die, in den einzelnen Boden-Klima-Regionen auf den Ackerflächen dominierenden Bodentypen, ausgewählt. In Tabelle 1 wird deutlich, dass sich die Boden-Klima-Regionen bezüglich der Bodenausstattung ihrer Ackerflächen stark unterscheiden. In den Berg- und Höhenlagen (Hocheifel, Sauerland, Bergisches Land) aber auch in der Börde dominieren die Bodentypen Braunerde, Pseudogley und Parabraunerde die Ackerflächen, während am Niederrhein und im Norden und Nordosten des Landes die grundwasserbeeinflussten Böden (Gley-assoziierte Bodentypen) neben Pseudogleyen, Podsole und Parabraunerden an Bedeutung gewinnen (Tabelle 2). Im Norden und Nordosten überwiegen eher sandig-lehmige Bodenarten, während in den Berglagen in der Börde und am Niederrhein die tonigen, schluffigen und lehmigen Böden vorherrschen (Tabelle 1)

**Tabelle 1: Übersicht über die auf den Ackerflächen dominanten Bodentypen in den einzelnen Boden-Klima-Regionen sowie deren Flächenanteile am Ackerland (BKR: 129=Hocheifel, 124=Sauerland, 141=Börde/Niederungslagen, 142=Niederrhein, 143=Bergisches Land/O-Westfalen , 146=Lüneburger Heide/sandige Böden, 147=Mittleres Niedersachsen/Leichte Lehm Böden, 148=S-Weser-Ems-Gebiet/Sandige Böden, 191=Teutoburger Wald)**

<b>BKR</b>	<b>Bodentyp</b>	<b>Bodenartenabfolge</b>	<b>Flächenanteil (%)</b>	<b>Bodentiefe (m)</b>	<b>Summe Flächenanteile (%)</b>
129	Braunerde	tonig-schluffig	85.2	2	92.0
	Pseudogley-Braunerde	sandig-lehmig	3.4	2	
	Vega <sup>1</sup>	stark lehmig-sandig	3.4	1.65	
134	Pseudogley	tonig-lehmig	7.2	2	90.9
	Pseudogley-Braunerde	tonig-lehmig	21.7	2	
	Braunerde (tonig-lehmig)	tonig-lehmig	61.9	2	
141	Pg-Parabraunerde	tonig-schluffig	6.8	2	82.2
	Norm-Parabraunerde	tonig-schluffig	67.1	2	
	Gley-Parabraunerde <sup>1</sup>	tonig-schluffig	8.2	2	
142	Pseudogley	tonig-schluffig	22.5	2	65.0
	Gley-Parabraunerde <sup>1</sup>	tonig-schluffig	26.9	2	
	Parabraunerde	sandig-lehmig	15.6	2	
143	Braunerde	tonig-schluffig	41.4	2	65.7
	Vega <sup>1</sup>	sandig-lehmig	14.5	1.65	
	Pseudogley-Braunerde	tonig-lehmig	9.7	2	
146	Gley	lehmig-sandig	19.0	2	86.8
	Gley-Podsol <sup>1</sup>	sandig	35.2	2	
	Pseudogley	sandig-schluffig	32.6	2	
147	Podsol-Gley <sup>1</sup>	sandig	17.7	2	64.6
	Gley	stark lehmig	16.5	2	
	Parabraunerde	tonig-schluffig	30.4	2	
148	Pseudogley	lehmig-tonig	17.4	2	73.8
	Podsol-Gley <sup>1</sup>	sandig	43.0	1.65	
	Plaggenesch	lehmig-sandig	13.4	2	
191	Braunerde	lehmig-sandig	14.9	2	66.7
	Podsol-Gley <sup>1</sup>	sandig	36.9	2	
	Parabraunerde	tonig-schluffig	14.9	2	

<sup>1</sup> Dieser Bodentyp steht stellvertretend für eine Gruppe von Gley-assoziierten Bodentypen in dem jeweiligen BKR



beobachteten Regionen ist in Abbildung 7 b) ionen abgebildet. Ton spielt hierbei eine Speicherung im Boden.

**Abbildung 7: Unterschiede im mittleren Jahresniederschlag (in mm) und im Tonanteil (in %) der Oberböden in fünf der neun Boden-Klima-Regionen**

**Tabelle 2: Ausgewählte Eigenschaften der dominanten Bodentypen auf den Ackerstandorten der Region 141 (Börde/Niederungslagen)**

Bodentyp	Textur	Tiefe (m)	Feldkapazität (%)	WV bei Sättigung (%)	Nutzbare FK (%)	Organischer Kohlenstoff (%)	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)
Pseudogley-Parabraunerde	Schluffiger Lehm	0.3	33	43	10	1.044	13	69	18
	Schluffiger Lehm	0.7	33	43	10	0.39	13	69	18
	Schluffiger Lehm	2	32	42	10	0.054	11	75	14
Norm-Parabraunerde	Schluffiger Lehm	0.3	29	42	13	1.26	16	60	24
	Schluffiger Lehm	1.4	29	42	13	0.114	16	60	24
	Ton	2	39	44	5	0.054	21	33	46
Gley-Parabraunerde	Schluffiger Lehm	0.3	29	42	13	1.794	16	60	24
	Schluffiger Lehm	1.8	29	42	13	0.054	16	60	24
	Schluffiger Lehm	2	33	43	10	0.054	14	67	19



Eine detaillierte Übersicht der eingesetzten Fruchtfolgen wird im Anhang (Abschnitt 12.2) gegeben. In Tabelle 4 wird eine Übersicht der Fruchtfolgen für die Region 141 gegeben. Zu beachten ist, dass jede Fruchtfolge mit jeder Anfangsfrucht simuliert wurde um Sondereffekte bestimmter Klimasituationen bestimmter Jahre auf die Ergebnisse zu vermeiden.

**Tabelle 4: Übersicht die Fruchtfolgen am Beispiel der Region 141 (Börde/Niederungslagen)**

No	Fruchtfolge ohne Zwischenfrucht	Fruchtfolge mit Zwischenfrucht
1	WW-WG-ZR	WW-WG-CC-ZR
2	WW-WW-WRa	WW-WW-WRa
3	WW-SM-ZR	WW-CC-SM-ZR
4	WW-SM-SM	WW-CC-SM-SM
5	WW-KM-WW-ZR	WW-CC-KM-WW-CC-ZR
6	WW-SM-WW-ZR	WW-CC-SM-WW-CC-ZR
7	WW-WG-WW-ZR	WW-WG-WW-CC-ZR
8	WW-SM	WW-CC-SM
9	WG-SM-SM	WG-CC-SM-SM
10	WW-WW-ZR	WW-WW-CC-ZR
11	WW-WG-SM-ZR	WW-WG-CC-SM-ZR
12	WW-WG-WW-WRa	WW-WG-WW-WRa
13	WW-WG-SM	WW-WG-CC-SM
14	WW-WG-WRa	WW-WG-WRa

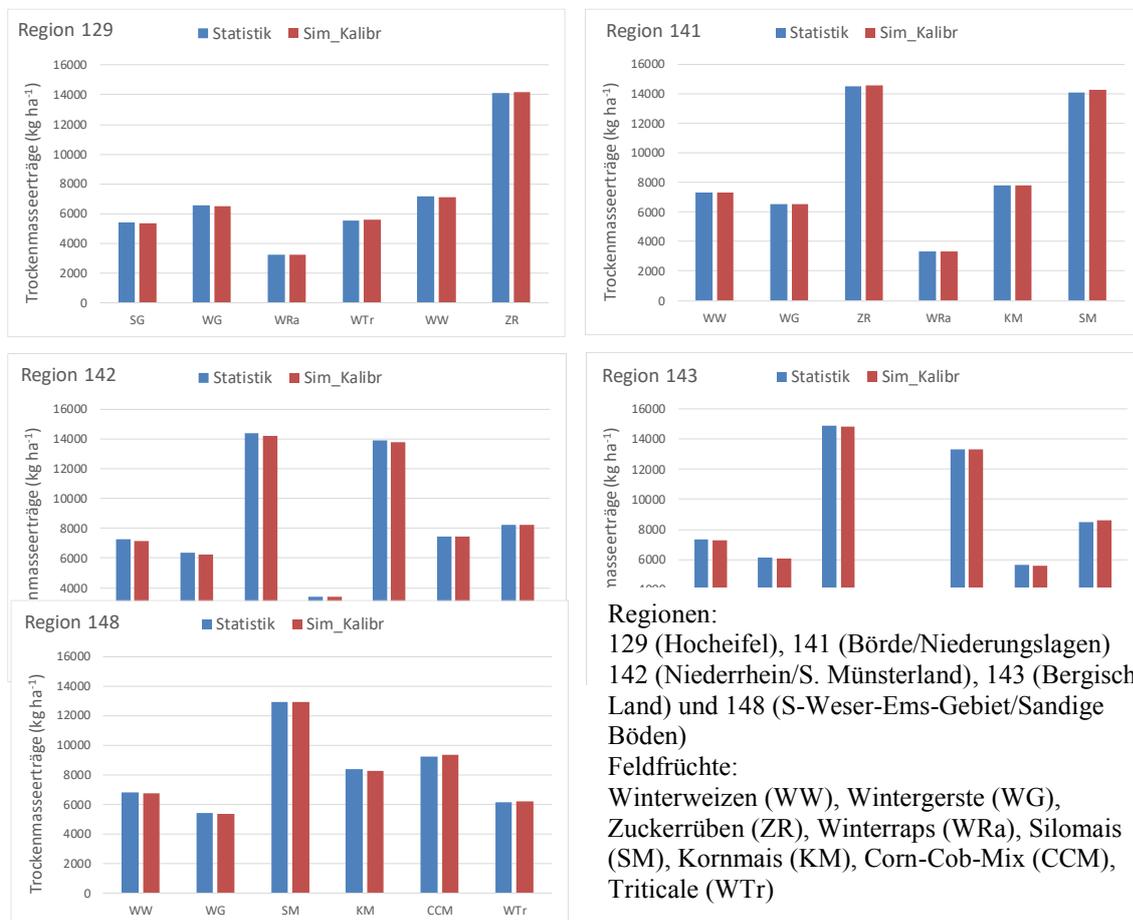
Winterweizen (WW), Wintergerste (WG), Zuckerrüben (ZR), Winterraps (WRa), Silomais (SM), Körnermais (KM), Zwischenfrucht (CC)

## 2.5 Kalibrierung der Modell-Solution

Zur Kalibrierung und Validierung des biophysikalischen Modells in SIMPLACE standen die statistischen Erträge aller Furchtarten auf Landkreisebene zur Verfügung. Außerdem konnten damit die mittleren Stickstoffentzüge pro Landkreis berechnet werden. Dazu wurden die mittleren Stickstoffgehalten im Erntegut nach DüV2017 herangezogen. Für die Modellkalibrierung wurden die statistischen Erträge und die daraus berechneten Stickstoffentzüge mit den durchschnittlichen simulierten Erträgen und Stickstoffentzügen in einzelnen Landkreisen bzw. in den verschiedenen Boden-Klima-Regionen über 4 Jahre (2000-2004) verglichen. Bei der Modellkalibrierung wurde davon ausgegangen, dass in den Jahren 2000-2004 der Großteil der Ackerflächen in den Boden-Klima-regionen nach den Faustzahlen der (KTBL, 2009) bzw. den Vorgaben der Landwirtschaftskammer NRW (LWK-NRW, 2017) bewirtschaftet wurde. Die angenommenen Gesamtstickstoffgaben nach (KTBL, 2009) können der Tabelle 3 entnommen werden.

### 2.5.1 Erträge der wichtigsten Fruchtarten

Abbildung 8 zeigt die Simulationsergebnisse für die wichtigsten Fruchtarten in fünf der neun Regionen nach der Kalibrierung der Modell-Solution auf der SIMPLACE Plattform. Meist wurden nach der Kalibrierung die Erträge der einzelnen Fruchtarten in allen Regionen sehr gut abgebildet. Allerdings zeigt sich bei einzelnen Fruchtarten eine leichte Unterschätzung der Erträge durch die Modellsimulationen (z.B. Silomais in Region 129 oder Silomais und Körnermais in Region 148). Ansonsten wurde das mittlere Ertragsniveau aller Fruchtarten in den Regionen auch bei der Validierung sehr gut simuliert. Die Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) für die Korrelation zwischen simulierten und statistischen Erträgen lagen zwischen 0.92 und 1.00 (Tabelle 5).

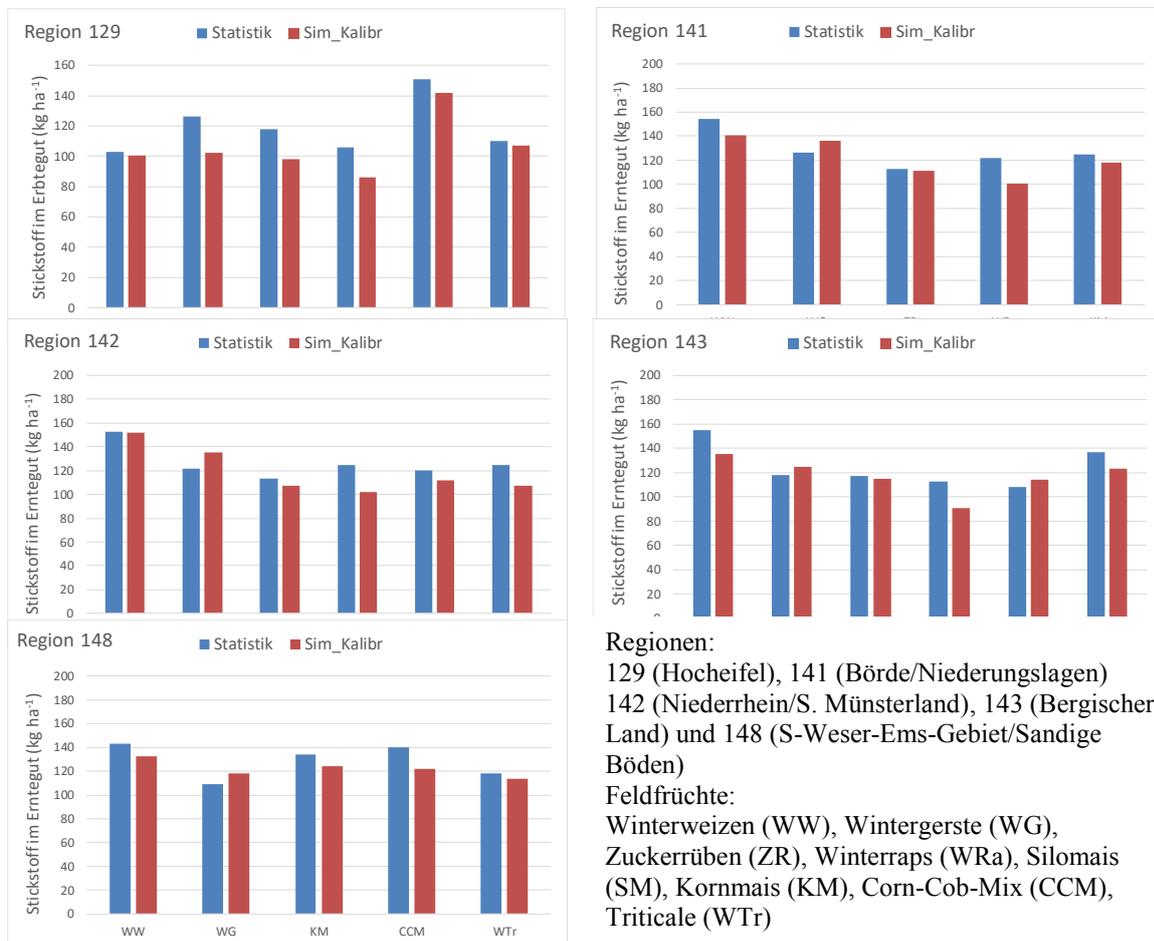


**Abbildung 8: Ergebnisse der Modellkalibrierung für die Erträge (in absoluter Trockenmasse) der wichtigsten Fruchtarten am Beispiel einzelner Regionen (Blaue Balken: Beobachtung, Rote Balken: nach Kalibrierung)**

Die höchsten relativen Abweichungen der simulierten Erträge von den statistischen Erträgen betrug zwischen -1.8 und +1.5% für Winterweizen in der Region 142 bzw. Corn-Cob-Mix in der Region 148.

### 2.5.2 Stickstoffentzüge

Nach der Modellkalibrierung wurden die Stickstoffentzüge durch die Modellsimulationen, mit Ausnahme der Wintergerste in den Regionen 141, 142, 143 und 148 und des Triticale in Region 143, meist leicht unterschätzt (Abbildung 9 und Tabelle 5). Die mittlere relative Abweichung lag zwischen +9.9% bei Wintergerste in der Region 142 und -24.7% bei Winterraps in der Region 143.



**Abbildung 9: Ergebnisse der Modellkalibrierung für die Stickstoffentzüge der wichtigsten Fruchtarten am Beispiel einzelner Regionen**

Die stärkste Unterschätzung der Stickstoffentzüge wurde bei Winterraps und Corn-Cob-Mix beobachtet. Bei diesen Kulturen besteht noch erhöhter Entwicklungsbedarf um das Modell anhand von Daten aus gut dokumentierten Feldversuchen zu verbessern. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den hier genutzten Referenzwerten nicht um Messungen, sondern um berechnete Werte handelt, die sich aus der Multiplikation der statistischen Erträge mit den Faustzahlen der Stickstoffgehalte in der DüV2017 ergeben.

**Tabelle 5: Mittlere relative Abweichungen der simulierten Erträge und Stickstoffentzüge im Erntegut nach der Modellkalibrierung für die einzelnen Fruchtarten in fünf Boden-Klima-Regionen**

<b>Erträge</b>								
Region	WW	WG	ZR	WRa	KM	SM	CCM	WTr
129	-0.8	-1.0	0.6	0.9	-	1.2	-	1.3
141	0.0	-0.6	0.7	-0.3	0.3	1.5	-	-
142	-1.8	-1.8	-1.5	0.9	-0.2	-0.8	0.3	-
143	-1.0	-1.4	-0.5	1.0	0.9	0.0	-	-0.8
148	-1.2	-0.5	-	-	-1.3	-0.2	1.5	0.5

<b>Stickstoffentzug im Erntegut</b>								
Region	WW	WG	ZR	WRa	KM	CCM	WTr	
129	-5.9	-18.8	-2.6	-16.7	-	-	-18.8	
141	-9.2	7.3	-1.8	-21.2	-6.0	-	-	
142	-0.7	9.9	-5.6	-22.8	-7.3	-16.3	-	
143	-14.4	5.2	-2.0	-24.7	-11.0	-	5.4	
148	-7.7	7.6	-	-	-8.1	-14.9	-4.0	

129 (Hocheifel), 141 (Börde/Niederungslagen), 142 (Niederrhein/S. Münsterland), 143 (Bergischer Land) und 148 (S-Weser-Ems-Gebiet/Sandige Böden). Winterweizen (WW), Wintergerste (WG), Zuckerrüben (ZR), Winterraps (WRa), Silomais (SM), Kornmais (KM), Corn-Cob-Mix (CCM), Triticale (WTr)

## 2.6 Modellverknüpfung mit dem ökonomischen Betriebsmodell FARMDyn

Die Verknüpfung des biophysikalischen Modells in SIMPLACE mit dem ökonomischen Modell FARMDyn basiert auf einer losen Kopplung über

1. Synchronisation der Eingangsdaten beider Systeme
2. Nutzung der Ergebnisse der SIMPLACE Simulationsergebnisse als Grundlage der Auswertung des FarmDyn Modells (Abbildung 10).

Hierdurch konnte das Ziel erreicht werden, die Veränderung des typischen Verhaltens der ökonomisch wirtschaftenden Beispielbetriebe in Bezug auf Düngemengen, Auswaschung und Betriebsergebnis nachvollziehbar abzuleiten. Vor Überleitung der Ergebnisse wurden diese generalisiert in Bezug auf Standorte, Simulationsjahre und Rotationsanfangsfrucht. Die entsprechenden Mittelwerte wurden in einer definierten Schnittstelle an das FarmDyn-Modell übergeben und hier zur Optimierung herangezogen. Die kombinierte Nutzung der Modelle hat zu einer Qualitätsverbesserung des Simulationsmodells und der Aussagekraft der Ergebnisse geführt.

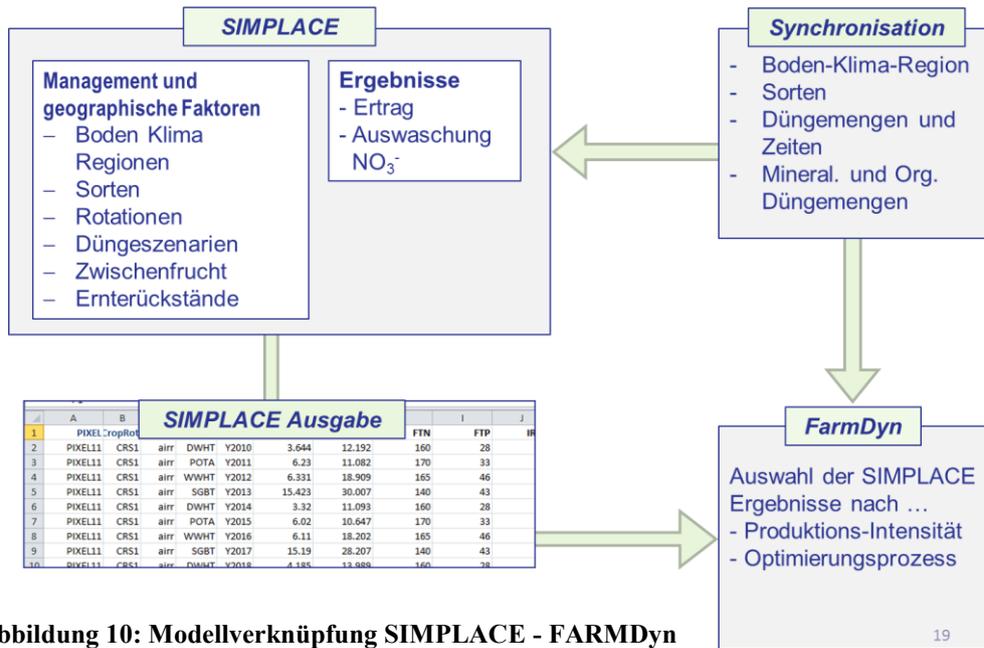


Abbildung 10: Modellverknüpfung SIMPLACE - FARMDyn

## 2.7 Berechnung der agronomische Effizienz der Stickstoffdüngung

Die Berechnung der agronomischen Effizienz der Stickstoffdüngung erfolgte nach dem Ansatz von (Baligar *et al.*, 2001). Danach wird die Düngereffizienz als das Verhältnis zwischen der eingesetzten Stickstoffmenge und dem zusätzlich erzielten Ertrag im Vergleich zu einer Nulldüngungsvariante definiert:

$$\text{Agronomische Effizienz} = \frac{Y_N - Y_0}{N_{\text{app}}}$$

wobei  $Y_N$  der Ertrag der Feldfrucht in  $\text{kg ha}^{-1}$  bei einer Gesamtstickstoffgabe  $N_{\text{app}}$  ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) ist und  $Y_0$  der Ertrag, wenn keine Stickstoffdüngung erfolgt.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden sind die Ergebnisse des biophysikalischen Modells in der Modellplattform SIMPLACE hinsichtlich der Auswirkungen der unterschiedlichen Düngeszenarios auf den Ertrag der in den BKR spezifischen Fruchtfolgen, die Stickstoffauswaschung und die Stickstoffnutzungseffizienz beispielhaft an ausgewählten Fruchtfolgen der Region 141 (Börde/Niederungslagen) dargestellt. Eine umfassende Darstellung der Ergebnisse über alle neun BKR, für alle Kulturen in den jeweiligen Fruchtfolgen und alle Düngeszenarien würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Vielmehr sollen anhand von drei Standorten (Standort-IDs C10R470, C36R438, C45R470) mit drei typischen Bodentypen (Pseudogley-Parabraunerde, Norm-Parabraunerde, Gley-Parabraunerde) die wichtigsten Effekte von

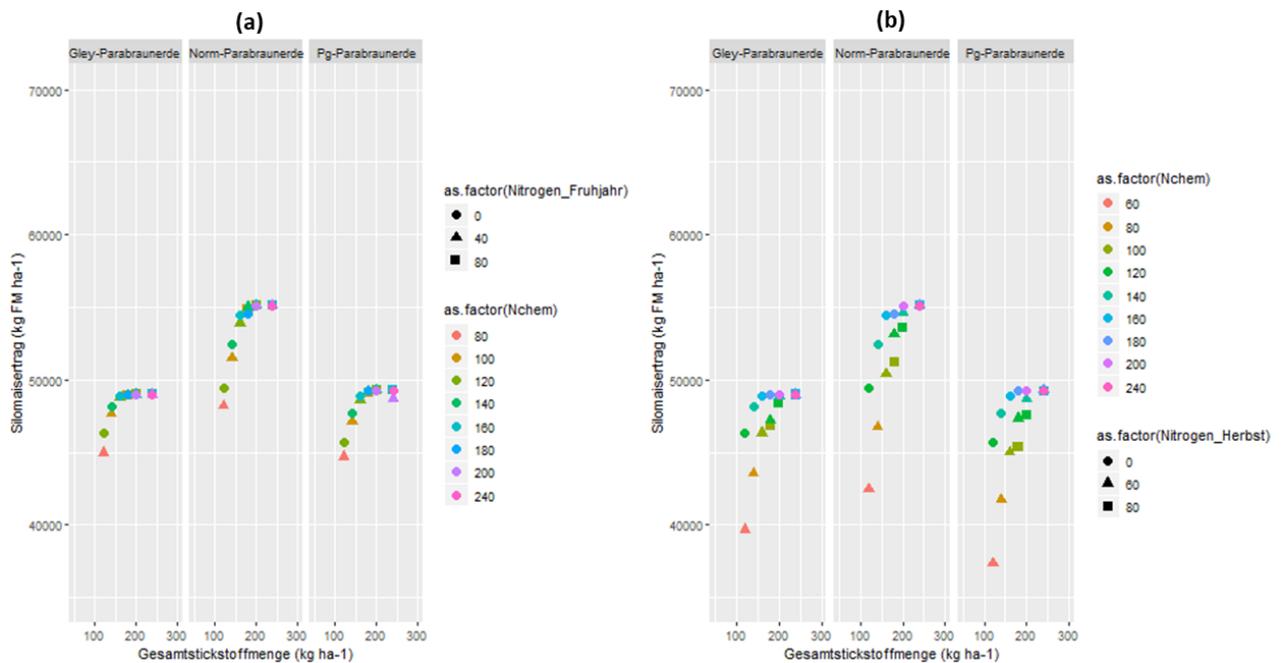
steigenden Gesamt- bzw. Mineral- und Güllestickstoffgaben für die dominanten Bodentypen in NRW aufgezeigt werden.

