

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Landwirtschaftliche Fakultät

The logo consists of the letters 'U', 'S', and 'L' in a stylized, hand-drawn font. The 'U' is green, the 'S' is black, and the 'L' is red. Below the letters are two parallel green lines that extend to the right and slightly downwards.

Lehr- und Forschungsschwerpunkt

„Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“

Forschungsbericht

Nr. 193

Regionale Modellierung von agrarstrukturellen
Änderungen in einem agentenbasierten Ansatz unter
Berücksichtigung des überbetrieblichen Austausches
von organischen Dünger

Verfasser:

David Schäfer, Zara Grauer, Wolfgang Britz

Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik

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, Mai 2019

ISSN 1610-2460

Projektleitung: PD Dr. Wolfgang Britz

Projektbearbeiter: PD Dr. Wolfgang Britz, M.Sc. David Schäfer, B.Sc. Zara Grauer

Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik
Nussallee 21, 53115 Bonn

SCHÄFER D., GRAUER, Z.; BRITZ, W. (2019): Regionale Modellierung von agrarstrukturellen Änderungen in einem agentenbasierten Ansatz unter Berücksichtigung des überbetrieblichen Austausches von organischem Dünger. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 193, 51 Seiten.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
1. Einleitung	1
2. Nährstoffverteilung und -transporte in Nordrhein-Westfalen	4
3. Material und Methoden	8
3.1 Transport Modell ManTra	8
3.1.1 Szenario Entwicklung	8
3.1.2 Datengrundlage	8
3.1.3 Modellaufbau	10
3.2 Agentenbasiertes Modell ABMSIM	11
3.2.1 Datengrundlage in der Modellkette	12
3.2.2 Meta-Modellierung einzelbetrieblicher Entscheidungen mit FarmDyn	16
3.2.3 Szenarien und Analyseobjekte	16
4. Ergebnisse	18
4.1 Kalibrierung in ManTra	18
4.2 Simulationsergebnisse in ManTra	19
4.3 Initialisierung von ABMSIM	21
4.4 Ergebnisse der Auktion von Wirtschaftsdünger in ABMSIM	23
5. Diskussion	25
5.1 Methodisches Vorgehen	25
5.1.1 Modellierung von regionalen Nährstoffströmen in ManTra	25
5.1.2 Modellierung von regionalen Nährstoffströmen in ABMSIM	26
5.1.3 Schnittstelle zu FarmDyn und Ökonometrische Schätzung einer dualen Gewinnfunktion	27
5.1.4 Initialisierung Betriebspopulation und räumliche Auflösung in ABMSIM	27
5.2 Diskussion der Ergebnisse von ManTra	28
5.3 Diskussion Ergebnisse ABMSIM	29

6.	Zusammenfassung.....	31
7.	Schlussfolgerungen für die Praxis.....	37
8.	Literaturverzeichnis.....	38
9.	Liste der Veröffentlichungen und Präsentationen	42
10.	Kurzfassung.....	43
11.	Executive Summary	44

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Struktur des Clusterprojekts mit Vorstellung der Modelle und der Schnittstellen	2
Abbildung 2: a) Stickstoffanfall aus Tierhaltung und Gärresten in NRW 2013; b) Stickstoffanfall aus Tierhaltung und Gärresten in NRW 2016.....	6
Abbildung 3: Bi-Level Set-Up für Schätzungsverfahren	10
Abbildung 4: Kalibrierung und Simulation mit ManTra	11
Abbildung 5: Modellaufbau des Teilprojekts 3 in der Modellkette.....	12
Abbildung 6: Betriebstypologie in ABMSIM	13
Abbildung 7: Darstellung der Landnutzung in ABMSIM	15
Abbildung 8: a) Geschätzte und observierten Exporte von Stickstoff b) Anzahl observierter Exporte mit geschätzten Werten von über null (OE) und null (ONE)	18
Abbildung 9: a) Net-Exporte der Kreise von NRW in kg N ha^{-1} b) Änderungen der Net-Exporte kg N ha^{-1} im Szenario	20
Abbildung 10: Ergebnisse der Verteilung von N im Nordwesten NRWs in kg ha^{-1}	22
Abbildung 11: Verteilung von N im Nordwesten NRWs nach Auktion im Nährstoffmodul in kg ha^{-1}	24

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Die 10 größten Kreise nach Transportvolumen von Stickstoff (2016)	6
Tabelle 2:	Datengrundlage von ManTra	9
Tabelle 3:	Betriebscharakteristika	14
Tabelle 4:	Charakteristika zur Schätzung der dualen Gewinnfunktion	16

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABM	agenten-basierte Modelle
BWA	betriebswirtschaftlichen Ausrichtung
EU	Europäische Union
GV	
GVE	Großvieheinheit
Ha	Hektar
Kg	Kilogramm
Km	Kilometer
N	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NiD	Nitratrichtlinie
NO ₃ -	Nitrat
NRW	Nordrhein-Westfalen
M	Meter
P	Phosphor
P ₂ O ₅	Phosphat

1. Einleitung

Organischer Dünger ist eine wertvolle Quelle für Stickstoff (N) und Phosphor (P) in der Landwirtschaft. Bei nicht adäquater Anwendung ist sie jedoch mit einer Vielzahl negativer Externalitäten für die Umwelt verbunden. Die zunehmende Spezialisierung in vielen landwirtschaftlichen Betrieben sowie der Ausbau der Biogaserzeugung in den letzten Jahren führten in Nordrhein-Westfalen (NRW) dazu, dass die Nährstoffaufnahmefähigkeit der Böden häufig überstiegen wurde. Die zunehmende Viehdichte führt auf betrieblicher Ebene und durch räumliche Konzentration von tierhaltenden Betrieben auch auf regionaler Ebene zu erheblichen Problemen mit Nährstoffüberschüssen. Folgen für die Umwelt sind durch reaktives N und P auf mehreren Ebenen zu beobachten. Zum einen belastet der Eintrag von Phosphat (P_2O_5) und Nitrat (NO_3^-) Grund- und Oberflächengewässer, was Auswirkungen auf Trinkwasserqualität und Biodiversität hat. Auf der anderen Seite tragen Ausgasungen von Ammoniak (NH_3) zur Eutrophierung von Böden sowie zur Feinstaubbelastung bei (Townsend et al. 2003; Dise et al. 2011; Grizzetti et al. 2011).

Grundlegendes agrar- und umweltpolitisches Instrument zur Regulierung der Nutzung von organischen und mineralischen Düngern und damit zum Eintrag von Nährstoffen in die Umwelt ist in Deutschland die Düngeverordnung (DüV) (BMEL 2017). Sie ist die direkte Implementierung der Nitratrichtlinie (NiD), steht aber auch im Zusammenhang mit den Umweltzielen aus weiteren Richtlinien. Ziel der NiD ist, sowohl die Umwelt vor übermäßigem Eintrag von NO_3^- aus der Landwirtschaft zu schützen als auch die Wasserqualität bereits verschmutzter Gewässer in den Mitgliedsstaaten zu verbessern. Die NiD setzt einen $50 \text{ mg } NO_3^- \text{ l}^{-1}$ Standard für eine gute Wasserqualität und gibt Empfehlungen zur guten landwirtschaftlichen Praxis heraus, um die Nitratemissionen in das aquatische Ökosystem zu reduzieren ((91/676/EWG) 1991). Aufgrund von wiederholten Überschreitungen des $50 \text{ mg } NO_3^- \text{ l}^{-1}$ Standards in vielen Regionen Deutschlands und der ausbleibenden Anpassung der DüV leitete die EU Kommission ein Vertragsverletzungsverfahren gegen Deutschland ein. Als Folge wurde im Jahr 2017 eine Revision der DüV 2007 implementiert. Die novellierte DüV stellt eine deutliche Verschärfung der Maßnahmen für Landwirte dar, welche in Regionen mit hohem Nährstoffanfall zu erheblichen Anpassungsreaktionen führen kann.

Landwirte haben hierfür eine Reihe an möglichen Anpassungsstrategien – siehe hierzu auch Kuhn et al. (2019) – wobei die überbetriebliche Verbringung von organischem Dünger eine der Schlüsselstrategien ist. Auswirkungen der novellierten Düngeverordnung auf Änderungen in den Nährstoffströmen, den landwirtschaftlichen Betriebsstrukturen und davon abgeleitete Umweltfolgen in unterschiedlichen Regionen sind bisher nur wenig erforscht. Bisherige Studien auf regionaler Ebene bilden hierbei simple und nur wenig differenzierte Implementierungen der unterschiedlichen Maßnahmen der DüV in ihren Modellen ab (Auburger et al. 2015). Eine höher aufgelöste Darstellung der DüV in regionalen Modellen ist

jedoch notwendig um den Novellierungsprozess der DüV 2017 zu bewerten sowie zukünftige Vollzugsmechanismen und Maßnahmen für landwirtschaftliche Betriebe zu bewerten.

Das im Folgenden vorgestellte Teilprojekt ist im Rahmen des Clusterprojekts „Skalenübergreifende Modellierung von Änderungen der Agrarstruktur und landwirtschaftlichen Stoffflüssen in Regionen von Nordrhein-Westfalen“ entstanden. Es wurde durch das Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) im Rahmen des Lehr- und Forschungsschwerpunktes "Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft" gefördert. Ziel des Clusterprojekts ist durch eine Kopplung der Modelle SIMPLACE (Teilprojekt 1), FarmDyn (Teilprojekt 2) und ABMSIM (Teilprojekt 3) eine Abbildung von Nährstoffflüssen auf pflanzlicher, betrieblicher sowie regionaler Ebene zu ermöglichen, um die Auswirkung der novellierten DüV in NRW mit Fokus auf N und P zu evaluieren. Die einzelnen Teilprojekte und die damit zusammenhängenden Skalen sind in Abbildung 1 dargestellt.

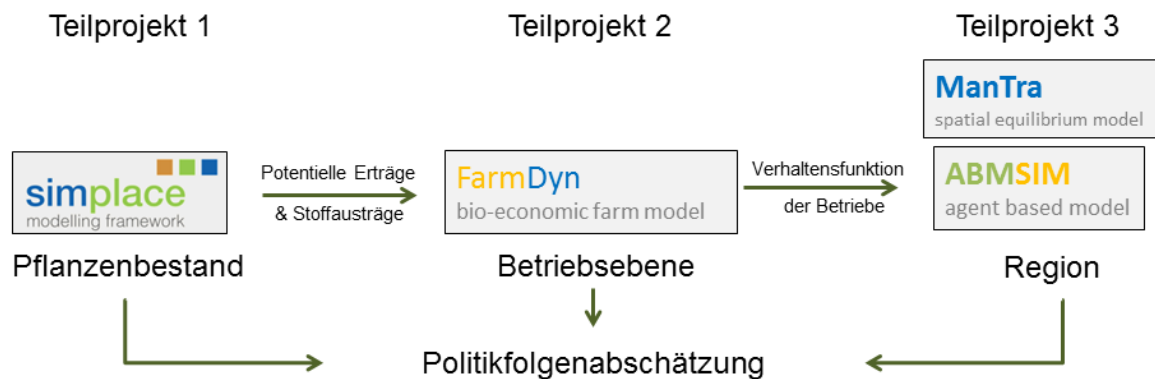


Abbildung 1: Struktur des Clusterprojekts mit Vorstellung der Modelle und der Schnittstellen

Quelle: Eigene Darstellung

Das Forschungsziel des Teilprojekts 3 ist hierbei in folgende Unterziele aufgeteilt:

- Analyse der überbetrieblichen Verbringung der Nährstoffströme zwischen landwirtschaftlichen Betrieben und administrativen Einheiten in Regionen NRWs und deren Effekte auf Betriebsstrukturen sowie die Verlagerung von N (und P).
- (Weiter-)Entwicklung von methodischen Ansätzen zur soeben genannten Analyse im Bereich der Ökonometrie (Meta-Modellierung mit FarmDyn Teilprojekt 2), räumlicher Gleichgewichtsmodelle (ManTra) sowie agenten-basierter Modelle (ABMSIM)
- Vor dem Hintergrund der Limitationen der Modelle ManTra und ABMSIM sollen aus den Modellergebnissen Empfehlungen für die Agrar- und Umweltpolitik in NRW gemacht werden.

Zusätzlich zu dem im Antrag vorgestellten agenten-basierten Modell ABMSIM, ist aufgrund der sequenziellen Natur der Modellkette sowie der Verzögerung der Verfügbarkeit der Datenbasis das

Modell ManTra entwickelt worden. Der innovative methodische Ansatz im räumlichen Gleichgewichtsmodell ManTra ist das Bi-Level Schätzungsverfahren, welches Transaktionskosten von Nährstofftransporten pro Einheit N bestimmt und dadurch observierte Transporte von organischem Dünger im Modell reproduzieren kann. Die Simulationen ermöglichen hierdurch eine Abschätzung von Veränderungen der Transporte unter Berücksichtigung ausgewählter Maßnahmen der novellierten DüV.

Das zweite Modell ABMSIM stellt das letzte Glied in der Modellkette des Clusterprojekts dar. ABMSIM ist ein agentenbasiertes Modell, welches entwickelt wurde, um große und komplexe Populationen von Landwirten und Flächen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Landnutzungen, Interaktionen von Landwirten sowie Heterogenität von Betrieben zu simulieren. ABMSIM nimmt dabei auf der regionalen Ebene Ergebnisse von FarmDyn auf. Die Schnittstelle zwischen ABMSIM und FarmDyn stellt ein Meta-Modell dar. Hierbei handelt es sich um eine ökonomisch aus Simulation mit FarmDyn geschätzte duale Gewinnfunktion, die das Verhalten der Landwirte in einer Auktion in ABMSIM abbildet. Die Agrarstrukturerhebung 2016 (ASE 2016) bildet hierbei eine konsistente Datengrundlage über alle Teilprojekte hinweg. In Teilprojekt 3 dient sie maßgeblich zur Generierung der Population in ABMSIM sowie zur Konstruktion der Typologien für das Meta-Modell in der Schnittstelle von FarmDyn und ABMSIM.

Der Abschlussbericht des Teilprojekts 3 gliedert sich wie folgt. Im zweiten Kapitel werden Nährstoffflüsse und potenzielle Quellen für organischen Dünger der Kreise in NRW aus dem Nährstoffbericht 2016 vorgestellt. Im dritten Kapitel werden die Datengrundlage und Methodik von ManTra und ABMSIM beschrieben. Im Weiteren werden die Datengrundlage sowie der modulare Aufbau von ABMSIM mit Fokus auf die Module mit Relevanz für das Projekt dargelegt. Das vierte Kapitel gliedert sich in die Darstellung der Ergebnisse von ManTra und ABMSIM auf. Das fünfte Kapitel diskutiert mit Blick auf den aktuellen wissenschaftlichen Stand die in Kapitel 4 vorgestellten Ergebnisse. Im sechsten und siebten Kapitel wird das Forschungsvorhaben zusammengefasst und Politikempfehlungen vor dem Hintergrund der Limitation der Modelle gegeben.

2. Nährstoffverteilung und -transporte in Nordrhein-Westfalen

NRW ist mit 33.688 landwirtschaftlichen Betrieben und einer landwirtschaftlich genutzten Fläche von 1.440.539 Hektar das viertgrößte Bundesland nach Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe und das drittgrößte nach landwirtschaftlicher Fläche (DESTATIS n.d.). Die Landwirtschaft ist dabei in NRW räumlich stark differenziert. Während der Südwesten und Osten von NRW (Jülicher Börde, Ost-Westfalen und südliches Münsterland) von Ackerbaubetrieben dominiert wird, sind im Nordwesten (Niederrhein, südliches Weser-Ems Gebiet, Münsterland) vermehrt intensive Veredelungs- und Futterbaubetriebe vorzufinden. Die Kreise Kleve und Wesel am Niederrhein und die Kreise Borken, Coesfeld, Steinfurt und Warendorf im Münsterland beheimaten dabei ungefähr die Hälfte (50,8%) aller Großvieheinheiten (GVE) in NRW. Die Konzentration einzelner Tiergruppen ist noch höher; allein die vier letztgenannten Kreise im Münsterland beherbergen 56% des kompletten Schweinebestandes in NRW (DESTATIS n.d.). Durch den Ausbau von Biogasanlagen zur energetischen Verwertung von Wirtschaftsdünger und nachwachsenden Rohstoffen ist auch eine Konzentration von Biogasanlagen in den viehstarken Kreisen am Niederrhein und im Münsterland zu beobachten. Die eben genannten Kreise haben dabei einen Anteil von 42,3% des gesamten Biogasanlagenbestandes in NRW, wobei 39,3% der installierten elektrischen Leistung auf sie fällt. Ein großer Teil der installierten elektrischen Leistung wird darüber hinaus durch Biogasanlagen mit höherer Leistung in Ackerbaubetrieben in Ost-Westfalen und der Soester Börde erzeugt (LWK NRW 2018a, 2018a, 2018a).

