

Hochschule Rhein-Waal

Potenziale und Hindernisse einer regionalen  
Nährstoffkreislaufwirtschaft

**Abschlussbericht**

**Gefördert unter dem Zeichen: 35605/01-36**

**20.05.2020 – 19.06.2023**

**Durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt**

**Prof. Dr. Florian Wichern**

**Bernou van der Wiel**

**Projektpartner**

**Prof. Dr. Eike Lüdeling**

**Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn**

## **Projektkennblatt**

**Aktenzeichen: 35605/01, Druckdatum: 28.02.2024:**

### **Zielsetzung und Anlass**

In vielen Gebieten basiert intensive Landnutzung auf dem Import von Futter- und Düngemitteln, was zu regionalen Nährstoffüberschüssen führt. Diese Überschüsse verursachen Umweltprobleme wie Gewässerverschmutzung. Im Kreis Kleve gibt es aufgrund vielfältiger intensiver Landnutzung ähnliche Probleme. Das Projekt zielt darauf ab, diese Herausforderung anzugehen. Dabei wird ein neuer Ansatz verfolgt: Entscheidungsträger bringen ihr Fachwissen in partizipativen Workshops ein, um das Gesamtsystem besser zu verstehen und gemeinsam Lösungsmöglichkeiten zu erarbeiten. Bestehende und potenzielle Maßnahmen sollen auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse bewertet werden .

Experteninformationen fließen in ein Stoffstrommodell des Kreises Kleve, um Szenarien für ein regionales Nährstoffkreislaufsystem zu simulieren. Ergebnisse und Szenarien werden in Expertenworkshops präsentiert, um gemeinsam wirksame Maßnahmen zu entwickeln. Ziel ist die Einrichtung eines Umsetzungsnetzwerks, das nach Projektabschluss eine Plattform für Biomasse- und Nährstoffmanagement bietet und zur Maßnahmenumsetzung beiträgt. Das Vorhaben strebt an, Nährstoffüberschüsse zu reduzieren und nachhaltige Biomassenutzung zu fördern, um negative Umweltauswirkungen, insbesondere Nährstoffanreicherung in Grund- und Oberflächengewässer zu minimieren.

### **Arbeitsschritte und Methoden**

Zunächst wurden mittels Stoffflussanalyse die Nährstoffflüsse für Stickstoff und Phosphor im Untersuchungsgebiet erfasst und für das Jahr 2020 aktualisiert. Auf Basis dieser Zahlen wurden die mengenmäßig bedeutendsten Nährstoffflüsse identifiziert und auf Basis des zugrunde liegenden Modells, wurden Szenarien simuliert. Zu dem Zwecke der Szenarientwicklung wurde ein partizipativer Modellierungsansatz gewählt. Dazu wurden im vorliegenden Projekt Stakeholder\*innen verschiedener relevanter Akteursgruppen in die Modellentwicklung einbezogen, um ein partizipatives Szenario zu entwickeln, aus welchem Maßnahmen zur Verbesserung der Nährstoffkreislaufwirtschaft in der Region abgeleitet werden, die die Stakeholder\*innen potenziell selber umsetzen. Mit Hilfe von Fragebögen, Einzelinterviews und Kleingruppentreffen wurden die Erkenntnisse der Akteur\*innen eingesammelt und Möglichkeiten der Verringerung von Nährstoffverlusten diskutiert. Aufgrund der Coronapandemie konnten keine partizipativen Expert\*innenworkshops stattfinden. Auch die Bereitschaft der Mitwirkung der Akteur\*innen war durch die Pandemie eingeschränkt. Parallel wurde die wissenschaftliche Literatur zu technologischen und nicht-technologischen Möglichkeiten der Nährstoffkreislaufwirtschaft analysiert um Optionen für eine zukünftige Verbesserung des lokalen Biomasse- und Nährstoffaustauschs zu entwickeln. Ein Expert\*innentreffen fand als Runder Tisch statt um von verschiedenen Akteur\*innen Feedback zu den bisherigen Erkenntnissen zu bekommen und die nächsten Schritte zur Entwicklung von Maßnahmen und der Etablierung eines Umsetzungsnetzwerks einzuläuten.

### **Ergebnisse und Diskussionen**

Das Projekt zielte darauf ab, ein Netzwerk von umsetzungswilligen Akteur\*innen in der Region zu schaffen, um Maßnahmen zur Reduzierung der Umwelteinflüsse von Stickstoff und Phosphor, insbesondere auf aquatische Ökosysteme zu entwickeln. Dies sollte die Abhängigkeit von

Nährstoffimporten verringern und die Kreislaufführung von Nährstoffen fördern. Allerdings wurde das Ziel aufgrund der Coronapandemie, die geplante Gruppendiskussionen beeinträchtigte und die Netzwerkbildung behinderte teilweise nicht erreicht. Eingeschränkte Kommunikation und eine gewisse Ermüdung der Akteur\*innen beeinflussten ebenfalls die Effektivität des Projekts. Nichtsdestotrotz konnte mit Hilfe partizipatorischer Ansätze eine Nährstoffstromanalyse des Kreises Kleve durchgeführt, bzw. aktualisiert werden. Dabei wurden in der Nutztierhaltung und im Futtermittelimport die größten Nährstoffflüsse identifiziert. Eine partizipatorische Modellierung resultierte in drei Szenarien zur Eliminierung von Futtermittelimporten. Die Ergebnisse zeigten, dass die Beseitigung dieser Importe zu einer Halbierung des Tierbestands führen würde. Die Reduktion der Tierhaltung um 30% und die Verwendung von 60% der pflanzlichen Produktion für Futtermittel reichen nicht aus, um die Tierversorgung sicherzustellen. Alle Szenarien führten zu reduziertem Stickstoffimport, Stickstoffexport und erhöhter regionaler Nährstoffwiederverwertung. Dennoch sind weitere Reduktionen der Stickstoffverluste durch tiefgreifende Änderungen erforderlich. Dabei können technologische und nicht-technologische Maßnahmen unterstützen die wichtige Maßnahme der Verbesserung der Nährstoffnutzungseffizienz im Pflanzenbau zu erhöhen. Allerdings haben sämtliche Maßnahmen weitreichende wirtschaftliche und strukturelle Auswirkungen für landwirtschaftliche Betriebe. Die Beteiligung der Akteurinnen war passiver als erwartet, womit die Einrichtung eines Umsetzungsnetzwerks zur Optimierung des Nährstoffmanagements nicht gelang. Bestehende Machtverhältnisse behindern oder erschweren Veränderungsprozesse. Insgesamt bleibt die Kreislaufführung der Nährstoffe begrenzt. Um die negativen Umwelteinflüsse zu reduzieren und die Unabhängigkeit von Nährstoffimporten zu steigern, sind substantielle Steigerungen der Nährstoffnutzungseffizienz, verstärkte regionale Nährstoffwiederverwertung und Veränderungen der Konsumgewohnheiten erforderlich. Für zukünftige Projekte wird empfohlen, Vorreiter\*innen zu nutzen, um andere Landwirt\*innen zu inspirieren.

### **Öffentlichkeitsarbeit**

Aufgrund der Coronapandemie konnte die Öffentlichkeitsarbeit des Projektes nicht erfolgen wie vormals geplant. Nichtsdestotrotz führte die Veröffentlichung einer Pressemitteilung auf Basis einer wissenschaftlichen Publikation zu großer Resonanz in der Presse und Landwirtschaft und führte zu Diskussionen mit verschiedenen Akteur\*innen.

Der Artikel mit dem Titel "Restoring nutrient circularity in a nutrient-saturated area in Germany requires systemic change" wurde in der wissenschaftliche Zeitschrift "Nutrient Cycling in Agroecosystems" als open access Artikel veröffentlicht. In diesem Artikel ist das entwickelte Grundmodell der Nährstoffflussanalyse dargestellt und werden die Nährstoffflüsse des Jahres 2016 vorgestellt. Die Arbeit diente als Basis für das Projektvorhaben mit der Anpassung der Daten an das Referenzjahr 2020. Der Artikel mit dem Titel "Challenges and opportunities for nutrient circularity: an innovation platform approach", ist ebenfalls in der wissenschaftlichen Zeitschrift erschienen. Die Szenarienentwicklung und deren Ergebnisse für die Stickstoffflüsse wurde mit dem Titel "Participatory modelling of scenarios to restore nitrogen cycles in a nutrient-saturated area" zur wissenschaftlichen Publikation eingereicht.