### **3.1 Ertragsfunktionen in Abhängigkeit von der Düngeintensität**

#### **3.1.1 Silomais**

Die Auswirkungen der Stickstoffdüngung in organischer oder mineralischer Form auf den Silomaisertrag wurden analysiert und sind beispielhaft für drei Standorte in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) auf einer Norm-Parabraunerde, einer Pseudogley-Parabraunerde und einer Gley-Parabraunerde für die Hauptfrucht Silomais in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (WW-SM-SM) dargestellt (Abbildung 11). Hier wurden nur Dünge Szenarien ausgewählt, bei den mindestens 50% der Gesamtstickstoffgabe aus der mineralischen Düngung stammen und jeweils der Rest organisch in Form von Rindergülle ergänzt wurde. Außerdem wurde unterschieden, ob die Ausbringung der Gülledüngung im Frühjahr (Abbildung 11a, Nitrogen-Frühjahr) oder im Herbst (Abbildung 11b, Nitrogen\_Herbst) erfolgte, auch wenn die Ausbringung im Herbst nach DÜV2017 vor Silomais nur noch bei Anbau von Winterzwischenfrüchten bzw. gleichzeitiger Strohdüngung möglich ist. Die Punkte in Abbildung 11 sind also die simulierten Mittelwerte des Silomaisertrages über neun Jahre (2000-2008) in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais für ein bestimmtes Dünge Szenario mit definierter Menge an ausgebrachtem organischem (Rindergülle) und mineralischem (meist in Form von Kalkammonsalpeter) Stickstoff. Auf allen drei Standorten war ein deutlich positiver Effekt der Stickstoffdüngung auf den Silomaisertrag erkennbar. Die Standorte unterscheiden sich deutlich im Ertragsniveau (höchster Maisertrag auf der Norm-Parabraunerde bei ca. 55 t FM ha<sup>-1</sup>), die in Abhängigkeit von Anteil und Zeitpunkt der organischen Düngung bei Gesamtstickstoffgaben von 160 (Pg-Parabraunerde und Gley-Parabraunerde) bis 200 kg ha<sup>-1</sup> (Norm-Parabraunerde) erreicht wurden (Abbildung 11). Sowohl das Ertragsniveau auf den Standorten als auch die Ertragsfunktionen waren relativ unabhängig vom Anbau von Winterzwischenfrüchten bzw. der Rückführung der Ernterückstände. Höchsterträge wurden auf der Norm-Parabraunerde und dem Gley-Parabraunerde, im Gegensatz zur Pseudogley-Parabraunerde, bei einer Gesamtgabe von ca. 200 kg N ha<sup>-1</sup> in jedem Fall erreicht. Darüber hinaus gab es keine weiteren Ertragszuwächse bei Silomais im Mittel über 8 Jahre auf den drei Standorten in der Börde. Die Unterschiede in den Höchsterträgen konnte durch die ausgeglichene Wasserversorgung während der Vegetationsperiode sowie die geringere Stickstoffauswaschung auf der Norm-Parabraunerde (24 kg N ha<sup>-1</sup> über 8 Jahre) im Vergleich zu den anderen beiden Standorten erklärt werden, wo die mittlere, jährliche simulierte Stickstoffauswaschung 40.3 (Pseudogley-Parabraunerde) und 39.7 kg N ha<sup>-1</sup> (Gley-Parabraunerde) betrug. Der Zeitpunkt der Ausbringung der Gülle im Herbst im Vergleich zum

Frühjahr war für die Ertragsbildung des Silomais weniger effektiv (Abbildung 11b, rötliche und bräunliche Dreiecke und Quadrate bei einem Ertragsniveau unter 48 t FM ha<sup>-1</sup>).

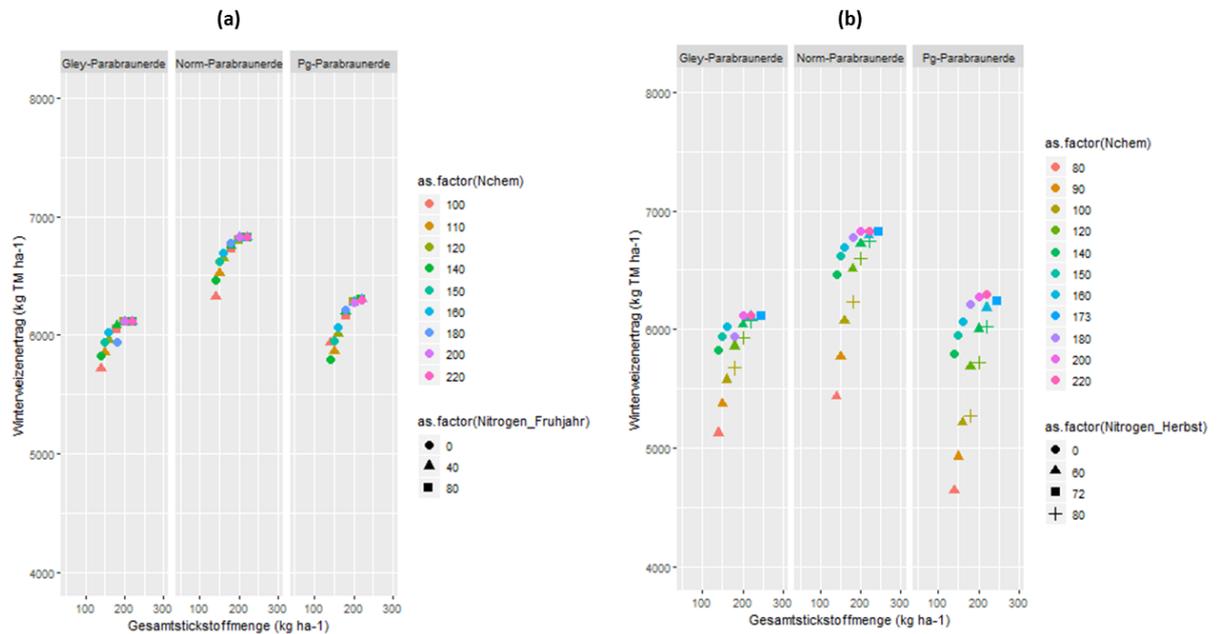


**Abbildung 11: Mittlerer simulierter Silomaisertrag (in kg ha<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil von mineralischem (Nchem) und organischem (Nitrogen\_Frühjahr (a) bzw. Nitrogen\_Herbst (b)) Stickstoff in kg ha<sup>-1</sup> in Form von Gülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (WW-SM-SM) ohne Rückführung der Ernterückstände und ohne Anbau einer Winterzwischenfrucht vor Silomais. Dargestellt sind Düngezenarien, in denen mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge über Mineraldünger ausgebracht wurde. Die Wirkung der Ausbringung des organischen Stickstoffs im Frühjahr bzw. Herbst ist in der Teilabbildung (a) bzw. (b) dargestellt. (N.B. obwohl die Ausbringung von Gülle auf Silomais im Herbst nach DÜV2017 ohne Zwischenfrüchte (Abbildung 11b) nicht möglich ist, wurde dieses Szenario zu Vergleichszwecken mit dargestellt)**

### 3.1.2 Winterweizen

Die Wirkung von gesteigerten Stickstoffgaben und deren Zusammensetzung auf den mittleren Winterweizenertrag in derselben Fruchtfolge (Winterweizen-Silomais-Silomais) ist in der Abbildung 12 dargestellt. Auch hier handelt es sich um Düngezenarien in denen mindestens 50% der Gesamtstickstoffgabe in mineralischer Form appliziert wurde. Unterschieden wird nach der Ausbringung des organischen Stickstoffs im Frühjahr (Abbildung 12a) oder im Herbst (Abbildung 12b). Auch bei Winterweizen wirkte sich eine Erhöhung der Gesamtstickstoffgabe positiv auf die mittleren, simulierten Erträge aus, bis zu einem Höchstertag von 6.1 bzw. 6.9 t TM ha<sup>-1</sup> auf der Gley-Parabraunerde bzw. auf der Norm-Parabraunerde. Das höchste Ertragsniveau wurde in der Regel bei 200 kg N ha<sup>-1</sup> Gesamtstickstoffmenge erreicht, wenn die organische Düngung im Frühjahr erfolgte (Abbildung 12a). Wenn die organische Düngung im Herbst erfolgte, waren etwas höhere

Gesamtstickstoffgaben (ca. 240 kg N ha<sup>-1</sup>) zur Erreichung des Höchstertrags notwendig. Eine weitere Erhöhung der Stickstoffgaben hatte auf allen drei Standorten keine Ertragswirkung mehr.

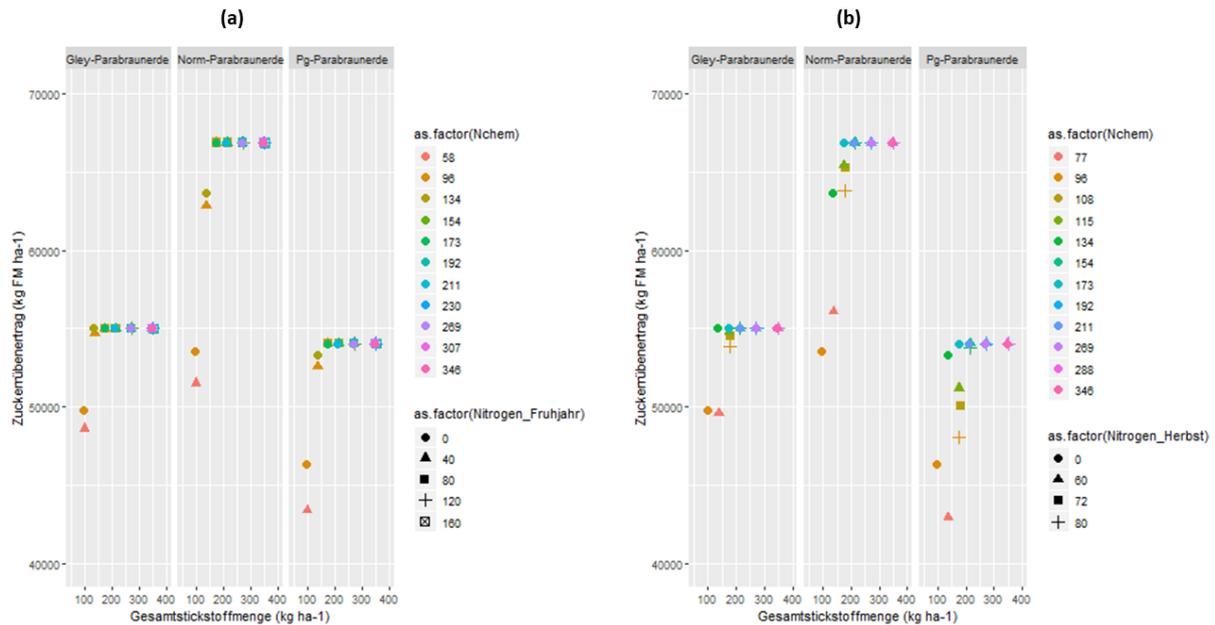


**Abbildung 12: Mittlerer simulierter Winterweizenertrag (in kg ha<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil von mineralischem (Nchem) und organischem (Nitrogen\_Frühjahr (a) bzw. Nitrogen\_Herbst (b)) Stickstoff in kg ha<sup>-1</sup> in Form von Gülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (WW-SM-SM) ohne Rückführung der Ernterückstände und ohne Anbau einer Winterzwischenfrucht vor Silomais (siehe auch Abbildung 11)**

Auch hier können die höchsten Winterweizenerträge auf der Norm-Parabraunerde auf die geringsten Stickstoffverluste durch Auswaschung (35.9 kg ha<sup>-1</sup>) und die ausgeglichene Wasserversorgung der Maispflanzen an diesem Standort zurückgeführt werden. Auf den beiden anderen Standorten waren die mittleren simulierten Stickstoffauswaschungsverluste am unteren Rand der Wurzelzone bis zu 33% höher (47.7 kg ha<sup>-1</sup> auf der Pg-Parabraunerde und 47.9 kg ha<sup>-1</sup> auf der Gley-Parabraunerde). Auch beim Winterweizen hatte der Ausbringungszeitpunkt der organischen Düngung (Rindergülle) besonders bei geringeren Gesamtstickstoffgaben eine signifikante Bedeutung. Bei einer Gesamtstickstoffmenge von 140 kg N ha<sup>-1</sup> erhöhte die Ausbringung von 60 kg N in Form von Gülle auf einer Pg-Parabraunerde im Frühjahr die Ertragswirkung um 1 t TM ha<sup>-1</sup> (+20%) im Vergleich zur Ausbringung derselben Güllemenge im Herbst (Abbildung 12a und 12b).

### 3.1.3 Zuckerrüben

Eine weitere Fruchtfolge, die in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) simuliert wurde, enthielt auch Zuckerrüben als Hauptfrucht (Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben). In diesem Fall wurde in den Düngezenarien für die Zuckerrübe eine sehr weite Spanne an möglichen Gesamtstickstoffgaben getestet, die der internationalen Fachliteratur entnommen wurde. Dabei wurden unter anderem in den siebziger und achtziger Jahren in den USA Stickstoffsteigerungsversuche mit Zuckerrüben durchgeführt, in denen maximale Gaben an mineralischem Stickstoffdünger zwischen 392 und 448 kg N ha<sup>-1</sup> ausgebracht wurden (Carter *et al.*, 1976; Carter and Traveller, 1981). Nach (Cordes, 2017) sollte maximal 75% der Gesamtstickstoffdüngung bei den Zuckerrüben in organischer Form im Frühjahr eingepflügt werden. Abbildung 13 zeigt die Effekte von steigenden Gesamtstickstoffgaben auf die mittleren simulierten Zuckerrübenenerträge auf drei typischen Standorten der Region 141. Die maximalen Erträge wurden bereits bei 120 (Gley-Parabraunerde) bis 160 kg N ha<sup>-1</sup> (Norm-parabraunerde) erreicht. Den nach (Carter and Traveller, 1981) zu erwartenden Rückgang der Rübenenerträge durch weitere Steigerung der Stickstoffgabe um 5 bis 6% konnte das Modell aus technischen Gründen nicht simulieren. Der simulierte mittlere Höchstertag lag bei 55 t FM ha<sup>-1</sup> (Pg-Braunerde) bis 67 t FM ha<sup>-1</sup> (Norm-Parabraunerde). Entsprechend der sehr hohen Gesamtstickstoffgaben in einigen Düngezenarien waren die mittleren simulierten Stickstoffverluste durch Auswaschung sehr hoch und lagen bei 115.4 kg N ha<sup>-1</sup> auf der Norm-Parabraunerde und auf den beiden anderen Standorten bei 149.0 kg N ha<sup>-1</sup> (Gley-Parabraunerde) und 154.9 kg N ha<sup>-1</sup> (Pg-Parabraunerde). Auch bei den Zuckerrüben war eine Ausbringung der organischen Düngung im Frühjahr bei niedrigen Gesamtstickstoffgaben (< 150 kg N ha<sup>-1</sup>) etwas effektiver als bei Ausbringung im Herbst. Der Unterschied in der Ertragswirksamkeit bei Zuckerrüben war am höchsten auf der Pg-Parabraunerde. Bei Gesamtstickstoffgaben über 150 kg N ha<sup>-1</sup>) hatte weder der Zeitpunkt der Ausbringung noch die Höhe der organischen Düngung eine Auswirkung auf den Rübenertag.



**Abbildung 13: Mittlerer simulierter Zuckerrübenenertrag (in kg ha<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil von mineralischem (Nchem) und organischem (Nitrogen\_Fruhjahr (a) bzw. Nitrogen\_Herbst (b)) Stickstoff in kg ha<sup>-1</sup> in Form von Rindergülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben (WW-WG-ZR) ohne Rückführung der Ernterückstände und ohne Anbau einer Winterzwischenfrucht vor Zuckerrüben (siehe auch Abbildung 11)**

Die hier am Beispiel der Fruchtfolgen Winterweizen-Silomais-Silomais und Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben in der Region 141 gezeigten Simulationen wurden auch für die übrigen Fruchtfolgen in der Region 141 bzw. in den anderen acht Regionen von Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Der Umfang des Berichtes erlaubt es nicht, alle Simulationen mit dem selben Detailliertheitsgrad darzustellen.

### 3.2 Stickstoffauswaschung in Abhängigkeit von Standort und Düngeszenario in der Region 141 (Börde/Niederungslagen)

Auf den in Abschnitt 3.1 präsentierten Standorten in der Region 141 wurden für dieselben Fruchtfolgen über alle Düngeszenarien neben den Erträgen auch die über acht Jahre gemittelten Stickstoffverluste durch Nitratauswaschung simuliert.

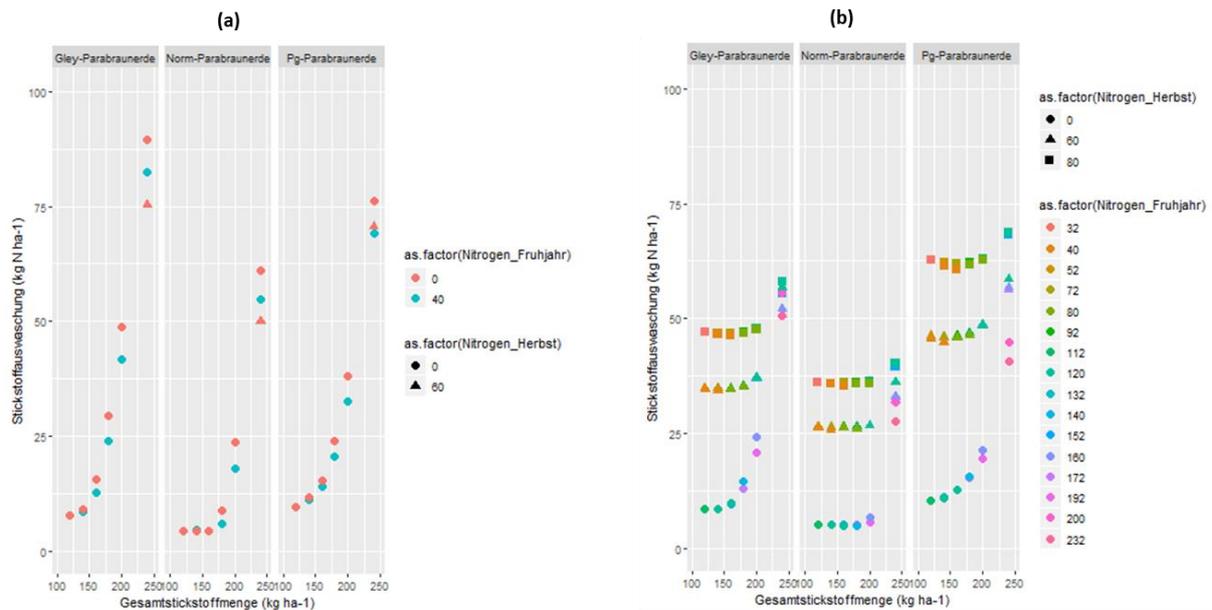
#### 3.2.1 Silomais

Für die Analyse der Stickstoffauswaschung wurden die Düngeszenarien aufgeteilt in Szenarien, in denen der Anteil des applizierten Mineralstickstoffdüngers >70 % der

Gesamtstickstoffgabe betrug (Abbildung 14a) und in Szenarien, in denen der Anteil des organischen Stickstoffs in der Gesamtstickstoffgabe >70% (Abbildung 14b) betrug.

Im Mineraldüngerszenario stiegen im Silomais in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais wie erwartet auf allen drei betrachteten Standorten die mittleren Auswaschungsverluste bei steigenden Gesamtstickstoffgaben exponentiell an (Abbildung 14a). Bei einer Gesamtstickstoffgabe von 240 kg ha<sup>-1</sup> auf Silomais betrug die höchsten Auswaschungsverluste 89.5 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> auf der Gley-Parabraunerde gefolgt von 76.0 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> auf der Pg-Parabraunerde und 60.9 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> auf der Norm-Parabraunerde. Dies galt für die rein mineralisch gedüngten Düngezenarien, wobei in diesem Fall der größte Teil der Düngung (außer der Startdüngung) als Unterfußdüngung in Form von Kalkammonsalpeter gegeben wurde. Abbildung 14a zeigt auch, dass wenn in diesem Fall 40 bzw. 60 kg mineralischer Stickstoff durch organischen Stickstoff in Form von Gülle ersetzt wird, die Auswaschungsverluste leicht abnehmen (blaue Punkte und rotes Dreieck in Abbildung 14a).