Aus der Konzentration von intensiver Tierhaltung und eines dichten Biogasanlagenbestandes im Nordwesten von NRW ergeben sich hohe Nährstoffanfänge von N und P_2O_5 . Wendet man zur Beurteilung der Nährstoffsituation die Ausbringungsobergrenze der DüV von 170 kg N ha^{-1} auf die einzelnen Kreise an, erkennt man in den Kreisen Borken und Kleve eine Überschreitung des Schwellenwertes im Jahr 2016 – siehe dazu Abbildung 2. Die angrenzenden Kreise Steinfurt und Coesfeld liegen auf Kreisebene lediglich kurz unter dem durch die DüV vorgegebenen Schwellenwert. Hieraus ergibt sich, dass selbst unter der Annahme, dass alle Betriebe innerhalb des Kreises bereit sind organischen Dünger aufzunehmen und bis zur maximal erlaubten Menge auszubringen, Exporte in andere Kreise notwendig werden.

Die im folgenden Abschnitt präsentierten Transporte in NRW basieren auf Daten des Nährstoffberichts 2017 (LWK NRW 2018b). Die Kreise mit dem größten Transportvolumen an organischem Dünger sind Borken, Recklinghausen, Coesfeld und Steinfurt. Weitere Kreise, die ein hohes Transportvolumen aufweisen, sind Heinsberg, Rhein-Erft-Kreis, Viersen, Rhein-Kreis Neuss sowie Düren. Hierbei ist eine Konzentration von exportierenden Kreisen mit hohem Nährstoffanfall im Nordwesten NRWs zu beobachten, während die meisten

importierenden Kreise mit der Jülicher Börde, dem südlichen Niederrhein im Süden und Südwesten und der Soester Börde im mittleren NRW zu finden sind. Die zehn Kreise mit den größten Transportvolumen sowie die zehn größten Importeure und Exporteure sind in Tabelle 1 dargestellt.

Importierende Kreise können dabei in drei verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Die Kreise Soest und Unna gehören zu einer Gruppe, die organischen Dünger primär aus den exportierenden intensiven Viehregionen im Nordwesten NRWs beziehen. Eine andere Gruppe sind Steinfurt und Recklinghausen, die gleichzeitig große Mengen an organischem Dünger importieren und exportieren. Dies liegt zum einen hauptsächlich an dem angrenzenden Kreis Borken, der große Mengen an organischem Dünger in diese Kreise exportiert. Ein weiterer Grund ist der eigene große Nährstoffanfall dieser Kreise, welcher es notwendig macht, organischen Dünger in angrenzende Kreise im Osten weiter zu transportieren. Die letzte Gruppe der importierenden Kreise sind im Südwesten von NRW in Grenznähe zu den Niederlanden zu finden. Importe aus den Niederlanden machen in den Kreisen Heinsberg, Euskirchen und Viersen jeweils 85,6%, 78,5% und 71,1% an den gesamten Importen der Kreise aus. Diese Kreise sind teilweise auch bei den größten Exporteuren zu finden, da die großen Mengen an organischem Dünger an angrenzende Kreise im Osten weitergereicht werden müssen.

Der bei weitem größte Exporteur von organischem Dünger ist Borken, gefolgt von Coesfeld und Steinfurt. Die Darstellung Tabelle 1 zeigt, dass die Kreise mit dem größten Transportvolumen mit den Kreisen der größten Exporteure übereinstimmen. Hier ist eine Konzentration der Kreise vor allem im Nordwesten von NRW zu erkennen. Die Kreise mit der höchsten Exportmenge sind auch die Kreise, welche den höchsten Anfall an organischem Dünger aus der Tierhaltung aufweisen. Zusätzlich findet sich in diesen Kreisen auch die größte Anzahl an Biogasanlagen.

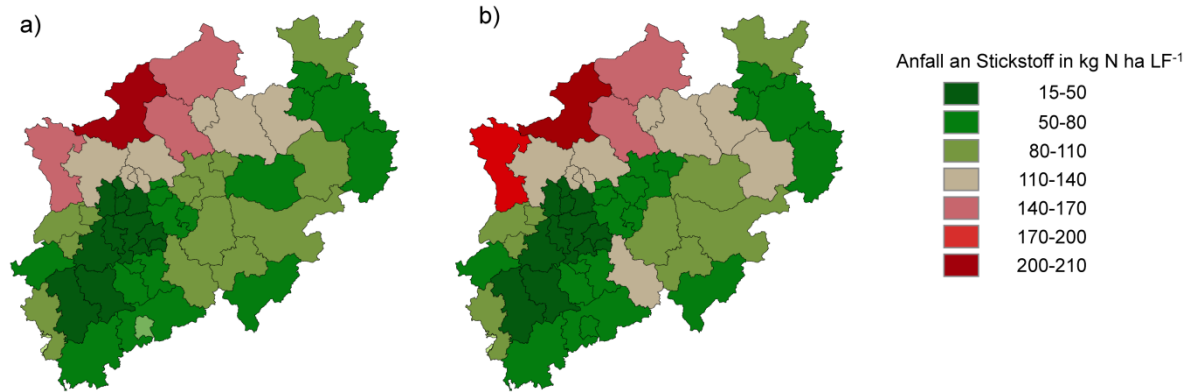


Abbildung 2: a) Stickstoffanfall aus Tierhaltung und Gärresten in NRW 2013; b) Stickstoffanfall aus Tierhaltung und Gärresten in NRW 2016

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus dem Nährstoffbericht 2014 und 2017 (LWK NRW 2014, 2018b); Geodaten: Kreise von NRW Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Verwaltungsgebiete 1:250.000 (Stand 1.1.2017) (BKG 2017); Kalkulation als Stickstoffanfall durch gesamte landwirtschaftlich genutzt Fläche

Tabelle 1: Die 10 größten Kreise nach Transportvolumen von Stickstoff (2016)

Kreis	Transportvolumen* von N [in t]	
Borken (BOR)	6.207,2	
Recklinghausen (RE)	4.568,0	
Coesfeld (COE)	4.495,5	
Steinfurt (ST)	4.201,6	
Heinsberg (HS)	4.174,5	
Kleve (KLE)	3.566,1	
Rhein-Erft-Kreis (BM)	3.422,6	
Viersen (VIE)	3.206,3	
Rhein-Kreis Neuss (NE)	2.969,9	
Düren (DN)	2.614,9	

Quelle: Daten aus(LWK NRW 2018a); Geodaten: Kreise von NRW Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Verwaltungsgebiete 1:250.000 (Stand 1.1.2017) (BKG 2017);* Transportvolumen ist die Summe aus Export und Import von organischem Dünger je Kreis

Die primär transportierten organischen Dünger mit Bezug auf Gesamt-N waren Gärreste mit 41,1% und Schweinegülle mit 26,2% gefolgt von Rinder-/Mischgülle mit 15,2% und Geflügelkot/-mist mit 9,7% im Jahre 2016. Betrachtet man N aus ausschließlich tierischer Herkunft, macht Schweinegülle mit 32,6% den Großteil der Abgaben aus, gefolgt von Gärresten mit 26,5% (LWK NRW 2018b).

3. Material und Methoden

Im Folgenden Kapitel wird auf die Datengrundlage und die Methodik von ManTra und ABMSIM eingegangen. Bei dem Modell ManTra wird dabei auf die Szenario Entwicklung, die Datengrundlage, das verwendete Bi-Level Schätzungsverfahren sowie auf die Simulation eingegangen. Bei ABMSIM wird zusätzlich zur Vorstellung der Datengrundlage und dem Aufbau des Modells die Einbettung in das Clusterprojekt vorgestellt.

3.1 Transport Modell ManTra

ManTra ist ein räumliches Gleichgewichtsmodell dessen Kalibrierung auf einem Bi-Level Schätzungsverfahren („bi-level estimation procedure“) basiert. Es wurde im Rahmen des Clusterprojekts entwickelt, um Nährstofftransporte zwischen Gemeinden in NRW unter Annahme einzelner Maßnahmen der DüV zu simulieren. Der Fokus des Modells liegt bei der Analyse von Änderungen in der Verteilung von N aus organischem Dünger in NRW, welche sich durch die Maßnahme der Anrechnung von N aus pflanzlichen Gärresten auf die Ausbringungsobergrenzen von 170 kg N ha^{-1} ergeben.

3.1.1 Szenario Entwicklung

Die räumliche Auflösung von ManTra auf der administrativen Einheit der Gemeinden erlaubt keine differenzierte Darstellung der Maßnahmen der DüV wie sie in Teilprojekt 2 gezeigt wurden. Dies beinhaltet einen Ausschluss von Investitionsmaßnahmen (bspw. Güllelagererweiterung, emissionsarme Ausbringungstechnik) und der Abbildung von Nährstoffbilanzen im Modell. Als geeignete Maßnahme zur Modellierung auf der räumlichen Ebene ergibt sich aus der Modellstruktur die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} . In der Simulation von ManTra liegt der Fokus daher auf der Maßnahme der DüV 2017, welche die Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} vorschreibt. Neben der guten Modellierungsmöglichkeit der genannten Maßnahme in ManTra, stellen Gärreste, als der meist transportierte organische Dünger in NRW, auch ein interessantes Analyseobjekt im Bereich der Nährstoffströme dar (LWK NRW 2014, 2018b). Die daraus abgeleitete Zielsetzung der Anwendung von ManTra unter Berücksichtigung von Gärresten in der Ausbringungsobergrenze ist die Abschätzung von Änderungen von N Transportmengen und Strömen in NRW.

3.1.2 Datengrundlage

Primäre Datengrundlage der Transportströme des Modells ist der Nährstoffbericht NRW, der von der nordrheinwestfälischen Landesregierung bereitgestellt wird (LWK NRW 2014). Die dargestellten Daten des Nährstoffberichts basieren auf den Daten welche im Rahmen der Umsetzung der Wirtschaftsdüngernachweisverordnung (WDüngNachV) gesammelt werden.

Der Nährstoffbericht gibt damit für jeden der 53 Landkreise in NRW N und P₂O₅ Mengen an, welche (1) von Tieren ausgeschieden, (2) von Biogasanlagen in Form von Gärresten erzeugt und (3) aus Kläranlagen als Klärschlamm gewonnen wurden. Des Weiteren beinhaltet der Nährstoffbericht Informationen über Exporte und Importe aus dem Ausland sowie aus benachbarten Bundesländern. Die Daten zu Transportflüssen werden auf Kreisebene bereitgestellt. Da sich alle Werte im Bericht nur auf Nährstoffe beziehen, kann nicht zwischen Wirtschaftsdüngern von unterschiedlichen Nutztieren unterschieden werden, auch wenn deren Wassergehalt sowie N-P-Verhältnis variieren. Daher wird nur der zwischen den administrativen Einheiten ausgetauschte N modelliert. Im Folgenden wird daher N und organischer Dünger synonym verwendet.

Tabelle 2: Datengrundlage von ManTra

Modelldaten	Einheit	Administrative Ebene	Datenquelle
Landwirtschaftliche Fläche	ha	Gemeinde	Thünen Atlas (Gocht und Röder 2014)
Großvieheinheiten	GVE	Gemeinde	Thünen Atlas (Gocht und Röder 2014)
Stickstoff aus Tierhaltung	t	Gemeinde	Gebildet aus Kreisdaten (Nährstoffbericht 2014) und GVE aus Thünen Atlas (Gocht und Röder 2014)
Transportdistanzen	km	Gemeinde	NRW Straßensystem (Google n.d.)
N – Exporte	t	Kreis	Nährstoffbericht (2014)
N aus Tierhaltung			
N aus Klärschlamm			
N aus Gärresten			
N – Exporte nach außerhalb NRW	t	Kreis	Nährstoffbericht (2014)
N – Importe von außerhalb NRW	t	Kreis	Nährstoffbericht (2014)

GVE – Großvieheinheit; N – Stickstoff; NRW - Nordrhein-Westfalen

Daten zu der landwirtschaftlichen Flächennutzung und den GVE auf Gemeindeebene stammen aus der Thünen-Atlas-Datenbank (Gocht und Röder 2014). Um die bestehende Straßeninfrastruktur von NRW einzubeziehen, werden die Entfernungen zwischen den Gemeinden als Fahrstrecken in km gemessen. Diese werden unter der Annahme der Verwendung von LKWs mit Güllefassaufbau als Transportmittel vom Google Maps Routenplaner berechnet (Google n.d.). Somit enthält die Entfernungsmatrix 396 x 396 Einträge für Entfernungen zwischen Gemeinden und 53 x 53 für Entfernungen zwischen Landkreisen. Diese Abstände beziehen sich auf die Schwerpunkte der administrativen Einheiten und stellen daher nur Annäherungen an den eigentlichen Standort von Betrieben dar. Sie könnten sowohl kleiner sein, wenn der durchschnittliche Abstand zwischen dem Güllelager der exportierenden

Betriebe und dem Grundstück des importierenden Betriebes nahe der nächsten Grenze der beiden Einheiten liegt und größer, wenn das Gegenteil gilt. Im Durchschnitt werden die Unterschiede zwischen der Fahrstrecke und der durchschnittlichen tatsächlichen Entfernung in dem Parameter erfasst, der die Transportkosten pro km Fahrstrecke zwischen den Schwerpunkten schätzt. Aufgrund von Limitationen in der Rechenleistung wird der Austausch über 40 km hinaus ausgeschlossen.

3.1.3 Modellaufbau

Das Bi-Level Schätzungsverfahren ist in ein oberes und unteres Problem aufgeteilt. Das obere Problem repräsentiert den statistischen Schätzer. Es minimiert die Abweichung zwischen beobachteten N-Exporten aus dem Nährstoffbericht und den im Modell geschätzten N-Exporten auf Kreisebene. Das untere Problem minimiert die Transportkosten für organischen Dünger. Hierbei wird angenommen, dass Gemeinden mit Exportbedarf die kostengünstigsten Transporte wählen. Die Markträumung als weitere Bedingung stellt im Modell sicher, dass die Summe aus N-Exporten und der N-Nutzung gleich der Summe aus Importen und dem Anfall von N in jeder Gemeinde sein muss. In einem solchen räumlichen Gleichgewichtsmodell werden die Preisunterschiede zwischen Akteuren durch Händler, sogenannte Arbitrageure, abgegriffen. In dem vorliegenden Fall sind die Akteure die einzelnen Gemeinden, während die Arbitrageure Vermittlungsstellen von organischem Dünger darstellen, wie beispielsweise von der Nährstoffbörse NRW angeboten (LWK NRW 2018b).

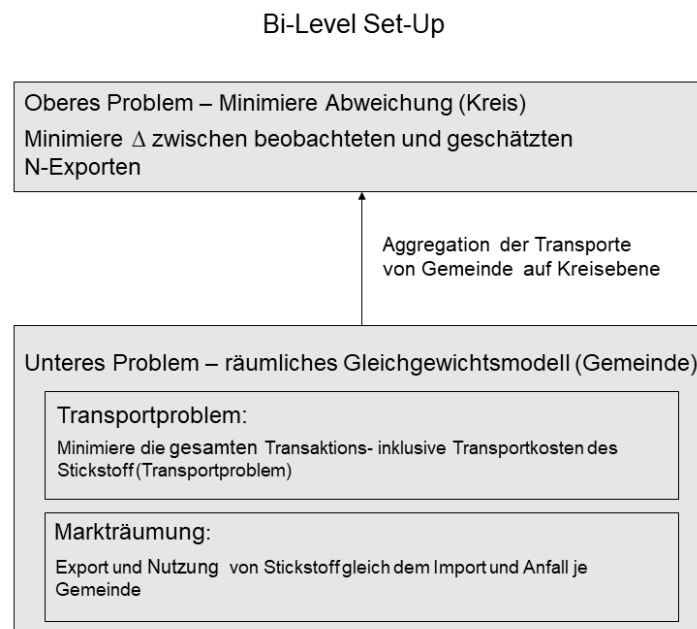


Abbildung 3: Bi-Level Set-Up für Schätzungsverfahren

Quelle: Eigene Darstellung

Nach der Initialisierung des Modells startet die Simulation von ManTra. Mit insgesamt 500 Iterationen wird durch Umstellung der endogenen Variablen, und damit immer wieder neuen Startwerten im Modell, eine optimalere Lösung gesucht. Nach den Iterationen wird das Simulationsergebnis für Transaktions- inklusive Transportkosten gespeichert. Zur Analyse der ausgewählten Maßnahme werden im Modell pflanzliche Gärreste in der Ausbringungsobergrenze angerechnet. Mit den Simulationsergebnissen des Bi-Level Schätzungsverfahrens werden im angepassten Transportkostenminimierungsproblem daraufhin Simulationen durchgeführt, wodurch sich kreisspezifische Änderungen sowie Verschiebungen in Transportflüssen aufzeigen lassen.