### **Fazit**

Das Projekt zielte darauf ab, ein Netzwerk umsetzungswilliger Akteur\*innen in der Region aufzubauen, um Maßnahmen zur Reduzierung negativer Umwelteffekte von Stickstoff und Phosphor zu entwickeln. Ziel war die Verringerung von Nährstoffimporten und die Verbesserung der überbetrieblichen

Kreislaufführung von Nährstoffen in der Region. Jedoch wurde das Ziel aufgrund der Coronapandemie und eingeschränkter Kommunikation mit Akteur\*innen nicht erreicht. Die partizipatorische Modellierung ergab Szenarien bei der ein Verzicht auf Futtermittelimporte die Anzahl der Nutztiere in der Region drastisch reduzieren würde und dadurch Nährstoffimporte und Nährstoffverluste verringert. Allerdings bewirkt diese Änderung sicherlich große ökonomische und strukturelle Veränderungen der Betriebe. Die Reduktion von Nährstoff- insbesondere Stickstoffverlusten erfordert eine stärkere Integration von Effizienzsteigerung bei der Nährstoffnutzung und Kreislaufführung durch verbesserte regionale Verwertung von Nährstoffen. Zudem bedarf es eines reduzierten Konsums tierischer Produkte. Die Region ist für die Produktion von Lebensmitteln für andere Region von hoher Relevanz, welches Nährstoffimporte und -exporte auch zukünftig beinhalten wird. Da es schwer war Akteur\*innen für ein Handlungsnetzwerk zu aktivieren, soll zukünftig stärker auf das Potenzial von Vorreiter\*innen andere zu inspirieren gesetzt werden. Vor diesem Hintergrund sind Betriebsbesuche bei erfolgreichen Anwender\*innen geplant.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	1
Einführung und Motivation.....	3
Vorgehensweise .....	7
Untersuchungsgebiet.....	7
Expert*innenkonsultation.....	8
Partizipative Modellierung.....	9
Projektergebnisse .....	12
Veröffentlichungen, Vorträge und studentische Arbeiten .....	17
Pressemitteilungen und Erwähnung in der Presse .....	17
Wissenschaftliche Veröffentlichungen .....	17
Konferenzteilnahme.....	18
Teilnahme an Workshops .....	18
Studentische Arbeiten .....	18
Fazit.....	19
Literaturangaben .....	21
Anhang.....	I
Tabelle S1: Neuer, angepasster Arbeits- und Zeitplan im Projekt.....	I
Tabelle S2: Adaptierte Arbeitspakete im Projekt.....	II
Fragebogen .....	III
Pressemitteilung auf der Website der Universität .....	VI

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Die Angaben der Beteiligten zu den einzelnen Punkten: Verteilung der pflanzlichen Produktion, Zusammensetzung des Viehbestands, Reduktion der Tieranzahl und Verteilung von Gülle und Mist. Jeder Punkt ist eine Antwort eines/r Akteur\*in. Bei den Punkten mit einem Fehlerbalken handelt es sich um Antworten von Akteur\*innen, die als Bereich angegeben wurden. Die Farben stehen für die verschiedenen Gruppen der beteiligten Akteur\*innen. .... 14

Abbildung 2 Differenz des N-Flusses für jedes Szenario (partizipatives Szenario (PS), Szenario mit Anpassung der Fläche lokal angebaute Feldfrüchte an die reduzierte Anzahl Tiere (CBS) und Szenario mit Anpassung des Viehbestands an das lokal verfügbare Futter (LBS)) im Vergleich zum Referenzjahr (Ref) 2020. Braune Fliesen zeigen einen Rückgang im Vergleich zum Referenzjahr und grüne Fliesen einen Anstieg im Vergleich zum Referenzjahr an. Die grauen Kreise zeigen den Interquartilsbereich der relativen Veränderung an, d. h. den Abstand zwischen dem 75 %- und dem 25 %-Quantil. Die Zahlen in den Kacheln zeigen den mittleren Nährstofffluss ( $t N \text{ Jahr}^{-1}$ ) für das Referenzjahr und die Veränderungen des Nährstoffflusses ( $t N \text{ Jahr}^{-1}$ ) für die Szenarien PS, CBS und LBS im Vergleich zum Referenzjahr an. .... 15

Abbildung 3 Darstellung der Kreislaufwirtschaftsindikatoren für das Referenzjahr (2020) und die drei Szenarien: Partizipatives Szenario (PS), Szenario mit Anpassung der Fläche lokal angebaute Feldfrüchte an die reduzierte Anzahl Tiere (CBS) und Szenario mit Anpassung des Viehbestands an das lokal verfügbare Futter (LBS). Die Fehlerbalken stellen das 16. und 84. Quantil dar; dies repräsentiert die Unsicherheit einer nicht-normalen Datenverteilung, analog zum Mittelwert  $\pm$  sd Notation in der Normalverteilung. .... 16

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Die Liste der Akteur*innen, die eingeladen wurden, durch Beantwortung eines Fragebogens und eines Interviews zur Erstellung der Szenarien beizutragen, und die, die geantwortet haben.....	11
Tabelle 2 Die Eigenschaften die als Input für das Modell der Szenarien verwendet wurden. PS steht für Participatory Scenario, CBS steht für Crop Buffered Scenario und LBS steht für Livestock Buffered Scenario. Die Merkmale sind als Prozentsätze dargestellt. ....	12
Tabelle 3 Die 12 wichtigsten Stickstoffflüsse im Referenzjahr 2020, die sich in den Szenarien wesentlich ändern oder deren Änderung ein Hinweis auf die Zirkularität der Szenarien gibt. Die Stickstoffflüsse sind in t N pro Jahr angegeben (p.a. = pro Jahr).....	13

## Abkürzungsverzeichnis

SFA = Stoffstromanalyse

PS = Participatory Scenario = Partizipatives Szenario

CBS = Crop Buffered Scenario = Anpassung der Fläche lokal angebauter Feldfrüchte an die reduzierte  
Anzahl Tiere

LBS = Livestock Buffered Scenario = Anpassung des Viehbestands an das lokal verfügbare Futter

Ref = Referenzjahr

N = Stickstoff

GVE = Großvieheinheiten



## Zusammenfassung

In ländlichen Regionen Deutschlands mit intensiver Landwirtschaft, insbesondere Tierhaltung, wie z.B. im Kreis Kleve am Niederrhein, kommt es durch hohe positive Nährstoffsalden in der Landwirtschaft oftmals zu regional ausgeprägten Nährstoffüberschüssen (eutrophe Regionen) und negativen Umwelteffekten in Grund- und Oberflächengewässern, in naturnahen Ökosystemen, sowie in Naturschutzgebieten. Ausschlaggebend für diese Effekte sind der Stickstoff- und Phosphattransfer in diese Umweltkompartimente. Vor dem Hintergrund der europäischen und nationalen Gesetzgebungen und Regularien, bedarf es einer weiteren Reduktion der Nährstofffrachten in diese Umweltkompartimente, welches sich in den letzten Jahren in zahlreichen Anpassungen der Düngeregularien widerspiegelt. Eine stärkere regionale Kopplung von Nährstoffangebot und -nachfrage kann hierbei eine effiziente Nutzung von Nährstoffen in einem Kreislaufsystem ermöglichen und helfen Überschüsse zu reduzieren. Insbesondere in Gebieten, in denen Tierhaltung dominiert, bedeutet dies, dass die Anzahl der gehaltenen Tiere von den lokal verfügbaren Futtermitteln abhängen sollte um Futtermittelimporte und damit Nährstoffimporte in die Region zu reduzieren. Eine Methode zur Abschätzung von regionalen Nährstoffsalden und damit potenziellen negativen Umwelteffekten ist die Stoffstromanalyse (SFA = Substance Flow Analysis) von Produktionssystemen oder Wertschöpfungsketten. Oftmals fehlen zu Nährstoffflüssen allerdings relevante statistische Daten oder sind schwer zugänglich. Empfehlungen aus diesen Analysen sind daher fehlerbehaftet oder orientieren sich nicht an den Bedarfen der landwirtschaftlichen Praxis. Zur optimierten Nutzung regionaler Nährstoffe wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche technische Ansätze zur Nährstoffgewinnung aus Stoffströmen und zur effizienten pflanzenbaulichen Verwertung entwickelt, deren Ansätze in der Untersuchungsregion größtenteils bekannt sind und in Teilen umgesetzt werden. Die Wirksamkeit der Maßnahmen spiegelt sich allerdings nicht in einer substanziellen Reduktion von Nährstoffüberschüssen in den eutrophen Regionen wider, welches auch an einer geringen Vernetzung von Anbieter\*innen und potenziellen Nutzer\*innen von nährstoffhaltigen Biomassen liegt. In der vorliegenden Studie wurde daher eine regionale Stoffstromanalyse zur Bereitstellung von Informationen für die Nährstoffbewirtschaftungspolitik für das Referenzjahr 2020 durchgeführt, indem auch die Kenntnisse der regionalen Interessensgruppen einbezogen wurden. Aufgrund der Coronapandemie war die Informationsbeschaffung durch gestörte Kommunikation allerdings sehr eingeschränkt. Anschließend wurden die Auswirkungen systemischer Veränderungen zur Förderung einer Nährstoffkreislaufwirtschaft im Kreis Kleve durch partizipative Modellierung anhand beispielhafter Simulationen abgeschätzt und bewertet. Mittel Fragebögen und Einzelinterviews wurden die Kenntnisse der verfügbaren Akteur\*innen für das Lebensmittelsystem nach einem Wegfall der Futtermittelimporte als gewählte extreme Veränderungsmaßnahme zur Förderung der Nährstoffkreislaufwirtschaft erfasst. Mit Hilfe von Monte-Carlo-Modellsimulationen wurden drei Szenarien erstellt. Dabei wurden die Kenntnisse und Erwartungen der Akteure bei einem Wegfall von Futtermittelimporten in vier Aspekten des Modells berücksichtigt: Anteil landwirtschaftlicher Kulturen an der Bewirtschaftungsfläche, Anzahl der Tiere (Viehbestand), Zusammensetzung des Viehbestands, und Verwertung des tierischen Düngers (direkte lokale Verwendung, Export, Biogasproduktion). Daraufhin wurden folgende Szenarien simuliert: (i) Einbeziehung aller Beiträge der Interessengruppen (PS = Participatory Scenario); (ii) Anpassung der Fläche lokal angebauter Feldfrüchte an die reduzierte Anzahl Tiere (CBS = Crop Buffered Scenario); (iii) Anpassung des Viehbestands an das lokal verfügbare Futter (LBS = Livestock Buffered Scenario). Auf Basis einer SFA für das Referenzjahr 2020 und anhand von Kreislaufindikatoren wurden die Szenarien anschließend bewertet und mit dem Referenzjahr 2020 verglichen. Das PS Szenario führte zu einem zu geringen Futtermittelangebot für den geschätzten