Wenn in den Simulationen mehr als 70% der Gesamtstickstoffgabe in organischer Form erfolgten, war neben der Gesamtstickstoffgabe insbesondere der Ausbringungszeitpunkt für die Auswaschungsverluste entscheidend (Abbildung 14b). Die Abbildung 14b zeigt eindrücklich, dass sich auf allen drei Standorten die Auswaschungsverluste bis zu einer Gesamtstickstoffgabe von 200 kg N ha<sup>-1</sup> in drei Kohorten verhalten. Die erste Kohorte mit den geringsten Auswaschungsverlusten wird von den Düngezenarien, in denen organischer Stickstoff (Rindergülle) nur im Frühjahr ausgebracht wird gebildet. Die zweite Kohorte, mit Auswaschungsverlusten um 35 kg N ha<sup>-1</sup> wird von den Düngezenarien gebildet, in denen 60 kg ha<sup>-1</sup> an organischem Stickstoff im Herbst ausgebracht wird und einer dritten Kohorte mit Auswaschungsverlusten von ca. 48 kg ha<sup>-1</sup> wird von Düngezenarien gebildet, in denen 80 kg ha<sup>-1</sup> an organischem Stickstoff im Herbst ausgebracht wird. Eine Ausbringung von Gülle auf Silomais im Herbst ist nach DüV2017 nur in Verbindung mit Strohdüngung bzw. einer Zwischenfrucht nach Winterweizen möglich. Dennoch zeigen die Simulationsergebnisse eindrücklich die Effekte einzelner Vorschriften, die in der DüV2017 oder schon in der DüV2007 verankert waren.



**Abbildung 14: Mittlere simulierte Menge an ausgewaschenem Stickstoff (in  $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) über acht Jahre bei steigender Gesamtstickstoffgabe (in  $\text{kg N ha}^{-1}$ ) unter Silomais auf drei typischen Ackerstandorten der Region 141 (Börde/Niederungslagen) (a) Der Datensatz enthält nur jene Düngerszenarien, in denen  $>70\%$  des applizierten Gesamtstickstoffs aus mineralischem Dünger (KAS) stammt, der übrige Stickstoff wurde in Form von Gülle im Frühjahr (Nitrogen\_Frühjahr) oder Herbst (Nitrogen\_Herbst) ausgebracht. (b) Der Datensatz enthält nur jene Düngerszenarien, in denen  $>70\%$  des applizierten Gesamtstickstoffs aus organischem Dünger (Rindergülle) stammt, der übrige Stickstoff wurde in Form von mineralischem Stickstoffdünger ausgebracht, wobei der Ausbringungszeitpunkt des organischen Düngers entweder im Frühjahr (Nitrogen\_Frühjahr) oder im Herbst (Nitrogen\_Herbst) lag. In allen Fällen wurde Silomais in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais angebaut (WW-SM-SM), wobei in der Fruchtfolge nie Winterzwischenfrüchte angebaut wurden und die Ernterückstände beim Winterweizen jedes Jahr abgefahren wurden (N.B. obwohl die Ausbringung von Gülle auf Silomais im Herbst nach DÜV2017 ohne Strohdüngung nicht möglich ist, wurde dieses Szenario zu Vergleichszwecken mit dargestellt)**

### 3.2.2 Winterweizen

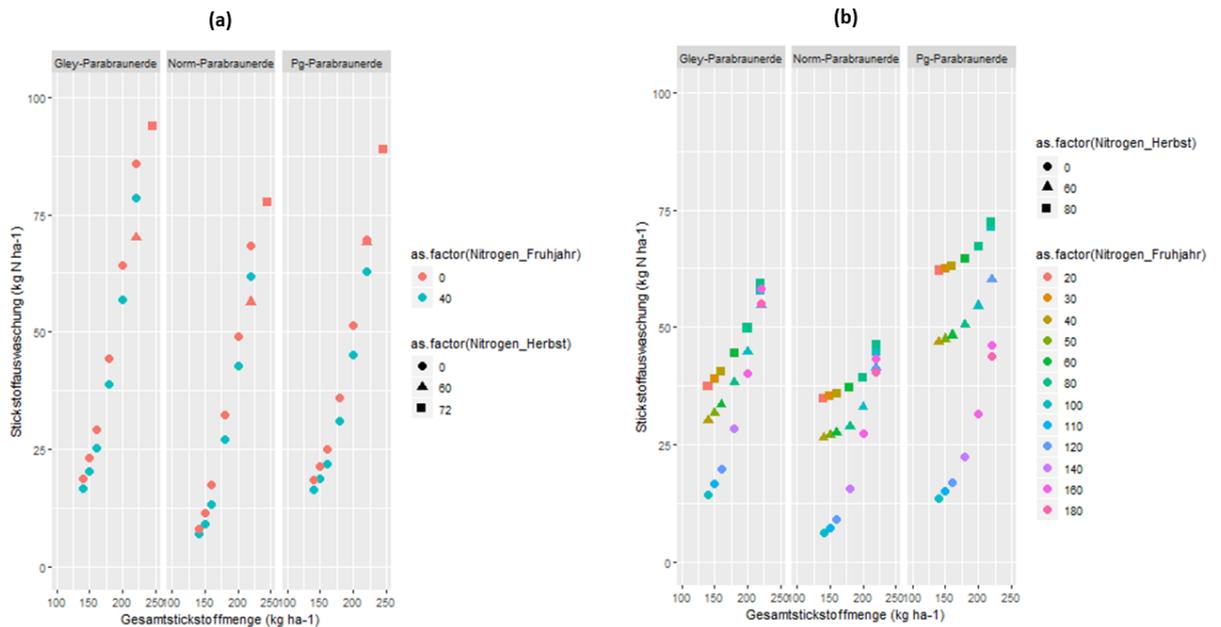
In Abbildung 15a und 15b wurden die Simulationsergebnisse zu den mittleren Auswaschungsverlusten in derselben Fruchtfolge (Winterweizen-Silomais-Silomais) für den Winterweizen dargestellt. Wenn man die Simulationsergebnisse der Düngerszenarien, in denen  $>70\%$  der Gesamtstickstoffgabe über mineralische Stickstoffformen ausgebracht wurde, anschaut, stiegen beim Winterweizen die mittleren Stickstoffverluste mit steigender Gesamtstickstoffgabe nicht exponentiell wie beim Silomais, sondern eher linear an (Abbildung 15a). Auf der Norm-Parabraunerde wurden bei vorwiegend mineralischer Stickstoffdüngung etwas geringere Auswaschungsverluste berechnet (Abbildung 15a). Bei sehr hohen Gesamtstickstoffgaben ( $230\text{--}240 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und ausschließlicher mineralischer Stickstoffdüngung, war die Stickstoffauswaschung auf der Norm-Parabraunerde bei Winterweizen etwas höher ( $68 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) als beim Silomais ( $62 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ), wobei im Silomais die gesamte Düngung (außer der Startdüngung) als Unterfußdüngung erfolgte. Wenn davon  $40 \text{ kg}$  organisch im Frühjahr gegeben wird, sinken die Auswaschungsverluste auf  $55 \text{ kg}$

(Winterweizen) bzw.  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Silomais) ab. Bei mineralischen Stickstoffdüngermengen von  $140 \text{ kg N ha}^{-1}$  sind die Auswaschungsverluste bei Winterweizen ebenfalls etwas höher ( $15 \text{ kg N}$  auf Gley- und Pg-Parabraunerde und  $7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  auf der Norm-Parabraunerde) als beim Silomais ( $10 \text{ kg N}$  auf Pg-Parabraunerde und  $4 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  auf der Norm-Parabraunerde).

Bei vorwiegend organischer Stickstoffdüngung konnte auch beim Winterweizen eine Abhängigkeit der Auswaschungsverluste vom Ausbringungszeitpunkt festgestellt werden (Abbildung 15b). In Abbildung 15b bilden die Düngeszenarien, in denen der organische Stickstoff im Frühjahr ausgebracht wurde die erste Punkteschar. Sie beginnt auf der Normparabraunerde bei geringen Gesamtstickstoffgaben mit Auswaschungsverlusten von  $6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  und steigt dann fast exponentiell bis über  $40 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  an. Wenn ein Teil der organischen Düngung ( $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ) im Herbst ausgebracht wird, beginnen die Auswaschungsverluste bei den geringsten Gesamtstickstoffgaben bereits bei  $25 \text{ kg N ha}^{-1}$  und steigen ebenfalls auf über  $40 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Dieses Verhalten der Auswaschungsverluste wurde auf allen drei Standorten festgestellt, wobei die Pg-Parabraunerde bei den Ausbringungsterminen im Herbst sowohl im Silomais als auch im Winterweizen die höchsten mittleren Auswaschungsraten verzeichnete (Abbildung 14b und 15b).

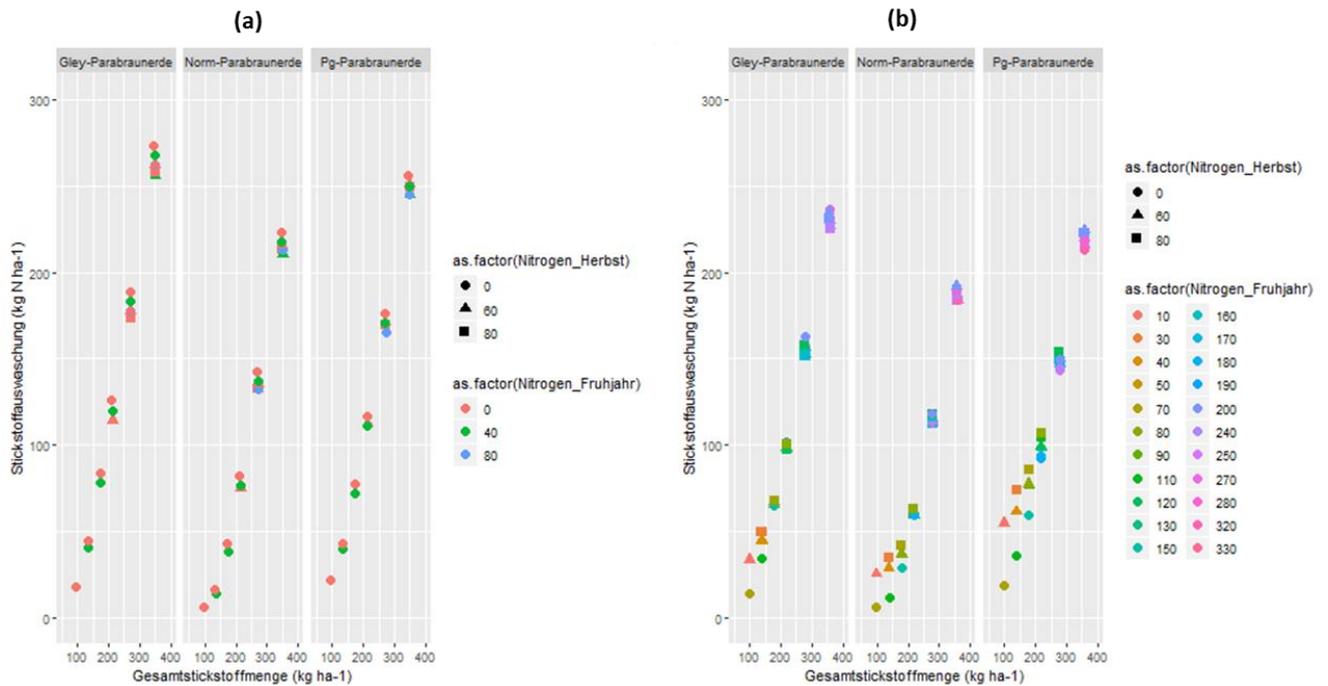
### 3.2.3 Zuckerrüben

Auf den ersten Blick scheinen die Auswaschungsverluste unter Zuckerrüben in der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben auf allen drei Standorten im Vergleich zu Silomais und Winterweizen in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (siehe 3.2.1 und 3.2.2) sehr viel höher. Dies liegt jedoch daran, dass, in den für Zuckerrüben aufgrund einer weltweiten Literaturrecherche definierten Düngeszenarien, die Gesamtstickstoffgaben eine viel höhere Spannweite aufwiesen (zwischen  $100$  und  $360 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) (Abbildung 16). Bei den Zuckerrüben wurden also Düngeszenarien mit bis zu  $360 \text{ kg N ha}^{-1}$  applizierten Gesamtstickstoff simuliert, während in den Düngeszenarien für Silomais und Winterweizen die höchsten Stickstoffgaben bei  $240 \text{ kg N ha}^{-1}$  lagen. Dennoch, wenn man vergleichbare Gesamtstickstoffgaben von  $120$ - $140 \text{ kg N ha}^{-1}$  bei vorwiegend mineralischer Düngung betrachtet (Abbildung 16a), lagen die mittleren simulierten Stickstoffauswaschungsverluste bei den Zuckerrüben auf der Gley-Parabraunerde und auf der Pg-Parabraunerde bei knapp  $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Abbildung 16a) während diese beim Silomais auf denselben Standorten unter  $10 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Abbildung 14a) und beim Winterweizen unter  $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Abbildung 15a) lagen.



**Abbildung 15: Mittlere simulierte Menge an ausgewaschenem Stickstoff (in kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) über acht Jahre bei steigender Gesamtstickstoffgabe (in kg N ha<sup>-1</sup>) unter Winterweizen auf drei typischen Ackerstandorten der Region 141 (Börde/Niederungslagen) (a) >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus mineralischem Dünger (KAS) (b) >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus organischem Dünger (Rindergülle) (siehe auch Abbildung 14)**

Abbildung 16b zeigt, dass bei vorwiegend organischer Stickstoffdüngung und extrem hohen Gesamtstickstoffgaben die Stickstoffauswaschungsverluste ebenso wie bei vorwiegend mineralischer Stickstoffdüngung, exponentiell ansteigen. Allerdings sind die Auswaschungsverluste bei vergleichbaren Gesamtstickstoffgaben und vorwiegender organischer Düngung (>70% als organischer Stickstoff) etwas geringer. Beispielsweise sind die simulierten Auswaschungsverluste bei einer Gesamtstickstoffgabe von 180 kg N ha<sup>-1</sup> und >70% organischem Stickstoff (Rindergülle) im Frühjahr um etwa 20 bis 25 kg N ha<sup>-1</sup> geringer als wenn der Stickstoff vorwiegend in mineralischer Form (KAS) ausgebracht wird.

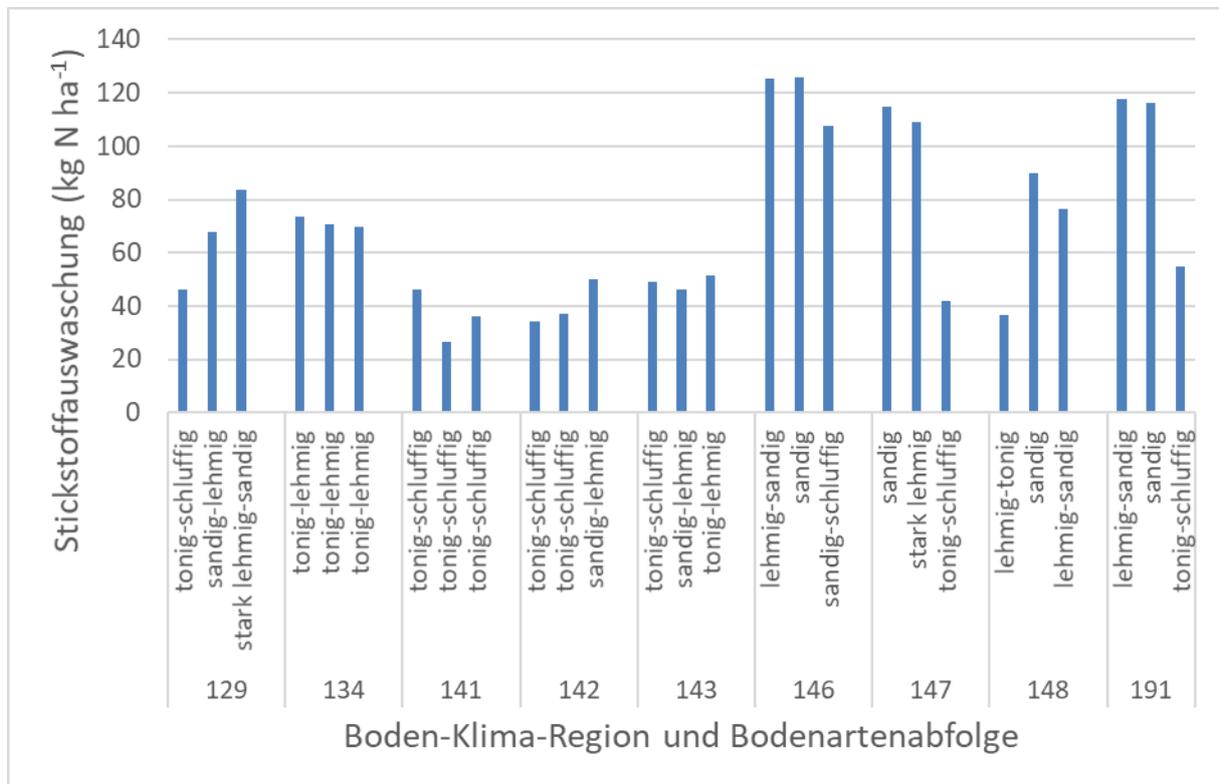


**Abbildung 16: Mittlere simulierte Menge an ausgewaschenem Stickstoff (in  $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) über acht Jahre bei steigender Gesamtstickstoffgabe (in  $\text{kg N ha}^{-1}$ ) unter Zuckerrüben auf drei typischen Ackerstandorten der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben (a) >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus mineralischem Dünger (KAS) (b) >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus organischem Dünger (Rindergülle) (siehe auch Abbildung 14)**

### 3.3 Stickstoffauswaschung in Abhängigkeit von Bodentyp und Fruchtart in NRW

Da die Höhe der Stickstoffauswaschung in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) offensichtlich von der Fruchtart und vom Bodentyp abhängt, soll im Folgenden ein Überblick über den Einfluss dieser beiden Faktoren auf der Landesebene gegeben werden. Wie in Kapitel 2.5.2. gezeigt, wurden in jeder der neun Boden-Klima-Regionen von NRW jeweils drei Standorte mit den Bodentypen ausgewählt, die typisch für die Ackerstandorte in der jeweiligen Region sind. Für jeden der 27 Standorte wurden die mittleren simulierten Stickstoffauswaschungsraten über acht Jahre über alle Düngeszenarien und Fruchtfolgen berechnet. Abbildung 17 zeigt, dass die Regionen sich stark hinsichtlich ihres Auswaschungspotenzial unterscheiden. Die Berglagen (Hocheifel, Sauerland, Bergisches Land), aber auch die Börde weisen deutlich geringere, simulierte Auswaschungsraten als die Regionen im Norden und Nordosten (Münsterland, sandige Böden am Rand der Lüneburger Heide, Teutoburger Wald, Weser-Ems-Gebiet) des Landes auf. Und dies obwohl die Düngeszenarien über alle Regionen dieselben waren, außer dass sich von Region zu Region der Anteil der Fruchtarten etwas verschob. Die Verteilung der häufigsten Bodenarten über die Regionen zeigt, dass die höchsten Auswaschungsraten mit dem Vorkommen von sandigen, sandig-lehmigen und sandig-schluffigen Bodenarten, die im Norden und Nordosten des

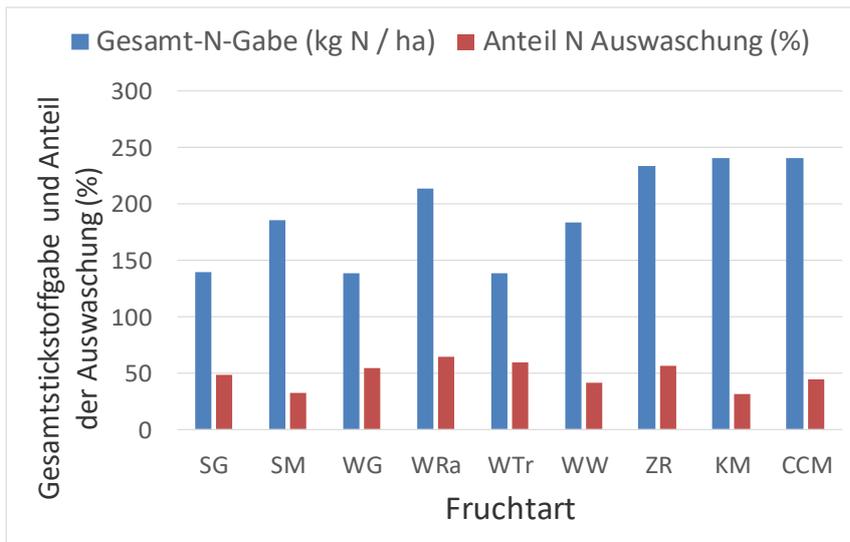
Landes dominieren korrelieren. Zudem sind in diesen Landesteilen die grundwasserbeeinflussten Böden (Gley-assoziierte Bodentypen) stärker verbreitet.



129=Hocheifel, 124=Sauerland, 141=Börde/Niederungslagen, 142=Niederrhein, 143=Bergisches Land/O-Westfalen, 146=Lüneburger Heide/sandige Böden, 147=Mittleres Niedersachsen/Leichte Lehmböden, 148=S-Weser-Ems-Gebiet/Sandige Böden, 191=Teutoburger Wald

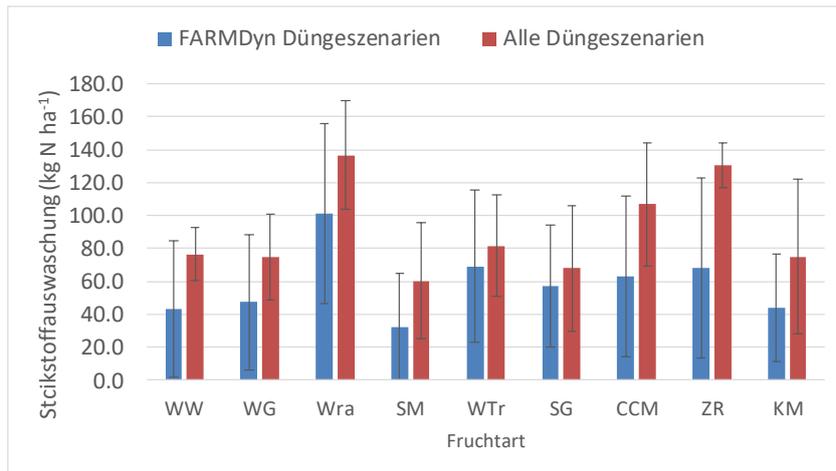
**Abbildung 17: Mittlere simulierte Menge an ausgewaschenem Stickstoff (in kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) in 1.65 bis 2 m Bodentiefe über acht Jahre über alle Fruchtarten und Düngeszenarien in den jeweiligen Boden-Klima-Regionen in NRW in Abhängigkeit von der Bodenartenabfolge im Bodenprofil bei einer mittleren Durchwurzelungstiefe von einem Meter**

Wenn man den Anteil der simulierten jährlichen Stickstoffauswaschung an den Gesamtstickstoffgaben für verschiedene Fruchtarten berechnet und über alle Düngeszenarien und Fruchtfolgen mittelt, so zeigt sich, je nach Fruchtart, ein Auswaschungsanteil zwischen 33% (Silomais) und 64% (Winterraps) (Abbildung 18). Bei Winterweizen, Silomais und Körnermais sind die Auswaschungsanteile am geringsten, obwohl zumindest bei Körnermais die mittlere Gesamtstickstoffgabe über alle Düngeszenarien 240 kg N ha<sup>-1</sup> betrug. Insgesamt sind die Anteile der Stickstoffauswaschung an den Gesamtstickstoffgaben in Abbildung 18, allerdings überschätzt, da über alle Düngeszenarien gemittelt wurde, also auch solche mit extrem hohen Stickstoffgaben pro Fruchtart, bzw. auch Szenarien mit Ausbringungszeitpunkten im Herbst, die nach der DüV2017 nicht mehr möglich sind.