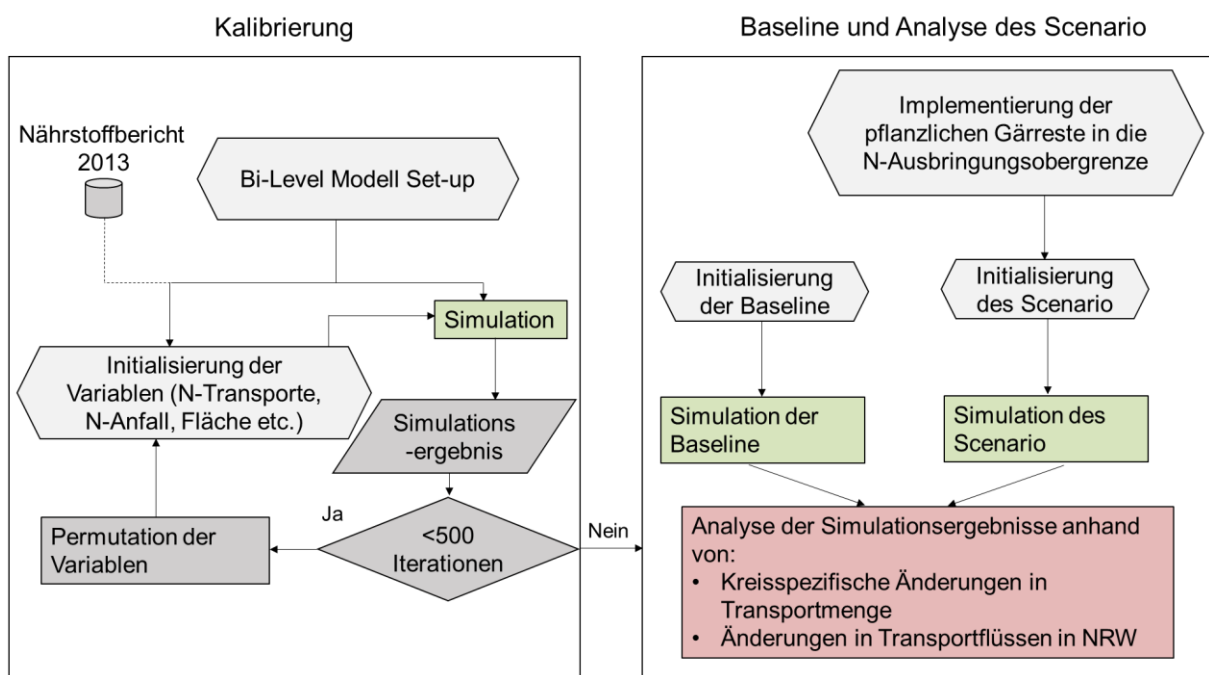


Abbildung 4: Kalibrierung und Simulation mit ManTra

Quelle: Eigene Darstellung

3.2 Agentenbasiertes Modell ABMSIM

ABMSIM ist ein räumlich explizites agentenbasiertes Modell, welches zur Analyse von strukturellen Änderungen im Agrarsektor entwickelt wurde (Britz 2013). Das Modell simuliert in jährlichen Schritten (rekursiv-dynamisch) und ist auf die Simulation von großen und komplexen Betriebspopulationen ausgerichtet. Die Interaktion der Landwirte in ABMSIM wird durch Auktionen gesteuert und umfasst hierbei den Landmarkt sowie den Markt für organischen Dünger. Die Verhaltensfunktion der Landwirte wird durch ökonometrische Schätzung in einem Meta-Modellierungsansatz als duale Gewinnfunktion in FarmDyn bestimmt. Ziel ist es dabei durch Unterschiede im Ergebnis der Verhaltensfunktion unter der DüV 2007 und DüV 2017 unterschiedliche Effekte im Handel von organischem Dünger aufzuzeigen.

Ziele in der Weiterentwicklung von ABMSIM im Rahmen des Forschungsvorhabens sind die Initialisierung der Betriebspopulation mit den agrarstrukturellen Gegebenheiten von NRW und die Erweiterung des Modells um ein Nährstoffmodul. Hierzu werden Preisstatistiken, die ASE 2016 sowie Landnutzungskarten systematisch erfasst und aufgearbeitet. Die aufgearbeiteten Daten werden im Weiteren im Meta-Modellierungsansatz in FarmDyn und in der Initialisierung von ABMSIM verwendet. Die Erweiterung von ABMSIM um ein Nährstoffmodul dient der Simulation des Handels mit organischem Dünger im Rahmen von Auktionen für Wirtschaftsdüngerverbringungsverträge. Im Folgenden wird die Datengrundlage vorgestellt und die einzelnen Arbeitsschritte genauer beleuchtet.

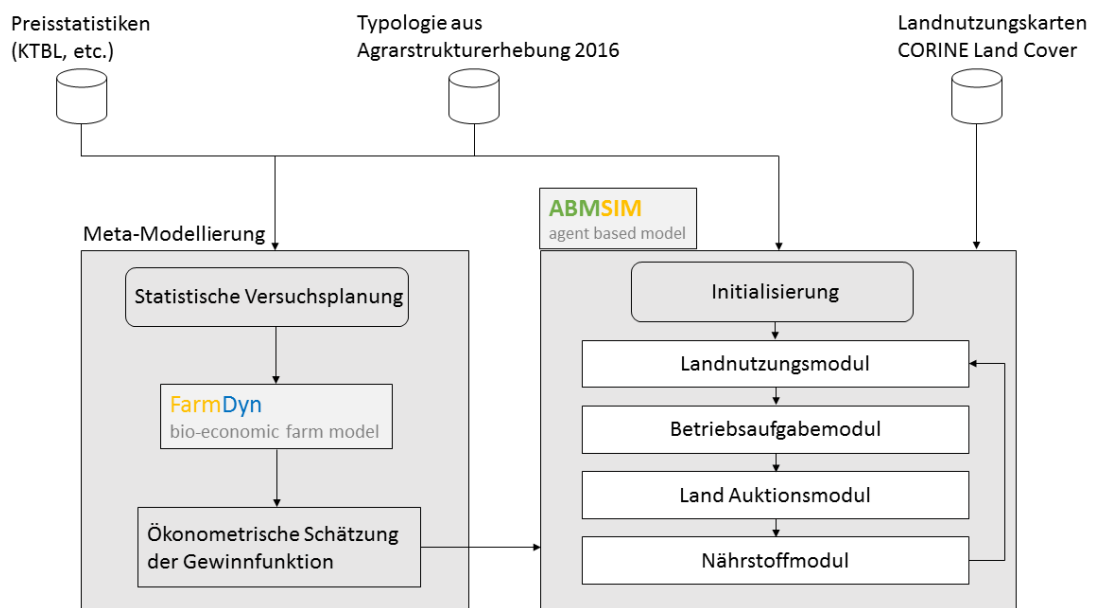


Abbildung 5: Modellaufbau des Teilprojekts 3 in der Modellkette

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.1 Datengrundlage in der Modellkette

Daten zu Produktionsverfahrens- und Investitionskosten für Pflanzenbau und Tierhaltung in FarmDyn sowie Preisdaten für ABMSIM und FarmDyn sind aus Veröffentlichungen des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) entnommen (KTBL 2014, 2016). In ABMSIM werden Daten aus der CORINE (‘coordination of information on the environment’) Land Cover (CLC) Datenbank für das Jahr 2010 für die Generierung der Landnutzung in NRW verwendet (EEA 2012). Zur Entwicklung der Typologie in FarmDyn und ABMSIM wird die ASE 2016 verwendet, wobei sich die einzelnen Betriebstypen in beiden Modellen aufgrund der Modellcharakteristika unterscheiden. Im

Folgenden werden die Datensätze und deren Aufarbeitung für das Forschungsvorhaben genauer beschrieben.

Betriebstypologie in ABMSIM

Zur Darstellung der Betriebspopulation dient die ASE 2016 als primäre Datengrundlage. Die ASE 2016 ist eine Vollerhebung mit zusätzlicher partieller Stichprobenerhebung weiterer detaillierter Daten, welche Produktionskapazitäten und –strukturen, Bodennutzung sowie Informationen zu Viehbeständen von landwirtschaftlichen Betrieben abfragt. Des Weiteren enthält die ASE 2016 Informationen zur räumlichen Verortung von landwirtschaftlichen Betrieben auf Gemeindeebene (DESTATIS n.d.).

Der Fokus bei der Entwicklung der Betriebstypologie liegt auf möglichst detaillierter Abbildung von Betriebsmerkmalen, die bei der Analyse der DüV von Bedeutung sind, d.h. insbesondere betriebliche Spezialisierung, Betriebsgröße und Tierdichte. Aufgrund der Bedeutung räumlicher Aspekte (Transportdistanzen, regionale Nährstoffdichten etc.) in den beiden im Teilprojekt 3 genutzten Modellen sollen die Daten auf einer möglichst niedrigen administrativen Einheit zur Verfügung gestellt werden. In diesem Zusammenhang stellte sich die Datenabfrage aufgrund von datenschutzrechtlichen Aspekten als Herausforderung dar. Um eine Identifikation einzelner Betriebe zu verhindern, sind Informationen in Bezug auf Größe und Betriebstypen auf Gemeindeebene nicht verfügbar. Vor diesem Hintergrund sind im Rahmen des Teilprojekts mehrere Informationsquellen auf Gemeinde- und Kreisebene aus der ASE 2016 zusammengeführt, um eine künstliche, aber möglichst reale Betriebspopulation auf Gemeindeebene zu generieren.

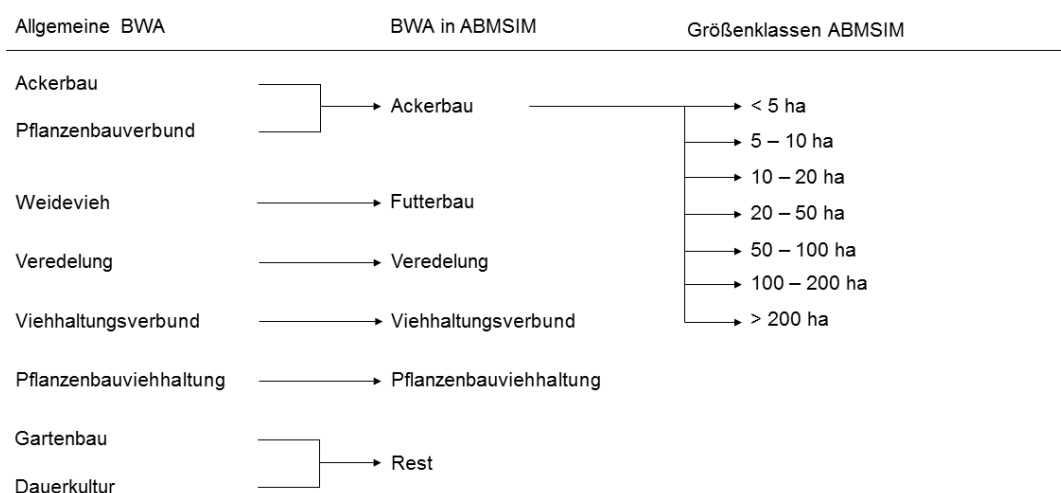


Abbildung 6: Betriebstypologie in ABMSIM

Quelle: Eigene Darstellung

Die Betriebstypologie in ABMSIM basiert auf der Klassifikation einzelner Betriebe nach der betriebswirtschaftlichen Ausrichtung (BWA) definiert durch die (EC 2008). Die BWA eines Betriebes richtet sich hierbei nach dem „relativen Beitrag des Standardoutputs eines bestimmten Merkmals zu seinem gesamten Standardoutput“ (EC 2008), wobei der Standardoutput ein standardisierter monetärer Wert der Bruttoerzeugung ist. Auf Grundlage der vorgegebenen Allgemeinen BWA der EU-Kommission ist eine weitere Aggregation aufgrund der verfügbaren Betriebstypen in FarmDyn notwendig. Da es keine Unterscheidung der Ackerbaubetriebe nach angebauten Kulturen in FarmDyn gibt, sondern die Fruchtfolgen abhängig von der Region gewählt werden können, sind Pflanzenbauverbund- und Ackerbaubetriebe in einer Gruppe zusammengeführt. Futterbaubetriebe sind in der Typologie ausschließlich Milchviehbetriebe, während Veredelungsbetriebe nur Schweinemastbetriebe umfassen. Darüber hinaus kann FarmDyn derzeit keine Gartenbau- und Dauerkulturbetriebe simulieren, weshalb diese Betriebstypen als Rest zusammengefasst sind und nicht am Landmarkt und am Markt von organischem Dünger teilnehmen. Betriebe sind des Weiteren in Größenklassen unterteilt, basierend auf der landwirtschaftlichen Fläche eines Betriebes wie Abbildung 6 zeigt. Die GVE eines Betriebes wird durch den Betriebstyp, die Größenklasse sowie einer Spanne von möglichen Viehdichten bestimmt.

Tabelle 3: Betriebscharakteristika

Charakteristika	Beschreibung	Quelle
Alter	Das Alter des Betriebsleiters	Eigene Annahme
Standort	Der Standort des Betriebes mit Informationen über genaue Location in Gemeinde und Kreis	Zufällig verteilt basierend auf ASE 2016
Betriebstyp	Einer der möglichen Betriebstypen der Betriebstypologie: Ackerbau, Milchvieh, Schweinemast, Viehhaltungsverbund, Pflanzenbauviehhaltung, Rest	Abgeleitet siehe 3.1.2
Ackerfläche	Eigene plus gepachtete Ackerflächen in Hektar	Zufällig verteilt basierend auf ASE 2016
Graslandfläche	Eigene plus gepachtete Graslandfläche in Hektar	Zufällig verteilt basierend auf ASE 2016
Arbeitskräfte	Anzahl an Arbeitskräften	Abgeleitet siehe 3.2.2
SNQ-Gewinnfunktion	Je nach Betriebstyp spezifische Gewinnfunktion	Geschätzt siehe 3.2.2

Daten für die einzelnen Betriebe nach Betriebstyp und Größenklasse sind auf Kreisebene aus der ASE 2106 verfügbar. Da jedoch auch Unterschiede in der räumlichen Betriebstypverteilung innerhalb von Kreisen bestehen, sind zusätzliche Informationen in Bezug auf die Anzahl von

Betriebstypen sowie landwirtschaftlicher Fläche auf Gemeindeebene verwendet worden, um die entwickelte Betriebstypologie auch auf Ebene von Gemeinden darzustellen. Hierfür wurde im Projekt ein Schätzungsmodell entwickelt, welches mit Hilfe von einer „Highest-Posterior Density“-Methode Beobachtungen auf Kreis- und Gemeindeebene nutzt, um eine artifizielle Betriebstypverteilung auf Gemeindeebene zu generieren.

Räumliche Auflösung von ABMSIM

Die räumliche Auflösung in ABMSIM beträgt 100 x 100 m (1 ha) in Rastereinheiten. Die zugrundeliegenden Landnutzungsdaten für ganz NRW stammen aus der CORINE Land Cover Datenbank (EEA 2012) für das Jahr 2012. Jedem Rasterpixel ist jeweils eine der folgenden Landnutzungsklassen zugeordnet: Betriebsstandort, Ackerland, Grasland, Siedlung, Wald, Industrie und andere Nutzungsarten. In ABMSIM werden landwirtschaftliche Flächen von einzelnen Pixeln zu Plots aggregiert, die sich in Breite und Länge unterscheiden. Plots sind im Eigentum bestimmter Landwirte und werden von diesen selbst bewirtschaftet, wenn sie ihren Betrieb nicht aufgegeben haben. Andernfalls können sie von anderen Landwirten gepachtet werden. In der Initialisierung von ABMSIM werden zunächst die einzelnen Pixel Landnutzungsklassen zugewiesen, dann die landwirtschaftlichen Pixel zu Plots aggregiert und die Plots benachbarten Betrieben nach Größenklasse nach ha zugeteilt, wobei Graslandflächen prioritär den Futterbaubetrieben zugewiesen werden.