Viehbestand. Dies zeigt sich in der negativen Bilanz des Teilsystems tierische Erzeugung. Das Szenario CBS führte zu einem Importbedarf an pflanzlichen Nahrungsmitteln für die menschliche Versorgung und damit zu Einschränkungen für die Nährstoffkreislaufwirtschaft. Das LBS Szenario zeigte eine verbesserte Kreislaufwirtschaft, führte aber weiterhin zu hohen Nährstoffverlusten aufgrund ineffizienter Nährstoffnutzung in der pflanzlichen Produktion. Alle Szenarien lagen in ihrer Reduktionswirksamkeit bzgl. der N-Verluste in einem vergleichbaren Rahmen. Die Einbeziehung der regionalen Akteure und Akteurinnen verbesserte die Modellergebnisse gegenüber den anderen Szenarien nicht. Insgesamt ist daher die Reduktion von Futtermittelimporten als solitäre Maßnahme zur Reduktion von negativen Umwelteffekten in der Untersuchungsregion und die damit einhergehende Reduktion wie im Modell vorgesehenen Umfang nicht ausreichend, zumal ein aus praktischer Sicht extremes Szenario gewählt wurde. Unsere Modellierungsergebnisse legen nahe, dass die Anpassungen sowohl die regionale Verwertung von Biomasse und Verarbeitung zu biobasierten Sekundärdüngern, innovative pflanzenbauliche Anbaumaßnahmen zur Reduktion von Verlusten und effizienterer Nährstoffnutzung, als auch veränderte Verbrauchsmuster der regionalen Konsument\*innen umfassen sollten. Die Einbeziehung der Akteure bei der Modellentwicklung und die Entwicklung eines regionalen Maßnahmenkatalogs zum optimierten überbetrieblichen Nährstoff-, insbesondere Stickstoffmanagement konnte aufgrund der Umstände durch die Coronapandemie nicht im geplanten Maße erreicht werden. Leider konnte daher das Ziel des Projektes ein Netzwerk williger Entscheidungsträger\*innen und Landwirt\*innen aufzubauen, die im Nachgang des Projektes überbetriebliche Maßnahmen zur optimierten Nährstoffnutzung umsetzen, nicht realisiert werden. Ursächlich hierfür scheint ein Mangel an zeitlichen und personellen Ressourcen, sowie zunehmende Partizipationsmüdigkeit, da einige der in den Diskussionen involvierten Personen bereits seit Jahren Veränderungsprozesse in der Landwirtschaft in verschiedenen Gruppen diskutieren. Basierend auf den Gesprächen und Beobachtungen empfehlen wir stattdessen zukünftig die Vorreiter in der Region als Partner\*innen zu gewinnen und mittels Besuchen und Exkursionen zu relevanten Stakeholder\*innen und Landwirt\*innen die als Multiplikator\*innen fungieren Veränderungsprozesse einzuleiten. Soll eine regionale zirkuläre Landwirtschaft ermöglicht werden, bedarf es flankierend umfangreicher finanzieller Unterstützung der Landwirt\*innen zum Aufbau regionaler Biomasse- und Nährstoffverwertungsnetzwerke und zentraler Biomasseaufbereitungsmöglichkeiten.

## Einführung und Motivation

Landwirtschaft war über Jahrtausende darauf angewiesen, dass Nährstoffe für die Produktion von Pflanzen und tierischen Produkten für die menschliche Ernährung oder Versorgung mit anderen Rohstoffen wie Energie, Fasern oder Medikamenten lokal oder regional verfügbar waren. Durch die Kopplung tierischer und pflanzlicher Erzeugung und der Verwertung von Reststoffen menschlicher Aktivitäten wurde gewährleistet, dass Nährstoffe für das Pflanzenwachstum verfügbar waren und es entstand eine lokale Nährstoffkreislaufwirtschaft. Diese war oftmals betriebsbezogen, beinhaltete aber auch überbetriebliche regionale Nährstoffverwertung (z.B. das Sammeln von Mauersalpeter in Stallungen). Insbesondere die Entwicklung und Einführung von mineralischen Düngemitteln, vor allem mineralischer Stickstoffdünger mit Hilfe fossiler Energieträger, resultierte in einer Entkopplung von lokalem Nährstoffangebot und der Nachfrage nach Nährstoffen (Theobald et al., 2016; Wang et al., 2021). So konnten mit Hilfe mineralischer Düngemittel großflächig Futtermittel in Regionen angebaut werden die weit entfernt von den Regionen der Verwertung der Futtermittel liegen. Dabei wurden im Rahmen einer landwirtschaftlichen Globalisierung gar spezialisierte Produktionsregionen auf verschiedenen Kontinenten (z.B. Südamerika und Europa) etabliert. Diese Entkopplung in der Lebensmittelproduktionskette erleichterte die Spezialisierung und Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion, was zu einer weiteren räumlichen Trennung von Nährstoffproduktion und -anfall, sowie Nährstoffverwertung führte (Koppelmäki et al., 2021). Die Spezialisierung ganzer Regionen auf Viehzucht oder auf Ackerbau, sowie der Beginn dieser Separation von Verwertung in städtischen und Produktion in ländlichen Gebieten erfolgte in Europa gegen Ende des 19. Jahrhunderts (Le Noë et al., 2018). Diese Veränderung von regionalen Nährstoffkreisläufen führt nach wie vor zu räumlich sehr heterogene Auswirkungen (De Vries et al., 2013). In Gebieten mit einer Spezialisierung auf die Viehzucht kann es beispielsweise zu einer lokalen Nährstoffanreicherung kommen, weil kontinuierlich Nährstoffe in Form von Futtermitteln importiert werden, während der Export von Produkten Nährstoffe nicht in gleichem Maße aus der Region entfernt (Coppens et al., 2016; Koppelmäki et al., 2021; Senthilkumar et al., 2012; van der Wiel et al., 2021; Van Zanten et al., 2018; Wironen et al., 2018). Außerdem übersteigt die Düngung mancherorts aufgrund der übermäßigen Verfügbarkeit von Dung den Bedarf der Pflanzen, so dass ein jährlicher Nährstoffüberschuss in den landwirtschaftlichen Böden entsteht (Senthilkumar et al., 2012). Diese linearen Nährstoffströme führen zu Nährstoffanreicherung im landwirtschaftlichen System und Verlusten in Umweltkompartimente, wie Grundwasser, Oberflächengewässer oder die Luft, welches wiederum zu Nährstoffeinträgen in Naturschutzgebiete beiträgt (Kuokkanen et al., 2017; Steffen et al., 2015). So führen diese Verluste zu einer Eutrophierung von Gewässern und terrestrischen Habitaten, was sich nachteilig auf die lokale biologische Vielfalt auswirkt und auch direkte und indirekte negative Effekte auf die menschliche Gesundheit haben kann (De Vries et al., 2013; Van Grinsven et al., 2010). Außerdem ist die künftige kostengünstige Verfügbarkeit von Mineraldünger aufgrund der endlichen Phosphatgesteinsreserven und des hohen Bedarfs an fossilen Brennstoffen für die Synthese von Stickstoffmineräldüngern fraglich (Cordell et al., 2012; Maurer et al., 2002). Das derzeitige System der landwirtschaftlichen Lebensmittelerzeugung befindet sich somit in einer Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Ressourcen wie Phosphatgestein und fossilen Energieträgern, während gleichzeitig die gesellschaftlichen Anforderungen zum Schutz der biologischen Vielfalt, der Luft und der Wasserkörper zunimmt. Dabei bilden internationale Abkommen und Gesetze (z.B. auf europäischer Ebene) einen regulatorischen Rahmen, der zu einer nationalen und regionalen Umsetzung führt, durch die Landwirte in Regionen mit Nährstoffanreicherung großen Veränderungen entgegenblicken.