**Abbildung 18: Mittlere Gesamtstickstoffgaben und mittlerer simulierter Anteil der Stickstoffauswaschung (in kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) an der Gesamtstickstoffgabe über acht Jahre über alle Düngezenarien und Standorte in NRW in Abhängigkeit von der Fruchtart bei einer mittleren Durchwurzelungstiefe von einem Meter**

Für eine realistische Einschätzung der Auswaschungsverluste wurden die mittleren jährlichen Stickstoffauswaschungsraten pro Fruchtart aus den SIMPLACE Simulationen sowohl für die Gesamtheit der Düngezenarien (108 Szenarien, siehe Anhang Abschnitt 12.1) als auch für die von FARMDyn ausgewählten Düngezenarien (12 Szenarien, siehe Abschlussbericht Teilprojekt 2) berechnet. Die von FARMDyn ausgewählten Szenarien sind unter den Annahmen des Betriebsmodells die ökonomisch sinnvollsten und sind mit der DüV2017 kompatibel. Abbildung 19 zeigt, dass die mittleren, jährlichen Stickstoffauswaschungsraten bei den einzelnen Fruchtarten wesentlich kleiner sind, wenn man nur über diejenigen Szenarien mittelt, die vom ökonomischen Betriebsmodell FARMDyn ausgewählt wurden. Insbesondere bei Silomais und Winterweizen sind die Auswaschungsraten in den von FARMDyn ausgewählten Düngezenarien um über 50% geringer. Über alle Fruchtarten beträgt die mittlere Stickstoffauswaschung 58 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> allerdings mit einer Standardabweichung, die fast ebenso hoch ist. Das bedeutet, dass die räumliche und zeitliche Variabilität der Stickstoffauswaschung extrem hoch ist, obwohl wir in unseren Simulationen in jeder Boden-Klima-Region nur die drei flächenmäßig dominanten Bodentypen auf den Ackerflächen berücksichtigt haben (Abschnitt 2.4.2). Zudem könnten die absoluten Werte für die Stickstoffauswaschungsraten z.T. etwas überschätzt sein, da SIMPLACE insbesondere bei Winterraps die Entzüge durch das Erntegut noch überschätzt (siehe Abschnitt 2.5).



**Abbildung 19: Mittlere simulierte Stickstoffauswaschung (in kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) über acht Jahre für die wichtigsten Fruchtarten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen), gemittelt über alle Düngeszenarien (rote Balken) bzw. gemittelt über die vom ökonomischen Betriebsmodell FARMDyn ausgewählten Düngeszenarien (blaue Balken)**

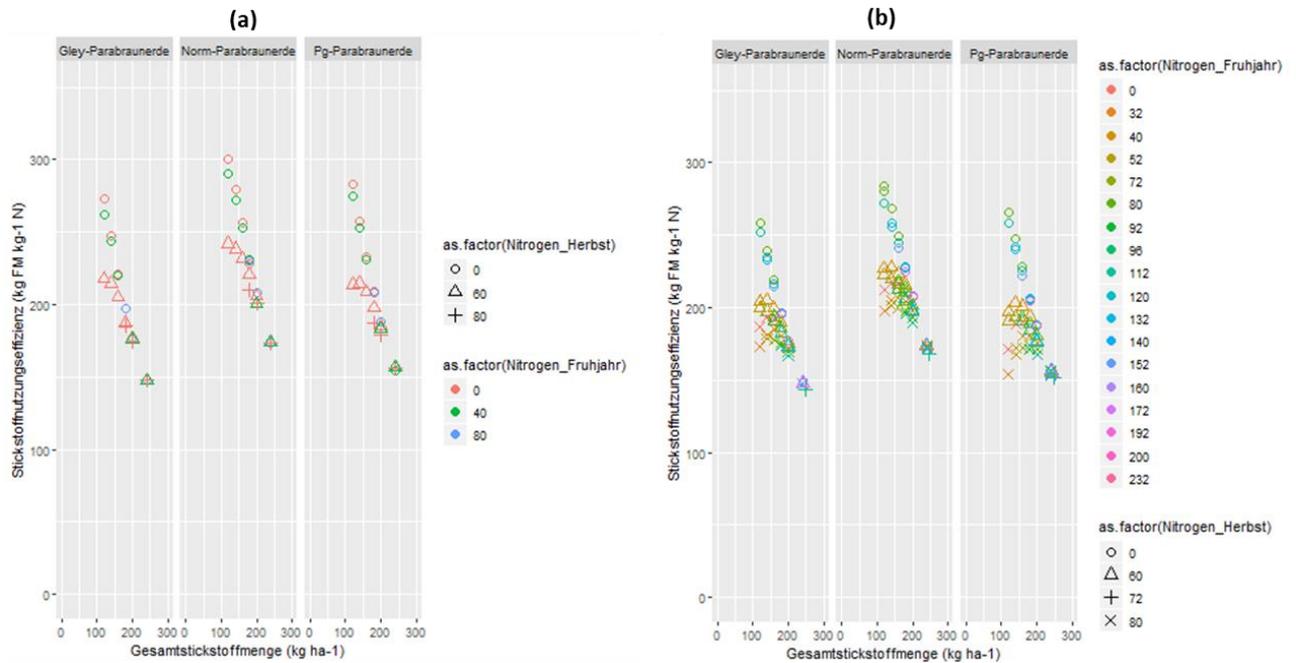
### 3.4 Agronomische Effizienz der Stickstoffdüngung

Die Düngeverordnung soll zur Verringerung der Stickstoffverluste aus dem System Boden-Pflanze führen und damit zu einer effizienteren Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs. Deshalb werden im Folgenden für die in 3.1. und 3.2 untersuchten Feldfrüchte und Fruchtfolgen die agronomische Effizienz der Stickstoffdüngung (und die Stickstoffaufnahmeeffizienz) analysiert. Die agronomische Effizienz wird hier nach 2.5.4 definiert als das Verhältnis zwischen der eingesetzten Stickstoffmenge und dem zusätzlich erzielten Ertrag im Vergleich zu einer Nulldüngungsvariante (Baligar *et al.*, 2001).

#### 3.4.1 Silomais

Theoretisch sollte die Düngereffizienz nach Bagliar *et al.* (2001) mit steigender Gesamtstickstoffgabe einer Optimumkurve folgen. Dies war bei Silomais wenn er vorwiegend mit mineralischem Stickstoff gedüngt und der organische Stickstoff (Rindergülle) im Frühjahr appliziert wird, nicht der Fall (Abbildung 20a, Kreise). Unter diesen Bedingungen scheint schon die kleinste in den Simulationen applizierte Gesamtstickstoffmenge (120 kg N ha<sup>-1</sup>) auf allen drei Standorten über dem Optimum zu liegen. Lediglich auf der Norm-Parabraunerde könnte man vermuten, dass unter diesen Bedingungen bei einer Gesamtstickstoffgabe zwischen 120 und 160 kg N ha<sup>-1</sup> das Optimum der Düngereffizienz liegt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Düngereffizienz auf der Norm-Parabraunerde bei einer Gesamtstickstoffgabe von 120 kg N ha<sup>-1</sup> mit 300 kg FM kg N<sup>-1</sup> am höchsten war gefolgt von 282 kg FM kg N<sup>-1</sup> auf der Pg-Parabraunerde und 269 kg FM kg N<sup>-1</sup> auf der Gley-Parabraunerde. Wenn ein Teil oder die gesamte Düngung des organischen Stickstoffs im Herbst erfolgte (Dreiecke und Kreuz in Abbildung 20a), ist ein deutliches Optimum der Düngereffizienz zwischen 150 und 200 kg N

ha<sup>-1</sup> Gesamtstickstoffgabe zu vermuten. Das bedeutet, dass die Ausbringung im Herbst die Düngereffizienz bei Gesamtstickstoffgaben unter 200 kg N ha<sup>-1</sup> offensichtlich reduziert. Dies ist auch zu beobachten, wenn über 50% der Stickstoffdüngung in organischer Form erfolgt (Abbildung 20b) und ein Teil davon im Herbst (Dreiecke und Kreuze in Abbildung 20b).



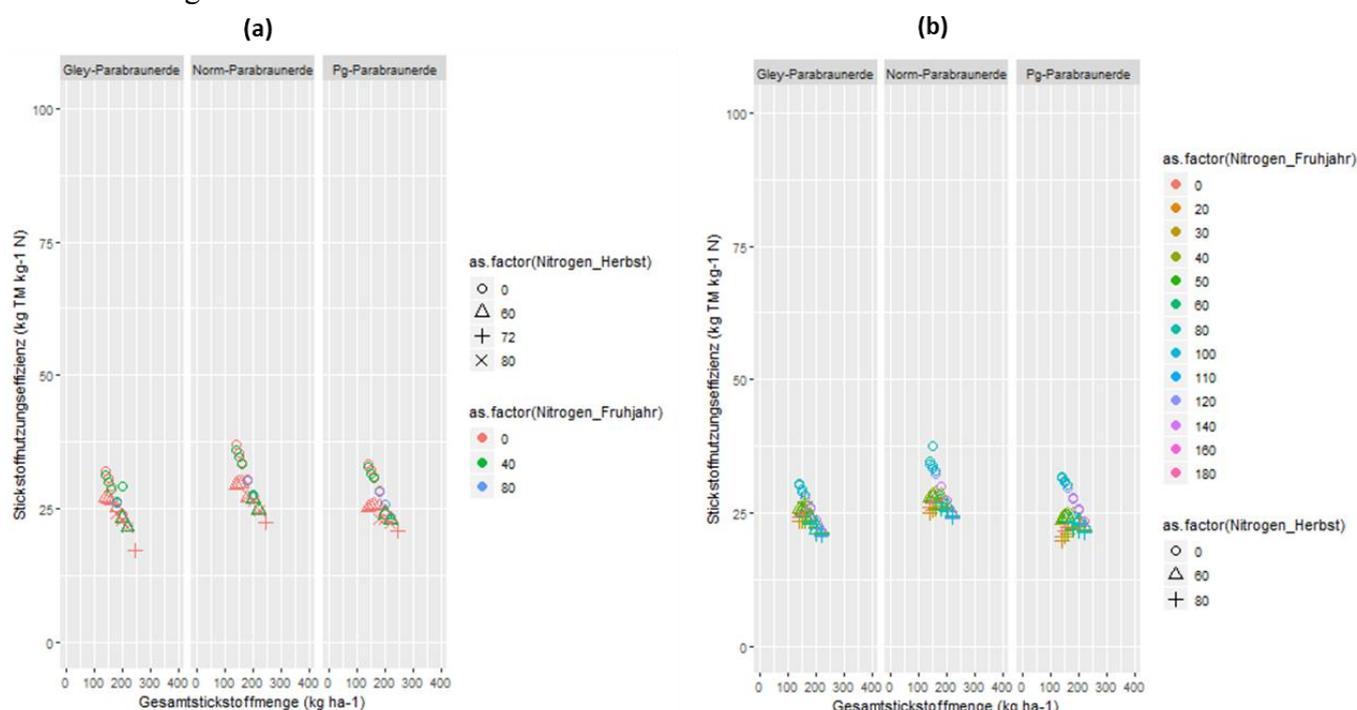
**Abbildung 20: Mittlere simulierte agronomische Düngereffizienz im Silomais (in kg FM kg N<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil an organischem (Nitrogen\_Frühjahr bzw. Nitrogen\_Herbst) Stickstoff in kg ha<sup>-1</sup> in Form von Gülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (WW-SM-SM) ohne Rückführung der Ernterückstände und ohne Anbau einer Winterzwischenfrucht vor Silomais. Dargestellt sind Düngeszenarien, in denen (a) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge über Mineraldünger ausgebracht wurde oder (b) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge in organischer Form (Rindergülle) ausgebracht wurde (N.B. obwohl die Ausbringung von Gülle auf Silomais im Herbst nach DÜV2017 ohne Zwischenfrüchte (Abbildung 1b) nicht möglich ist, wurde dieses Szenario zu Vergleichszwecken mit dargestellt)**

Abbildung 20b zeigt außerdem, dass die Düngereffizienz bei vorwiegend organischer Stickstoffdüngung geringer ist. Beispielsweise liegt die Düngereffizienz bei einer Gesamtstickstoffgabe von 120 kg N ha<sup>-1</sup> und wenn die gesamte Stickstoffdüngung im Frühjahr erfolgt (Kreise in Abbildung 20b) bei 254 kg FM kg N<sup>-1</sup> (Gley-Parabraunerde) bis 286 kg FM kg N<sup>-1</sup> (Norm-Parabraunerde).

### 3.4.2 Winterweizen

Die agronomische Effizienz des eingesetzten Stickstoffs verhielt sich beim Winterweizen auf den drei betrachteten Standorten in der Börde in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais ähnlich wie bei Silomais (Abbildung 21). Allerdings lassen sich die absoluten Düngereffizienzen wegen den unterschiedlichen Bezugsgrößen (Frischmasse bei Silomais

gegenüber Trockenmasse bei Winterweizen) nicht mit denen des Silomais vergleichen. Die Düngereffizienz war auf der Norm-Parabraunerde im Mittel höher als auf den beiden anderen Ackerstandorten. Bei vorwiegend mineralischer Stickstoffdüngung betrug die Düngereffizienz beim geringsten Stickstoffeinsatz ( $120 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) auf der Norm-parabraunerde  $37 \text{ kg TM kg N}^{-1}$  und auf der Gley-Parabraunerde  $31 \text{ kg TM kg N}^{-1}$  (Abbildung 21). Sowohl bei vorwiegend mineralischer Stickstoffdüngung (Abbildung 21a) als auch bei vorwiegend organischer Düngung (Abbildung 21b) sank die agronomische Effizienz im Bereich von Gesamtstickstoffgaben von 120 bis  $240 \text{ kg N ha}^{-1}$  mit zunehmender Stickstoffmenge.



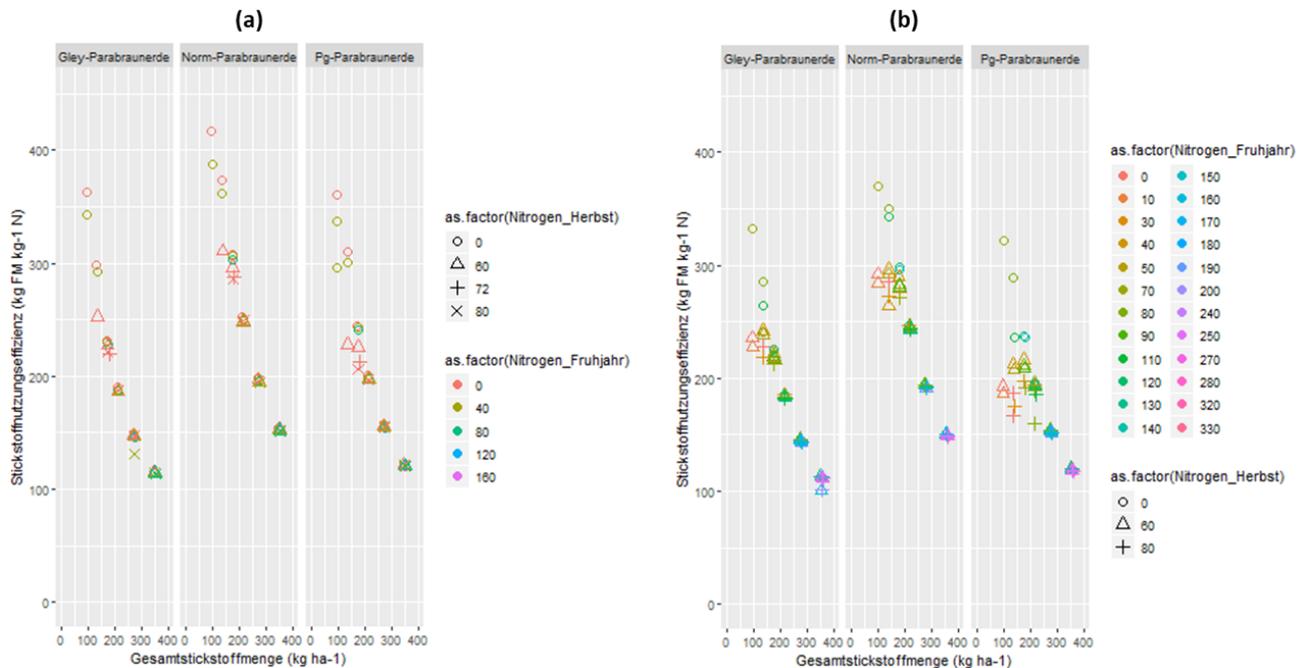
**Abbildung 21: Mittlere simulierte agronomischen Düngereffizienz im Winterweizen (in  $\text{kg TM kg N}^{-1}$ ) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil an organischem Stickstoff (Nitrogen\_Fruhjahr bzw. Nitrogen\_Herbst) in  $\text{kg ha}^{-1}$  in Form von Rindergülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (WW-SM-SM) (a) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge als Mineraldünger (b) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge in organischer Form (Rindergülle) (siehe Abbildung 20)**

Lediglich bei vorwiegend organischer Düngung und wenn ein Teil des organischen Stickstoffs im Herbst gedüngt wurde, stieg die Düngereffizienz im Bereich von 140 bis 160  $\text{kg Gesamtstickstoff ha}^{-1}$  an, um bei weiterem Anstieg der Gesamtstickstoffgabe wieder abzunehmen.

### 3.4.3 Zuckerrüben

Wie in Kapitel 3.2 und 3.3 wurde als weitere wichtige Fruchtart in der Börde die Zuckerrübe in der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben betrachtet. Die mittlere

agronomische Düngereffizienz ist ebenfalls auf der Norm-Parabraunerde ( $95.8 \text{ kg TM kg N}^{-1}$ ) am höchsten, gefolgt von der Gley-Parabraunerde ( $83.4 \text{ kg TM kg N}^{-1}$ ) und der Pg-Parabraunerde ( $82.8 \text{ kg TM kg N}^{-1}$ ) bei einer Gesamtstickstoffgabe von  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  in mineralischer Form (Abbildung 22).



**Abbildung 22: Mittlere simulierte agronomische Düngereffizienz in Zuckerrüben (in  $\text{kg FM kg N}^{-1}$ ) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil an organischem Stickstoff (Nitrogen\_Frühjahr bzw. Nitrogen\_Herbst) in  $\text{kg ha}^{-1}$  in Form von Rindergülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben (WW-WG-ZR) (a) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge als Mineraldünger (b) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge in organischer Form (Rindergülle) (siehe Abbildung 20)**

Wenn der Stickstoff in vorwiegend organischer Form ausgebracht wird, sinkt die Düngereffizienz bei einer Gesamtstickstoffgabe von  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  auf  $85.1 \text{ kg TM kg N}^{-1}$  auf der Norm-Parabraunerde bzw.  $76.6 \text{ kg TM kg N}^{-1}$  auf der Pg-Parabraunerde und  $74.1 \text{ kg TM kg N}^{-1}$  auf der Gley-Parabraunerde ab (Abbildung 22b). Bei diesem Düngerniveau ( $100 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) führte wie bei Winterweizen und Silomais die Ausbringung eines Teils des organischen Stickstoffs im Herbst zu einem weiteren Rückgang der Düngereffizienz (Rote Dreiecke in Abbildung 22b).

### 3.5 Bedeutung der Annahmen zum Gesamtstickstoffgehaltes im Boden für die Stickstoffaufnahme und die Auswaschungsverluste

Die Simulationen der Stickstoffdynamik im Boden berücksichtigen, neben der Aufnahme durch die Pflanze und die Auswaschung von Nitrat und Ammonium, sowohl den Umsatz der

durch die Düngung zugeführten Stickstoffformen als auch die Mineralisierung bzw. Immobilisierung des organischen Stickstoffs im Humusvorrat. Deshalb hängt die Simulation der zeitlichen Entwicklung der Mineralstickstoffgehalte ( $N_{min}$ ) und der Stickstoffauswaschung von vielen Modelleingangsgrößen ab und in besonderem Maße vom Anfangsgehalt an organischem Stickstoff im Boden. Die kann bei relativ engen C/N-Verhältnissen der organischen Substanz in Ackerböden aus dem Humusgehalt in den einzelnen Bodenschichten bis zur Wurzeltiefe abgeschätzt werden. Allerdings sind die Datenbestände zu den Humusgehalten in den Ackerböden in Nordrhein-Westfalen aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht zugänglich. Um einigermaßen realistische Werte für die Gehalte an organischer Substanz bzw. organischem Gesamtstickstoff in den Ackerböden als Eingangsgrößen für die SIMPLACE Modellläufe zu bekommen, wurden die aktuellen Gehalte in drei Schritten abgeschätzt: (1) aus der Datenbank von (Hoffmann *et al.*, 2016), in der über Pedotransferfunktionen die Gehalte an organischer Bodensubstanz für Ackerböden in NRW abgeschätzt wurde, wurden die Gehalte an organischer Bodensubstanz übernommen; (2) da diese Werte nach (Grosz *et al.*, 2017) die Gehalte an organischer Substanz überschätzen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der die Werte für den Gesamtstickstoffgehalt aus (Hoffmann *et al.*, 2016) auf 60 bzw. 40% der Originalgehalte reduziert wurden. Die Abbildung 23 zeigt die Auswirkungen der Reduktion der Gesamtstickstoffgehalte auf die Simulation der Stickstoffaufnahme durch Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrüben (NU) in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) und die Stickstoffauswaschung (NL). Eine Reduktion der Gesamtstickstoffgehalte als Eingangsgröße für die Simulationen auf 40% reduziert zwar die simulierten Stickstoffaufnahmen durch die Pflanzen nur geringfügig, reduziert jedoch die Stickstoffauswaschungsraten teilweise auf die Hälfte; (3) aufgrund dieser enormen Sensitivität der Auswaschungsraten auf die Eingangsgröße „Gesamtstickstoffgehalt“ wurde den Modellsimulationen über die Jahre 2000-2008 eine 18 jährige sogenannte „Spin up“- Simulationsphase vorgeschaltet (siehe auch Abschnitt 2.2), in der sich die Gesamtstickstoffgehalte in den Bodenschichten jedes Standortes auf ein Fließgleichgewicht einpendeln, das nur noch von den Bodeneigenschaften, den Witterungsbedingungen und der Bewirtschaftungsintensität (hier die verschiedenen Düngeszenarien) abhängt. Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass, wenn man die Gesamtstickstoffgehalte aus der Datenbank von (Hoffmann *et al.*, 2016) auf 50% reduziert, die Fließgleichgewichte sich innerhalb von weniger Jahren einstellen. Dies wurde als Indikator dafür gesehen, dass die gewählte Reduktion der Gesamtstickstoffgehalte in den Böden auf 50% realistische Werte für die Ackerböden in Nordrhein-Westfalen generiert. Nichtsdestotrotz wäre es wünschenswert, diese Herangehensweise durch die vorhandenen, aber nicht zugänglichen Beobachtungsdaten zu stützen.