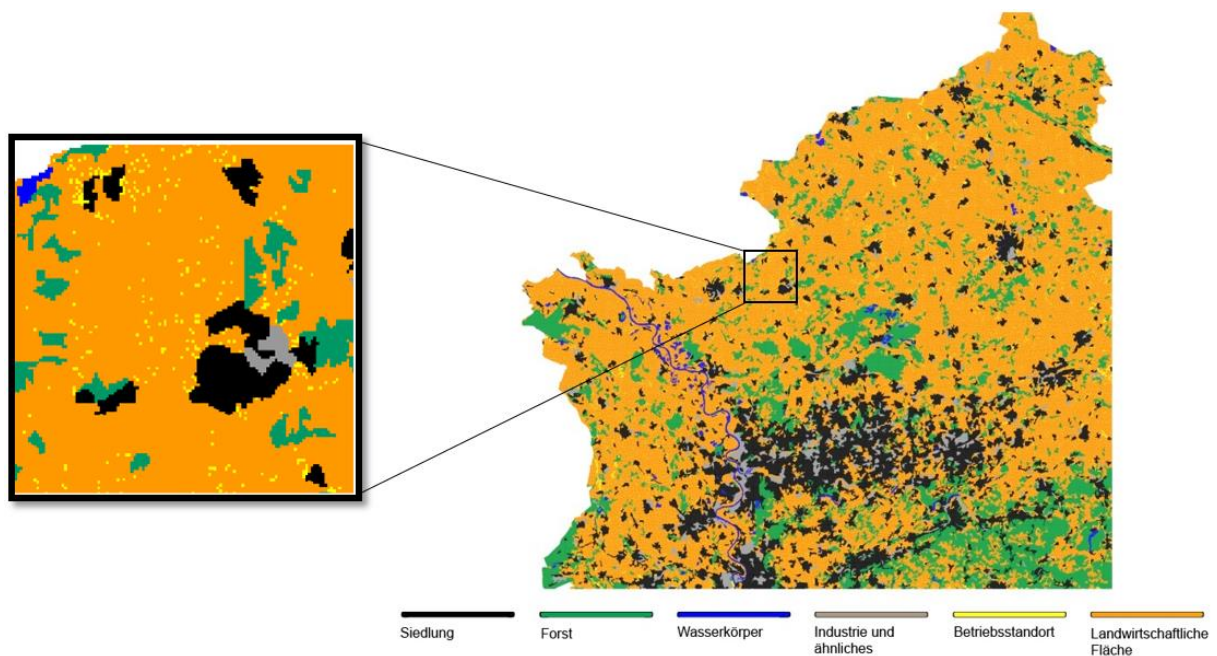


Abbildung 7: Darstellung der Landnutzung in ABMSIM

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.2 Meta-Modellierung einzelbetrieblicher Entscheidungen mit FarmDyn

Mögliche Gewinnveränderungen bestimmen in ABMSIM die Gebote der Landwirte auf frei werdende Pachtflächen und Verträge zur Verbringung von Gülle. Diese Gewinnveränderungen werden im ABM nicht direkt in FarmDyn simuliert. Stattdessen wird das Simulationsverhalten von FarmDyn mittels eines statistischen Meta-Modells angenähert, wozu eine duale Gewinnfunktion ökonomischen geschätzt wird. Sie bestimmt in ABMSIM die Zahlungsbereitschaft für zusätzliche Fläche oder Ausbringungsrechte für organischen Dünger. Tabelle 4 dokumentiert die in der Schätzung verwendeten erklärenden Faktoren. Zusätzlich zu diesen Charakteristika nutzt die Schätzung der Gewinnfunktion für alle Betriebstypen relevante Preisbereiche für Input und Outputs aus dem KTBL (2016). Annahmen zur Verteilung emissionsarmer Ausbringung, Lagerkapazität und P₂O₅-Versorgung der Böden sind aus Teilprojekt 2 übernommen.

Tabelle 4: Charakteristika zur Schätzung der dualen Gewinnfunktion

Erklärende Faktoren	Betriebstyp	Minimum	Maximum	Datenquelle
Landwirtschaftliche Fläche [ha]	Ackerbau	10	225	ASE 2016 ¹
	Milchvieh	10	153	
	Schweinemast	6	159	
Anteil an Grünland [%]	Ackerbau	-	-	ASE 2016 ¹
	Milchvieh	0,06	1	
	Schweinemast	-	-	
Viehichte [LU ha ⁻¹]	Ackerbau	-	-	ASE 2016 ¹
	Milchvieh	0,6	5,9	
	Schweinemast	1,1	14,6	
Arbeitskraft [AK]	Ackerbau	1,1	3,8	Eigene Berechnung nach KTBL ²
	Milchvieh	1	11,2	
	Schweinemast	1,1	8,5	
Emissionsrechte [m ³]	Ackerbau	-	-	Eigene Annahme ³
	Milchvieh	0	420	
	Schweinemast	0	420	

¹ DESTATIS n.d.;² KTBL (2016); ³Emissionsrechte sind außerbetriebliche Ausbringungskapazitäten auf aufnehmenden Betrieben, die keine zusätzlichen Kosten hervorrufen

3.2.3 Szenarien und Analyseobjekte

ABMSIM bietet durch Abbildung der Interaktion zwischen Landwirten die Möglichkeit, den Einfluss der Maßnahmen der DüV auch auf dem abgebildeten Markt für überbetriebliche Nährstoffverwertung zu berücksichtigen. Hierbei sind die ausbringungslimitierenden Maßnahmen wie zulässige Nährstoffsalden für P₂O₅ und N sowie die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha⁻¹ in FarmDyn maßgeblich für die Zahlungsbereitschaft für Nährstoffexporte

in der Gewinnfunktion. Während die Gewinnfunktion alle abgebildeten Maßnahmen der DüV aus FarmDyn berücksichtigt, ist im Nährstoffmodul in ABMSIM je Betrieb nur die N-Ausbringungsobergrenze bindend.

In der Initialisierung von ABMSIM werden jedem Betrieb seine unterschiedlichen Charakteristika wie Betriebstyp, Anzahl an Tieren sowie Acker- und Graslandfläche zugeteilt und bilden zusammen mit der Gewinnfunktion unter der DüV von 2007 die Baseline (DüV '07). Im Szenario mit der DüV 2017 (DüV '17) wird die Gewinnfunktion für die Simulation geändert, wodurch die Zahlungsbereitschaft für Nährstoffexporte angepasst wird. Die Notwendigkeit zu exportieren wird bestimmt durch die Anzahl an Tieren, deren Nährstoffausscheidung und der N-Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} unter der DüV 2007 und 2017.

Bei Nutzung aller Modellmechanismen von ABMSIM lassen sich folgende Ergebnisgrößen simulieren:

1. Verlagerung von N und P_2O_5 Mengen pro Hektar von exportierenden zu importierenden Betrieben und Aggregation auf Gemeinde und Kreisebene (Nährstoffmodul).
2. Aufgabe von Betrieben nach Betriebstyp und Größe sowie regionaler Zuordnung (Betriebsaufgabemodul)
3. Veränderung von durchschnittlicher Betriebsgröße nach Betriebstyp in allen Regionen (Landmarktmodul)

Ziel ist es außerdem die Baseline in Zusammenhang mit dem Nährstoffanfall aus tierischer Haltung und Gärresten sowie deren Transporte anhand der verfügbaren Daten des Nährstoffberichts 2017 zu validieren. Wie weiter unten ausgeführt, konnten zu 2. und 3. keine zufriedenstellenden Ergebnisse im Rahmen des Teilprojekts erreicht werden.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kalibrierung und der Simulationen von ManTra sowie die Initialisierung und erste Ergebnisse des Nährstoffmoduls von ABMSIM vorgestellt.

4.1 Kalibrierung in ManTra

Daten zu Transportströmen von N zwischen Kreisen in ManTra basieren auf Informationen aus dem Nährstoffbericht. Um eine möglichst realitätsnahe Darstellung der Exporte zu realisieren, wird ManTra auf die observierten Exporte aus dem Nährstoffbericht kalibriert. Hierzu werden freie Parameter wie Transaktionskosten der Exporte von N so geschätzt, dass die Differenz zwischen observierten und geschätzten N Exporten simultan für alle Kreise minimiert wird.

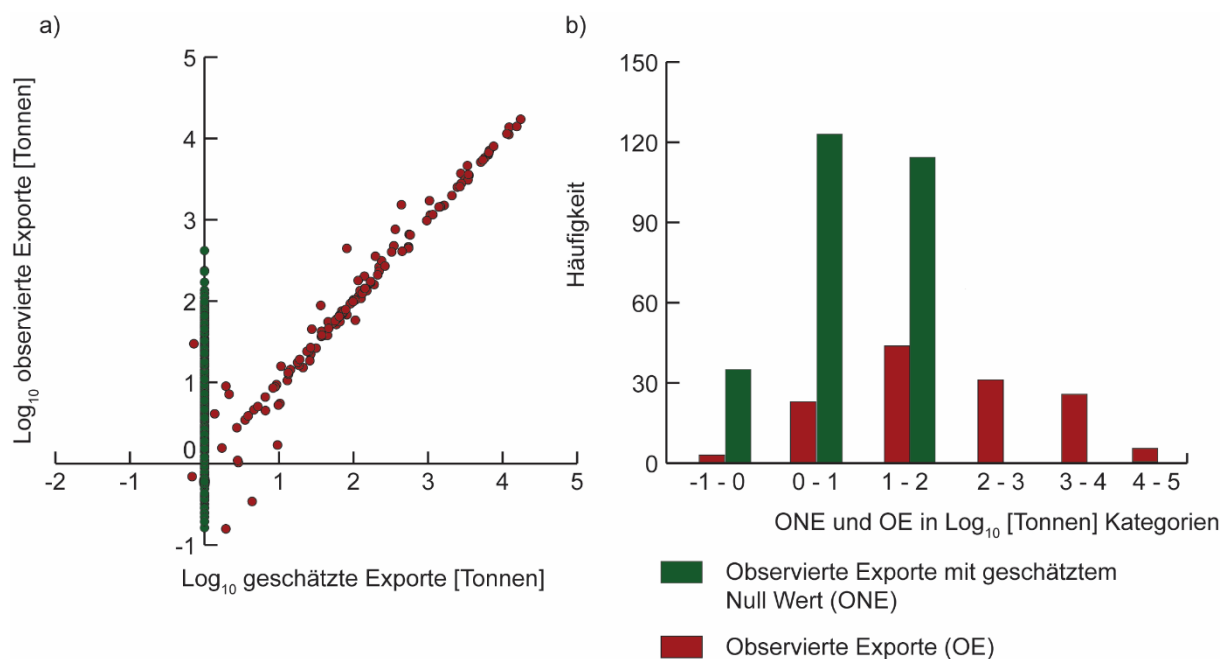


Abbildung 8: a) Geschätzte und observierten Exporte von Stickstoff b) Anzahl observierter Exporte mit geschätzten Werten von über null (OE) und null (ONE)

Quelle: Eigene Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Bi-Level Schätzungsverfahrens sind in Abbildung 8 dargestellt. In Abbildung 8a) werden die observierten Exporte aus dem Nährstoffbericht mit geschätztem Wert größer null (OE) und die observierten Exporte mit geschätztem Wert gleich null (ONE) in ManTra gegenübergestellt. Um die stark unterschiedlichen Größenordnungen der N-Transporte darzustellen, sind die Werte zur besseren Interpretation logarithmiert. Der diagonale Verlauf (OE) zeigt, dass nur ein kleiner Teil (17,7%) der N-Exporte perfekt mit dem Modell abgebildet wird. Im Kontrast machen observierte N-Exporte, welche nicht durch das Modell abgebildet werden können (ONE), 82,2% aller N-Exporte aus.

Die Ergebnisse zeigen weiter, dass OEs und ONEs eine große Differenz in der Höhe der Transportmengen aufweisen, wie in Abbildung 8b) dargestellt. Bedeutende Nährstofftransporte in den Gruppen >100 t sind sehr gut abgebildet, während bei kleineren Transportmengen die Transportströme durch das Modell nicht erfasst werden. Der durchschnittliche N-Export je Kreis in der Gruppe der OE liegt bei 78,77 t, während Transporte in der ONE Gruppe lediglich einen Wert von 23,64 t aufweisen. Diese Durchschnittswerte ergeben sich primär aus den unterschiedlichen Verteilungen von OEs und ONEs.

Die Unterschiede in den Mittelwerten und Verteilung der Transportmengen lassen sich vor allem durch die Modellstruktur von ManTra erklären. Im Modell können Gemeinden nicht gleichzeitig N importieren und exportieren, da dies der Annahme von minimalen Transportkosten widerspricht. Als Folge reduziert sich im Modell die Anzahl der Transporte, die dargestellt werden können, um die Anzahl an wechselseitigen Transporten in den observierten Daten. Hierbei werden primär kleinere Transportvolumen nicht geschätzt. Dies ergibt sich dadurch, dass niedrige Transportvolumen und die damit einhergehende Gewichtung einen kleineren Effekt bei der Minimierung der Differenz zwischen observierten und geschätzten Transporten haben, als hohe Transportvolumen.

Die Anzahl der im Modell schätzbaren Transporte wird weiter reduziert durch die maximale Transportdistanz von 40 km, die aufgrund von limitierender Rechenleistung implementiert ist. Ähnlich wie bei dem Ausschluss von wechselseitigen Transporten, weisen auch hier die nicht geschätzten Transporte eher geringe Transportmengen auf.

Trotz der genannten Limitation kann als Fazit der Kalibrierung von ManTra festgehalten werden, dass ein Großteil der volumenstarken Transporte, welche sowohl ökonomisch als auch ökologisch den größten Einfluss in NRW haben, abgebildet werden können.

4.2 Simulationsergebnisse in ManTra

Die Ergebnisse der Baseline für Netto-Exporte in kg N ha^{-1} innerhalb von NRW sind in der Abbildung 9a) dargestellt. Sie zeigt, dass die N Netto-Exportierenden Kreise mit Borken, Kleve, Viersen, Coesfeld und Warendorf in der Baseline die volumenstärksten Exporte aufweisen. Sie weisen damit ein ähnliches Muster wie die Verteilung von kg N ha^{-1} aus landwirtschaftlichen Quellen in Abbildung 2. Die hohen volumenstarken Exporte der Kreise Rhein-Sieg sowie Rhein-Erft stehen hierbei im Kontrast zu den observierten Daten, wobei die Netto-Exporte sich lediglich im leicht positiven Bereich mit 0 bis 5 kg N ha^{-1} befinden. Die volumenstärksten Importe sind an der Grenze zu den Niederlanden in den Kreisen Düren, Aachen und Heinsberg zu finden, wobei Heinsberg mit mehr als 40 kg N ha^{-1} extrem hohe Importe aufweist. Eine weitere Region die Importe, d.h. negative Netto-Exporte, aufweist findet sich südlich des Münsterlands und in dem Kreis Steinfurt. Diese Importe stammen hauptsächlich aus den benachbarten Kreisen mit hohem N Anfall aus landwirtschaftlichen

Quellen und verteilen sich hierbei auf mehrere Kreise, sodass der Import je Kreis im Bereich zwischen 5 bis 20 kg N ha⁻¹ liegt. Die Darstellung der Baseline umfasst keine kreisfreien Städte, da diese einen zu kleinen Anteil an landwirtschaftlicher Fläche ausweisen. Dadurch führen bereits kleinste Im- und Exporte zu großen Veränderungen in Netto-Exporten, wobei sie gleichzeitig nur einen kleinen Effekt auf die gesamte transportierte Menge in NRW haben.

Die Ergebnisse des Szenarios mit der Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in ManTra sind in Abbildung 9b) abgebildet. Deutliche Steigerungen in den Exportmengen sind in den Kreisen Borken und Warendorf mit mehr als 10 kg N ha⁻¹ beziehungsweise 5 bis 10 kg N ha⁻¹ zu verzeichnen. Des Weiteren steigen die Netto-Exporte der grenznahen Kreise Kleve, Viersen, Heinsberg und Düren zwischen 0 bis 5 kg N ha⁻¹. Veränderungen auf der Importseite verzeichnen vor allem der Kreis Wesel, Münster und der Rhein-Erft Kreis mit mehr als 10 kg N ha⁻¹. Auch die Kreise Recklinghausen und Steinfurt haben im Gärreste-Szenario einen Anstieg der Importe im Bereich von 5 bis 10 kg N ha⁻¹.

a) Stickstoffmenge gemessen in Netto-Export [kg ha⁻¹]

b) Änderung der Stickstoffmenge gemessen in Netto-Export [kg ha⁻¹]

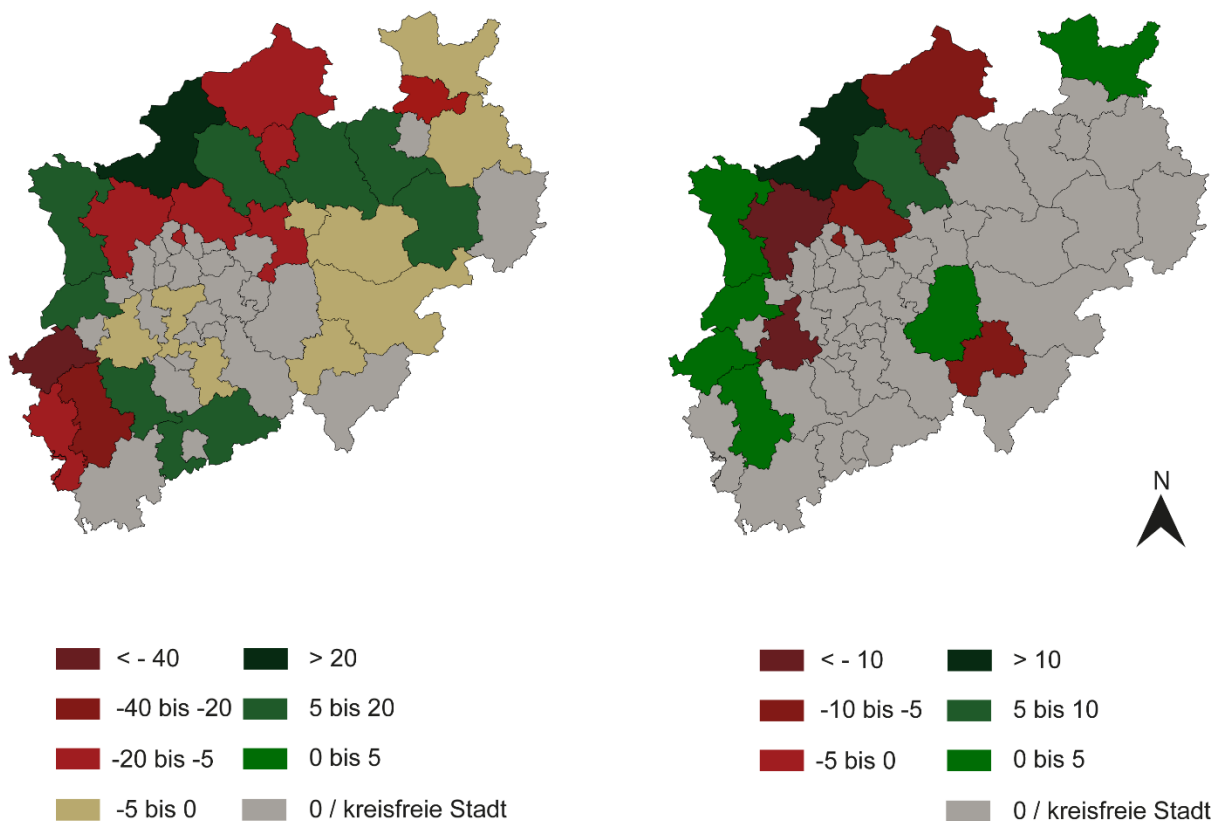


Abbildung 9: a) Net-Exporte der Kreise von NRW in kg N ha⁻¹ b) Änderungen der Net-Exporte kg N ha⁻¹ im Szenario

Stellt man die Ergebnisse der Baseline den Ergebnissen des Gärresteszenarios gegenüber, kann man erkennen, dass bereits exportierende Kreise dazu tendieren, im Szenario mehr zu exportieren, während importierende Kreise eher mehr importieren. Ausnahmen sind hierbei die Kreise Heinsberg und Düren, welche in der Baseline stark importieren, in dem Gärresteszenario jedoch eine Abnahme in der importierten Menge N aufweisen. Heinsberg und Düren nehmen hierbei eine gesonderte Rolle in der Simulation ein, da die Hauptquelle der importierten N-Menge die Niederlande ist. Im Kontrast zu anderen importierenden Kreisen wie Steinfurt und Recklinghausen, nimmt in grenznahen Kreisen der Ausbringungsdruck innerhalb der Kreise durch die Anrechnung der pflanzlichen Gärreste zu, während es durch konstante Importe aus dem Ausland zu keinem N-Ausbringungszuwachs kommt.