Um diesen vorherrschenden Problemen entgegenzuwirken, erfordert es einen systemischen Wandel des Agrar- und Lebensmittelbereichs unter besonderer Berücksichtigung der Nährstoffbewirtschaftung (de Boer & van Ittersum, 2018; Vanhamäki et al., 2020). Diese Notwendigkeit wird in der Forschung durch das Konzept der Nährstoffkreislaufwirtschaft (auch zirkuläre Landwirtschaft) oder der Kreislauf-Bioökonomie des Agrar-Lebensmittel-Abfall-Systems anerkannt (Aschemann-Witzel & Stangherlin, 2021; Billen et al., 2021; Harder et al., 2021; Naidoo et al., 2021; van der Wiel et al., 2020; Velasco-Muñoz et al., 2021). Der Nährstoffkreislauf im Agrar-Lebensmittel-Abfall-System ist gekennzeichnet durch die Offenheit des Systems, variierender Effizienz der Nährstoffnutzung in verschiedenen Kompartimenten, einer punktuellen Nährstoffrückgewinnung und dem Auftreten von Nährstoffverlusten insbesondere in der Primärproduktion (Bijon et al., 2022; Egan et al., 2022; Harder et al., 2021; Velasco-Muñoz et al., 2021). Die Offenheit eines Systems bedeutet hierbei, dass Nährstoffimporte in das System teilweise zu Outputs und damit Inputs in ein anderes System werden (Harder et al., 2021). Das übergeordnete Ziel einer zirkulären Landwirtschaft ist die Verringerung des Nährstoffüberschusses in einer bestimmten Region, um den negativen ökologischen Fußabdruck vor Ort und die Abhängigkeit von knappen Ressourcen (z.B. Phosphor) zu verringern. Zudem sollen im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft negative ökologische und soziale Auswirkungen im Ausland (z.B. die Abholzung von Primärwäldern zur Erzeugung von Futtermitteln für Tierhaltungssysteme in anderen Regionen) reduziert werden. Dieses bedeutet, dass das System auf lokale Ressourcen zurückgreifen sollte (Koppelmäki et al., 2021). Die Nutzung lokaler Ressourcen beinhaltet u. a., die Fähigkeit vor Ort Futtermittel zu erzeugen, die schließlich die Anzahl der zu haltenden Tiere definiert (Koppelmäki et al., 2021). Um dieses Ziel zu erreichen, steht eine breite Palette an Strategien, wie beispielsweise die technische Aufbereitung von Reststoffen (z.B. Gülle) und deren gezieltere Wiederverwertung im Acker- und Futterbau oder der Export von Reststoffen aus der Region, sowie die strukturelle Veränderung der Landwirtschaft durch Reduktion der Tieranzahl oder landwirtschaftlichen Fläche (siehe Niederlande) zur Verfügung (Kahiluoto et al., 2011). Momentan wird das volle Potenzial der vorliegenden Strategien und Maßnahmen in vielen Regionen allerdings nicht ausgeschöpft, da sich herausstellt, dass das existierende System der Nahrungsmittelproduktion in den Regionen mit intensiver Nährstoffnutzung auf Nährstoffimport angewiesen ist um die politischen und ökonomischen Ziele einer exportorientierten Erzeugung tierischer Lebensmittel zu erhalten, obgleich es dabei immer wieder für lokale und globale Umweltprobleme verantwortlich zeichnet (Bijon et al., 2022; Egan et al., 2022; Mayer & Kaltschmitt, 2022; Steffen et al., 2015; Velasco-Muñoz et al., 2021). Vor dem Hintergrund der lokalen/regionalen und globalen Probleme dieser entkoppelten Nährstoffkreisläufe, steigt das Bestreben der Politik, regional eine bessere Nutzung der vorhandenen Nährstoffe zu ermöglichen. Beispielsweise streben die Niederlande vor dem Hintergrund der massiven nationalen Umweltprobleme durch Nährstoffüberschüsse als politische Strategie eine stärkere Verknüpfung der Tierhaltung und der Pflanzenproduktion an (Agroberichten Buitenland, 21.05.2019, Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality of the Netherlands, <https://www.netherlandsworldwide.nl/documents/publications/2018/11/19/agriculture-nature-and-food-valuable-and-connected>).

Vielerorts werden bereits seit geraumer Zeit technologische und nicht-technologische Lösungen zur effizienteren Nährstoffnutzung in Landwirtschaft und Gartenbau entwickelt und durch Forschung und Politik gefördert. Nicht-technologische Lösungen, wie z.B. die bereits 2003 eingerichtete Nährstoffbörse Nordrhein-Westfalen (NRW) zielen darauf ab, Angebot und Nachfrage von Nährstoffen in Form organischer Düngemittel zu vernetzen, um somit die effiziente Verteilung und Nutzung der Nährstoffe in den Regionen zu ermöglichen. Nach 20 Jahren Erfahrung mit dieser Plattform, bestehen aber weiterhin

Nährstoffüberschüsse, welches verdeutlicht, dass für Landwirt\*innen Hinderungsgründe für eine großflächige Teilnahme und zur Reduktion der Nährstoffverluste bestehen. Andererseits wurde in vielen Teilen Deutschlands, wie z.B. in NRW sehr erfolgreich mittels reduzierter Düngung und intensiviertem Zwischenfruchtanbau in kooperativen Ansätzen zwischen der Wasserwirtschaft mit 160 Wasserversorgungsunternehmen und ca. 11.500 Landwirten und Gärtnern in über 100 Wasserschutzkooperationen bereits eine Reduktion der Nitratgehalte im Grundwasser erreicht (Wendland et al., 2020).

Technologische Lösungen beinhalten pflanzenbauliche Maßnahmen, wie reduzierte Düngung, Zwischenfruchtanbau, Umstellung auf ökologischen Landbau, aber auch Gülleseparation und Gülleaufbereitung (Trennung Fest- und Flüssigphase), Applikation von Zusatzstoffen (z.B. Nitrifikationsinhibitoren, Ansäuerung) oder verbesserte Ausbringtechnik (z.B. Schleppschuh, Injektion) und zielen vor allem auf eine Reduktion der Nährstoffverluste in die Umwelt ab. Sensortechnik an Schlepper oder Ausbringgerät sollen den tatsächlichen Bedarf der Pflanzen und die über den organischen Dünger ausgebrachten Nährstoffe genauer erfassen und somit die Nährstoffnutzung effizienter werden lassen. Als Vorteil einiger technologischer Lösungen wird die Möglichkeit der Nährstofftrennung gesehen. So können aus den organischen Düngern Biomassefraktionen mit höherem Gehalt an N und Kalium (K) gewonnen werden, die von vielen Pflanzen in höheren Mengen benötigt werden als andere Nährstoffe (Ahmed et al., 2019). P ist zudem in vielen Böden ausreichend vorhanden, oder wird nur in geringerem Maße benötigt (Wironen et al., 2018). Die getrennten Biomassefraktionen können somit vielversprechend für eine bedarfsgerechte Ernährung von Pflanzen sein. Durch Separation mit Trennung in eine feste und eine flüssige Phase steigt die Transportwürdigkeit der trockeneren, festen Phase, da der Nährstoffgehalt pro Volumeneinheit z.B. bei der Entwässerung von Gülle steigt (Hamilton et al., 2017). Klassische Ackerbauregionen haben häufig einen Bedarf an organischen Düngemitteln um den Humusgehalt der Böden aufrecht zu erhalten und können diese kohlenstoffhaltigen Fraktionen gut verwerten. Vor dem Hintergrund zunehmender Wetterextreme als Folge des Klimawandels, ist ein höherer Humusgehalt im Boden als positiv zu bewerten, da die Wasserspeicherfähigkeit, die Infiltration und die Temperaturpufferfähigkeit des Bodens steigt (Lal, 2004). Zudem könnte die organische, nährstoffarme Phase als Substrat im Gartenbau als Torfersatz verwendet werden. Trotz dieser Möglichkeiten, ist die Umsetzung von Trennverfahren in der Praxis bisher allerdings eher gering. Zudem fehlen umfassende, kritische Evaluierungen der Umwelteffekte von Nährstofftrennverfahren und der (Langstrecken)Transporte organischer Reststoffe. So müssen z.B. auch die Stickoxid- und Kohlendioxidemissionen der Verkehrsmittel, sowie die gasförmigen Emissionen der hergestellten Sekundärdünger und organischen Substrate entlang der gesamten Verwendungskette evaluiert werden.

Neben der organischen Biomasse landwirtschaftlichen Ursprungs, fallen in ländlichen wie urbanen Regionen darüber hinaus organische Reststoffe aus der kommunalen Abfall- und Abwasserentsorgung (z.B. Kompost, Klärschlamm) und industrieller Biomasseverarbeitung (z.B. Zuckerindustrie, Kartoffelverarbeitung) an, die ebenfalls Pflanzennährstoffe und organische Kohlenstoffverbindungen enthalten und somit als Düngemittel und als Bodenverbesserer fungieren können (Kryvoruchko et al., 2009; Suhartini et al., 2018). Des weiteren bestehen Verfahren um aus verschiedenen Biomasseströmen wertvolle Pflanzennährstoffe zu gewinnen und einen handelsfähigen Mineräldünger herzustellen (z.B. Struvit) (Watson et al., 2019). Die Rückgewinnung eines Teils des Phosphors aus kommunalen Abwässern wird in den nächsten Jahren verpflichtend und damit zur regionalen Kreislaufwirtschaft beitragen

(Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 04.10.2017, <https://www.bmu.de/en/law/sewage-sludge-ordinance/>).

Trotz vieler bekannter und seit Jahren erforschter technologischer und nicht-technologischer Maßnahmen sind die Erfolge, große Nährstoffmengen regional zu recyceln und Nährstoffverluste einzudämmen in den eutrophen Regionen, wie z.B. dem Niederrhein gering. Insofern stellt sich die Frage, welche Kombination möglicher Maßnahmen und welche in einer Region vorkommenden Lösungsansätze zukünftig vielversprechend dafür sind, die Nitratfrachten ins Grundwasser zu reduzieren und eine nachhaltige Nährstoffkreislaufwirtschaft für sämtliche Pflanzennährstoffe, sowie Kohlenstoff als Quelle für die Bodenhumusbildung zu fördern, ohne dabei neue Umweltprobleme zu kreieren.