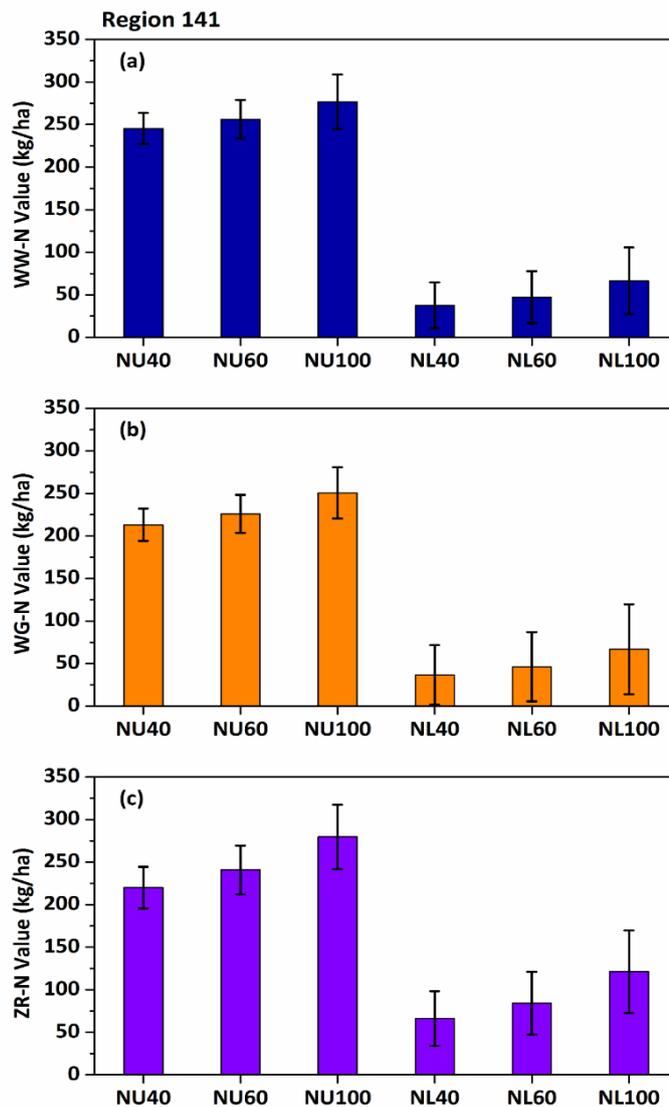


Abbildung 23: Mittlere Stickstoffaufnahme (NU) und Stickstoffauswaschung (NL) (in  $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) bei unterschiedlichen Annahmen zum Gesamtstickstoffgehalt im Boden als Startwert für die Modellsimulationen mit SIMPLACE (100= 100%, d.h. der Anfangswert für den Gesamtstickstoffgehalt der Ackerböden in der Datenbank wurde nicht verändert, 60 = Anfangswert wurde auf 60% des Gesamtstickstoffgehalts in der Datenbank reduziert, 40 = Anfangswert wurde auf 40% des Gesamtstickstoffgehalts in der Datenbank reduziert)

Unser Vorgehen zur Schätzung der Ausgangsgehalte an Gesamtstickstoff in den Böden impliziert auch, dass die Ergebnisse aller der in diesem Bericht gezeigten Simulationsergebnisse auf der Annahme beruhen, dass die betrachteten Standorte schon über längere Zeit unter dem Einfluss des jeweiligen Düngeszenarios gestanden haben. Oder anders ausgedrückt, die in diesem Bericht und im Bericht von Teilprojekt TP2 gezeigten Änderungen der Stickstoffaufnahme, der Erträge und der Auswaschungsraten durch eine Änderung der Düngepraxis als Reaktion auf die neue Düngeverordnung (wie sie im TP2 durch FARMDyn berechnet wurde) stellen den Zustand einer langfristigen Umstellung über mehrere Jahre dar. Kurzfristige Änderungen wie zum Beispiel den Abbau von organischer Substanz bei Reduktion der Güllegaben, was kurzfristig zu einem Mineralisierungsschub und einer

Freisetzung von zusätzlichem Stickstoff führen würde, wurde in den Simulationen nicht abgebildet.

#### **4. Zusammenfassung**

Ziel des Teilprojektes TP1 („Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW“) war die Abschätzung von standortspezifischen Nährstoffflüssen in betriebstypischen Anbausystemen der Boden-Klima-Regionen Nordrhein-Westfalens mit Hilfe der Modellplattform SIMPLACE (Scientific Impact Assessment and Modelling Platform for Advanced Crop and Ecosystem Management). Die Modell-Solution ist dabei in der Lage, die für das Projekt entwickelten, 108 Düngezenarien und die definierten Fruchtfolgen auf drei Standorten in jeder der neun Boden-Klima-Region von NRW zu rechnen. Fruchtfolgen auf drei Standorten in jeder der neun Boden-Klima-Region von NRW zu rechnen. In diesem Bericht werden beispielhaft die Simulationsergebnisse der drei Standorte (Norm-Parabraunerde, Pseudogley-Parabraunerde und Gley-Parabraunerde) in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) für zwei Fruchtfolgen (Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben bzw. Winterweizen-Silomais-Silomais) vorgestellt. Die mittleren simulierten Erträge über 9 Jahre stiegen für alle betrachteten Fruchtarten mit steigenden Stickstoffmengen bis zu einem Höchstertag an, wobei der Höchstertag von der Fruchtart und dem einzelnen Standort in den Boden-Klima-Regionen abhängt. Beispielsweise waren die Erträge von Winterweizen, Zuckerrüben, und Silomais in der Region 141 auf der Norm-Parabraunerde immer höher als auf den beiden anderen Ackerstandorten (Pseudogley-Parabraunerde und Gley-Parabraunerde). Die Stickstoffauswaschungsraten waren auf der Norm-Parabraunerde bei vergleichbaren Gesamtstickstoffgaben und Stickstoffformen hingegen geringer, was sich durch die höheren Stickstoffentzüge erklären ließ. Im Vergleich der mittleren simulierten Stickstoffauswaschungsraten auf den 27 Standorte der neun Boden-Klima-Regionen wurden die höchsten Auswaschungsraten (gemittelt über alle 108 Düngezenarien) in den Regionen 146 (Südliche Lüneburger Heide/sandige Böden), 147 (Mittleres Niedersachsen/leichte Lehmböden) und 191 (Teutoburger Wald/alle Bodenarten) gefunden. Sehr hohe Auswaschungsraten waren mit den Bodentypen Gley und Gley-Podsol (Region 146), Podsol-Gley und Gley (Region 147) und Braunerde und Podsol-Gley (Region 191), die, außer dem Gley in der Region 147, durch sandige Unterböden charakterisiert waren. Wenn man nur über die Düngezenarien mittelt, die vom ökonomischen Betriebsmodell FARMDyn (Teilprojekt TP2) als optimal ausgewählt wurden, also bei „betriebsüblicher Düngung“, waren die absoluten Auswaschungsraten bedeutend niedriger, und lagen im Schnitt bei 40 bis 60 kg N ha<sup>-1</sup> und a<sup>-1</sup>. Der Wintertraps hatte die höchsten Auswaschungsraten (> 60 kg N ha<sup>-1</sup>) gefolgt von Zuckerrüben, Triticale und Corn-Cob-Mix.

Abschließend wurde beispielhaft die agronomische Düngeneffizienz für die o.g. Fruchtfolgen und Fruchtarten in der Region 141 als das Verhältnis zwischen Masse des Ernteguts und eingesetzter Gesamtstickstoffmenge berechnet. Im Vergleich der drei Ackerstandort in der Region 141, hatte die Norm-Parabraunerde bei vergleichbaren Gesamtstickstoffgaben die höchste agronomische Düngeneffizienz bei allen drei betrachteten Fruchtarten unabhängig von der Art der Stickstoffform (vorwiegend mineralisch oder organisch). Die Simulationsergebnisse (Ertragsfunktionen in Abhängigkeit von Stickstoffmenge, -form und –ausbringungszeitpunkt sowie Auswaschungsraten pro Fruchtart in den betriebstypischen Fruchtfolgen der Bodenklimaregionen) dienten als Eingangsgrößen in das einzelbetriebliche ökonomische Modell FARMDYN im Teilprojekt TP2.

## **5. Schlußfolgerungen für die Umsetzung der Ergebnisse in der Praxis**

Das Teilprojekt „Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW“ hat versucht Stickstoffflüsse in 108 Düngeszenarien kombiniert mit über 50 Fruchtfolgen auf typischen Standorten in NRW abzubilden. Die abgeleiteten Ergebnisse bezüglich des Auswaschungsrisikos auf den flächenmäßig bedeutendsten Ackerstandorten bzw. der wichtigsten Fruchtarten sind vor allem für Entscheidungsträger in der Politik relevant. In Verbindung mit den Ergebnissen des ökonomischen Betriebsmodells FARMDyn wurden praxisrelevante Schlussfolgerungen hinsichtlich der Auswirkungen der DüV2017 auf Anpassungskosten, Handel mit organischen Wirtschaftsdüngern und Emissionsreduktionen in Betrieben mit typischer betriebswirtschaftlicher Ausrichtung gezogen (siehe Abschlussbericht Teilprojekt TP2). Potenziell wäre eine Weiterentwicklung der Plattform SIMPLACE zu einem web-basierten Tool für die ex-post und ex-ante Abschätzung der Stickstoffauswaschungen auf Schlagebene denkbar, jedoch sind dafür eine Reihe von technischen und organisatorischen Voraussetzungen nötig. Dazu zählen: (1) Entwicklung eines Eingabeformulars für die Landwirte, um schlagspezifische Informationen wie Nutzungsgeschichte, Gesamtstickstoffgehalte im Boden, Nmin-Analyseergebnisse, Art, Zeitpunkt und Menge der Stickstoffgaben etc. als Eingabegrößen für das Modell zu erfassen (2) eine Institution, die die technischen und finanziellen Voraussetzungen für den Aufbau und die Unterhaltung einer solchen Webanwendung herstellen kann und langfristig garantiert, (3) kostenlose on-line Verfügbarkeit von historischen Klimazeitreihen in Tagesauflösung (für ex-post Analysen) bzw. von mittelfristige Wettervorhersagen vom Zeitpunkt der Stickstoffausbringung bis zur Ernte (bei ex-ante Analysen) und (4) zusätzliche Modellvalidierungen auf Schlagebene. Zumindest die technischen Voraussetzungen (3) und (4) könnten im Zuge des Exzellenz-

Clusters PhenoRob in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich bearbeitet und verbessert werden (siehe Abschnitt 6).

## **6. Konsequenzen für weitere Forschungsaktivitäten**

Das Teilprojekt „**Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW**“ ist ein weiterer Schritt im Bemühen um eine verbesserte standortspezifische, witterungs- und anbauabhängige Abschätzung der Stickstoffbilanzen einschließlich der aktuellen Stickstoffauswaschungsraten in Nordrhein-Westfalen. Die Modellentwicklungsplattform SIMPLACE bildet die gesamte Wirkungskette der Einflussfaktoren für den Prozess der Stickstoffumsetzung im Boden, Stickstoffaufnahme durch die Pflanze sowie Stickstoffauswaschung unterhalb der Wurzelzone ab und hat das Potenzial die hohe räumliche und zeitliche Variabilität der Auswaschungsraten auf der Ebene einzelner Standorte abzubilden. Im Exzellenzcluster PhenoRob soll dieses Instrument auf der Grundlage von teilschlagspezifischen, zeitlich hochaufgelösten Beobachtungen und Messungen weiterentwickelt werden, um die Ausbringung von Stickstoff in organischer und mineralischer Form im Präzisionspflanzenbau im Hinblick auf ihre Ertrags- und Umweltwirkungen zu optimieren. Obwohl die Auswaschungsraten für die einzelnen Standorte und betriebsüblichen Düngenniveaus plausibel sind, wäre eine Modellvalidierung auf der Feldebene anhand von Feldexperimenten wünschenswert, in den Auswaschungsraten über mehrere Jahre und verschiedenen Düngebehandlungen gemessen wurden. Der Klimawandel wird in NRW zu einer weiteren Zunahme der Bodentemperaturen führen, was, in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte insbesondere in den oberen Bodenschichten, die Umsetzung der organischen Substanz und somit auch die Freisetzung von mineralischem Stickstoff fördern könnte. In Kombination mit verschiedenen Klimaszenarien könnte SIMPLACE zu einem Instrument weiterentwickelt werden, das die zukünftigen Veränderungen der Stickstoffdynamik in den Ackerböden NRWs aufgrund des Klimawandels abschätzt, einschließlich der langfristigen Entwicklung der Stickstoffvorräte und der Stickstoffauswaschungsraten.

## **7. Liste der Veröffentlichungen und Vorträge**

Zeng, W., Gaiser, T., Enders, A., Kuhn, T., Schäfer, D., Britz, B. (2018): Developing a Crop Model for N Management of Crop Rotations in North Rhine-Westphalia, Germany. International Environmental Modelling and Software Society Conference, July 2018, Fort Collins, USA

Kuhn, T.; Schäfer, D.; Srivastava, A.K.; Gaiser, T.; Britz, W. (o.J.): Coupling crop and bio-economic farm modelling to evaluate the revised implementation of the EU Nitrates Directive in Germany. Agricultural systems, under review.

Srivastava, A.K., Enders, A., Zeng, W., Gaiser, T. (o.J.): Effect of combined application of mineral and organic nitrogen fertilizer on crop yields, nitrate leaching and nitrogen balance at the regional scale. (geplant)

Ahrends, H., Enders, A., Krauss, G., Gaiser, T. (o.J.): Developing a grassland model for regional assessment of nitrogen fertilizer strategies and environmental impacts. (geplant)

## 8. Liste über Pressemitteilungen

Es wurden im Rahmen des Projektes keine Pressemitteilungen gemacht bzw. verbreitet

## 9. Liste über Posterpräsentationen, Vorfürungen und Demonstrationen

Es wurden im Rahmen des Teil-Projektes weder Posterpräsentationen gemacht, noch Vorfürungen der Demonstrationen durchgeführt

## 10. Kurzfassung in Deutsch und Englisch

### 10.1 Kurzfassung

Das Forschungsvorhaben **„Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW“** war Teil des Clusterprojektes **„Skalenübergreifende Modellierung von Änderungen der Agrarstruktur und landwirtschaftlichen Stoffflüssen in Regionen von Nordrhein-Westfalen“**. Anlass für das Clusterprojekt war die im Juni 2017 verabschiedete, überarbeitete Düngeverordnung DüV2017 (BMEL, 2017) nach einem mehrjährigen Novellierungsprozess der DüV2007. Ziel des Clusters war die gekoppelte Simulation und Analyse von Nährstoffflüssen auf Ebene des Pflanzenbestandes (Teilprojekt TP1), des landwirtschaftlichen Betriebes (Teilprojekt TP2) und der Region unter expliziter Betrachtung des Nährstoffaustausches zwischen typischen landwirtschaftlichen Betrieben (Teilprojekt TP3). Ziel des Teilprojektes TP1 (**„Modellierung der Auswirkungen von unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngergaben auf Erträge und Umwelt in betriebstypischen Anbausystemen ausgewählter Regionen von NRW“**) war die Abschätzung von standortspezifischen Nährstoffflüssen in betriebstypischen Anbausystemen der Boden-Klima-Regionen Nordrhein-Westfalens mit Hilfe der Modellplattform SIMPLACE (Scientific Impact Assessment and Modelling Platform for Advanced Crop and Ecosystem Management). Gemeinsam mit Teilprojekt TP2 wurden in

jeder Boden-Klima-Region Betriebe mit typischer betriebswirtschaftlicher Ausrichtung und einer betriebstypischen Fruchtfolge definiert, um eine konsistente Modellierung von Erträgen und Nährstoffflüssen auf der Standort- und Betriebsebene zu erreichen. Außerdem wurden gemeinsam mit TP2 108 Düngeszenarien für jede Fruchtart bzw. Fruchtfolge definiert. In der Modellplattform SIMPLACE wurde eine komplexe Modell-Solution entwickelt, die in der Lage ist alle 108 Düngeszenarien in Kombination mit allen Fruchtfolgen auf drei Standorten in jeder Boden-Klima-Region zu rechnen. Bei den drei Standorten handelte es sich um die drei jeweils flächenmäßig bedeutendsten Ackerböden. Dies führte zu mehr als 3.000.000 Simulationsläufen über eine Periode von 26 Simulationsjahren (18 Jahre Spin-up Phase und 8 Jahre Auswertungsphase). Für die große Anzahl an Simulationen wurde der Rechner-Cluster des Lehrstuhls für Pflanzenbau verwendet. Die Simulationsergebnisse wurden für TP2 über alle drei Standorte einer Boden-Klima-Region aggregiert. In diesem Bericht werden beispielhaft die Simulationsergebnisse der drei Standorte (Norm-Parabraunerde, Pseudogley-Parabraunerde und Gley-Parabraunerde) in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) für zwei Fruchtfolgen (Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben bzw. Winterweizen-Silomais-Silomais) vorgestellt.

Die mittleren simulierten Erträge über 9 Jahre stiegen für alle betrachteten Fruchtarten mit steigenden Stickstoffmengen bis zu einem Höchstertag an, wobei der Höchstertag von der Fruchtart und dem einzelnen Standort in den Boden-Klima-Regionen abhängt. Beispielsweise waren die Erträge von Winterweizen, Zuckerrüben, und Silomais in der Region 141 auf der Norm-Parabraunerde immer höher als auf den beiden anderen Ackerstandorten (Pseudogley-Parabraunerde und Gley-Parabraunerde). Die Stickstoffauswaschungsraten waren auf der Norm-Parabraunerde bei vergleichbaren Gesamtstickstoffgaben und Stickstoffformen hingegen geringer, was sich durch die höheren Stickstoffentzüge erklären ließ. Im Vergleich der mittleren simulierten Stickstoffauswaschungsraten auf den 27 Standorte der neun Boden-Klima-Regionen wurden die höchsten Auswaschungsraten (gemittelt über alle 108 Düngeszenarien) in den Regionen 146 (Südliche Lüneburger Heide/sandige Böden), 147 (Mittleres Niedersachsen/leichte Lehmböden) und 191 (Teutoburger Wald) gefunden. Sehr hohe Auswaschungsraten waren mit den Bodentypen Gley und Gley-Podsol (Region 146), Podsol-Gley und Gley (Region 147) und Braunerde und Podsol-Gley (Region 191), die, außer dem Gley in der Region 147, durch sandige Unterböden charakterisiert waren. Vergleicht man die simulierten Auswaschungsraten gemittelt über alle Standorte und Düngeszenarien für die einzelnen Fruchtarten, waren die Auswaschungsraten und der Anteil des ausgewaschenen Stickstoffs an der Gesamtstickstoffgabe bei Winterraps und Zuckerrüben am höchsten. Wenn man nur über die Düngeszenarien mittelt, die vom ökonomischen Betriebsmodell FARMDyn (Teilprojekt TP2) als optimal ausgewählt wurden, also bei „betriebsüblicher Düngung“, waren die absoluten Auswaschungsraten bedeutend niedriger, und lagen im Schnitt bei 40 bis 60 kg

$\text{N ha}^{-1}$  und  $\text{a}^{-1}$ . Auch in diesem Fall hatte der Winterraps die höchsten Auswaschungsraten ( $> 60 \text{ kg N ha a}^{-1}$ ) gefolgt von Zuckerrüben, Triticale und Corn-Cob-Mix. Abschließend wurde beispielhaft die agronomische Düngeneffizienz für die o.g. Fruchtfolgen und Fruchtarten in der Region 141 als das Verhältnis zwischen Masse des Ernteguts und eingesetzter Gesamtstickstoffmenge berechnet. Im Vergleich der drei Ackerstandort in der Region 141, hatte die Norm-Parabraunerde bei vergleichbaren Gesamtstickstoffgaben die höchste agronomische Düngeneffizienz bei allen drei betrachteten Fruchtarten unabhängig von der Art der Stickstoffform (vorwiegend mineralisch oder organisch).

Die Simulationsergebnisse (Ertragsfunktionen in Abhängigkeit von Stickstoffmenge, -form und -ausbringungszeitpunkt sowie Auswaschungsraten pro Fruchtart in den betriebstypischen Fruchtfolgen der Bodenklimaregionen) dienten als Eingangsgrößen in das einzelbetriebliche ökonomische Modell FARMDYN im Teilprojekt TP2. Die Integration des Teilprojektes in das Clusterprojekt „Skalenübergreifende Modellierung von Änderungen der Agrarstruktur und landwirtschaftlichen Stoffflüssen in Regionen von Nordrhein-Westfalen“ hat gezeigt, dass ein enge Zusammenarbeit zwischen pflanzenbaulich und betriebswirtschaftlich orientierten Disziplinen einen beträchtlichen Mehrwert generieren kann und dass die dynamische Modellierung bzw. die Kopplung von Modellen ein effektives Werkzeug zur Integration der zwei wissenschaftlichen Disziplinen (Pflanzenbau und Betriebsökonomik) darstellt. Aus dieser Integration konnten schließlich praxisrelevante Abschätzungen zur Auswirkung der DüV2017 im Vergleich zur DüV2007 gemacht werden.

## 10.2 Extended Summary

The research project "Modelling of the effects of different mineral and organic fertiliser applications on yields and the environment in typical farming systems of selected regions of NRW" was part of the cluster project "Cross-scale modelling of changes in agricultural structure and agricultural material flows in regions of North Rhine-Westphalia". The aim of the cluster was the coupled simulation and analysis of nutrient fluxes at the level of the field (subproject TP1), the farm (subproject TP2) and the region with explicit consideration of nutrient exchange between typical, region-specific farm types (subproject TP3). The aim of subproject TP1 ("Modelling of the effects of different mineral and organic fertiliser applications on yields and environment in typical farming systems of selected regions of North Rhine-Westphalia") was the assessment of site-specific nutrient flows in typical farming systems of the soil-climate regions of North Rhine-Westphalia using the modelling platform SIMPLACE (Scientific Impact Assessment and Modelling Platform for Advanced Crop and Ecosystem Management). Together with subproject TP2, farms with a typical farm management and a typical crop rotation were defined in each soil-climate region in order to achieve consistent modelling of yields and nutrient flows at the site and farm level. In

addition, 108 fertiliser scenarios for each crop type and crop rotation were defined together with TP2. In the model platform SIMPLACE a complex model solution was developed, which is able to calculate all 108 fertiliser scenarios in combination with all crop rotations at three locations in each soil-climate region. The three locations were the three most important arable soils with the highest share in the cropland area of each region. This led to more than 3,000,000 simulation runs over a period of 26 simulation years (18 years spin-up phase and 8 years evaluation phase). The computer cluster of the Chair of Crop Production was used for the large number of simulations. The simulation results were aggregated as an input to TP2 across all three locations of a soil-climate region. In this report the simulation results of the three sites (Norm-Parabraunerde, Pseudogley-Parabraunerde and Gley-Parabraunerde) in the region 141 (Börde/Lowlands) for two crop rotations (winter wheat-winter barley-sugar beet and winter wheat-silomais-silomais respectively) are presented as examples.

The mean simulated yields over 9 years increased up to a maximum yield for all considered crop types with increasing nitrogen quantities, whereby the maximum yield depends on the crop and the individual location in the soil-climate regions. For example, the yields of winter wheat, sugar beet, and silage maize in Region 141 were always higher on Norm-Parabraunerde than on the other two arable sites (Pseudogley-Parabraunerde and Gley-Parabraunerde). The nitrogen leaching rates on the Norm-Parabraunerde, however, were lower with comparable total nitrogen inputs and nitrogen forms, which could be explained by the higher nitrogen uptake. In the comparison of the mean simulated nitrogen leaching rates on the 27 sites of the nine soil-climate regions, the highest leaching rates (averaged over all 108 fertiliser scenarios) were found in the regions 146 (Southern Lüneburger Heide/Sandy Soils), 147 (Middle Lower Saxony/loamy-clay Soils) and 191 (Teutoburger Wald). Very high leaching rates were found with the soil types Gley and Gley-Podsol (region 146), Podsol-Gley and Gley (region 147) and Braunerde and Podsol-Gley (region 191), which, apart from the Gley site in region 147, were characterised by sandy subsoils. When comparing the simulated leaching rates averaged over all locations and fertilization scenarios for the individual crops, the leaching rates and the proportion of leached nitrogen in the total nitrogen application were highest for winter rape and sugar beet. If only the fertiliser scenarios selected as optimal by the economic farm model FARMDyn (subproject TP2) were averaged, i.e. "farm optimized fertilisation", the absolute leaching rates were significantly lower, averaging 40 to 60 kg N ha<sup>-1</sup> and a<sup>-1</sup>. Also, in this case the winter rape had the highest leaching rates (> 60 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) followed by sugar beet, triticale and corn-cob mix. Finally, the agronomic fertiliser efficiency for the above crop rotations and crop types in Region 141 was calculated as the ratio between the crop yield and the total amount of nitrogen used. In the comparison of the three arable sites in region 141, the Norm-Parabraunerde had the highest agronomic fertiliser efficiency

for all three crops considered, irrespective of the type of nitrogen form (predominantly mineral or organic), with comparable total nitrogen application rates.