Zusammenfassend lässt sich ein klarer Trend der Transporte erkennen, welcher ausgehend von Kreisen mit hohem Nährstoffdruck durch hohe Viehbesatz- und Biogasdichten sowie hohen Importen aus dem Ausland in Richtung der angrenzenden Kreise im Landesinneren geht. Auch hervorzuheben ist das trotz der großen Anzahl an Biogasanlagen in den Kreisen Warendorf, Gütersloh, Soest und Paderborn es zu keinen mit ManTra erfassbaren Anstiegen in der Verbringung von organischem Dünger in Nachbarkreisen kommt.

4.3 Initialisierung von ABMSIM

Die Initialisierung von ABMSIM umfasst die Generierung der Karte von NRW mit den verschiedenen Landnutzungstypen sowie die Verteilung von Betrieben auf Pixeln landwirtschaftlichem Landnutzungstyp. Mittels der synthetisch generierten Kreuztabelle aus Betriebstyp und –größenklasse auf Gemeindeebene werden die randomisiert gezogenen Betriebe in jedem Betriebstyp anhand ihrer Gemeindezugehörigkeit auf der Karte verteilt. Hierbei werden weitere auch Merkmale wie z.B. Arbeitskräftebesatz und Graslandanteil zugewiesen. Jedem Betriebstyp wird eine duale Gewinnfunktion zugeteilt, wodurch sich die Anzahl an GV und die damit einhergehende Menge an N aus der Tierhaltung ergibt. Die Ergebnisse der Verteilung der Betriebspopulation basieren dabei auf der ASE 2016.

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten keine zufriedenstellenden dualen Gewinnfunktionen mit den Daten der ASE 2016 und der DüV generiert werden. Dies gilt maßgeblich für die Simulation von kleinen Betrieben bzw. Nebenerwerbsbetrieben in FarmDyn, welche in der ASE 2016 einen erheblichen Teil der Betriebe ausmachen. Nur durch extrem hohe Marktpreise der Produkte von kleineren Betrieben bei gleichzeitig niedrigen Einkaufspreisen konnte FarmDyn einen Gewinn aus dem landwirtschaftlichen Teil des Betriebes simulieren. Durch die fehlenden Ergebnisse ergibt sich in der Modellkette eine Lücke, welche durch eine duale Gewinnfunktion ohne Bezug auf die ASE 2016 und die alte und novellierte DüV gefüllt wird. Die duale Gewinnfunktion wird daher nur zur Verteilung von

GVE und Arbeitskräften in der Initialisierung verwendet und hat dadurch nur einen indirekten Effekt auf das Nährstoffmodul.

In Abbildung 10 wird die durch die Initialisierung errechnete Menge Anfall von N aus tierischer Haltung für einen Ausschnitt von NRW dargestellt. Die anfallende Menge N ergibt sich hierbei aus der Anzahl der GVE der Betriebe nach der Initialisierung und den Ausscheidungsfaktoren der DüV 2017 (BMEL 2017). Der Ausschnitt in Abbildung 10 bildet vorwiegend die Kreise Borken, Kleve, Wesel sowie zum Teil die Kreise Recklinghausen, Coesfeld und Steinfurt ab. Jeder farblicher Pixel ist einem landwirtschaftlichen Betrieb zugewiesen, grüne Farbtöne stellen geringen und roten hohen Anfall von N aus tierischer Haltung des landwirtschaftlichen Betriebes pro ha dar. Die Karte erfasst somit eine Situation ohne Gülle Im- oder exporte. Weiße Flächen stellen nicht landwirtschaftliche Nutzungstypen dar (Siedlungsfläche, Wald etc.).

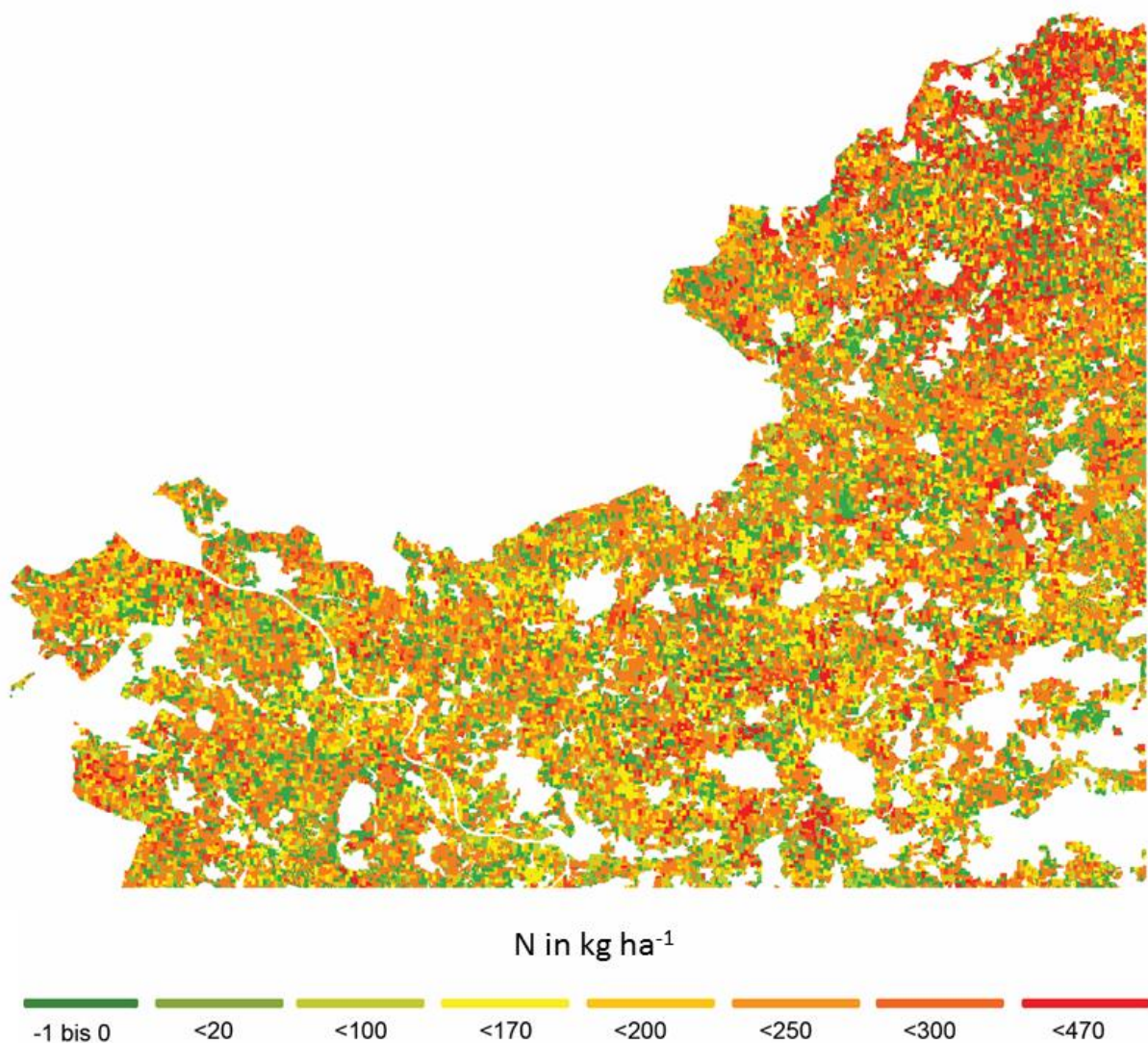


Abbildung 10: Ergebnisse der Verteilung von N im Nordwesten NRWs in kg ha⁻¹

Die Daten zeigen eine ähnliche räumliche Verteilung des N Anfalls wie in Abbildung 2. Der Kreis Borken weist in der Initialisierung die stärkste Konzentration von N Anfall aus der Tierhaltung aus. Tierhaltende Betriebe in Kreis Borken haben dabei mehrheitlich 250 kg N ha^{-1} ; jedoch geht der Anfall bei einzelnen Betrieben bis hin zu 470 kg N ha^{-1} . Im Kreis Kleve sowie in den anderen abgebildeten Kreisen sind hingegen nur wenige Betriebe mit sehr hohen N Anfällen vorzufinden. Die Betriebe haben hier mehrheitlich einen N Anfall von 170 kg N ha^{-1} mit vereinzelt Betrieben die eine höhere Menge an kg N ha^{-1} vorweisen. Alle Betriebe, die Ackerbau betreiben oder zu der Gruppe Rest der Betriebstypologie gehören, haben annahmegemäß keine Tierhaltung und weisen damit in der Initialisierung einen Wert von 0 aus, der dunkelgrün dargestellt ist.

4.4 Ergebnisse der Auktion von Wirtschaftsdünger in ABMSIM

Die Ergebnisse der Auktion von Wirtschaftsdünger werden wie in der Initialisierung in kg N ha^{-1} ausgewiesen. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben basieren die verteilten dualen Gewinnfunktionen nicht auf der Verteilung der Charakteristika der ASE 2016, da die Simulation von kleinen Betrieben mit FarmDyn keine verwendbaren Ergebnisse für die Meta-Modellierung lieferte. In der Auktion sind daher keine von der Gewinnfunktion ausgehenden Gebote von abgebenden Betrieben gemacht worden. Sie stellt daher auch keine Unterschiede zwischen der DüV '07 und DüV '17 dar. Daraus folgend kann ein Teil der für das Forschungsprojekt definierten Ziele nicht erfüllt werden. Hierzu zählen zum einen Analysen zu Betriebsaufgaben und Änderungen der Betriebsgröße durch das Landmarktmodul beziehungsweise das Betriebsaufgabenmodul. Im Nährstoffmodul konnten daher auch keine Zahlungsbereitschaften basierend auf den dualen Gewinnfunktionen verwendet werden.

Die Ergebnisse der Auktion zeigen für Betriebe im Nordwesten von NRW, dass nahezu alles überbetrieblich zu verbringende N von aufnehmenden Betrieben importiert wird. Nur wenige Betriebe, vorwiegend in Borken, finden dabei keine aufnehmenden Betriebe, um die 170 kg N ha^{-1} Ausbringungsobergrenze nicht zu überschreiten. Das abgebende Betriebe nicht genug aufnehmende Betriebe finden hat, ist die durch mehrere Charakteristika des Modells erklärbar. Erstens ist die mit ABMSIM betrachtete Region in NRW durch einen hohen Anfall an N aus der Tierhaltung charakterisiert. In der Realität sind diese Kreise auf angrenzende Kreise, die N aufnehmen können, angewiesen. Zweitens nehmen Betriebe, die unter dem Rest (Dauerkultur- und Gartenbaubetriebe) in der Betriebstypologie zusammengefasst sind, in ABMSIM keinen Wirtschaftsdünger auf. Drittens bedingt der fixe Betrag für die Zahlungsbereitschaft in ABMSIM eine maximale Transportdistanz, wodurch in Regionen mit hohem N Anfall nicht genug aufnehmende Betriebe gefunden werden können.

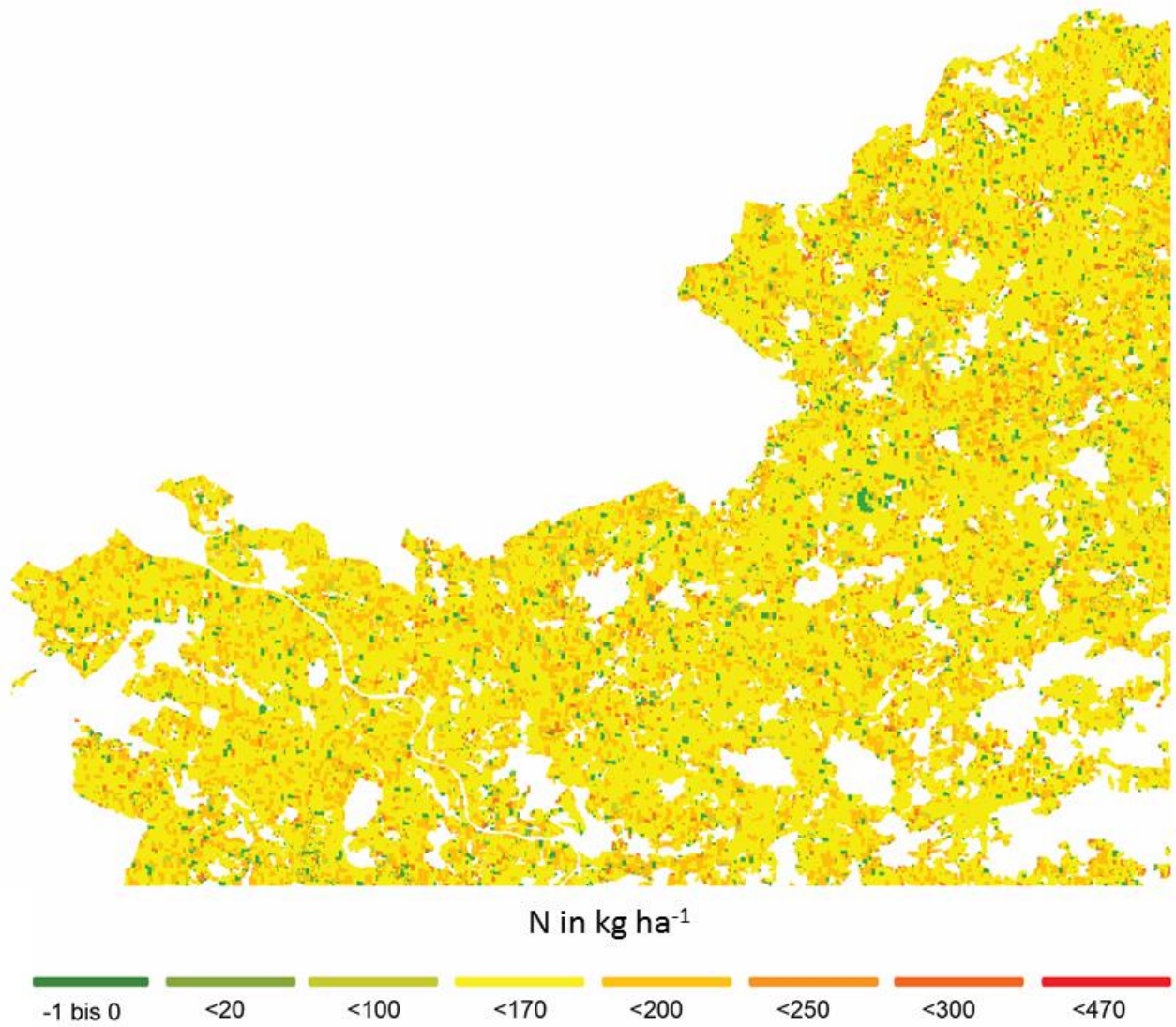


Abbildung 11: Verteilung von N im Nordwesten NRWs nach Auktion im Nährstoffmodul in kg ha^{-1}

5. Diskussion

5.1 Methodisches Vorgehen

Im Folgenden Kapitel wird die Anwendung von ManTra und ABMSIM vor dem Hintergrund der Modellierung von Nährstoffströmen diskutiert. Hierbei liegt der Fokus auf der Simulation von Nährstofftransporten, der verwendeten Datengrundlage sowie der Entwicklung der Betriebspopulation. Zentral bei der Diskussion sind die Vorteile und Limitationen der einzelnen Modellanwendungen bei der Bewertung von politischen Maßnahmen wie beispielsweise der DüV.