Gleichzeitig zeigt die Situation eine Diskrepanz zwischen wissenschaftlichen Erkenntnissen und umweltpolitischen Zielen einerseits und der landwirtschaftlichen Praxis und den wirtschaftspolitischen Zielen der Landwirtschaft andererseits. Die Kluft zwischen Wissenschaft und lokalem Handeln kann durch die Zusammenarbeit mit Interessensgruppen überwunden werden (Luedeling & Shepherd, 2016; Metson et al., 2012; Sattler et al., 2022; Vanhamäki et al., 2020; Whitney et al., 2018). Damit die Beteiligten entsprechende Veränderungen in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft durchführen, ist es wichtig, dass sie dem Übergangsprozess vertrauen, einschließlich des Vertrauens, dass er die Prioritäten der verschiedenen Beteiligten berücksichtigt und die Umweltziele und die wirtschaftliche Sicherheit der landwirtschaftlichen Betriebe erreichen wird (Hare, 2011; Koole, 2022; Sisto et al., 2022). Darüber hinaus unterstützt die Zusammenarbeit den Zugang zu lokalem Wissen und dem Erfahrungswissen der Interessensgruppen, da die Strategien in gemeinsamer Arbeit entwickelt werden (Metson et al., 2012; Rhisiart et al., 2015). Die Schließung von Kreisläufen zur Erhaltung und Wiederverwendung von Ressourcen erfordert einen systemweiten Wandel und nicht nur Verbesserungen der Ressourceneffizienz; dies erfordert einen Wandel bei allen Beteiligten (Aschemann-Witzel & Stangherlin, 2021; Lüdeke-Freund et al., 2019). Vor diesem Hintergrund verdeutlichte Vanhamäki et al. (2020), dass eine regionale Umsetzungsstrategie unter Einbeziehung der Interessengruppen speziell für den Übergang zur Kreislaufwirtschaft hilfreich sein kann. Die Vorhersage der Auswirkungen dieser Systemänderungen durch Simulationen auf der Grundlage von Modellen, die das gesamte System berücksichtigen, kann die Akzeptanz dieser Änderungen erhöhen (Luedeling & Shepherd, 2016). Angesichts der Komplexität des Agrar- und Lebensmittel-Abfallsystems ist es jedoch selten möglich, alle Wissenslücken zu schließen, so dass eine gewisse Unsicherheit bestehen bleibt (Luedeling & Shepherd, 2016). Darüber hinaus ist es schwierig und zeitaufwendig, die Auswirkungen komplexer Lebensmittelproduktionssysteme als Ganzes vorherzusagen (Lindqvist & von Malmborg, 2004; Luedeling & Shepherd, 2016; Timmermans & Van Holderbeke, 2004). Nach Tjihuis et al. (2012), erfordert die Erstellung von Modellen einen Ansatz, der diese Unsicherheit und die Komplexität eines Systems berücksichtigt. Die partizipative Modellierung ermöglicht es, dies zu berücksichtigen, indem neben wissenschaftlichen Daten auch Expert\*innenwissen genutzt wird (Luedeling & Shepherd, 2016; Sattler et al., 2022). Die Einbeziehung eines partizipatorischen Ansatzes in einer Stoffstromanalyse durch einen Bottom-up-Ansatz hat gezeigt, dass sie den Zugang zu ansonsten stillschweigendem Wissen ermöglicht (Nanda et al., 2020).

Vor dem Hintergrund der hier geschilderten Situation war das Hauptziel des Projektes die Etablierung eines Umsetzungsbündnisses lokaler Akteur\*innen im Kreis Kleve, die auf Basis bestehender und potenzieller Lösungsansätze ein Maßnahmenpaket entwickeln sollten um das Nährstoffmanagement im Kreis Kleve überbetrieblich zu optimieren. Dieses sollte als Beispiel für andere Regionen in Deutschland

fungieren, die Nährstoffüberschüsse reduzieren wollen. In einem ersten Schritt wurden Herausforderungen und mögliche Lösungsansätze zur Reduktion von Nährstoffverlusten durch die Methode der Innovationsplattform und im Rahmen von Interviews mit verschiedenen Expert\*innen erfasst. Mit Unterstützung des entstandenen Akteur\*innennetzwerks wurde für das Referenzjahr 2020 eine Nährstoffstromanalyse für den Kreis Kleve erstellt. Diese diente als Basis für die Entwicklung von Szenarien mit Hilfe partizipativer Modellierung die darauf abzielte die lokale Kreislaufführung von Nährstoffen, insbesondere aus der Landwirtschaft und dem Gartenbau, in der Region Kleve zu verbessern um vor allem Stickstoffverluste zu reduzieren.

Es sei bereits hier angemerkt, dass aufgrund der Coronapandemie die mit Projektbeginn startete und die Interaktion mit lokalen Akteur\*innen sehr stark einschränkte und damit die Kommunikationswege und im Laufe des Projektes die Kommunikations- und Interaktionsqualität substanziell beeinflussten, die Ziele des Projektes nicht erreicht werden konnten. Die Aktivierung von Akteur\*innen während der Coronapandemie war schwierig und die kontinuierliche Kooperation zum Thema wurde durch die Verlagerung der Kommunikation in den virtuellen Raum erschwert. Im Laufe der Zeit kam es zu einer Ermüdung der Akteur\*innen hinsichtlich ihrer Partizipation an den Erkenntnisprozessen. Dieses lag auch an der Tatsache, dass einige der Akteur\*innen in diesen partizipativen Projekten involviert waren und die Motivation der Partizipation schwindete. Für zukünftige partizipative Projekte gilt dieses zu berücksichtigen.

## Vorgehensweise

### Untersuchungsgebiet

Für die Untersuchung wurde der Kreis Kleve ausgewählt, da er mit Umweltproblemen im Zusammenhang mit Nährstoffverlusten konfrontiert ist. Grundwasser und Oberflächengewässer in Kleve überschreiten den in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (Directive 2000/60/EG) festgelegten Schwellenwert von 50 mg Nitrat L<sup>-1</sup> (NRW, 2014). Der Kreis erstreckt sich über 1.233 km<sup>2</sup> entlang des Rheins. Im Referenzjahr 2020 zählte der Kreis 313.586 Einwohner (Destatis, 2021). Der Kreis grenzt im Westen an die Niederlande und im Norden, Osten und Süden an die deutschen Kreise Borken, Wesel und Viersen. Das Gebiet ist überwiegend ländlich geprägt, die landwirtschaftliche Nutzfläche beträgt 708 km<sup>2</sup> (57 % der Gesamtfläche). Der Kreis befindet sich jedoch auch in unmittelbarer Nähe zu mehreren großen städtischen Zentren, wie dem Ruhrgebiet. Die Landwirtschaft im Kreis wird von der Viehzucht dominiert. Die Viehdichte lag im Referenzjahr 2020 bei 1,9 Großvieheinheiten pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche, was im Vergleich zu 2016 einen Rückgang bedeutet, der auf eine Verringerung des Tierbestands und eine Zunahme der landwirtschaftlichen Nutzfläche zurückzuführen ist (van der Wiel et al., 2021). Die pflanzliche Erzeugung im Kreis ist durch den Anbau von Marktfrüchten (z.B. Kartoffeln, Zuckerrüben, Weizen) und Futterbau (z.B. Mais), sowie Gartenbau (z.B. Feldgemüse) gekennzeichnet. Der Kreis grenzt an Regionen, wie den Kreis Borken oder die Niederlande, die durch intensive Tierhaltung über Jahre ihre Nährstoffüberschüsse durch Export von Nährstoffen in Nachbarregionen reduziert haben. Im Kontext der Nährstoffkreislaufwirtschaft sind im Kreis Kleve auch die Lebensmittel- und Futtermittelindustrie ein wichtiger Sektor der Nährstoffe in Rohstoffen zukaufen, in Produkten verkaufen und Restströme mit Nährstoffen generieren. Mehrere größere Unternehmen sind im Kreis angesiedelt, wie z.B. ForFarmers (Futtermittelverarbeitung), Katjes (Süßwarenherstellung), Pfeiffer & Langen

(Zuckerherstellung). Der Anschluss von 92% der Bevölkerung an die kommunale Abwasserreinigung birgt ein Potenzial für die zentrale Rückgewinnung von Nährstoffen aus dem Abwasser (Destatis, 2022).

#### Expert\*innenkonsultation

Aufgrund der Verzögerungen bei der Personaleinstellung zu Beginn des Projektes, durch die Coronapandemie und durch eine Elternzeit der Mitarbeiterin, kam es zu Verschiebungen und eine Anpassung der Durchführungszeiträume der Arbeitspakete und Meilensteine gegenüber dem ursprünglichen Plan. Es wurde erwartet, dass der Erfolg des Projektes durch diese Verzögerungen eher positiv beeinflusst wird, da die Auswirkungen der Coronapandemie nunmehr im Jahr 2022 geringer ausfallen würden, da geplante Treffen mit Expert\*innen in Anwesenheit stattfinden könnten. Die Meilensteine wurden daher neu terminiert wie im Folgenden dargestellt:

*Meilenstein 1 (07/2021):* Erfolgreiche Durchführung des partizipativen Expertenworkshops und ergänzende Bewertung der Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffverlusten mittels Literaturanalyse.

*Meilenstein 2 (07/2022):* Erfolgreiche Entwicklung von Szenarien die eine Reduktion von Nährstoffverlusten und eine verbesserte Nährstoffkreislaufwirtschaft im Kreis Kleve versprechen lassen.

*Meilenstein 3 (11/2022):* Festlegung eines an die Anforderungen im Kreis Kleve angepassten Maßnahmenbündels und Etablierung eines Umsetzungsnetzwerks zur Weiterführung im Anschluss an das Projekt.

Nach der Elternzeit der Mitarbeiterin wurde damit begonnen, eine Stoffstromanalyse als Referenz für zukünftige Szenarien kreislauffähigerer Nährstoffflüsse im Kreis Kleve zu erstellen. Das Jahr 2020 wurde als aktuellstes Jahr mit guter Datenverfügbarkeit und somit als Referenzjahr gewählt. Als Datenbasis wurde unter anderem der von der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen veröffentlichte Nährstoffbericht 2020 verwendet. Weitere Datenquellen waren Statistiken des Landes und des Bundes, sowie Zahlen die durch persönliche Konsultation von Behörden, Organisationen und Unternehmen erlangt wurden. Da die Szenarien gemeinsam mit Interessengruppen und Expert\*innen entwickelt wurden, hat es zum Teil zur Erreichung des Meilensteins 3 (11/2022) beigetragen.