The simulation results (yield functions dependent on nitrogen quantity, form and application time as well as leaching rates per crop type in the typical crop rotations of the soil climate regions) were used as input parameters for the economic farm model FARMDYN in subproject TP2. The integration of the subproject into the cluster project "Cross-Scale Modelling of Changes in Agricultural Structure and Agricultural Material Flows in Regions of North Rhine-Westphalia" has shown that a close cooperation between agronomic and economic disciplines can generate a considerable added value and that dynamic modelling and coupling of bio-physical and economic models is an effective tool for the integration of the two scientific disciplines (crop production and farm economics). From this integration, practice-relevant estimates of the impact of the fertilizer regulation DüV2017 in comparison to the fertilizer regulation DüV2007 could finally be made.

## 11. Literaturverzeichnis

- Addiscott, T.M., Heys, P.J., Whitmore, A.P., 1986. Application of simple leaching models in heterogeneous soils. *Geoderma* 38, 185-194.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage* 56. FAO, Rome, p. 300.
- Angulo, C., Rötter, R., Lock, R., Enders, A., Fronzek, S., Ewert, F., 2013. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 170, 32-46.
- Baligar, V.V., Fageria, N.K., He, Z.L., 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 32, 921-950.
- Basis-DLM, 2017. Digitales Basis-Landschaftsmodell von NRW (Basis-DLM). Bezirksregierung Köln, Köln, Germany.
- Beaudoin, N., Saad, J.K., Van Laethem, C., Machet, J.M., Maucorps, J., Mary, B., 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111, 292-310.
- BMEL, 2017. Verordnung über den Umgang mit Nährstoffen im Betrieb und betriebliche Stoffstrombilanzen. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), <https://www.gesetze-im-internet.de/stoffbilv/StoffBilV.pdf>, 1.6.2019.
- BMELV, 2007. Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen - DüV. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV). Berlin, Deutschland.
- Carter, J.N., Traveller, 1981. check. *Agronomy Journal*.
- Carter, J.N., Westermann, D.T., Jensen, M.E., 1976. Sugarbeet Yield and Quality as Affected by Nitrogen Level. *Agronomy Journal* 68, 49-55.
- Colomb, B., Debaeke, P., Jouany, C., Nolot, J.M., 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *European Journal of Agronomy* 26, 154-165.
- Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Pepper, D.A., O'Connell, A.M., 2005. A process-based model of nitrogen cycling in forest plantations Part I. Structure, calibration and analysis of the decomposition model. *Ecol. Model.* 187, 426-448.
- Cordes, L., 2017. Wer überzieht, hat schlechte Karten. *Land und Forst* 11, 32-33.
- Deike, S., Pallutt, B., Melander, B., Strassemeyer, J., Christen, O., 2008. Long-term productivity and environmental effects of arable farming as affected by crop rotation, soil tillage intensity and strategy of pesticide use: A case-study of two long-term field experiments in Germany and Denmark. *European Journal of Agronomy* 29, 191-199.
- Gibbons, J.M., Williamson, J.C., Williams, A.P., Withers, P.J.A., Hockley, N., Harris, I.M., Hughes, J.W., Taylor, R.L., Jones, D.L., Healey, J.R., 2014. Sustainable nutrient management at field, farm and regional level: Soil testing, nutrient budgets and the trade-off between lime application and greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 188, 48-56.
- Grosz, B., Dechow, R., Gebbert, S., Hoffmann, H., Zhao, G., Constantin, J., Raynal, H., Wallach, D., Coucheney, E., Lewan, E., Eckersten, H., Specka, X., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Kuhnert, M., Yeluripati, J., Haas, E., Teixeira, E., Bindi, M., Trombi, G., Moriondo, M., Doro, L., Roggero, P.P., Zhao, Z.G., Wang, E.L., Tao, F.L., Rotter, R., Kassie, B., Cammarano, D., Asseng, S., Weihermüller, L., Siebert, S., Gaiser, T., Ewert, F., 2017. The

- implication of input data aggregation on up-scaling soil organic carbon changes. *Environ. Modell. Softw.* 96, 361-377.
- Happe, K., Hutchings, N.J., Dalgaard, T., Kellerman, K., 2011. Modelling the interactions between regional farming structure, nitrogen losses and environmental regulation. *Agricultural Systems* 104, 281-291.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evaporation from temperature. *Appl. Engr. in Agric* 1, 96-109.
- Hirose, T., 2005. Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. *Annals of Botany* 95, 483-494.
- Hoffmann, H., Zhao, G., Asseng, S., Bindi, M., Biernath, C., Constantin, J., Coucheney, E., Dechow, R., Doro, L., Eckersten, H., Gaiser, T., Grosz, B., Heinlein, F., Kassie, B.T., Kersebaum, K.C., Klein, C., Kuhnert, M., Lewan, E., Moriondo, M., Nendel, C., Priesack, E., Raynal, H., Roggero, P.P., Rotter, R.P., Siebert, S., Specka, X., Tao, F.L., Teixeira, E., Trombi, G., Wallach, D., Weihermuller, L., Yeluripati, J., Ewert, F., 2016. Impact of Spatial Soil and Climate Input Data Aggregation on Regional Yield Simulations. *PLoS One* 11, 23.
- KTBL, 2009. *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt.
- LWK-NRW, 2017. *Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz 2017*.
- Modin-Edman, A.-K., Öborn, I., Sverdrup, H., 2007. FARMFLOW—A dynamic model for phosphorus mass flow, simulating conventional and organic management of a Swedish dairy farm. *Agricultural Systems* 94, 431-444.
- Nielsen, A.H., Kristensen, I.S., 2005. Nitrogen and phosphorus surpluses on Danish dairy and pig farms in relation to farm characteristics. *Livestock Production Science* 96, 97-107.
- Poesen, J., Lavee, H., 1994. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena* 23, 1–28.
- Roßberg, D., Michel, V., Graf, R., Neukampf, R., 2007. Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 59, 155–161.
- Rubæk, G.H., Kristensen, K., Olesen, S.E., Østergaard, H.S., Heckrath, G., 2013. Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soils in Denmark. *Geoderma* 209–210, 241-250.
- Torri, D., Poesen, J., Monaci, F., Busoni, E., 1994. Rock Fragments in Soil: Surface Dynamics. *Catena* 23, 65–71.
- Vanden Nest, T., Vandecasteele, B., Ruysschaert, G., Coughon, M., Merckx, R., Reheul, D., 2014. Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C levels, crop yield and P leaching in a long term trial on a silt loam soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 197, 309-317.
- Williams, J.R., Izaurralde, C.A., 2005. The APEX model. *Blackland Research Center Reports, Vol. 2*. Blackland Research Center, USDA, Temple, Texas, USA.
- Wolf, J., 2012. *User Guide for LINTUL5: Simple Generic Model for Simulation of Crop Growth under Potential, Water Limited and Nitrogen, Phosphorus and Potassium Limited Conditions*. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Wösten, J.H., Lilly, M.A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169–185.

## 12. Anhang

### 12.1 Aufbau der Düngeszenarien in allen Regionen von Nordrhein-Westfalen

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F1: NC1-1	CCM	160	0	0	160
F1: NC1-1	KM	160	0	0	160
F1: NC1-1	SG	100	0	0	100
F1: NC1-1	SM	120	0	0	120
F1: NC1-1	WG	100	0	0	100
F1: NC1-1	WRa	140	0	0	140
F1: NC1-1	WTr	100	0	0	100
F1: NC1-1	WW	140	0	0	140
F1: NC1-1	ZR	100	0	0	100
F2: NC1-2	CCM	120	0	40	160
F2: NC1-2	KM	120	0	40	160
F2: NC1-2	SG	60	0	40	100
F2: NC1-2	SM	80	0	40	120
F2: NC1-2	WG	60	0	40	100
F2: NC1-2	WRa	100	0	40	140
F2: NC1-2	WTr	60	0	40	100
F2: NC1-2	WW	100	0	40	140
F2: NC1-2	ZR	60	0	40	100
F3: NC1-3	CCM	80	0	80	160
F3: NC1-3	KM	80	0	80	160
F3: NC1-3	SG	60	0	40	100
F3: NC1-3	SM	40	0	80	120
F3: NC1-3	WG	60	0	40	100
F3: NC1-3	WRa	100	0	40	140
F3: NC1-3	WTr	60	0	40	100
F3: NC1-3	WW	60	0	80	140
F3: NC1-3	ZR	60	0	40	100
F4: NC1-4	CCM	40	0	120	160
F4: NC1-4	KM	40	0	120	160
F4: NC1-4	SG	60	0	40	100
F4: NC1-4	SM	40	0	80	120
F4: NC1-4	WG	60	0	40	100
F4: NC1-4	WRa	100	0	40	140
F4: NC1-4	WTr	60	0	40	100
F4: NC1-4	WW	60	0	80	140
F4: NC1-4	ZR	60	0	40	100

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F5: NC1-5	CCM	8	0	152	160
F5: NC1-5	KM	8	0	152	160
F5: NC1-5	SG	40	0	60	100
F5: NC1-5	SM	8	0	112	120
F5: NC1-5	WG	40	0	60	100
F5: NC1-5	WRa	70	0	70	140
F5: NC1-5	WTr	40	0	60	100
F5: NC1-5	WW	40	0	100	140
F5: NC1-5	ZR	30	0	70	100
F6: NC1-6	CCM	100	60	0	160
F6: NC1-6	KM	100	60	0	160
F6: NC1-6	SG	40	60	0	100
F6: NC1-6	SM	60	60	0	120
F6: NC1-6	WG	40	60	0	100
F6: NC1-6	WRa	80	60	0	140
F6: NC1-6	WTr	40	60	0	100
F6: NC1-6	WW	80	60	0	140
F6: NC1-6	ZR	40	60	0	100
F7: NC1-7	CCM	60	60	40	160
F7: NC1-7	KM	60	60	40	160
F7: NC1-7	SG	40	60	0	100
F7: NC1-7	SM	20	60	40	120
F7: NC1-7	WG	40	60	0	100
F7: NC1-7	WRa	80	60	0	140
F7: NC1-7	WTr	40	60	0	100
F7: NC1-7	WW	40	60	40	140
F7: NC1-7	ZR	40	60	0	100
F8: NC1-8	CCM	20	60	80	160
F8: NC1-8	KM	20	60	80	160
F8: NC1-8	SG	40	60	0	100
F8: NC1-8	SM	20	60	40	120
F8: NC1-8	WG	40	60	0	100
F8: NC1-8	WRa	80	60	0	140
F8: NC1-8	WTr	40	60	0	100
F8: NC1-8	WW	40	60	40	140
F8: NC1-8	ZR	40	60	0	100

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F9: NC1-9	CCM	8	60	92	160
F9: NC1-9	KM	8	60	92	160
F9: NC1-9	SG	40	60	0	100
F9: NC1-9	SM	8	60	52	120
F9: NC1-9	WG	40	60	0	100
F9: NC1-9	WRa	70	60	10	140
F9: NC1-9	WTr	40	60	0	100
F9: NC1-9	WW	40	60	40	140
F9: NC1-9	ZR	30	60	10	100
F10: NC1-10	CCM	40	80	40	160
F10: NC1-10	KM	40	80	40	160
F10: NC1-10	SG	40	60	0	100
F10: NC1-10	SM	40	80	0	120
F10: NC1-10	WG	40	60	0	100
F10: NC1-10	WRa	80	60	0	140
F10: NC1-10	WTr	40	60	0	100
F10: NC1-10	WW	60	80	0	140
F10: NC1-10	ZR	40	60	0	100
F11: NC1-11	CCM	8	80	72	160
F11: NC1-11	KM	8	80	72	160
F11: NC1-11	SG	40	60	0	100
F11: NC1-11	SM	8	80	32	120
F11: NC1-11	WG	40	60	0	100
F11: NC1-11	WRa	70	60	10	140
F11: NC1-11	WTr	40	60	0	100
F11: NC1-11	WW	40	80	20	140
F11: NC1-11	ZR	30	60	10	100

## Düngestufenreferenz 2

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F12: NC2-1	CCM	180	0	0	180
F12: NC2-1	KM	180	0	0	180
F12: NC2-1	SG	120	0	0	120
F12: NC2-1	SM	140	0	0	140
F12: NC2-1	WG	120	0	0	120
F12: NC2-1	WRa	160	0	0	160
F12: NC2-1	WTr	120	0	0	120
F12: NC2-1	WW	150	0	0	150
F12: NC2-1	ZR	140	0	0	140
F13: NC2-2	CCM	140	0	40	180
F13: NC2-2	KM	140	0	40	180
F13: NC2-2	SG	80	0	40	120
F13: NC2-2	SM	100	0	40	140
F13: NC2-2	WG	80	0	40	120
F13: NC2-2	WRa	120	0	40	160
F13: NC2-2	WTr	80	0	40	120
F13: NC2-2	WW	110	0	40	150
F13: NC2-2	ZR	100	0	40	140
F14: NC2-3	CCM	100	0	80	180
F14: NC2-3	KM	100	0	80	180
F14: NC2-3	SG	40	0	80	120
F14: NC2-3	SM	60	0	80	140
F14: NC2-3	WG	40	0	80	120
F14: NC2-3	WRa	80	0	80	160
F14: NC2-3	WTr	40	0	80	120
F14: NC2-3	WW	70	0	80	150
F14: NC2-3	ZR	60	0	80	140
F15: NC2-4	CCM	60	0	120	180
F15: NC2-4	KM	60	0	120	180
F15: NC2-4	SG	40	0	80	120
F15: NC2-4	SM	20	0	120	140
F15: NC2-4	WG	40	0	80	120
F15: NC2-4	WRa	80	0	80	160
F15: NC2-4	WTr	40	0	80	120
F15: NC2-4	WW	70	0	80	150
F15: NC2-4	ZR	60	0	80	140

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F16: NC2-5	CCM	20	0	160	180
F16: NC2-5	KM	20	0	160	180
F16: NC2-5	SG	40	0	80	120
F16: NC2-5	SM	20	0	120	140
F16: NC2-5	WG	40	0	80	120
F16: NC2-5	WRa	80	0	80	160
F16: NC2-5	WTr	40	0	80	120
F16: NC2-5	WW	70	0	80	150
F16: NC2-5	ZR	60	0	80	140
F17: NC2-6	CCM	8	0	172	180
F17: NC2-6	KM	8	0	172	180
F17: NC2-6	SG	40	0	80	120
F17: NC2-6	SM	8	0	132	140
F17: NC2-6	WG	40	0	80	120
F17: NC2-6	WRa	70	0	90	160
F17: NC2-6	WTr	40	0	80	120
F17: NC2-6	WW	40	0	110	150
F17: NC2-6	ZR	30	0	110	140
F18: NC2-7	CCM	120	60	0	180
F18: NC2-7	KM	120	60	0	180
F18: NC2-7	SG	60	60	0	120
F18: NC2-7	SM	80	60	0	140
F18: NC2-7	WG	60	60	0	120
F18: NC2-7	WRa	100	60	0	160
F18: NC2-7	WTr	60	60	0	120
F18: NC2-7	WW	90	60	0	150
F18: NC2-7	ZR	80	60	0	140
F19: NC2-8	CCM	80	60	40	180
F19: NC2-8	KM	80	60	40	180
F19: NC2-8	SG	60	60	0	120
F19: NC2-8	SM	40	60	40	140
F19: NC2-8	WG	60	60	0	120
F19: NC2-8	WRa	100	60	0	160
F19: NC2-8	WTr	60	60	0	120
F19: NC2-8	WW	50	60	40	150
F19: NC2-8	ZR	40	60	40	140

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F20: NC2-9	CCM	40	60	80	180
F20: NC2-9	KM	40	60	80	180
F20: NC2-9	SG	60	60	0	120
F20: NC2-9	SM	40	60	40	140
F20: NC2-9	WG	60	60	0	120
F20: NC2-9	WRa	100	60	0	160
F20: NC2-9	WTr	60	60	0	120
F20: NC2-9	WW	50	60	40	150
F20: NC2-9	ZR	40	60	40	140
F21: NC2-10	CCM	8	60	112	180
F21: NC2-10	KM	8	60	112	180
F21: NC2-10	SG	40	60	20	120
F21: NC2-10	SM	8	60	72	140
F21: NC2-10	WG	40	60	20	120
F21: NC2-10	WRa	70	60	30	160
F21: NC2-10	WTr	40	60	20	120
F21: NC2-10	WW	40	60	50	150
F21: NC2-10	ZR	30	60	50	140
F22: NC2-11	CCM	100	80	0	180
F22: NC2-11	KM	100	80	0	180
F22: NC2-11	SG	40	80	0	120
F22: NC2-11	SM	60	80	0	140
F22: NC2-11	WG	40	80	0	120
F22: NC2-11	WRa	80	80	0	160
F22: NC2-11	WTr	40	80	0	120
F22: NC2-11	WW	70	80	0	150
F22: NC2-11	ZR	60	80	0	140
F23: NC2-12	CCM	60	80	40	180
F23: NC2-12	KM	60	80	40	180
F23: NC2-12	SG	40	80	0	120
F23: NC2-12	SM	20	80	40	140
F23: NC2-12	WG	40	80	0	120
F23: NC2-12	WRa	80	80	0	160
F23: NC2-12	WTr	40	80	0	120
F23: NC2-12	WW	70	80	0	150
F23: NC2-12	ZR	60	80	0	140

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F24: NC2-13	CCM	20	80	80	180
F24: NC2-13	KM	20	80	80	180
F24: NC2-13	SG	40	80	0	120
F24: NC2-13	SM	20	80	40	140
F24: NC2-13	WG	40	80	0	120
F24: NC2-13	WRa	80	80	0	160
F24: NC2-13	WTr	40	80	0	120
F24: NC2-13	WW	70	80	0	150
F24: NC2-13	ZR	60	80	0	140
F25: NC2-14	CCM	8	80	92	180
F25: NC2-14	KM	8	80	92	180
F25: NC2-14	SG	40	80	0	120
F25: NC2-14	SM	8	80	52	140
F25: NC2-14	WG	40	80	0	120
F25: NC2-14	WRa	70	80	10	160
F25: NC2-14	WTr	40	80	0	120
F25: NC2-14	WW	40	80	30	150
F25: NC2-14	ZR	30	80	30	140

## Düngestufenreferenz 3

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F26: NC3-1	CCM	200	0	0	200
F26: NC3-1	KM	200	0	0	200
F26: NC3-1	SG	130	0	0	130
F26: NC3-1	SM	160	0	0	160
F26: NC3-1	WG	130	0	0	130
F26: NC3-1	WRa	180	0	0	180
F26: NC3-1	WTr	130	0	0	130
F26: NC3-1	WW	160	0	0	160
F26: NC3-1	ZR	180	0	0	180
F27: NC3-2	CCM	160	0	40	200
F27: NC3-2	KM	160	0	40	200
F27: NC3-2	SG	90	0	40	130
F27: NC3-2	SM	120	0	40	160
F27: NC3-2	WG	90	0	40	130
F27: NC3-2	WRa	140	0	40	180
F27: NC3-2	WTr	90	0	40	130
F27: NC3-2	WW	120	0	40	160
F27: NC3-2	ZR	140	0	40	180
F28: NC3-3	CCM	120	0	80	200
F28: NC3-3	KM	120	0	80	200
F28: NC3-3	SG	50	0	80	130
F28: NC3-3	SM	80	0	80	160
F28: NC3-3	WG	50	0	80	130
F28: NC3-3	WRa	100	0	80	180
F28: NC3-3	WTr	50	0	80	130
F28: NC3-3	WW	80	0	80	160
F28: NC3-3	ZR	100	0	80	180
F29: NC3-4	CCM	80	0	120	200
F29: NC3-4	KM	80	0	120	200
F29: NC3-4	SG	50	0	80	130
F29: NC3-4	SM	40	0	120	160
F29: NC3-4	WG	50	0	80	130
F29: NC3-4	WRa	100	0	80	180
F29: NC3-4	WTr	50	0	80	130
F29: NC3-4	WW	40	0	120	160
F29: NC3-4	ZR	60	0	120	180
F30: NC3-5	CCM	40	0	160	200
F30: NC3-5	KM	40	0	160	200
F30: NC3-5	SG	50	0	80	130
F30: NC3-5	SM	40	0	120	160
F30: NC3-5	WG	50	0	80	130
F30: NC3-5	WRa	100	0	80	180
F30: NC3-5	WTr	50	0	80	130
F30: NC3-5	WW	40	0	120	160
F30: NC3-5	ZR	60	0	120	180

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F31: NC3-6	CCM	8	0	192	200
F31: NC3-6	KM	8	0	192	200
F31: NC3-6	SG	40	0	90	130
F31: NC3-6	SM	8	0	152	160
F31: NC3-6	WG	40	0	90	130
F31: NC3-6	WRa	70	0	110	180
F31: NC3-6	WTr	40	0	90	130
F31: NC3-6	WW	40	0	120	160
F31: NC3-6	ZR	30	0	150	180
F32: NC3-7	CCM	140	60	0	200
F32: NC3-7	KM	140	60	0	200
F32: NC3-7	SG	70	60	0	130
F32: NC3-7	SM	100	60	0	160
F32: NC3-7	WG	70	60	0	130
F32: NC3-7	WRa	120	60	0	180
F32: NC3-7	WTr	70	60	0	130
F32: NC3-7	WW	100	60	0	160
F32: NC3-7	ZR	120	60	0	180
F33: NC3-8	CCM	100	60	40	200
F33: NC3-8	KM	100	60	40	200
F33: NC3-8	SG	70	60	0	130
F33: NC3-8	SM	60	60	40	160
F33: NC3-8	WG	70	60	0	130
F33: NC3-8	WRa	80	60	40	180
F33: NC3-8	WTr	70	60	0	130
F33: NC3-8	WW	60	60	40	160
F33: NC3-8	ZR	80	60	40	180
F34: NC3-9	CCM	60	60	80	200
F34: NC3-9	KM	60	60	80	200
F34: NC3-9	SG	70	60	0	130
F34: NC3-9	SM	20	60	80	160
F34: NC3-9	WG	70	60	0	130
F34: NC3-9	WRa	80	60	40	180
F34: NC3-9	WTr	70	60	0	130
F34: NC3-9	WW	60	60	40	160
F34: NC3-9	ZR	40	60	80	180
F35: NC3-10	CCM	20	60	120	200
F35: NC3-10	KM	20	60	120	200
F35: NC3-10	SG	70	60	0	130
F35: NC3-10	SM	20	60	80	160
F35: NC3-10	WG	70	60	0	130
F35: NC3-10	WRa	80	60	40	180
F35: NC3-10	WTr	70	60	0	130
F35: NC3-10	WW	60	60	40	160
F35: NC3-10	ZR	40	60	80	180