5.1.1 Modellierung von regionalen Nährstoffströmen in ManTra

Räumliche Gleichgewichtsmodelle sind ein häufig verwendeter Modelltyp, um komplexe Politikinstrumente in dem Themenfeld von Handel darzustellen. Bei observierten Angebots-, Nachfrage- und Transportmengen ermöglichen sie eine Reproduktion realer Handelsströme (Paris et al. 2011). Durch die veröffentlichten Daten des Nährstoffberichts und der Möglichkeit der Kalibrierung weist ABMSIM als Gleichgewichtsmodell mehrere Vorteile gegenüber anderen Methoden zur Darstellung von Nährstofftransporten unter Berücksichtigung der neuen DüV auf.

Durch die Kalibrierung werden Transaktionskosten geschätzt, welche zusätzlich zu Transportkosten auch implizite Transaktionskosten berücksichtigen, wie Kosten der Suche nach einem aufnehmenden Betrieb. Hohe lokale Transaktionskosten spiegeln dabei, sowohl den großen Konkurrenzdruck von abgebenden Betrieben in Regionen mit hohem Wirtschaftsdüngeranfall als auch die Aufnahmebereitschaft von Betrieben mit freien Ausbringungskapazitäten wider. Aus verschiedenen Gründen nehmen Betriebe keine Gülle oder nicht bis zur Ausbringungsobergrenze auf. Hierzu gehören eine mögliche Unkrautbelastung durch organischem Dünger, Bodenverdichtung durch Ausbringungsmaschinen, Arbeitsspitzen im Frühjahr, hohe Transportkosten, Geruchsbelastung durch die Ausbringung von organischem Dünger sowie nicht vorhandener Güllelagerinfrastruktur in Ackerbauregionen (Battel 2006; Núñez und McCann 2004; Asai et al. 2014).

Hierdurch vergrößert sich der Suchradius der aufnehmenden Betriebe, was durch die Kalibrierung auf beobachtete Transportdistanzen in ManTra erfasst wird. Dies verhindert eine unrealistische Verteilung von Nährstoffen nur über kurze Distanzen um die viehintensiven Regionen wie sie durch die „Next-Neighbour“ Methode in Auburger et al. (2015) erfolgt. Auch diese Studie untersucht die Auswirkungen auf die Verteilung von N durch die Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} .

ManTrans weist klare Limitationen in der Beurteilung der DüV aus. Wie bei den meisten Modellen mit räumlicher Auflösung (Auburger et al. 2015; Gömann et al. 2018) erfolgt auch in ManTrans eine Aggregation vom Einzelbetrieb zu administrativen Einheiten auf der Gemeindeebene. Die sich hierdurch ergebende Detailtiefe der DüV beschränkt sich auf Maßnahmen, die sich in der Fläche aggregieren lassen, wie beispielsweise in Auburger et al. (2015) mit der N-Ausbringungsobergrenze und Gömann et al. (2018) mit der Nährstoffbilanz. Auf der anderen Seite ist aufgrund der Größe und Komplexität des Modells und der gegebenen Rechenleistung derzeit nur eine Transportdistanz von 40 km im Modell realisierbar.

5.1.2 Modellierung von regionalen Nährstoffströmen in ABMSIM

Im Gegensatz zu räumlichen Gleichgewichtsmodellen ermöglichen agenten-basierte Modelle (ABM) wie ABMSIM die Simulation von Interaktionen zwischen Betrieben und erfassen die Heterogenität einer Betriebspopulation (Matthews et al. 2007). Hierbei lassen sich verschiedene Verhaltensannahmen simulieren (Huber et al. 2018). In Zusammenhang mit der Bewertung der Novellierung der DüV ermöglicht dies, z.B. Ressentiments gegenüber der Aufnahme von organischem Dünger von Betrieben zu implementieren. Diese Experience/Preference-Based Entscheidungen stehen dabei dem eher ökonomisch getriebenen Entscheidungsverhalten der abgebenden Betriebe gegenüber. Sowohl das Experience/Preference-Based Entscheidungsverhalten als auch ökonomisch-rationales Entscheidungsverhalten, abgebildet durch mathematischer Modellierung, ist häufig in ABM anzutreffen (An 2012). Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde hierbei versucht, durch Meta-Modellierung die Zahlungsbereitschaft für Exporte von organischem Dünger unter der DüV '07 und DüV '17 zu ermitteln. Konzeptionell wird so eine größere Detailtiefe der politischen Maßnahme in die räumliche Analyse integriert.

Die Interaktion der Agenten auf Agrarmärkten in ABM mit Fokus auf landwirtschaftlichen Betrieben wird häufig durch Auktionen simuliert (Kellermann und Balmann 2006). In ABMSIM ist die Interaktion der Agenten auf dem Nährstoffmarkt ebenfalls durch eine Auktion abgebildet. Hierbei wird eine Vickrey Auktion simuliert, welche Angebote von Wirtschaftsdüngerverbringungsverträgen sowie Gebote von abgebenden Betrieben zusammenführt. In der Realität kommt der Handel von Wirtschaftsdünger zwischen zwei landwirtschaftlichen Betrieben entweder durch bilaterale Absprachen (Asai et al. 2014) oder durch Vermittler von Nährstoffbörsen bzw. Landmaschinenringen zustande (Nährstoffbörse 2019). Es sind jedoch keine Daten zur Häufigkeit der unterschiedlichen Handelsformen öffentlich zugänglich, weshalb die Auktion hierbei die bestmögliche Lösung bietet, um ökonomisches Verhalten in den Nährstoffmarkt zu integrieren.

5.1.3 Schnittstelle zu FarmDyn und Ökonometrische Schätzung einer dualen Gewinnfunktion

Die Darstellung von Verhaltensfunktionen für Betriebe auf Agrarmärkten wie beispielsweise dem Landmarkt wird in ABM bisher primär durch weniger detaillierte Betriebsmodelle simuliert (Schreinemachers und Berger 2011; Happe et al. 2006). Durch Simulation können hier unter Annahme der Gewinnmaximierung optimale Produktions- und Investitionsmengen sowie Grenzgewinne für eine gegebene Betriebsausstattungen ermittelt werden. Hierbei steigt bei detaillierteren Betriebsmodellen und Zunahme der Betriebe in der Population der Rechenbedarf stark an, was die Darstellung großer Betriebspopulationen limitiert. Eine Untersuchung ganzer Regionen oder Bundesländern wie NRW ist so kaum möglich. Der Meta-Modellierungsansatz mit FarmDyn ersetzt das rechenintensive Betriebsmodell durch eine sehr schnell zu berechnendes statistisches Meta-Modell. Hierzu wird zuerst außerhalb des ABMs ein großer Betriebsdatensatz durch Sensitivitätsanalysen generiert. Er dient als Grundlage, eine duale Gewinnfunktion zu schätzen, die als Verhaltensfunktion in ABMSIM verwendet wird (Britz 2013). Die duale Gewinnfunktion gibt dabei optimale In- und Output Mengen bei gegebenen Preisen und Betriebsausstattungen wieder (Diewert 1973) und erlaubt die Bestimmung der Zahlungsbereitschaft für Land und Ausbringungsrechte von Nährstoffen. Die Maßnahmen der DüV sind hierbei in dem erzeugten Betriebsdatensatz von FarmDyn als limitierende Produktionsmöglichkeiten erfasst.

Eine große Herausforderung im Rahmen des Teilprojekts war die Simulation von kleinen Betrieben bzw. Nebenerwerbsbetrieben in FarmDyn, welche in der ASE 2016 einen erheblichen Teil der Betriebe ausmachen. Milchvieh- und Ackerbaubetriebe mit einer Größe von weniger als 30 ha erwirtschafteten nur bei sehr hohen Marktpreisen ihrer Produkte, bei gleichzeitig niedrigen Einkaufspreisen einen Gewinn, wenn (geringe) Opportunitätskosten für Arbeit und Investitionskosten angesetzt werden. Betriebe mit negativen Gewinnen scheiden im Betriebsaufgabemodul mit hoher Wahrscheinlichkeit aus und nehmen dann auch nicht mehr am Land- und Nährstoffmarkt teil, was zu nicht interpretierbaren Ergebnissen im Rahmen der DüV führt.

5.1.4 Initialisierung Betriebspopulation und räumliche Auflösung in ABMSIM

Die Berücksichtigung von heterogenen Betriebspopulationen ist einer der primären Vorteile von ABM (Matthews et al. 2007), erfordert jedoch genauso eine entsprechend hohe Auflösung der zugrundeliegenden Datenbasis, um Auswirkungen von Politiken bewerten zu können. Die Auflösung der Daten sollte hierbei, sowohl räumlich, d.h. auf der administrativen Ebene, als auch in Bezug auf relevante Betriebsmerkmale wie z.B. Spezialisierung und Größe hoch sein. Eine hohe räumliche Auflösung bietet die Möglichkeit, agrarstrukturelle Unterschiede innerhalb von administrativen Einheiten wie beispielsweise Kreisen darstellen zu können. Eine hohe Auflösung der Betriebstypen ermöglicht eine realitätsnahe Heterogenität in der

Population. Im Rahmen des Forschungsprojekts dient die ASE 2016 als primäre Datengrundlage. Da aufgrund von datenschutzrechtlichen Gründen keine hohe Detailtiefe in der Betriebspopulation möglich war, wurde mit Hilfe von Kreis- und Gemeindedaten und dem Highest Posterior Density Schätzungsverfahrens (Heckeley et al. 2008) eine synthetische Population generiert. Die Datenverfügbarkeit ermöglicht lediglich eine Zuteilung von Betrieben auf Gemeindeebene auf Ebene der Allgemeinen Betriebswirtschaftlichen Ausrichtung. Diese Limitierung in ABMSIM stellt einen klaren Nachteil gegenüber ABMs in anderen EU-Ländern mit besserem Datenzugriff dar, wie beispielsweise in Belgien (van der Straeten et al. 2011; Willeghems et al. 2016) oder den Niederlanden (Schouten et al. 2013).

Eine weitere Herausforderung in der Initialisierung des ABMs liegt in den unterschiedlichen Erfassungszeiträumen der Datenquellen. Während die Datenbasis für die Betriebspopulation und die vorhandene landwirtschaftliche Fläche die ASE 2016 ist, werden die Daten zur räumlichen Auflösung aus der CORINE von 2010 verwendet. Veränderungen im Umfang der landwirtschaftlichen Fläche in den Jahren 2010 und 2016 auf Ebene der Gemeinden sowie die Tatsache, dass die Zuordnung von Flächen nach Betriebstyp nach Betriebsstandort erfolgt, erschwert es, die agrarstrukturellen Daten auf Gemeindeebene mit der hoch aufgelösten Landnutzungskarte zu verschneiden. Zudem arbeitet ABMSIM mit rechteckigen Landschaften, sodass teilweise Gemeinden beschnitten werden. Die notwendige Skalierung der ganzzahligen Betriebsanzahlen nach Größe- und Spezialisierung stellt hierbei eine weitere Herausforderung dar.

5.2 Diskussion der Ergebnisse von ManTra

Die Ergebnisse der Baseline und des Szenarios der novellierten DüV werden in ManTra in kg N ha^{-1} angegeben. Diese Metrik erlaubt, sowohl den Vergleich unterschiedlich großer Kreise als auch den Ausbringungsobergrenzen der DüV '07 und DüV '17.

Die Ergebnisse für die Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in der Ausbringungsobergrenze unter der DüV '17 zeigen im Nordwesten und Westen von NRW mit Borken, Warendorf, Kleve und Viersen die stärkste Zunahme an N Netto-Exporten in angrenzende Kreise. Die sich hieraus ergebenden primären Aufnahmekreise sind die direkten Nachbarkreise Wesel, Steinfurt, Recklinghausen und der Rhein-Kreis Neuss. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen Auburger et al. (2015) in ihrer Studie, die sich auch ausschließlich mit der DüV Maßnahme der Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in die Ausbringungsobergrenze von N beschäftigt. In dieser Studie, die alle Gemeinden von NRW und Niedersachsen betrachtet, verteilt sich der anfallende Wirtschaftsdünger im Nordwesten und Westen von NRW: Unterschiede zwischen der vorliegenden Studie und der Studie von Auburger et al. (2015) in der Verteilung des Wirtschaftsdünger sind vor allem in den grenznahen Kreisen Heinsberg, Düren oder Rhein-Kreis Neuss zu finden. Die Unterschiede lassen sich durch die unterschiedliche Datenbasis

erklären. Im Gegensatz zu Auburger et al. (2015) berücksichtigt die vorliegende Studie, zusätzlich zum Anfall an N aus der Tierhaltung und den Gärresten, auch Importe aus den Niederlanden. Ein direkter Vergleich der transportierten Menge zwischen beiden Studien ist nicht möglich, da die vorliegende Studie N Netto-Exporte betrachtet und observierte Transporte durch eine Kalibrierung reproduziert wurden.

5.3 Diskussion Ergebnisse ABMSIM

Die Ergebnisse der Initialisierung werden in Anfall an N in kg ha^{-1} aus tierischer Haltung ausgewiesen und dienen damit zum einen als Validierungsindikator für die Verteilung von viehhaltungsintensiven Betrieben der ASE 2016 in NRW und zum anderen ermöglichen sie einen direkten Vergleich zu den Ergebnissen der Nährstoffauktion der Simulation. Andere Forschungsziele des Teilprojekts die mit ABMSIM analysiert werden sollten sind aufgrund der schlechten Ergebnisse der Meta-Modellierung, mit Werten der ASE 2016, unter der DüV '07 und DüV '17 nicht möglich.

Die Initialisierung von ABMSIM bildet die Betriebspopulation der ASE 2016 ab und beachtet hierbei die vordefinierten Größenklassen und Betriebstypen. Die Ergebnisse zeigen dabei eine extrem hohe Konzentration von Anfall an N aus der Tierhaltung in dem Kreis Borken, mit mehrheitlich tierhaltenden Betrieben, die mehr als 250 kg N ha^{-1} vorweisen. Die Ergebnisse der hohen Konzentration an N in Borken und angrenzenden Kreisen decken sich hierbei mit den beobachteten Daten des Nährstoffberichts wie in Abbildung 2 dargestellt. Im Vergleich zu dem Modell von Auburger et al. (2015) weist ABMSIM eine Auflösung auf Pixelebene und nicht nur auf Gemeindeebene auf.

Die Ergebnisse der Simulation mit der Auktion für Wirtschaftsdüngerverbringungsverträge zeigen, dass nahezu alle Betriebe die Anforderungen an die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} in der betrachteten Region erfüllen. Dennoch kommt es vereinzelt zu Betrieben die in der Auktion nicht genügend Wirtschaftsdüngerverbringungsverträge kaufen können, da nicht genug freie Ausbringungskapazitäten von aufnehmenden Betrieben vorhanden sind. Hierfür gibt es mehrere potenzielle Gründe. Dauerkultur- und Gartenbaubetriebe können in der Auktion keine Gebote abgeben, wodurch die Anzahl an verfügbarer landwirtschaftlicher Fläche zur Ausbringung abnimmt. Des Weiteren gibt es im Modell die Annahme einer maximalen Transportdistanz, die sich aus der Zahlungsbereitschaft und den Transportkosten pro km ergibt. Hierdurch verringert sich die Anzahl der möglichen Vertragspartner in der Auktion und führt zu Betrieben, die nicht allen überschüssigen Wirtschaftsdünger außerhalb des Betriebes verbringen können.

Der so verwendete Ansatz der maximalen Transportdistanz ähnelt dem Next-Neighbour Ansatz von Auburger et al. 2015, da es keine durch die Betriebsstruktur ermittelte Zahlungsbereitschaft gibt, sondern die Zahlungsbereitschaft für die am nächsten gelegenen landwirtschaftlichen

Flächen am höchsten ausfallen. Der Vorteil von ABMSIM zeigt sich in den Ergebnissen darin, dass nicht alle landwirtschaftliche Fläche hierbei als Ausbringungsfläche zu Verfügung steht, da beispielsweise verschiedene Dauerkulturen nicht mit Wirtschaftsdünger gedüngt werden.