Ergänzend wurden durch eine Literaturstudie im Rahmen einer Masterarbeit Technologien zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus Biomasseströmen und ihr Potenzial zur Optimierung von Nährstoffkreisläufen in der Region untersucht. Zur Bewertung der Technologien wurde eine Mehrkriterienanalyse durchgeführt. Die am besten bewerteten Technologien wurden verwendet, um die gesamte potenzielle Nährstoffrückgewinnung im Kreis Kleve für ausgewählte Biomasseströme zu berechnen. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass für Klärschlamm Pyrolyse die Technologie mit der höchsten Punktzahl ist, für Abwasser die Membranfiltration in Form der Vorwärtsosmose vielversprechend ist, für Gülle die Membranfiltration in Form der Umkehrosmose und der Mikrofiltration, für Gärreste Ammoniakstrippung und -absorption, Pyrolyse und Kompostierung, sowie für organische Abfälle die hydrothermale Karbonisierung die höchsten Potenziale aufweist. Die durchgeführten Berechnungen ergaben ein Verwertungspotenzial von Restströmen, das mit dem Gesamtbedarf der Region Kleve verglichen wurde. Auf Basis einer Massenbilanz der zurückgewonnenen Pflanzennährstoffe N, P und K bedeutet dies, dass der Bedarf der pflanzlichen Produktion theoretisch aus den Restströmen gedeckt werden kann. Es ist jedoch zu beachten, dass wir in unserer Studie nicht untersucht haben, ob biobasierte Dünger dieselbe Funktion erfüllen können wie herkömmliche Dünger. So ist die



Nährstoffwirksamkeit der Sekundärdünger unzureichend erforscht und die Variabilität der Nährstoffgehalte der Produkte groß.

Da aufgrund der Coronapandemie die geplanten partizipativen Workshops nicht stattfinden konnten, wurde versucht Wissen und Erkenntnisse auf Basis von Fragebögen, Einzelinterviews in Emails und Telefonaten, sowie Videokonferenzen mit Kleingruppen von Vertreter\*innen des Akteur\*innennetzwerks zu generieren. Daher sind die Ergebnisse aller Voraussicht nach nicht so umfassend, wie es bei erfolgreicher Durchführung eines Akteur\*innenworkshops der Fall gewesen wäre. Aus diesem Grunde wurden ergänzend die Erkenntnisse eines Expert\*innenworkshops der als Innovationsplattform (siehe van der Wiel et al. (2023)) die Erkenntnisse der Akteur\*innen stärker systematisch abgerufen hat, einbezogen. Die Ergebnisse der Interviews und der Innovationsplattform dienten als Basis für die partizipative Modellierung (siehe unten).

Im Dezember 2021 wurde eine Pressemitteilung der Hochschule (siehe Anlage) zu der veröffentlichten Studie über die Nährstoffflüsse im Kreis Kleve im Jahr 2016 herausgegeben und in lokalen Zeitungen (Rheinische Post, NRZ) aufgegriffen. Diese Berichte sorgten beim Kreisvertreter des Bauernverbands für einige Aufregung und Unmut und einer Verweigerung des Austauschs mit den Wissenschaftler\*innen. Zunächst war es nicht möglich einen Austausch mit den Kreisvertreter\*innen des Bauernverbandes zu organisieren, da Seitens des Verbandes sämtliche Anfragen unbeantwortet blieben. Unabhängig vom Bauerverband haben allerdings individuelle Landwirt\*innen zur weiteren Diskussion und Szenarioentwicklung beigetragen. Im Jahre 2022 konnte ein Akteur\*innengruppentreffen als Gespräch am Runden Tisch realisiert werden. Dieser Runde Tisch hat am 27. Juni 2022 stattgefunden. Beim Rundtischgespräch war der Vertreter der Kreisbauernschaft ebenso zugegen wie weitere Landwirt\*innen und Vertreter\*innen anderer Interessensgruppen. Zu Beginn wurde das Ergebnis der Analyse der Nährstoffflüsse im Referenzjahr vorgestellt. Anschließend wurden die Implikationen für die Landwirtschaft und naturnahe Ökosysteme, sowie Lösungsansätze diskutiert. Damit wurde zum Aufbau des angestrebten Umsetzungsnetzwerks beigetragen (Meilenstein 3). Leider hat sich die Organisation und Durchführung weiterer Treffen und somit die Fortführung des Netzwerks als schwierig erwiesen. Alle Teilnehmer\*innen trugen sich zwar in eine Liste ein und erklärten sich bereit, an der Erstellung eines Szenarios für eine verbesserte lokale Nährstoffkreislaufwirtschaft mitzuarbeiten. Allerdings hat leider kein einziger der Teilnehmer\*innen im Nachgang auf unsere Bemühungen zur Kontaktaufnahme reagiert und keine weiteren Informationen zur Verfügung gestellt. In den Fällen der informellen Rückmeldung wurde meistens Zeitmangel als Grund angeführt.

### Partizipative Modellierung

Aufgrund der Coronapandemie konnte die Entscheidungsmodellierung nicht vollumfänglich durchgeführt werden, da die Kalibrierung die für das Funktionieren des Modellierungsansatzes notwendig ist zu dem Zeitpunkt nicht online durchführbar war. Nichtsdestotrotz wurde die Methoden abgewandelt und zum Zwecke der Szenarienentwicklung eine partizipative Modellierung durchgeführt. Hierbei wurden Stakeholder\*innen in die Modellentwicklung einbezogen, um Szenarien zu entwickeln, bei dem diese Akteur\*innen potenziell auch die Ausführenden der Umsetzungsmaßnahmen sein würden. Die partizipative Modellierung ist eine Methode, die das praktische und administrative Wissen der Beteiligten in den Entscheidungsprozess einbezieht, anstatt sich nur auf akademisches Wissen zu beziehen (Sattler et al., 2022).

Ursprünglich wurden die Treffen der Interessenvertreter\*innen mit Gruppen von Personen desselben Teilsystems (z.B. Landwirtschaft, Abfallwirtschaft, Lebensmittelverarbeitung) organisiert. Aufgrund mehrerer häufig kurzfristiger Absagen der Stakeholder\*innen haben wir unsere Strategie angepasst und Fragebogen erstellt, sowie Einzelinterviews durchgeführt. Vor der Anpassung der Strategie wurden zwei Gruppensitzungen zum einen mit Vertreter\*innen der Lebensmittel- und Futtermittelindustrie und zum anderen mit Naturschutzorganisationen durchgeführt. Um mit den Schwierigkeiten bei der Organisation von Treffen, bei denen mehrere Interessensgruppenvertreter\*innen gleichzeitig anwesend sein müssen, und den Auswirkungen der Coronapandemie konstruktiv umzugehen, wurde beschlossen, den Fragebogen zu entwickeln und diesen als Basis der Gespräche mit den Interessensgruppenvertreter\*innen und anderen Expert\*innen des Agrar-Lebensmittel-Abfallsystems zu verwenden (siehe Anlage). Anschließend wurden zudem Einzelgespräche mit den Stakeholder\*innen geführt. Mit dem Fragebogen wurde die Einschätzung von Interessensgruppenvertreter\*innen und Expert\*innen eingeholt, wie sie die Entwicklung des Systems nach der Einführung von Maßnahmen zur Wiederherstellung einer ausgeglichenen Bilanz zwischen lokal erzeugten Futtermitteln und der tierischen Erzeugung einschätzen.

Der Fragebogen wurden nach einer Analyse zur Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Nährstoffkreislaufwirtschaft im Kreis Kleve, basierend auf der erstellten Stoffstromanalyse (siehe Veröffentlichung van der Wiel et al. (2021)) erstellt. Die Fragen betrafen die Auswirkung eines fiktiven Ausgangspunkts des zu entwickelnden Szenarios, nämlich die Abschaffung von Futtermittelimporten, auf die Veränderung des Viehbestands, die resultierende Verwendung von organischen und mineralischen Düngemitteln und die Verwendung von lokal erzeugten Pflanzen als Futtermittel oder zur menschlichen Ernährung.

Die Akteur\*innen der verschiedenen Teilsysteme des Agrar-Lebensmittel-Abfallsystems wurden gebeten, den Fragebogen auszufüllen (Mitchell et al., 1997). Die Akteur\*innen wurden so ausgewählt, dass die verschiedenen Teilsysteme gleichmäßig vertreten sind. Innerhalb der Teilsysteme Landwirtschaft wurde es ebenfalls als wichtig erachtet, sowohl konventionelle als auch ökologisch wirtschaftende Landwirt\*innen, sowie Landwirt\*innen mit Viehhaltung und Ackerbauer\*innen einzubeziehen. Die überwiegende Zahl der sich beteiligenden Akteur\*innen wurden aus den Akteur\*innen ausgewählt, die Daten für die Referenznährstoffflussanalyse geliefert hatten. Die Landwirt\*innen hingegen wurden aus den bestehenden Netzwerken ausgewählt. Die nachstehende Tabelle (Tabelle 1) enthält eine Liste der Akteur\*innen (aus Datenschutzgründen entfallen die Namen der Kontaktpersonen), die wir gebeten haben, den Fragebogen auszufüllen. Die letzte Spalte gibt an, ob der Fragebogen ausgefüllt wurde und das Interview stattgefunden hat.