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F36: NC3-11	CCM	8	60	132	200
F36: NC3-11	KM	8	60	132	200
F36: NC3-11	SG	40	60	30	130
F36: NC3-11	SM	8	60	92	160
F36: NC3-11	WG	40	60	30	130
F36: NC3-11	WRa	70	60	50	180
F36: NC3-11	WTr	40	60	30	130
F36: NC3-11	WW	40	60	60	160
F36: NC3-11	ZR	30	60	90	180
F37: NC3-12	CCM	120	80	0	200
F37: NC3-12	KM	120	80	0	200
F37: NC3-12	SG	50	80	0	130
F37: NC3-12	SM	80	80	0	160
F37: NC3-12	WG	50	80	0	130
F37: NC3-12	WRa	100	80	0	180
F37: NC3-12	WTr	50	80	0	130
F37: NC3-12	WW	80	80	0	160
F37: NC3-12	ZR	100	80	0	180
F38: NC3-13	CCM	80	80	40	200
F38: NC3-13	KM	80	80	40	200
F38: NC3-13	SG	50	80	0	130
F38: NC3-13	SM	40	80	40	160
F38: NC3-13	WG	50	80	0	130
F38: NC3-13	WRa	100	80	0	180
F38: NC3-13	WTr	50	80	0	130
F38: NC3-13	WW	40	80	40	160
F38: NC3-13	ZR	60	80	40	180
F39: NC3-14	CCM	40	80	80	200
F39: NC3-14	KM	40	80	80	200
F39: NC3-14	SG	50	80	0	130
F39: NC3-14	SM	40	80	40	160
F39: NC3-14	WG	50	80	0	130
F39: NC3-14	WRa	100	80	0	180
F39: NC3-14	WTr	50	80	0	130
F39: NC3-14	WW	40	80	40	160
F39: NC3-14	ZR	60	80	40	180
F40: NC3-15	CCM	8	80	112	200
F40: NC3-15	KM	8	80	112	200
F40: NC3-15	SG	40	80	10	130
F40: NC3-15	SM	8	80	72	160
F40: NC3-15	WG	40	80	10	130
F40: NC3-15	WRa	70	80	30	180
F40: NC3-15	WTr	40	80	10	130
F40: NC3-15	WW	40	80	40	160
F40: NC3-15	ZR	30	80	70	180

## Düngestufenreferenz 4

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F41: NC4-1	CCM	240	0	0	240
F41: NC4-1	KM	240	0	0	240
F41: NC4-1	SG	140	0	0	140
F41: NC4-1	SM	180	0	0	180
F41: NC4-1	WG	140	0	0	140
F41: NC4-1	WRa	200	0	0	200
F41: NC4-1	WTr	140	0	0	140
F41: NC4-1	WW	180	0	0	180
F41: NC4-1	ZR	220	0	0	220
F42: NC4-2	CCM	200	0	40	240
F42: NC4-2	KM	200	0	40	240
F42: NC4-2	SG	100	0	40	140
F42: NC4-2	SM	140	0	40	180
F42: NC4-2	WG	100	0	40	140
F42: NC4-2	WRa	160	0	40	200
F42: NC4-2	WTr	100	0	40	140
F42: NC4-2	WW	140	0	40	180
F42: NC4-2	ZR	180	0	40	220
F43: NC4-3	CCM	160	0	80	240
F43: NC4-3	KM	160	0	80	240
F43: NC4-3	SG	60	0	80	140
F43: NC4-3	SM	100	0	80	180
F43: NC4-3	WG	60	0	80	140
F43: NC4-3	WRa	120	0	80	200
F43: NC4-3	WTr	60	0	80	140
F43: NC4-3	WW	100	0	80	180
F43: NC4-3	ZR	140	0	80	220
F44: NC4-4	CCM	120	0	120	240
F44: NC4-4	KM	120	0	120	240
F44: NC4-4	SG	60	0	80	140
F44: NC4-4	SM	60	0	120	180
F44: NC4-4	WG	60	0	80	140
F44: NC4-4	WRa	80	0	120	200
F44: NC4-4	WTr	60	0	80	140
F44: NC4-4	WW	60	0	120	180
F44: NC4-4	ZR	100	0	120	220
F45: NC4-5	CCM	100	0	140	240
F45: NC4-5	KM	100	0	140	240
F45: NC4-5	SG	60	0	80	140
F45: NC4-5	SM	40	0	140	180
F45: NC4-5	WG	60	0	80	140
F45: NC4-5	WRa	80	0	120	200
F45: NC4-5	WTr	60	0	80	140
F45: NC4-5	WW	40	0	140	180
F45: NC4-5	ZR	80	0	140	220

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F46: NC4-6	CCM	60	0	180	240
F46: NC4-6	KM	60	0	180	240
F46: NC4-6	SG	60	0	80	140
F46: NC4-6	SM	40	0	140	180
F46: NC4-6	WG	60	0	80	140
F46: NC4-6	WRa	80	0	120	200
F46: NC4-6	WTr	60	0	80	140
F46: NC4-6	WW	40	0	140	180
F46: NC4-6	ZR	40	0	180	220
F47: NC4-7	CCM	20	0	220	240
F47: NC4-7	KM	20	0	220	240
F47: NC4-7	SG	60	0	80	140
F47: NC4-7	SM	40	0	140	180
F47: NC4-7	WG	60	0	80	140
F47: NC4-7	WRa	80	0	120	200
F47: NC4-7	WTr	60	0	80	140
F47: NC4-7	WW	40	0	140	180
F47: NC4-7	ZR	40	0	180	220
F48: NC4-8	CCM	8	0	232	240
F48: NC4-8	KM	8	0	232	240
F48: NC4-8	SG	40	0	100	140
F48: NC4-8	SM	8	0	172	180
F48: NC4-8	WG	40	0	100	140
F48: NC4-8	WRa	70	0	130	200
F48: NC4-8	WTr	40	0	100	140
F48: NC4-8	WW	40	0	140	180
F48: NC4-8	ZR	30	0	190	220
F49: NC4-9	CCM	180	60	0	240
F49: NC4-9	KM	180	60	0	240
F49: NC4-9	SG	80	60	0	140
F49: NC4-9	SM	120	60	0	180
F49: NC4-9	WG	80	60	0	140
F49: NC4-9	WRa	140	60	0	200
F49: NC4-9	WTr	80	60	0	140
F49: NC4-9	WW	120	60	0	180
F49: NC4-9	ZR	160	60	0	220
F50: NC4-10	CCM	140	60	40	240
F50: NC4-10	KM	140	60	40	240
F50: NC4-10	SG	40	60	40	140
F50: NC4-10	SM	80	60	40	180
F50: NC4-10	WG	40	60	40	140
F50: NC4-10	WRa	100	60	40	200
F50: NC4-10	WTr	40	60	40	140
F50: NC4-10	WW	80	60	40	180
F50: NC4-10	ZR	120	60	40	220

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F51: NC4-11	CCM	100	60	80	240
F51: NC4-11	KM	100	60	80	240
F51: NC4-11	SG	40	60	40	140
F51: NC4-11	SM	40	60	80	180
F51: NC4-11	WG	40	60	40	140
F51: NC4-11	WRa	100	60	40	200
F51: NC4-11	WTr	40	60	40	140
F51: NC4-11	WW	40	60	80	180
F51: NC4-11	ZR	80	60	80	220
F52: NC4-12	CCM	60	60	120	240
F52: NC4-12	KM	60	60	120	240
F52: NC4-12	SG	40	60	40	140
F52: NC4-12	SM	40	60	80	180
F52: NC4-12	WG	40	60	40	140
F52: NC4-12	WRa	100	60	40	200
F52: NC4-12	WTr	40	60	40	140
F52: NC4-12	WW	40	60	80	180
F52: NC4-12	ZR	40	60	120	220
F53: NC4-13	CCM	20	60	160	240
F53: NC4-13	KM	20	60	160	240
F53: NC4-13	SG	40	60	40	140
F53: NC4-13	SM	40	60	80	180
F53: NC4-13	WG	40	60	40	140
F53: NC4-13	WRa	100	60	40	200
F53: NC4-13	WTr	40	60	40	140
F53: NC4-13	WW	40	60	80	180
F53: NC4-13	ZR	40	60	120	220
F54: NC4-14	CCM	8	60	172	240
F54: NC4-14	KM	8	60	172	240
F54: NC4-14	SG	40	60	40	140
F54: NC4-14	SM	8	60	112	180
F54: NC4-14	WG	40	60	40	140
F54: NC4-14	WRa	70	60	70	200
F54: NC4-14	WTr	40	60	40	140
F54: NC4-14	WW	40	60	80	180
F54: NC4-14	ZR	30	60	130	220
F55: NC4-15	CCM	160	80	0	240
F55: NC4-15	KM	160	80	0	240
F55: NC4-15	SG	60	80	0	140
F55: NC4-15	SM	100	80	0	180
F55: NC4-15	WG	60	80	0	140
F55: NC4-15	WRa	120	80	0	200
F55: NC4-15	WTr	60	80	0	140
F55: NC4-15	WW	100	80	0	180
F55: NC4-15	ZR	140	80	0	220

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F56: NC4-16	CCM	120	80	40	240
F56: NC4-16	KM	120	80	40	240
F56: NC4-16	SG	60	80	0	140
F56: NC4-16	SM	60	80	40	180
F56: NC4-16	WG	60	80	0	140
F56: NC4-16	WRa	80	80	40	200
F56: NC4-16	WTr	60	80	0	140
F56: NC4-16	WW	60	80	40	180
F56: NC4-16	ZR	100	80	40	220
F57: NC4-17	CCM	80	80	80	240
F57: NC4-17	KM	80	80	80	240
F57: NC4-17	SG	60	80	0	140
F57: NC4-17	SM	20	80	80	180
F57: NC4-17	WG	60	80	0	140
F57: NC4-17	WRa	80	80	40	200
F57: NC4-17	WTr	60	80	0	140
F57: NC4-17	WW	60	80	40	180
F57: NC4-17	ZR	60	80	80	220
F58: NC4-18	CCM	40	80	120	240
F58: NC4-18	KM	40	80	120	240
F58: NC4-18	SG	60	80	0	140
F58: NC4-18	SM	20	80	80	180
F58: NC4-18	WG	60	80	0	140
F58: NC4-18	WRa	80	80	40	200
F58: NC4-18	WTr	60	80	0	140
F58: NC4-18	WW	60	80	40	180
F58: NC4-18	ZR	60	80	80	220
F59: NC4-19	CCM	8	80	152	240
F59: NC4-19	KM	8	80	152	240
F59: NC4-19	SG	40	80	20	140
F59: NC4-19	SM	8	80	92	180
F59: NC4-19	WG	40	80	20	140
F59: NC4-19	WRa	70	80	50	200
F59: NC4-19	WTr	40	80	20	140
F59: NC4-19	WW	40	80	60	180
F59: NC4-19	ZR	30	80	110	220

## Düngestufenreferenz 5

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F60: NC5-1	CCM	280	0	0	280
F60: NC5-1	KM	280	0	0	280
F60: NC5-1	SG	150	0	0	150
F60: NC5-1	SM	200	0	0	200
F60: NC5-1	WG	150	0	0	150
F60: NC5-1	WRa	240	0	0	240
F60: NC5-1	WTr	150	0	0	150
F60: NC5-1	WW	200	0	0	200
F60: NC5-1	ZR	280	0	0	280
F61: NC5-2	CCM	240	0	40	280
F61: NC5-2	KM	240	0	40	280
F61: NC5-2	SG	110	0	40	150
F61: NC5-2	SM	160	0	40	200
F61: NC5-2	WG	110	0	40	150
F61: NC5-2	WRa	200	0	40	240
F61: NC5-2	WTr	110	0	40	150
F61: NC5-2	WW	160	0	40	200
F61: NC5-2	ZR	240	0	40	280
F62: NC5-3	CCM	200	0	80	280
F62: NC5-3	KM	200	0	80	280
F62: NC5-3	SG	70	0	80	150
F62: NC5-3	SM	120	0	80	200
F62: NC5-3	WG	70	0	80	150
F62: NC5-3	WRa	160	0	80	240
F62: NC5-3	WTr	70	0	80	150
F62: NC5-3	WW	120	0	80	200
F62: NC5-3	ZR	200	0	80	280
F63: NC5-4	CCM	160	0	120	280
F63: NC5-4	KM	160	0	120	280
F63: NC5-4	SG	70	0	80	150
F63: NC5-4	SM	80	0	120	200
F63: NC5-4	WG	70	0	80	150
F63: NC5-4	WRa	120	0	120	240
F63: NC5-4	WTr	70	0	80	150
F63: NC5-4	WW	80	0	120	200
F63: NC5-4	ZR	160	0	120	280
F64: NC5-5	CCM	160	0	120	280
F64: NC5-5	KM	160	0	120	280
F64: NC5-5	SG	70	0	80	150
F64: NC5-5	SM	80	0	120	200
F64: NC5-5	WG	70	0	80	150
F64: NC5-5	WRa	120	0	120	240
F64: NC5-5	WTr	70	0	80	150
F64: NC5-5	WW	40	0	160	200
F64: NC5-5	ZR	160	0	120	280

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F65: NC5-6	CCM	120	0	160	280
F65: NC5-6	KM	120	0	160	280
F65: NC5-6	SG	70	0	80	150
F65: NC5-6	SM	40	0	160	200
F65: NC5-6	WG	70	0	80	150
F65: NC5-6	WRa	80	0	160	240
F65: NC5-6	WTr	70	0	80	150
F65: NC5-6	WW	40	0	160	200
F65: NC5-6	ZR	120	0	160	280
F66: NC5-7	CCM	80	0	200	280
F66: NC5-7	KM	80	0	200	280
F66: NC5-7	SG	70	0	80	150
F66: NC5-7	SM	40	0	160	200
F66: NC5-7	WG	70	0	80	150
F66: NC5-7	WRa	80	0	160	240
F66: NC5-7	WTr	70	0	80	150
F66: NC5-7	WW	40	0	160	200
F66: NC5-7	ZR	80	0	200	280
F67: NC5-8	CCM	40	0	240	280
F67: NC5-8	KM	40	0	240	280
F67: NC5-8	SG	70	0	80	150
F67: NC5-8	SM	40	0	160	200
F67: NC5-8	WG	70	0	80	150
F67: NC5-8	WRa	80	0	160	240
F67: NC5-8	WTr	70	0	80	150
F67: NC5-8	WW	40	0	160	200
F67: NC5-8	ZR	40	0	240	280
F68: NC5-9	CCM	8	0	272	280
F68: NC5-9	KM	8	0	272	280
F68: NC5-9	SG	40	0	110	150
F68: NC5-9	SM	8	0	192	200
F68: NC5-9	WG	40	0	110	150
F68: NC5-9	WRa	70	0	170	240
F68: NC5-9	WTr	40	0	110	150
F68: NC5-9	WW	40	0	160	200
F68: NC5-9	ZR	30	0	250	280
F69: NC5-10	CCM	220	60	0	280
F69: NC5-10	KM	220	60	0	280
F69: NC5-10	SG	90	60	0	150
F69: NC5-10	SM	140	60	0	200
F69: NC5-10	WG	90	60	0	150
F69: NC5-10	WRa	180	60	0	240
F69: NC5-10	WTr	90	60	0	150
F69: NC5-10	WW	140	60	0	200
F69: NC5-10	ZR	220	60	0	280

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F70: NC5-11	CCM	180	60	40	280
F70: NC5-11	KM	180	60	40	280
F70: NC5-11	SG	50	60	40	150
F70: NC5-11	SM	100	60	40	200
F70: NC5-11	WG	50	60	40	150
F70: NC5-11	WRa	140	60	40	240
F70: NC5-11	WTr	50	60	40	150
F70: NC5-11	WW	100	60	40	200
F70: NC5-11	ZR	180	60	40	280
F71: NC5-12	CCM	140	60	80	280
F71: NC5-12	KM	140	60	80	280
F71: NC5-12	SG	50	60	40	150
F71: NC5-12	SM	60	60	80	200
F71: NC5-12	WG	50	60	40	150
F71: NC5-12	WRa	100	60	80	240
F71: NC5-12	WTr	50	60	40	150
F71: NC5-12	WW	60	60	80	200
F71: NC5-12	ZR	140	60	80	280
F72: NC5-13	CCM	100	60	120	280
F72: NC5-13	KM	100	60	120	280
F72: NC5-13	SG	50	60	40	150
F72: NC5-13	SM	20	60	120	200
F72: NC5-13	WG	50	60	40	150
F72: NC5-13	WRa	100	60	80	240
F72: NC5-13	WTr	50	60	40	150
F72: NC5-13	WW	60	60	80	200
F72: NC5-13	ZR	100	60	120	280
F73: NC5-14	CCM	60	60	160	280
F73: NC5-14	KM	60	60	160	280
F73: NC5-14	SG	50	60	40	150
F73: NC5-14	SM	20	60	120	200
F73: NC5-14	WG	50	60	40	150
F73: NC5-14	WRa	60	60	120	240
F73: NC5-14	WTr	50	60	40	150
F73: NC5-14	WW	60	60	80	200
F73: NC5-14	ZR	60	60	160	280
F74: NC5-15	CCM	20	60	200	280
F74: NC5-15	KM	20	60	200	280
F74: NC5-15	SG	50	60	40	150
F74: NC5-15	SM	20	60	120	200
F74: NC5-15	WG	50	60	40	150
F74: NC5-15	WRa	60	60	120	240
F74: NC5-15	WTr	50	60	40	150
F74: NC5-15	WW	60	60	80	200
F74: NC5-15	ZR	60	60	160	280

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F75: NC5-16	CCM	8	60	212	280
F75: NC5-16	KM	8	60	212	280
F75: NC5-16	SG	40	60	50	150
F75: NC5-16	SM	8	60	132	200
F75: NC5-16	WG	40	60	50	150
F75: NC5-16	WRa	70	60	110	240
F75: NC5-16	WTr	40	60	50	150
F75: NC5-16	WW	40	60	100	200
F75: NC5-16	ZR	30	60	190	280
F76: NC5-17	CCM	200	80	0	280
F76: NC5-17	KM	200	80	0	280
F76: NC5-17	SG	70	80	0	150
F76: NC5-17	SM	120	80	0	200
F76: NC5-17	WG	70	80	0	150
F76: NC5-17	WRa	160	80	0	240
F76: NC5-17	WTr	70	80	0	150
F76: NC5-17	WW	120	80	0	200
F76: NC5-17	ZR	200	80	0	280
F77: NC5-18	CCM	160	80	40	280
F77: NC5-18	KM	160	80	40	280
F77: NC5-18	SG	30	80	40	150
F77: NC5-18	SM	80	80	40	200
F77: NC5-18	WG	70	80	0	150
F77: NC5-18	WRa	120	80	40	240
F77: NC5-18	WTr	30	80	40	150
F77: NC5-18	WW	80	80	40	200
F77: NC5-18	ZR	160	80	40	280
F78: NC5-19	CCM	120	80	80	280
F78: NC5-19	KM	120	80	80	280
F78: NC5-19	SG	70	80	0	150
F78: NC5-19	SM	40	80	80	200
F78: NC5-19	WG	70	80	0	150
F78: NC5-19	WRa	80	80	80	240
F78: NC5-19	WTr	70	80	0	150
F78: NC5-19	WW	40	80	80	200
F78: NC5-19	ZR	120	80	80	280
F79: NC5-20	CCM	80	80	120	280
F79: NC5-20	KM	80	80	120	280
F79: NC5-20	SG	70	80	0	150
F79: NC5-20	SM	40	80	80	200
F79: NC5-20	WG	70	80	0	150
F79: NC5-20	WRa	80	80	80	240
F79: NC5-20	WTr	70	80	0	150
F79: NC5-20	WW	40	80	80	200
F79: NC5-20	ZR	80	80	120	280

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F80: NC5-21	CCM	40	80	160	280
F80: NC5-21	KM	40	80	160	280
F80: NC5-21	SG	70	80	0	150
F80: NC5-21	SM	40	80	80	200
F80: NC5-21	WG	70	80	0	150
F80: NC5-21	WRa	80	80	80	240
F80: NC5-21	WTr	70	80	0	150
F80: NC5-21	WW	40	80	80	200
F80: NC5-21	ZR	40	80	160	280
F81: NC5-22	CCM	40	80	160	280
F81: NC5-22	KM	40	80	160	280
F81: NC5-22	SG	70	80	0	150
F81: NC5-22	SM	40	80	80	200
F81: NC5-22	WG	70	80	0	150
F81: NC5-22	WRa	80	80	80	240
F81: NC5-22	WTr	70	80	0	150
F81: NC5-22	WW	40	80	80	200
F81: NC5-22	ZR	40	80	160	280
F82: NC5-23	CCM	8	80	192	280
F82: NC5-23	KM	8	80	192	280
F82: NC5-23	SG	40	80	30	150
F82: NC5-23	SM	8	80	112	200
F82: NC5-23	WG	40	80	30	150
F82: NC5-23	WRa	70	80	90	240
F82: NC5-23	WTr	40	80	30	150
F82: NC5-23	WW	40	80	80	200
F82: NC5-23	ZR	30	80	170	280

## Düngestufenreferenz 6

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F83: NC6-1	CCM	300	0	0	300
F83: NC6-1	KM	300	0	0	300
F83: NC6-1	SG	160	0	0	160
F83: NC6-1	SM	240	0	0	240
F83: NC6-1	WG	160	0	0	160
F83: NC6-1	WRa	280	0	0	280
F83: NC6-1	WTr	160	0	0	160
F83: NC6-1	WW	220	0	0	220
F83: NC6-1	ZR	360	0	0	360
F84: NC6-2	CCM	260	0	40	300
F84: NC6-2	KM	260	0	40	300
F84: NC6-2	SG	120	0	40	160
F84: NC6-2	SM	200	0	40	240
F84: NC6-2	WG	120	0	40	160
F84: NC6-2	WRa	240	0	40	280
F84: NC6-2	WTr	120	0	40	160
F84: NC6-2	WW	180	0	40	220
F84: NC6-2	ZR	320	0	40	360
F85: NC6-3	CCM	220	0	80	300
F85: NC6-3	KM	220	0	80	300
F85: NC6-3	SG	80	0	80	160
F85: NC6-3	SM	160	0	80	240
F85: NC6-3	WG	80	0	80	160
F85: NC6-3	WRa	200	0	80	280
F85: NC6-3	WTr	80	0	80	160
F85: NC6-3	WW	140	0	80	220
F85: NC6-3	ZR	280	0	80	360
F86: NC6-4	CCM	180	0	120	300
F86: NC6-4	KM	180	0	120	300
F86: NC6-4	SG	40	0	120	160
F86: NC6-4	SM	120	0	120	240
F86: NC6-4	WG	40	0	120	160
F86: NC6-4	WRa	160	0	120	280
F86: NC6-4	WTr	40	0	120	160
F86: NC6-4	WW	100	0	120	220
F86: NC6-4	ZR	240	0	120	360
F87: NC6-5	CCM	140	0	160	300
F87: NC6-5	KM	140	0	160	300
F87: NC6-5	SG	40	0	120	160
F87: NC6-5	SM	80	0	160	240
F87: NC6-5	WG	40	0	120	160
F87: NC6-5	WRa	120	0	160	280
F87: NC6-5	WTr	40	0	120	160
F87: NC6-5	WW	60	0	160	220
F87: NC6-5	ZR	200	0	160	360