6. Zusammenfassung

Die DüV ist das grundlegende agrar- und umweltpolitische Instrument zur Regulierung der Nutzung von organischen und mineralischen Düngern und damit dem landwirtschaftlichen Eintrag von Stickstoff (N) und Phosphor (P) in die Umwelt. Die DüV, als zentrale Umsetzung der Nitratrictlinie in Deutschland, ist nach 10 Jahren im Juni 2017 novelliert worden. Das vorliegende Forschungsprojekt „Regionale Modellierung von agrarstrukturellen Änderungen in einem agentenbasierten Ansatz unter Berücksichtigung des überbetrieblichen Austausches von organischen Dünger“ ist im Rahmen des Clusterprojekts „Skalenübergreifende Modellierung von Änderungen der Agrarstruktur und landwirtschaftlichen Stoffflüssen in Regionen von Nordrhein-Westfalen“ bearbeitet worden. Ziel des Clusterprojekts ist, durch eine Kopplung der Modelle SIMPLACE (Teilprojekt 1), FarmDyn (Teilprojekt 2) und ABMSIM (Teilprojekt 3), eine Abbildung von Nährstoffflüssen auf pflanzlicher, betrieblicher sowie regionaler Ebene zu ermöglichen, um die Auswirkung der novellierten DüV in NRW mit Fokus auf N und P zu evaluieren. Das Forschungsziel im Teilprojekt 3 ist die Analyse der überbetrieblichen Verbringung und der Nährstoffströme zwischen landwirtschaftlichen Betrieben und administrativen Einheiten in Regionen NRWs und deren Effekte auf Betriebsstrukturen sowie der Verlagerung von N (und P).

Methodik: Zusätzlich zu dem im Antrag vorgestellten agenten-basierten Modell ABMSIM ist, aufgrund der sequenziellen Natur der Modellkette sowie der Verzögerung der Verfügbarkeit der Datenbasis, das Modell ManTra entwickelt worden. Das räumliche Gleichgewichtsmodell ManTra ist ein Handelsmodell, welches Transporte von N zwischen Gemeinden in NRW simuliert. Zur Entwicklung der Baseline (DüV'07) werden observierte Transporte von N des Nährstoffberichts mit Hilfe eines Bi-Level Schätzungsverfahrens reproduziert. ManTra verwendet hierzu Daten zu Anfallmengen von N aus tierischer Haltung und Gärresten sowie Daten über Transportmengen auf Kreisebene aus dem Nährstoffbericht. Diese werden mit Hilfe eines Schätzungsverfahrens zur Gemeindeebene disaggregiert. Aufgrund der räumlichen Auflösung, bildet ManTra nur flächenbezogene Maßnahmen der DüV ab, wie die 170 kg N ha⁻¹ Ausbringungsobergrenze. ManTra simuliert die nun erfolgende Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in die 170 kg N ha⁻¹ Ausbringungsobergrenze (Scenario (DüV '17)).

ABMSIM ist ein räumlich explizites agentenbasiertes Modell, welches zur Analyse von strukturellen Änderungen im Agrarsektor entwickelt wurde (Britz 2013). Die Interaktion der Landwirte in ABMSIM wird durch Auktionen erfasst, sie umfasst den Landmarkt sowie den Markt für organischen Dünger. In der Auktion bieten Landwirte räumlich differenzierte Güter an (Pachtflächen, Aufnahme von Gülle), auf die andere Landwirte Gebote abgeben können. Ob ein Landwirt ein Gebot abgibt und dessen Höhe, reflektiert die erwartete Gewinnsteigerung nach Zupacht bzw. zusätzlichem Nährstoffexport. Die Gewinnsteigerung wird nicht für jedes

Gebot direkt in FarmDyn als detailliertes einzelbetriebliches Modell simuliert, stattdessen kommt ein Meta-Model zum Einsatz. Ausgewählte Merkmale, in der Schätzung, sind an Teilprojekt 2 angelehnt und durch Daten zu Preisen und Arbeitskräften komplementiert. Die Betriebspopulation in ABMSIM orientiert sich an der Klassifikation der Europäischen Kommission auf Ebene der Allgemeinen Betriebswirtschaftlichen Ausrichtung und ist an die Modellstruktur von FarmDyn angepasst. Die Daten zur Initialisierung der Betriebspopulation sind der Agrarstrukturerhebung 2016 (ASE 2016) entnommen. Hierzu wurden, mit Hilfe eines Highest-Posterior Density Schätzers und Daten auf Gemeinde und Kreisebene, Kreuztabellen mit Häufigkeiten für Betriebstyp und Betriebsgrößen auf Gemeindeebene entwickelt. Die räumliche Auflösung der landwirtschaftlichen Fläche ist 100x100 m (1 ha) und umfasst alle Landnutzungstypen der CORINE Landdatenbank. Zur Initialisierung der Fläche und Betriebspopulation werden die Betriebe zufällig auf landwirtschaftliche Flächen innerhalb einer Gemeinde verteilt und je nach Größenklasse die Acker- und Graslandfläche zugewiesen.

Die Entwicklung und Implementation des Nährstoffmarkts basiert auf einer Vickrey-Auktion von Wirtschaftsdüngerverbringungsverträgen. Die Verträge werden von aufnehmenden Betrieben angeboten und können von abgebenden Betrieben ersteigert werden. Die Anzahl an angebotenen Verträge je aufnehmenden Betrieb ergibt sich durch die Ausscheidungsmenge der GV des Betriebes und der landwirtschaftlichen Fläche, wodurch die freien Aufnahmekapazitäten vor dem Hintergrund der Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} ermittelt werden. Abgebende Betriebe ermitteln anhand der dualen Gewinnfunktion und ihrer GV- und Landausstattung die maximale Zahlungsbereitschaft für die Wirtschaftsdüngerverbringungsverträge und bieten auf dem Nährstoffmarkt entsprechend. Die Simulation der DüV '17 greift in ABMSIM daher auf zwei Ebenen. Zum einen erfasst der Meta-Modellierungsansatz eine Detailtiefe der DüV wie in Teilprojekt 2 beschrieben, zum anderen ist auf Ebene der Agenten in ABMSIM die flächenbezogene Ausbringungsobergrenze von N die limitierende Maßnahme.

Ergebnisse: Die Ergebnisse der Kalibrierung zeigen, dass ein kleiner Teil (17.7%) der N-Exporte der Kreise nahezu perfekt mit dem Modell abgebildet werden können, während ein Großteil (82.2%) der N-Exporte nicht durch das Modell reproduzierbar ist. Die perfekt abgebildeten N-Exporte weisen dabei durchschnittlich höhere N-Exportmengen mit 78.77 t auf, während die nicht reproduzierten Transporte einen Mittelwert von 23.64 t aufweisen. Die geringe Anzahl an reproduzierten N-Exporten und der vergleichbar hohe Mittelwert der transportierten N-Menge basieren primär auf der Modellstruktur von ManTra. Zum einen kann ManTra aufgrund der Annahme minimaler Transportkosten keine wechselseitigen Transporte simulieren, welche häufig im Nährstoffbericht zu beobachten sind. Zum anderen ist die maximale Transportstrecke in ManTra, aufgrund der verfügbaren Rechenleistung auf 40 km beschränkt. Trotz der genannten Limitation kann als Fazit der Kalibrierung von ManTra

festgehalten werden, dass ein großer Teil der volumenstarken Transporte, welche, sowohl ökonomisch als auch ökologisch den größten Einfluss in NRW haben, abgebildet werden können.

Die Baseline (DüV '07) in ManTra weist aus, dass die größten Netto-Exporte in den NRW-Kreisen Kleve, Viersen, Coesfeld und Warendorf mit 5 bis 20 kg N ha⁻¹ und in Borken mit mehr als 20 kg N ha⁻¹ zu finden sind. Die volumenstärksten Importe von N in der Baseline sind in den Kreisen Düren, Aachen und Heinsberg zu finden, welche primär aus den grenznahen Niederlanden kommen. Heinsberg weist hierbei die größten N-Exporte mit mehr als 40 kg N ha⁻¹ auf. Neben den grenznahen Kreisen zeigen die Kreise Steinfurt, Unna und Recklinghausen hohe Importmengen mit 5 bis 20 kg N ha⁻¹. Ergebnisse für kreisfreie Städte, die einen kleinen Anteil an landwirtschaftlicher Fläche haben, sind nicht erfasst. Im Szenario (DüV '17) wird die Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in der Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha⁻¹ simuliert. Die Kreise Borken und Warendorf mit mehr als 10 kg N ha⁻¹ bzw. 5 bis 10 kg N ha⁻¹ stellen hierbei die größten Zuwächse in der N Exportmenge. Grenznahe Kreise wie Kleve und Viersen weisen hingegen nur geringe Zuwächse der Netto N-Exporte aus. Auch in Heinsberg und Düren steigt die Netto N-Exportmenge, was jedoch nicht als vergrößerter N-Export zu interpretieren ist, sondern als Verringerung der Importmenge. Eine Verringerung des Netto N-Export bzw. ein Anstieg der Importmenge ist in den Kreisen Wesel, Rhein-Kreis Neuss mit mehr als 10 kg N ha⁻¹ zu beobachten, während die Kreise Recklinghausen und Steinfurt geringere Mengen von 5 bis 10 kg N ha⁻¹ mehr importieren. Zusammenfassend lässt sich ein klarer Trend der Transporte erkennen, welcher ausgehend von Kreisen mit hohem Nährstoffdruck durch hohe Viehbesatz und Biogasdichten sowie hohen Importen aus dem Ausland in Richtung der angrenzenden Kreise im Landesinneren geht. Auch hervorzuheben ist, dass trotz der großen Anzahl an Biogasanlagen in den Kreisen Warendorf, Gütersloh, Soest, Paderborn es zu keinen, mit ManTra erfassbaren, Anstiegen in der Verbringung von organischem Dünger in Nachbarkreisen kommt.

Die Ergebnisse der Initialisierung von ABMSIM zeigen, dass die mit der ASE 2016 ermittelte Betriebspopulation eine realistische Konzentration von viehintensiven Regionen reproduzieren kann. Hierbei zeigt sich, für die ausgewählte Region im Nordwesten NRWs, eine Konzentration von sehr hohen N Anfall aus der Tierhaltung in dem Kreis Borken. Im Kreis Borken und in angrenzenden Kreisen sind extrem hohe Anfälle von N mit mehr als 470 kg N ha⁻¹ für einzelne Betriebe zu beobachten, welche dadurch gezwungen sind organischen Dünger überbetrieblich zu verbringen. Die Simulation zeigt, dass durch die Auktion von Wirtschaftsdüngerverbringungsverträgen die Verteilung von N in der Fläche mit ABMSIM abgebildet werden kann, sodass nahezu alle Betriebe die Ausbringungsobergrenze erfüllen. Die in dem Teilprojekt zusätzlichen Forschungsfragen konnten aufgrund der Problematik mit der Schätzung der dualen Gewinnfunktion nicht beantwortet werden.

Diskussion: ManTra erlaubt die Simulation von N Handelsströmen vor dem Hintergrund der neuen DüV auf regionaler Ebene in NRW. Durch die regionale Betrachtung der Transporte von N und der damit einhergehenden Aggregation ergibt sich eine abnehmende Detailtiefe der DüV im Vergleich zu einzelbetrieblichen Untersuchungen. Zur Analyse der novellierten DüV bietet sich daher eine flächenbezogene Maßnahme, wie die Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} an, welche mit ManTra simuliert wird. Durch das Bi-Level Schätzungsverfahren ermöglicht es observierte Transporte von N zu einem gewissen Grad zu reproduzieren und damit implizite Kosten in die Simulation aufzunehmen. Diese Transaktionskosten beinhalten beispielsweise Kosten zum Finden von aufnehmenden Betrieben, welche durch Ressentiments gegen die Aufnahme von organischem Dünger wie Unkrautbelastung, Bodenverdichtung durch Ausbringung, Geruchsbelastung und fehlender Güllelager Infrastruktur in manchen Regionen vorhanden sein können. Trotz der Vorteile der Kalibrierung müssen die Ergebnisse vor dem Hintergrund der Limitationen des Modells bewertet werden. Vor allem die geringe Anzahl der reproduzierten Transporte sowie die kleine maximale Transportreichweite vor dem Hintergrund der verfügbaren Rechenkapazität haben einen starken Einfluss auf die Interpretierbarkeit der Ergebnisse.

ABMSIM, als agenten-basiertes Modell (ABM), ermöglicht die Simulation von Interaktionen innerhalb einer heterogenen Betriebspopulation. Zur Interaktion zwischen Betrieben können dazu verschiedene Verhaltensannahmen verwendet werden, welche in ABMSIM, sowohl Preference-Based als auch ökonomisch rational durch duale Gewinnfunktionen dargestellt werden. Die Interaktionen in ABMSIM werden im Nährstoffmodul als Vickrey-Auktion simuliert, in welcher aufnehmende Betriebe Wirtschaftsdüngerverbringungsverträge anbieten und abgebende Betriebe darauf bieten. Die Auktionen ersetzen dabei zum einen die primären bilateralen Absprachen zwischen Betrieben und zum anderen die Position von Vermittlungsstellen wie beispielsweise der Nährstoffbörse.

Die im Teilprojekt 3 angestrebte ökonometrische Schätzung einer dualen Gewinnfunktion mit Hilfe von FarmDyn, basierend auf der ASE 2016 unter Berücksichtigung der beiden unterschiedlichen DüV, konnte nicht realisiert werden. Zum Zeitpunkt der Antragstellung lagen in einem DFG-Projekt erste, ermutigende Ergebnisse zur Schätzung von dualen Gewinnfunktionen vor. Diese Ergebnisse waren jedoch mit der Modellversion vor dem detaillierten Einbau der DüV erzeugt worden, mit einem Fokus auf größere Haupterwerbsbetriebe. Im DFG-Projekt wurde davon ausgegangen, dass weitere Arbeiten am Schätzansatz die noch mäßige Abbildung des Grenzwertes des Landes – zentral für die Integration in das ABM – deutlich verbessern würden. Dies stellte sich jedoch nicht ein. Methodisch stellt die Interaktion zwischen dem Zukauf von Düngerecht (= Export von Nährstoffen) und der Zupacht von Land eine Herausforderung dar. Eine befriedigende Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Betriebsausstattung (Land, Arbeit), Bestandgröße,

den detaillierten Maßnahmen der DüV auf der einen Seite und den Grenzwerte für Land und Düngerechten auf der anderen Seite, konnte mit der dualen Gewinnfunktion nicht erzielt werden. Bereits erfolgreich beantragte Folgeprojekte werden deshalb stattdessen Ansätzen aus dem Machine-Learning für die Schätzung der Grenzwerte verwenden.

Für die Anwendung im USL kam erschwerend hinzu, dass erstens die Betriebspopulation auch viele kleinere Betriebe mit weniger als 30 ha und Nebenerwerbsbetriebe umfasst. Unter realistischen Opportunitätskosten für Arbeit und unter Anrechnung von Investitionskosten weist FarmDyn keine positiven Ergebnisse für den Gewinn aus landwirtschaftlichen Einkommen aus, selbst unter optimistischen Annahmen zu Input- und Outputpreisen. Zweitens finden sich viele Betriebe mit sehr hohen Beständen und geringer Flächenausstattung, für die sich sehr hohe Grenzwerte des Landes (und Zahlungsbereitschaften für den Gülleexport) ergeben.

Die Initialisierung der Betriebe der beobachteten Region im Nordwesten von NRW in ABMSIM beruht auf der entwickelten gemeindespezifischen Betriebspopulation nach Betriebstyp und Größenklasse auf Grundlage der ASE 2016. Betriebstypen sind dabei auf der Ebene der Allgemeinen Betriebswirtschaftlichen Ausrichtung (BWA) nach Klassifikation der Europäischen Kommission dargestellt und bieten so eine mäßige Detailtiefe der Betriebstypen im Vergleich zu anderen ABM Modellen in den Niederlanden (Schouten et al. 2013) oder Belgien (van der Straeten et al. 2011; Willeghems et al. 2016). Analysen zu Änderungen einzelner Betriebstypen sind daher beschränkt auf die größte Klassifikationsstufe Allgemeine BWA.

Die Ergebnisse in ABMSIM sind in die Initialisierung und die Simulation des Nährstoffmarktes eingeteilt und werden zur Vergleichbarkeit zu ManTra und anderen Studien wie Auburger et al. (2015) jeweils als N in kg ha^{-1} dargestellt. Die Ergebnisse der Initialisierung zeigen eine hohe Menge N mit mehr als 250 kg N ha^{-1} für vereinzelte Betriebe, in der beobachteten Region. Eine extrem hohe Konzentration ist dabei in dem Kreis Borken zu erkennen, was auch in den letzten Nährstoffberichten (LWK NRW 2014, 2018b) zu erkennen ist. Wir schließen daraus, dass die Initialisierung mit den Daten der ASE 2016 die angefallene Menge an N basierend auf dem Betriebstyp und der Größenklasse gut wiedergeben kann.

Die Ergebnisse der Simulation des Nährstoffmarktes mit Hilfe der Auktion für Wirtschaftsdüngerverbringungsverträge zeigen, dass fast alle Betriebe die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} nicht überschreiten. Jedoch zeigen vereinzelt Betriebe eine Ausbringungsmenge von N über 170 kg N ha^{-1} , da sie auf dem Nährstoffmarkt nicht genug aufnehmende Betriebe finden. Diese Ergebnisse sind auf Charakteristika des Modells zurückzuführen. Zum einen nehmen Betriebe, die in der Betriebstypologie „Rest“ wie Gartenbau- und Dauerkulturbetriebe, zusammengefasst sind, nicht am Nährstoffmarkt teil und

nehmen daher auch keinen Wirtschaftsdünger auf. Zum anderen reicht die im Modell angenommene maximale Transportdistanz nicht aus, um genug aufnehmende Betriebe in der beobachteten Region im Nordwesten NRWs zu finden.