*Tabelle 1 Die Liste der Akteur\*innen, die eingeladen wurden, durch Beantwortung eines Fragebogens und eines Interviews zur Erstellung der Szenarien beizutragen, und die, die geantwortet haben.*

	Organisation	Subsystem	Fragebogen ausgefüllt
1	Landesamt für Natur- und Verbraucherschutz (LANUV)		X
2	Naturschutzzentrum Kreis Kleve		X
3	NABU		
4	For Farmers	Lebensmittel - und Futtermittelverarbeitung	
5	Pfeifer und Langen	Lebensmittel - und Futtermittelverarbeitung	X
6	Kühne	Lebensmittel - und Futtermittelverarbeitung	
7	Schönmackers	Abfallwirtschaft	X
8	Umweltbetriebe der Stadt Kleve AÖR	Abfallwirtschaft	X
9	Kreis-Kleve-Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH	Abfallwirtschaft	
10	Landwirtschaftskammer Nord Rhein-Westfalen (LWK NRW)	Landwirtschaft	
11		Landwirtschaft	X
12		Landwirtschaft	X
13		Landwirtschaft	
14		Landwirtschaft	
15		Landwirtschaft	
16		Landwirtschaft	
17		Landwirtschaft	
18		Landwirtschaft	
19		Landwirtschaft	
20		Landwirtschaft	
21		Landwirtschaft	
21		Landwirtschaft	
22	Kreisbauernschaft Kleve	Landwirtschaft	
23	Hochschule Rhine Waal	Wissenschaft	X
24	Hochschule Rhine Waal	Wissenschaft	X

Mit Hilfe dieser partizipativen Modellierung wurden drei Szenarien erstellt. Unter Einbeziehung aller Beiträge der Interessengruppen entstand das Szenario (i): PS = Participatory Scenario = partizipatives Szenario. Anhand dieser Angaben, den Aussagen aller beteiligten Akteur\*innen, wurde in diesem Szenario analysiert, wie die Stickstoffflüsse im Agrar-Lebensmittel-Abfallsystem auf die Eliminierung von Futtermittelimporten reagieren. Die Modelleingaben sind in Tabelle 2 aufgeführt. Ergänzend wurden zwei weitere Szenarien konstruiert. Im zweiten Szenario (ii) erfolgte die Anpassung der Fläche lokal angebauter Feldfrüchte an die reduzierte Anzahl Tiere: CBS = Crop Buffered Scenario. Das dritte Szenario (iii) wurde über die Anpassung des Viehbestands an das lokal verfügbare Futter definiert: LBS = Livestock Buffered Scenario.

Tabelle 2 Die Eigenschaften die als Input für das Modell der Szenarien verwendet wurden. PS steht für Participatory Scenario, CBS steht für Crop Buffered Scenario und LBS steht für Livestock Buffered Scenario. Die Merkmale sind als Prozentsätze dargestellt.

Eigenschaften der Szenarien		Referenzsystem (2020) %	PS	CBS	LBS
Verteilung der pflanzlichen Produktion	Menschliche Ernährung	14	26	2	26
	Futtermittel	63	58	98	58
	Biogassubstrat	23	16	0	16
Zusammensetzung des Viehbestands	Rinder	63	64	64	64
	Schweine	28	23	23	23
	Geflügel	4	7	7	7
	Andere	4	6	6	6
Reduktion der Tieranzahl			29	29	49
Verteilung Gülle und Mist	Lokale Nutzung	31	47	47	47
	Export	58	19	19	19
	Biogassubstrat	11	34	34	34

## Projektergebnisse

Die Nährstoffflussanalyse für 2020 zeigt die Bedeutung der Landwirtschaft für die Nährstoffflüsse im Kreis Kleve. Bezogen auf die Stickstoffflüsse dominieren die landwirtschaftlichen Stoffflüsse (siehe Tabelle 3 für die wichtigsten Stickstoffflüsse und <https://github.com/larscaspersen/DA-nutrient-flow-Kleve> für die vollständige Liste). Das gleiche Bild zeigt sich auch für Phosphor und Kalium, wie auch bereits für das Jahr 2016 dokumentiert (van der Wiel et al., 2023).

Für die Szenarioentwicklung wurde die Nährstoffflussanalyse für 2020 ausgewertet, um interessante Maßnahmen zu ermitteln, mit denen der lineare Fluss von Nährstoffimport zu Nährstoffverlusten reduziert werden kann. Gleichzeitig wurde die Datenbasis in R codiert und ein Simulationsmodell entwickelt, um Szenarien zu simulieren. Als Hauptursache für die Linearität erwies sich die umfangreiche Einfuhr von Futtermitteln. Um in Gebieten, in denen die Tierhaltung vorherrscht, Nährstoffverluste und Nährstoffanreicherungen zu reduzieren, müssen entweder die Nährstoffe im Dung in Gebiete transportiert werden, in denen Nährstoffbedarf besteht. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wären die Nährstoffe für die zu importierenden Futtermittel einzusetzen. Alternativ können die Futtermittel- und damit Nährstoffimporte verringert werden (Koppelmäki et al., 2021). Granstedt et al. (2008) hat festgestellt, dass die regionale Wiederherstellung von gekoppelter pflanzlicher und tierischer Erzeugung zu geringeren Nährstoffverlusten und -akkumulationen führen kann. Im Hinblick auf den schrittweisen Wandel, der darauf abzielt, durch die Verringerung der Abhängigkeit von importierten mineralischen Düngemitteln eine lokale und regionale Nährstoffkreislaufwirtschaft zu fördern, sollte bei der Umleitung von Dung und Abfällen die Rückführung der zurückgewonnenen Nährstoffe in die lokalen landwirtschaftlichen Böden Priorität haben (Treadwell et al., 2018). Daher ist es Prämisse die zurückgewonnenen Nährstoffe zunächst für die Deckung des lokalen Nährstoffbedarfs in der Pflanzenproduktion einzusetzen, bevor der Nährstoffüberschuss exportiert wird. In Anbetracht des hohen Wassergehalts von Gülle, hohem Volumen und Masse pro Nährstoffeinheit und den resultierenden hohen Transportkosten, sollte die Verwertung auf lokaler oder regionaler Ebene erfolgen; die Kreisebene stellt

daher ein geeignetes Untersuchungs- und Umsetzungsgebiet dar (Koppelmäki et al., 2021; Vanhamäki et al., 2020). Darüber hinaus sollten bei der Umsetzung des systemischen Wandels hin zur Kreislaufwirtschaft regionale Besonderheiten berücksichtigt werden, was den Fokus auf ein lokales Gebiet wie einen Landkreis rechtfertigt (Koppelmäki et al., 2021; Van Zanten et al., 2021; Vanhamäki et al., 2020). Allerdings bestehen einige Beschränkungen und Hinderungsgründe, wie z.B. verlässliche rechtliche Rahmenbedingungen für Sekundärdüngerverwendung, fehlende Passung der Nährstoffstöchiometrie der anfallenden Biomasse mit dem Bedarf der Kulturpflanze (beispielsweise das N:K-Verhältnis) oder unklare Langzeiteffekte der Sekundärdünger.

*Tabelle 3 Die 12 wichtigsten Stickstoffflüsse im Referenzjahr 2020, die sich in den Szenarien wesentlich ändern oder deren Änderung ein Hinweis auf die Zirkularität der Szenarien gibt. Die Stickstoffflüsse sind in t N pro Jahr angegeben (p.a. = pro Jahr).*

Stofffluss	Menge (t N p.a.)
1 Direkter Gülleinsatz in Ackerbau und Grünland	3.027
2 Gülleexport aus dem Kreis Kleve	5.645
3 Einsatz von Biogassubstrat aus Gülle in Ackerbau und Grünland	1.078
4 Einfuhr Mineraldünger	6.001
5 Einsatz von Biogassubstrat aus Pflanzenverwertung in Ackerbau und Grünland	1.763
6 Futtermittel aus der Verarbeitung von Ackerfrüchten	461
7 Einfuhr tierischer Produkte	118
8 Ausfuhr tierischer Produkte	2.859
9 Netto Lebensmittelimport	200
10 Anbauverluste	2.708
11 Verluste im Stall und bei Mist-/ Güllelagerung	2.285
12 Bilanz im Nutztierhaltungssystem	0

Der Input durch die Akteur\*innen ist in Form der Ergebnisse aus den ausgefüllten Fragebögen und der Einzelgespräche in Abbildung 1 aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Einschätzung der Akteur\*innen bzgl. der Auswirkungen des Verzichts von Futtermittelimporten bei einzelnen Parametern stark variiert hingegen es in anderen Bereichen wenig Variabilität in der Einschätzung gibt. Die Akteur\*innen erwarten einen Rückgang der Tieranzahl im Kreis Kleve um 5 bis 55% was eine sehr unterschiedliche Einschätzung der Akteur\*innen aufzeigt. Auch innerhalb der Akteur\*innengruppen (z.B. Landwirtschaft, Abfallwirtschaft) kommt es zu variierenden Einschätzungen. Die Zusammensetzung des Tierbestandes hingegen wird von allen Akteur\*innen gleich eingeschätzt und es wird erwartet, dass 64% der Tiere Rinder sind, 23% Schweine, 7% Geflügel und 6% andere (Tabelle 3). Die Einschätzung aller Akteur\*innen, wie sich die Verwendung der landwirtschaftlichen Flächen für die pflanzliche Produktion ändert ist bzgl. der Allokation für Biogasanlagen ähnlich, was womöglich in der vorhandenen Biogasanlagenkapazität begründet liegt, da diese mit Substrat versorgt werden müssen. Nach wie vor ist die Verwendung von Mais für Biogasanlagen attraktiv für Landwirt\*innen in der Region. Bei der Allokation der Fläche für Futtermittel- oder Nahrungsmittelproduktion variiert die Einschätzung stärker. Die Verwendung von Gülle und Mist nach der Veränderung variiert ebenfalls stärker und es wird erwartet, dass ein größerer Anteil lokal verwendet und auch ein größerer Anteil in Biogasanlagen verwertet wird.