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F88: NC6-6	CCM	100	0	200	300
F88: NC6-6	KM	100	0	200	300
F88: NC6-6	SG	40	0	120	160
F88: NC6-6	SM	40	0	200	240
F88: NC6-6	WG	40	0	120	160
F88: NC6-6	WRa	80	0	200	280
F88: NC6-6	WTr	40	0	120	160
F88: NC6-6	WW	60	0	160	220
F88: NC6-6	ZR	160	0	200	360
F89: NC6-7	CCM	60	0	240	300
F89: NC6-7	KM	60	0	240	300
F89: NC6-7	SG	40	0	120	160
F89: NC6-7	SM	40	0	200	240
F89: NC6-7	WG	40	0	120	160
F89: NC6-7	WRa	80	0	200	280
F89: NC6-7	WTr	40	0	120	160
F89: NC6-7	WW	60	0	160	220
F89: NC6-7	ZR	120	0	240	360
F90: NC6-8	CCM	20	0	280	300
F90: NC6-8	KM	20	0	280	300
F90: NC6-8	SG	40	0	120	160
F90: NC6-8	SM	40	0	200	240
F90: NC6-8	WG	40	0	120	160
F90: NC6-8	WRa	80	0	200	280
F90: NC6-8	WTr	40	0	120	160
F90: NC6-8	WW	60	0	160	220
F90: NC6-8	ZR	80	0	280	360
F91: NC6-9	CCM	20	0	280	300
F91: NC6-9	KM	20	0	280	300
F91: NC6-9	SG	40	0	120	160
F91: NC6-9	SM	40	0	200	240
F91: NC6-9	WG	40	0	120	160
F91: NC6-9	WRa	80	0	200	280
F91: NC6-9	WTr	40	0	120	160
F91: NC6-9	WW	60	0	160	220
F91: NC6-9	ZR	40	0	320	360
F92: NC6-10	CCM	8	0	292	300
F92: NC6-10	KM	8	0	292	300
F92: NC6-10	SG	40	0	120	160
F92: NC6-10	SM	8	0	232	240
F92: NC6-10	WG	40	0	120	160
F92: NC6-10	WRa	70	0	210	280
F92: NC6-10	WTr	40	0	120	160
F92: NC6-10	WW	40	0	180	220
F92: NC6-10	ZR	30	0	330	360

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F93: NC6-11	CCM	240	60	0	300
F93: NC6-11	KM	240	60	0	300
F93: NC6-11	SG	100	60	0	160
F93: NC6-11	SM	180	60	0	240
F93: NC6-11	WG	100	60	0	160
F93: NC6-11	WRa	220	60	0	280
F93: NC6-11	WTr	100	60	0	160
F93: NC6-11	WW	160	60	0	220
F93: NC6-11	ZR	300	60	0	360
F94: NC6-12	CCM	200	60	40	300
F94: NC6-12	KM	200	60	40	300
F94: NC6-12	SG	60	60	40	160
F94: NC6-12	SM	140	60	40	240
F94: NC6-12	WG	60	60	40	160
F94: NC6-12	WRa	180	60	40	280
F94: NC6-12	WTr	60	60	40	160
F94: NC6-12	WW	120	60	40	220
F94: NC6-12	ZR	260	60	40	360
F95: NC6-13	CCM	160	60	80	300
F95: NC6-13	KM	160	60	80	300
F95: NC6-13	SG	60	60	40	160
F95: NC6-13	SM	100	60	80	240
F95: NC6-13	WG	60	60	40	160
F95: NC6-13	WRa	140	60	80	280
F95: NC6-13	WTr	60	60	40	160
F95: NC6-13	WW	80	60	80	220
F95: NC6-13	ZR	220	60	80	360
F96: NC6-14	CCM	120	60	120	300
F96: NC6-14	KM	120	60	120	300
F96: NC6-14	SG	60	60	40	160
F96: NC6-14	SM	60	60	120	240
F96: NC6-14	WG	60	60	40	160
F96: NC6-14	WRa	100	60	120	280
F96: NC6-14	WTr	60	60	40	160
F96: NC6-14	WW	40	60	120	220
F96: NC6-14	ZR	180	60	120	360
F97: NC6-15	CCM	80	60	160	300
F97: NC6-15	KM	80	60	160	300
F97: NC6-15	SG	60	60	40	160
F97: NC6-15	SM	20	60	160	240
F97: NC6-15	WG	60	60	40	160
F97: NC6-15	WRa	100	60	120	280
F97: NC6-15	WTr	60	60	40	160
F97: NC6-15	WW	40	60	120	220
F97: NC6-15	ZR	140	60	160	360

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F98: NC6-16	CCM	40	60	200	300
F98: NC6-16	KM	40	60	200	300
F98: NC6-16	SG	60	60	40	160
F98: NC6-16	SM	20	60	160	240
F98: NC6-16	WG	60	60	40	160
F98: NC6-16	WRa	100	60	120	280
F98: NC6-16	WTr	60	60	40	160
F98: NC6-16	WW	40	60	120	220
F98: NC6-16	ZR	100	60	200	360
F99: NC6-17	CCM	40	60	200	300
F99: NC6-17	KM	40	60	200	300
F99: NC6-17	SG	60	60	40	160
F99: NC6-17	SM	20	60	160	240
F99: NC6-17	WG	60	60	40	160
F99: NC6-17	WRa	100	60	120	280
F99: NC6-17	WTr	60	60	40	160
F99: NC6-17	WW	40	60	120	220
F99: NC6-17	ZR	60	60	240	360
F100: NC6-18	CCM	8	60	232	300
F100: NC6-18	KM	8	60	232	300
F100: NC6-18	SG	40	60	60	160
F100: NC6-18	SM	8	60	172	240
F100: NC6-18	WG	40	60	60	160
F100: NC6-18	WRa	70	60	150	280
F100: NC6-18	WTr	40	60	60	160
F100: NC6-18	WW	40	60	120	220
F100: NC6-18	ZR	30	60	270	360
F101: NC6-19	CCM	220	80	0	300
F101: NC6-19	KM	220	80	0	300
F101: NC6-19	SG	80	80	0	160
F101: NC6-19	SM	160	80	0	240
F101: NC6-19	WG	80	80	0	160
F101: NC6-19	WRa	200	80	0	280
F101: NC6-19	WTr	80	80	0	160
F101: NC6-19	WW	140	80	0	220
F101: NC6-19	ZR	280	80	0	360
F102: NC6-20	CCM	180	80	40	300
F102: NC6-20	KM	180	80	40	300
F102: NC6-20	SG	40	80	40	160
F102: NC6-20	SM	120	80	40	240
F102: NC6-20	WG	40	80	40	160
F102: NC6-20	WRa	160	80	40	280
F102: NC6-20	WTr	40	80	40	160
F102: NC6-20	WW	100	80	40	220
F102: NC6-20	ZR	240	80	40	360

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F103: NC6-21	CCM	140	80	80	300
F103: NC6-21	KM	140	80	80	300
F103: NC6-21	SG	40	80	40	160
F103: NC6-21	SM	80	80	80	240
F103: NC6-21	WG	40	80	40	160
F103: NC6-21	WRa	120	80	80	280
F103: NC6-21	WTr	40	80	40	160
F103: NC6-21	WW	60	80	80	220
F103: NC6-21	ZR	200	80	80	360
F104: NC6-22	CCM	100	80	120	300
F104: NC6-22	KM	100	80	120	300
F104: NC6-22	SG	40	80	40	160
F104: NC6-22	SM	40	80	120	240
F104: NC6-22	WG	40	80	40	160
F104: NC6-22	WRa	80	80	120	280
F104: NC6-22	WTr	40	80	40	160
F104: NC6-22	WW	60	80	80	220
F104: NC6-22	ZR	160	80	120	360
F105: NC6-23	CCM	60	80	160	300
F105: NC6-23	KM	60	80	160	300
F105: NC6-23	SG	40	80	40	160
F105: NC6-23	SM	40	80	120	240
F105: NC6-23	WG	40	80	40	160
F105: NC6-23	WRa	80	80	120	280
F105: NC6-23	WTr	40	80	40	160
F105: NC6-23	WW	60	80	80	220
F105: NC6-23	ZR	120	80	160	360
F106: NC6-24	CCM	20	80	200	300
F106: NC6-24	KM	20	80	200	300
F106: NC6-24	SG	40	80	40	160
F106: NC6-24	SM	40	80	120	240
F106: NC6-24	WG	40	80	40	160
F106: NC6-24	WRa	80	80	120	280
F106: NC6-24	WTr	40	80	40	160
F106: NC6-24	WW	60	80	80	220
F106: NC6-24	ZR	80	80	200	360
F107: NC6-25	CCM	20	80	200	300
F107: NC6-25	KM	20	80	200	300
F107: NC6-25	SG	40	80	40	160
F107: NC6-25	SM	40	80	120	240
F107: NC6-25	WG	40	80	40	160
F107: NC6-25	WRa	80	80	120	280
F107: NC6-25	WTr	40	80	40	160
F107: NC6-25	WW	60	80	80	220
F107: NC6-25	ZR	40	80	240	360

Titel	Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
F108: NC6-26	CCM	8	80	212	300
F108: NC6-26	KM	8	80	212	300
F108: NC6-26	SG	40	80	40	160
F108: NC6-26	SM	8	80	152	240
F108: NC6-26	WG	40	80	40	160
F108: NC6-26	WRa	70	80	130	280
F108: NC6-26	WTr	40	80	40	160
F108: NC6-26	WW	40	80	100	220
F108: NC6-26	ZR	30	80	250	360

**Düngestufenreferenz Ist KTBL (Titel: F0)**

Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
CCM	79	72	0	151
KM	79	72	0	151
SG	84	72	0	156
SM	79	96	72	248
WG	113	0	0	113
WRa	119	0	72	191
WTr	113	0	0	113
WW	173	0	72	245
ZR	108	0	72	180

**Düngestufenreferenz Null**

Frucht	Mineralisch	Herbst	Frühjahr	Gesamt
CCM	0	0	0	0
KM	0	0	0	0
SG	0	0	0	0
SM	0	0	0	0
WG	0	0	0	0
WRa	0	0	0	0
WTr	0	0	0	0
WW	0	0	0	0
ZR	0	0	0	0

## 12.2. Typische Fruchtfolgen in den Boden-Klima-Regionen NRW

### Rotationen – BKR 129

Region	ID	Rotation
129	1	WW-WG-WRa
129	2	WW-WG-SM
129	3	WW-SG-WTr
129	4	WW-WG-SM-WTr
129	5	WW-WG-WW-WRa
129	6	WW-WW-ZR
129	7	WW-WG-ZR
129	8	WW-WG-WW-ZR
129	9	WG-SM-SM
129	10	WW-SM-SM
129	11	WW-SM
129	12	WW-SG-SM
129	13	WW-SM-WW-WTr
129	14	WW-SG-WRa

### Rotationen – BKR 134

Region	ID	Rotation
134	1	WW-WG-WRa
134	2	WW-SM-SM
134	3	WW-SG-SM
134	4	WTr-WRa-SM

### Rotationen – BKR 141

Region	ID	Rotation
141	1	WW-WG-ZR
141	2	WW-WW-WRa
141	3	WW-SM-ZR
141	4	WW-SM-SM
141	5	WW-KM-WW-ZR
141	6	WW-SM-WW-ZR
141	7	WW-WG-WW-ZR
141	8	WW-SM
141	9	WG-SM-SM
141	10	WW-WW-ZR
141	11	WW-WG-SM-ZR
141	12	WW-WG-WW-WRa
141	13	WW-WG-SM
141	14	WW-WG-WRa

### Rotationen – BKR 142

Region	ID	Rotation
142	1	WW-WG-WRa
142	2	WW-KM-ZR
142	3	WW-WG-SM
142	4	WW-SM-ZR-SM
142	5	WW-WG-CCM
142	6	WW-WG-SM-ZR
142	7	WW-WG-WW-CCM
142	8	WW-WW-ZR
142	9	WW-SM-SM
142	10	WG-SM-SM
142	11	WW-SM
142	12	WW-WW-SM
142	13	WW-WG-SM-SM
142	14	WW-WG-SM-CCM
142	15	WW-WG-WTr-SM
142	16	WW-WRa-WG-SM
142	17	WW-WG-ZR

### Rotationen – BKR 143

Region	ID	Rotation
143	4	WW-WG-SM-SM
143	5	WW-WG-WTr-WRa
143	6	WW-WG-WRa-KM
143	7	WW-WG-WW-WRa
143	8	WW-WW-ZR
143	9	WW-SM-SM
143	10	WG-SM-SM
143	11	WW-SM
143	12	WW-WG-WW-SM
143	13	WW-WG-WRa-SM
143	14	WW-WG-CCM-SM

## Rotationen – BKR 146

Region	ID	Rotation
146	1	WTr-WG-SM-SM
146	2	WTr-WG-CCM
146	3	WW-WTr-CCM-SM

Region	ID	Rotation
147	1	WW-WG-WRa
147	2	WW-WG-SM
147	3	WTr-WG-ZR

## Rotationen – BKR 148

Region	ID	Rotation
148	1	WW-KM-KM
148	2	KM
148	3	WG-KM-KM
148	4	WW-WG-SM-SM
148	5	WW-WG-CCM
148	6	WW-WG-CCM-CCM
148	7	WG-CCM-CCM-SM
148	8	WW-WG-CCM-KM
148	9	WW-SM-SM
148	10	WG-SM-SM
148	11	WW-SM
148	12	WTr-SM-SM
148	13	WTr-WG-SM-SM
148	14	WW-WG-SM-CCM
148	15	WTr-WG-CCM-SM
148	16	WTr-KM-ZR-KM
148	17	WW-SM-WTr-SM
148	18	WTr-SM-SM
148	19	WTr-WG-SM-SM
148	20	WTr-WG-SM
148	21	WW-WG-CCM-SM

## Rotationen – BKR 191

Region	ID	Rotation
191	1	WW-WG-WRa
191	2	WW-WG-SM
191	3	WW-WTr-SM-SM

### 13. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SIMPLACE Oberfläche am Beispiel der Modelling Solution „Düngeszenarien für Fruchtfolgen“ .....	3
Abbildung 2: Beispielhafte Ausgabe der SIMPLACE Oberfläche.....	3
Abbildung 3: Typische Systemumgebung des SIMPLACE Modellersystems.....	4
Abbildung 4: SIMPLACE Plug-In Struktur.....	4
Abbildung 5: Struktureller Ablauf der Modellsimulation incl. Vor- und Nachbereitung.....	5
Abbildung 6: Übersicht die Boden-Klima-Regionen in Nordrhein-Westfalen (nach Roßberg <i>et al.</i> 2007) .....	7
Abbildung 7: Unterschiede im mittleren Jahresniederschlag (in mm) und im Tonanteil (in %) der Oberböden in fünf der neun Boden-Klima-Regionen.....	10
Abbildung 8: Ergebnisse der Modellkalibrierung für die Erträge (in absoluter Trockenmasse) der wichtigsten Fruchtarten am Beispiel einzelner Regionen (Blaue Balken: Beobachtung, Rote Balken: nach Kalibrierung).....	13
Abbildung 9: Ergebnisse der Modellkalibrierung für die Stickstoffentzüge der wichtigsten Fruchtarten am Beispiel einzelner Regionen .....	14
Abbildung 10: Modellverknüpfung SIMPLACE - FARMDyn .....	16
Abbildung 11: Mittlerer simulierter Silomaisertrag (in kg ha <sup>-1</sup> ) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil von mineralischem (Nchem) und organischem (Nitrogen_Frühjahr (a) bzw. Nitrogen_Herbst (b)) Stickstoff in kg ha <sup>-1</sup> in Form von Gülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (WW-SM-SM) ohne Rückführung der Ernterückstände und ohne Anbau einer Winterzwischenfrucht vor Silomais. Dargestellt sind Düngeszenarien, in denen mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge über Mineraldünger ausgebracht wurde. Die Wirkung der Ausbringung des organischen Stickstoffs im Frühjahr bzw. Herbst ist in der Teilabbildung (a) bzw. (b) dargestellt. (N.B. obwohl die Ausbringung von Gülle auf Silomais im Herbst nach DÜV2017 ohne Zwischenfrüchte (Abbildung 11b) nicht möglich ist, wurde dieses Szenario zu Vergleichszwecken mit dargestellt).....	18
Abbildung 12: Mittlerer simulierter Winterweizenertrag (in kg ha <sup>-1</sup> ) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil von mineralischem (Nchem) und organischem (Nitrogen_Frühjahr (a) bzw. Nitrogen_Herbst (b)) Stickstoff in kg ha <sup>-1</sup> in Form von Gülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-	

Silomais-Silomais (WW-SM-SM) ohne Rückführung der Ernterückstände und ohne Anbau einer Winterzwischenfrucht vor Silomais (siehe auch Abbildung 11) .....	19
Abbildung 13: Mittlerer simulierter Zuckerrübenenertrag (in kg ha <sup>-1</sup> ) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil von mineralischem (Nchem) und organischem (Nitrogen_Frühjahr (a) bzw. Nitrogen_Herbst (b)) Stickstoff in kg ha <sup>-1</sup> in Form von Rindergülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben (WW-WG-ZR) ohne Rückführung der Ernterückstände und ohne Anbau einer Winterzwischenfrucht vor Zuckerrüben (siehe auch Abbildung 11) .....	21
Abbildung 14: Mittlere simulierte Menge an ausgewaschenem Stickstoff (in kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) über acht Jahre bei steigender Gesamtstickstoffgabe (in kg N ha <sup>-1</sup> ) unter Silomais auf drei typischen Ackerstandorten der Region 141 (Börde/Niederungslagen) (a) Der Datensatz enthält nur jene Düngerszenarien, in denen >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus mineralischem Dünger (KAS) stammt, der übrige Stickstoff wurde in Form von Gülle im Frühjahr (Nitrogen_Frühjahr) oder Herbst (Nitrogen_Herbst) ausgebracht. (b) Der Datensatz enthält nur jene Düngerszenarien, in denen >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus organischem Dünger (Rindergülle) stammt, der übrige Stickstoff wurde in Form von mineralischem Stickstoffdünger ausgebracht, wobei der Ausbringungszeitpunkt des organischen Düngers entweder im Frühjahr (Nitrogen_Frühjahr) oder im Herbst (Nitrogen_Herbst) lag. In allen Fällen wurde Silomais in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais angebaut (WW-SM-SM), wobei in der Fruchtfolge nie Winterzwischenfrüchte angebaut wurden und die Ernterückstände beim Winterweizen jedes Jahr abgefahren wurden (N.B. obwohl die Ausbringung von Gülle auf Silomais im Herbst nach DÜV2017 ohne Strohdüngung nicht möglich ist, wurde dieses Szenario zu Vergleichszwecken mit dargestellt) .....	23
Abbildung 15: Mittlere simulierte Menge an ausgewaschenem Stickstoff (in kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) über acht Jahre bei steigender Gesamtstickstoffgabe (in kg N ha <sup>-1</sup> ) unter Winterweizen auf drei typischen Ackerstandorten der Region 141 (Börde/Niederungslagen) (a) >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus mineralischem Dünger (KAS) (b) >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus organischem Dünger (Rindergülle) (siehe auch Abbildung 14) .....	25
Abbildung 16: Mittlere simulierte Menge an ausgewaschenem Stickstoff (in kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) über acht Jahre bei steigender Gesamtstickstoffgabe (in kg N ha <sup>-1</sup> ) unter Zuckerrüben auf drei typischen Ackerstandorten der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben (a) >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus mineralischem Dünger (KAS) (b) >70% des applizierten Gesamtstickstoffs aus organischem Dünger (Rindergülle) (siehe auch Abbildung 14) .....	26

Abbildung 17: Mittlere simulierte Menge an ausgewaschenem Stickstoff (in kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) in 1.65 bis 2 m Bodentiefe über acht Jahre über alle Fruchtarten und Düngeszenarien in den jeweiligen Boden-Klima-Regionen in NRW in Abhängigkeit von der Bodenartenabfolge im Bodenprofil bei einer mittleren Durchwurzelungstiefe von einem Meter .....	27
Abbildung 18: Mittlere Gesamtstickstoffgaben und mittlerer simulierter Anteil der Stickstoffauswaschung (in kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) an der Gesamtstickstoffgabe über acht Jahre über alle Düngeszenarien und Standorte in NRW in Abhängigkeit von der Fruchtart bei einer mittleren Durchwurzelungstiefe von einem Meter .....	28
Abbildung 19: Mittlere simulierte Stickstoffauswaschung (in kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) über acht Jahre für die wichtigsten Fruchtarten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen), gemittelt über alle Düngeszenarien (rote Balken) bzw. gemittelt über die vom ökonomischen Betriebsmodell FARMDyn ausgewählten Düngeszenarien (blaue Balken) .....	29
Abbildung 20: Mittlere simulierte agronomischen Düngereffizienz im Silomais (in kg FM kg N <sup>-1</sup> ) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil an organischem (Nitrogen_Frühjahr bzw. Nitrogen_Herbst) Stickstoff in kg ha <sup>-1</sup> in Form von Gülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (WW-SM-SM) ohne Rückführung der Ernterückstände und ohne Anbau einer Winterzwischenfrucht vor Silomais. Dargestellt sind Düngeszenarien, in denen (a) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge über Mineraldünger ausgebracht wurde oder (b) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge in organischer Form (Rindergülle) ausgebracht wurde (N.B. obwohl die Ausbringung von Gülle auf Silomais im Herbst nach DÜV2017 ohne Zwischenfrüchte (Abbildung 1b) nicht möglich ist, wurde dieses Szenario zu Vergleichszwecken mit dargestellt) .....	30
Abbildung 21: Mittlere simulierte agronomischen Düngereffizienz im Winterweizen (in kg TM kg N <sup>-1</sup> ) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil an organischem Stickstoff (Nitrogen_Frühjahr bzw. Nitrogen_Herbst) in kg ha <sup>-1</sup> in Form von Rindergülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Silomais-Silomais (WW-SM-SM) (a) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge als Mineraldünger (b) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge in organischer Form (Rindergülle) (siehe Abbildung 20) .....	31
Abbildung 22: Mittlere simulierte agronomischen Düngereffizienz in Zuckerrüben (in kg FM kg N <sup>-1</sup> ) in Abhängigkeit von der ausgebrachten Stickstoffmenge und dem Anteil an organischem Stickstoff (Nitrogen_Frühjahr bzw. Nitrogen_Herbst) in kg ha <sup>-1</sup> in Form von Rindergülle auf drei Standorten in der Region 141 (Börde/Niederungslagen) in der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Zuckerrüben (WW-WG-ZR) (a) mindestens 50% der	

Gesamtstickstoffmenge als Mineraldünger (b) mindestens 50% der Gesamtstickstoffmenge in organischer Form (Rindergülle) (siehe Abbildung 20) .....	32
Abbildung 23: Mittlere Stickstoffaufnahme (NU) und Stickstoffauswaschung (NL) (in kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) bei unterschiedlichen Annahmen zum Gesamtstickstoffgehalt im Boden als Startwert für die Modellsimulationen mit SIMPLACE (100= 100%, d.h. der Anfangswert für den Gesamtstickstoffgehalt der Ackerböden in der Datenbank wurde nicht verändert, 60 = Anfangswert wurde auf 60% des Gesamtstickstoffgehalts in der Datenbank reduziert, 40 = Anfangswert wurde auf 40% des Gesamtstickstoffgehalts in der Datenbank reduziert .....	34

## 14. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die auf den Ackerflächen dominanten Bodentypen in den einzelnen Boden-Klima-Regionen sowie deren Flächenanteile am Ackerland (BKR: 129=Hocheifel, 124=Sauerland, 141=Börde/Niederungslagen, 142=Niederrhein, 143=Bergisches Land/O-Westfalen , 146=Lüneburger Heide/sandige Böden, 147=Mittleres Niedersachsen/Leichte Lehmböden, 148=S-Weser-Ems-Gebiet/Sandige Böden, 191=Teutoburger Wald).....	9
Tabelle 2: Ausgewählte Eigenschaften der dominanten Bodentypen auf den Ackerstandorten der Region 141 (Börde/Niederungslagen).....	10
Tabelle 3: Ist-Szenario (F0) der Düngemengen der unterschiedlichen Feldfrüchte für die Modellkalibrierung nach KTBL (KTBL, 2009).....	11
Tabelle 4: Übersicht die Fruchtfolgen am Beispiel der Region 141 (Börde/Niederungslagen) .....	12
Tabelle 5: Mittlere relative Abweichungen der simulierten Erträge und Stickstoffentzüge im Erntegut nach der Modellkalibrierung für die einzelnen Fruchtarten in fünf Boden-Klima-Regionen.....	15