Weitere Forschungsziele des Teilprojekts, die mit ABMSIM analysiert werden sollten, sind aufgrund der Ergebnisse der Meta-Modellierung mit Werten der ASE 2016 unter der DüV '07 und DüV '17 nicht möglich. Jedoch zeigen die vorgestellte Methodik und die resultierenden Ergebnisse bereits vielversprechende Möglichkeiten den Nährstoffmarkt in NRW abzubilden und bei Verbesserung der Meta-Modellierung zu analysieren.

7. Schlussfolgerungen für die Praxis

Forschungsziel des Teilprojekt 3 „Regionaler Modellierung von agrarstrukturellen Änderungen in einem agentenbasierten Ansatz unter Berücksichtigung des überbetrieblichen Austausches von organischen Dünger“ war die Analyse regionaler Effekte der Novellierung der DüV mit Bezug auf Transporte von organischen Dünger sowie agrarstruktureller Veränderungen. Schlussfolgerungen aus der Projektarbeit lassen sich durch die vorgestellten Ergebnisse vor allem im Bereich der Verteilung von N durch Transporte in NRW machen, während Aussagen zu agrarstrukturellen Veränderungen durch die novellierte DüV nicht erreicht werden konnten. Die Ergebnisse legen nahe, dass aufgrund der Novellierung der DüV sowohl Menge als auch Transportdistanzen erheblich zunehmen werden. Hiermit verbunden sind auch steigende Kosten für die exportierenden Betriebe (siehe auch Ergebnisse Teilprojekt 2). Eine gesetzkonforme Verbringung ist nur zu erwarten, wenn in den aufnehmenden Regionen mehr Betriebe gewonnen werden können, die Gülle aufnehmen. Hier kommt der Beratung eine Schlüsselrolle zu.

Gülletransporte werden, in abgebenden als auch aufnehmenden Regionen, zunehmend von Anwohnern als störend empfunden; dies gilt insbesondere auch für Geruchsbelästigungen. Hier sollte geprüft werden, ob dem Stand der Technik entsprechend gearbeitet wird.

8. Literaturverzeichnis

An, Li (2012): Modeling human decisions in coupled human and natural systems. Review of agent-based models. In: *Ecological Modelling* 229, S. 25–36. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010.

Asai, Masayasu; Langer, Vibeke; Frederiksen, Pia; Jacobsen, Brian H. (2014): Livestock farmer perceptions of successful collaborative arrangements for manure exchange. A study in Denmark. In: *Agricultural Systems* 128, S. 55–65. DOI: 10.1016/j.agsy.2014.03.007.

Auburger, Sebastian; Wustholz, Richard; Petig, Eckart; Bahrs, Enno (2015): Biogas digestate and its economic impact on farms and biogas plants according to the upper limit for nitrogen spreading—the case of nutrient-burdened areas in north-west Germany. In: *AIMS Energy* 3 (4), S. 740–759. DOI: 10.3934/energy.2015.4.740.

Battel, R. D. (2006): Farmer Willingness to Enter into Manure Exchange Agreements: Differences Based on Age and Farm Size. In: *Journal of Extension* (44 (3)).

BKG (2017): Verwaltungsgebiete 1:250.00. Hg. v. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Online verfügbar unter http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=13&gdz_user_id=0, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

Britz, Wolfgang (2013): ABMSim - A flexible framework for Agent Based Models to simulate spatially explicit structural change in agriculture. Hg. v. Wolfgang Britz. Institute for Food and Resource Economics, Bonn. Bonn. Online verfügbar unter http://www.ilr.uni-bonn.de/em/rsrch/abmsim/abmsim_version1.pdf.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. BMEL (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis. BMEL. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/index.html, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

DESTATIS (n.d.): Informationen zur Agrarstrukturerhebung 2016. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Agrarstrukturerhebung2016/AktuellAgrarstrukturerhebung2016.html>.

Diewert, W. E. (1973): Functional Forms for Profit and Transformation Functions. In: *Journal of Economic Theory* (6), S. 284–316, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

Dise, Nancy; Ashmore, Mike; Belyazid, Salim; Bleeker, Albert; Bobbink, Roland; Vries, Wim de et al.: Nitrogen as a threat to European terrestrial biodiversity. In: The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives, S. 463–494, zuletzt geprüft am 08.05.2019.

EEA (2012): Copernicus Land Monitoring Service - Corine Land Cover. Hg. v. European Environment Agency. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-corine#tab-figures-produced>.

Europäische Kommission. EC (2008): Commission Regulation (EC) No 1242/2008 of 8 December 2008 establishing a Community typology for agricultural holdings. EC (L 335), S. 3–24.

Europäischer Rat (1991): Richtlinie des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen, (91/676/EWG). In: Official Journal of the European Communities, zuletzt geprüft am 08.05.2019.

Gocht, Alexander; Röder, Norbert (2014): Using a Bayesian estimator to combine information from a cluster analysis and remote sensing data to estimate high-resolution data for agricultural production in Germany. In: *International Journal of Geographical Information Science* 28 (9), S. 1744–1764. DOI: 10.1080/13658816.2014.897348.

Gömman, Horst; Pfyngten, Tony; Kreins, Peter (2018): Quantifizierung regionaler Stickstoffbilanzen der Landwirtschaft in NRW mit dem Modell RAUMIS. Düsseldorf 13.12.2018. Online verfügbar unter https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/2._n-bilanzen-zusf_und_top_6c_0.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2019.

Google (n.d.): Google Maps. Online verfügbar unter <https://www.google.de/maps>.

Grizzetti, Bruna; Bouraoui Faycal; Billen, Gilles; van Grinsven, Hans; Cardoso, Ana; Thieu, Vincent et al.: Nitrogen as a threat to European water quality. In: The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives, S. 379–404, zuletzt geprüft am 08.05.2019.

Happe, Kathrin; Kellermann, Konrad; Balmann, Alfons (2006): Agent-based Analysis of Agricultural Policies: an Illustration of the Agricultural Policy Simulator AgriPoliS, its Adaptation and Behavior. In: *Ecology and Society* (11(1)), S. 49, zuletzt geprüft am 15.05.2019.

Heckelei, Thomas; Mittelhammer, Ron; Jansson, Torbjorn (2008): A Bayesian Alternative To Generalized Cross Entropy Solutions for Underdetermined Econometric Models. Institute for Food and Resource Economics, Bonn. Bonn, zuletzt geprüft am 08.05.2019.

- Huber, Robert; Bakker, Martha; Balmann, Alfons; Berger, Thomas; Bithell, Mike; Brown, Calum et al. (2018): Representation of decision-making in European agricultural agent-based models. In: *Agricultural Systems* 167, S. 143–160. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.09.007.
- Kellermann, Konrad; Balmann, Alfons (Hg.) (2006): How smart should farms be modeled? Behavioral foundation on bidding strategies in agent-based land market models. International Association of Agricultural Economists Conference. Gold Coast, Australia, August, zuletzt geprüft am 07.05.2019.
- KTBL (2014): Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). Darmstadt.
- KTBL (2016): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). Darmstadt.
- Kuhn, Till; Schäfer, David; Holm-Müller, Karin; Britz, Wolfgang (2019): On-farm compliance costs with the EU-Nitrates Directive. A modelling approach for specialized livestock production in northwest Germany. In: *Agricultural Systems* 173, S. 233–243. DOI: 10.1016/j.agsy.2019.02.017.
- LWK NRW (2014): Nährstoffbericht 2014 über Wirtschaftsdünger und andere organische Düngemittel in NRW. Hg. v. Direkt der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen als Landesbeauftragter. Landwirtschaftskammer NRW. Münster, zuletzt geprüft am 08.05.2019.
- LWK NRW (2018a): Biogas in Nordrhein-Westfalen. Unter Mitarbeit von Katharina Karbach-Nölke. Hg. v. Landwirtschaftskammer NRW. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/biogas/veroeffentlichungen/biogas-in-nrw.htm>, zuletzt geprüft am 09.05.2019.
- LWK NRW (2018b): Nährstoffbericht 2017 über Wirtschaftsdünger und andere organische Dünger. Hg. v. Direkt der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen als Landesbeauftragter. Landwirtschaftskammer NRW. Münster, zuletzt geprüft am 08.05.2019.
- Matthews, Robin B.; Gilbert, Nigel G.; Roach, Alan; Polhill, J. Gary; Gotts, Nick M. (2007): Agent-based land-use models. A review of applications. In: *Landscape Ecol* 22 (10), S. 1447–1459. DOI: 10.1007/s10980-007-9135-1.
- Nährstoffbörse (2019): Nährstoffbörse NRW. Hg. v. Kuratorium für Betriebshilfsdienste und Maschinenringe in Westfalen-Lippe e.V. Online verfügbar unter <https://naehrstoffboerse.de/de/>, zuletzt geprüft am 09.05.2019.
- Núñez, Jennifer; McCann, Laura (2004): Crop Farmers' Willingness To Use Manure. American Agricultural Economics ASSociation Annual Meeting. Denver, Colorado 2004, zuletzt geprüft am 06.05.2019.

Paris, Quirino; Drogué, Sophie; Anania, Giovanni (2011): Calibrating spatial models of trade. In: *Economic Modelling* 28 (6), S. 2509–2516. DOI: 10.1016/j.econmod.2011.07.008.

Schouten, Marleen; Opdam, Paul; Polman, Nico; Westerhof, Eugène (2013): Resilience-based governance in rural landscapes. Experiments with agri-environment schemes using a spatially explicit agent-based model. In: *Land Use Policy* 30 (1), S. 934–943. DOI: 10.1016/j.landusepol.2012.06.008.

Schreinemachers, Pepijn; Berger, Thomas (2011): An agent-based simulation model of human–environment interactions in agricultural systems. In: *Environmental Modelling & Software* 26 (7), S. 845–859. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.02.004.

Townsend, Alan R.; Howarth, Robert W.; Bazzaz, Fakhri A.; Booth, Mary S.; Cleveland, Cory C.; Collinge, Sharon K. et al. (2003): Human health effects of a changing global nitrogen cycle. In: *Frontiers in Ecology and the Environment* 1 (5), S. 240–246. DOI: 10.1890/1540-9295(2003)001[0240:HHEOAC]2.0.CO;2.

van der Straeten, Bart; Buysse, Jeroen; Nolte, Stephan; Lauwers, Ludwig; Claeys, Dakerlia; van Huylenbroeck, Guido (2011): Markets of concentration permits. The case of manure policy. In: *Ecological Economics* 70 (11), S. 2098–2104. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2011.06.007.

Willeghems, G.; Clercq, L. de; Michels, E.; Meers, E.; Buysse, J. (2016): Can spatial reallocation of livestock reduce the impact of GHG emissions? In: *Agricultural Systems* 149, S. 11–19. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.08.006.

9. Liste der Veröffentlichungen und Präsentationen

Schäfer, D., Britz, W. (2017): Estimating impacts of the revised German fertilizer ordinance on manure transport flows within North Rhine-Westphalia, Poster presented at the EAAE XVth Congress, Parma (Italy).

Kuhn, T., Schäfer, D. 2018. A farm typology for North Rhine-Westphalia to assess agri-environmental policies, Institute for Food and Resource Economics, Discussion Paper 2018:1, http://www.ilr.uni-bonn.de/agpo/publ/dispa/download/dispa18_01.pdf (zuletzt geprüft 15.02.19).

10. Kurzfassung

Die Düngeverordnung (DüV) ist das zentrale agrar- und umweltpolitische Instrument zur Steuerung des Einsatzes von Wirtschafts- und Mineraldünger in Deutschland. Sie ist die primäre Implementierung der EU Nitrate Directive (NiD), mit dem Ziel, den Eintrag von Nährstoffen aus der Landwirtschaft in die Umwelt zu regulieren. Aufgrund des Verfehlens der Zielvorgabe der NiD wurde die DüV im Jahre 2017 novelliert. Die novellierte DüV implementiert dabei strengere Maßnahmen für die Nährstoffausbringung sowie zusätzliche Anforderungen an emissionsarme Technik. Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts ist es, die Novellierung auf regionaler Ebene mit Fokus auf Wirtschaftsdüngertransporte aus ökonomischer Sicht zu analysieren. Das Projekt ist als Teilprojekt in ein übergeordnetes Clusterprojekt integriert, welches auf verschiedenen Skalen (Feld, Betrieb, Region) die Auswirkungen der Novellierung untersucht. Es widmet sich der regionalen Analyse und untersucht mittels des räumlichen Gleichgewichtsmodells ManTra und des agentenbasierten Modells ABMSIM Wirtschaftsdüngertransporte zwischen Kreisen in Nordrhein-Westfalen (NRW). Die Datengrundlage basiert auf der Agrarstrukturerhebung 2016 sowie dem Nährstoffbericht 2016. Die Maßnahme der DüV, die auf regionaler Ebene beobachtet wird, ist die Anrechnung von pflanzlichen Gärresten in die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} . Die Ergebnisse von ManTra zeigen hierbei eine Steigerung der Exporte aus den Kreisen mit hohem Stickstoffaufkommen aus der Tierhaltung und Gärresten. Sie sind vorwiegend im Nordwesten von NRW mit Borken, Kleve und Coesfeld vorzufinden. Die aufnehmenden Kreise Wesel, Recklinghausen und Steinfurt sind in direkter Nachbarschaft zu den exportierenden Kreisen zu finden. Eine besondere Rolle in den Ergebnissen nehmen die Kreise Heinsberg und Viersen ein, welche durch die Maßnahme weniger Nährstoffe aus NRW importieren, jedoch die Importe aus den Niederlanden konstant halten. Im Laufe des Projekts ist es jedoch gelungen, ABMSIM um ein funktionierendes Nährstoffauktionsmodul zu erweitern und die Betriebspopulation von NRW darzustellen. Hierbei zeigt ABMSIM vielversprechende Ergebnisse, um in folgenden Entwicklungen auch das Meta-Model mit in die Analyse zu integrieren. Durch die Ergebnisse von ManTra wird deutlich, dass die exportierte Wirtschaftsdüngermenge zwischen Kreisen vor allem in hoch belasteten Gebieten zunehmen wird. Die Bereitschaft zur Aufnahme von Wirtschaftsdünger von Betrieben in angrenzenden Regionen ist jedoch nicht nur abhängig von monetären Ausgleichszahlungen, sondern auch von Ressentiments gegenüber der Nutzung von Wirtschaftsdüngern, wie Geruchsbelastung, Unkrautbelastung oder Konflikten mit Arbeitsspitzen im Ackerbau. Der Politik kommt hierdurch eine zentrale Rolle im Bereich der Beratung und der Entwicklung unterstützender Maßnahmen in den Regionen mit Nährstoffaufnahmekapazitäten zu.

11.Executive Summary

The Fertilization Ordinance (FO) is the primary agricultural and environmental policy instrument to regulate the use of organic and mineral fertilizer in Germany. The FO is the implementation of the EU Nitrate directive (NiD), which aims at reducing the emission of nutrients from the agricultural sector to the environment. As Germany missed the target levels of the NiD, it revised the FO in the year of 2017. The revised FO comprises tighter measures for fertilizer management with focus on nutrient limits and additional investment in storage and low-emission application techniques. The objective of the research project is the analysis of economic indicators on a regional scale with focus on transports of organic fertilizer. The project at hand is a part of a cluster project, which evaluates the impact of the revised FO on three scales (plant, farm, and region). This part of the project applying a spatial equilibrium Model ManTra and an agent-based model ABMSIM to analyse regional changes in transports between counties within North Rhine-Westphalia (NRW), Germany. The data is based on the agricultural census 2016 as well as the nutrient report NRW 2016. On regional level the projects evaluates the FO measure in which farmers are obliged to apply a maximum amount of nitrogen of 170 kg N ha⁻¹ and the newly added accounting of nitrogen of plant based biogas digestate. The results of Mantra show an increase in exports in counties with high nitrogen accumulation of livestock farms and biogas digestate. The counties are primarily in the north-west of NRW, namely Borken, Kleve and Coesfeld. The receiving counties are Wesel, Recklinghausen and Steinfurt which are located in the direct neighborhood of the aforementioned counties. The counties Heinsberg and Viersen are playing a special role in ManTra as the implemented FO measure lead to a decrease in nutrient imports from NRW though no changes in imports from the Netherlands as they are considered constant. In the course of the project, we were able to implement a functioning nutrient auction module as well as to depict the farm population of NRW with ABMSIM. The model shows promising results to integrate the meta-model from project 2 into the model chain for further analysis. The results of ManTra show that organic fertilizer amount traded between counties in highly burdened region is going to increase. However, the willingness to accept organic fertilizer of farms in neighboring regions is not only dependent on monetary compensation but also on resentments to the use of organic fertilizer as it generates smell pollution, weed contamination and conflicts with labor intensive times in the arable part of the farm. Here, policy implementations play a pivotal role in counseling farms and to implement supporting measures in regions with nutrient absorption capacity.