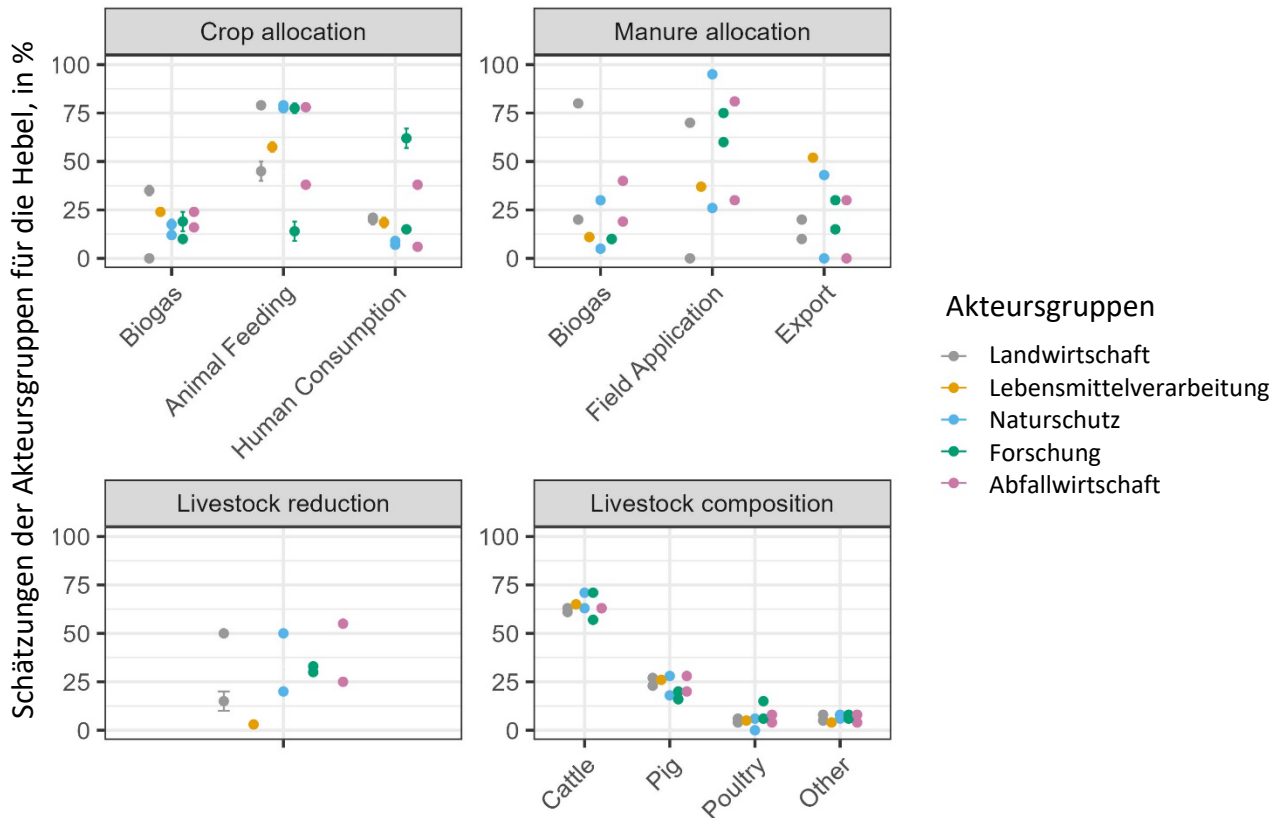


Abbildung 1 Die Angaben der Beteiligten zu den einzelnen Punkten: Verteilung der pflanzlichen Produktion, Zusammensetzung des Viehbestands, Reduktion der Tieranzahl und Verteilung von Gülle und Mist. Jeder Punkt ist eine Antwort eines/r Akteur\*in. Bei den Punkten mit einem Fehlerbalken handelt es sich um Antworten von Akteur\*innen, die als Bereich angegeben wurden. Die Farben stehen für die verschiedenen Gruppen der beteiligten Akteur\*innen.

Das in R erstellte Modell ergab auf Basis der von den Stakeholder\*innen gemachten Angaben im Szenario PS, die in Abbildung 2 dargestellten Veränderungen der Stickstoffflüsse. Hier zeigt die Bilanz des Teilsystems Tierproduktion, dass die Anzahl der Tiere, die gemäß den Akteur\*innen gehalten werden würden und die vorgesehene Reallokation der pflanzlichen Produktion quantitativ nicht deckend sind. So ist für die Anzahl der gehaltenen Tiere lokal nicht ausreichend Futtermittel vorhanden.

In der CBS könnten die neu zugewiesenen lokal erzeugten Pflanzen die benötigten Futtermittel kompensieren, wobei der Bedarf an Importen pflanzlicher Erzeugnisse für den menschlichen Konsum steigt und der Export pflanzlicher Erzeugnisse wegfällt. Im PS und in der LBS stehen im Vergleich zum Referenzjahr mehr pflanzliche Erzeugnisse für den menschlichen Verzehr und damit für den Export zur Verfügung, wobei mehr der von den Interessengruppen vorgeschlagenen Pflanzen für den menschlichen Verzehr auf Kosten von Biogassubstrat und Futtermitteln umgewidmet werden sollen. In der LBS könnte die Verringerung des Viehbestands um 49 % immer noch die lokale Nachfrage nach Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs decken. Außerdem übersteigt die Produktion tierischer Produkte nach wie vor den lokalen Verbrauch. Die Verringerung des Tierbestands führt folglich zu einer Verringerung der Stickstoffverluste bei der Haltung der Tiere und der Lagerung des Dungs in jedem Szenario.

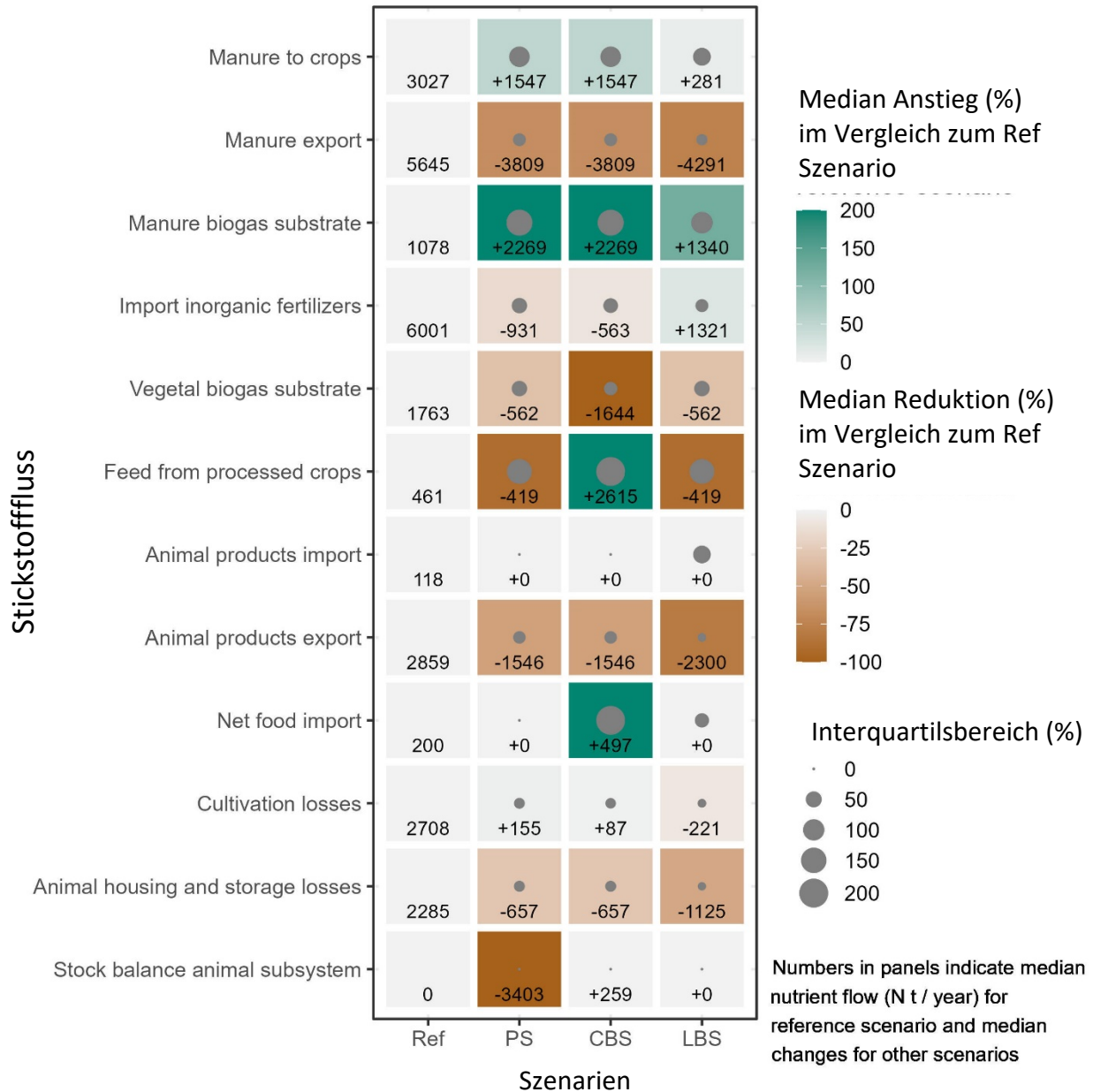


Abbildung 2 Differenz des N-Flusses für jedes Szenario (partizipatives Szenario (PS), Szenario mit Anpassung der Fläche lokal angebaute Feldfrüchte an die reduzierte Anzahl Tiere (CBS) und Szenario mit Anpassung des Viehbestands an das lokal verfügbare Futter (LBS)) im Vergleich zum Referenzjahr (Ref) 2020. Braune Fliesen zeigen einen Rückgang im Vergleich zum Referenzjahr und grüne Fliesen einen Anstieg im Vergleich zum Referenzjahr an. Die grauen Kreise zeigen den Interquartilsbereich der relativen Veränderung an, d. h. den Abstand zwischen dem 75 %- und dem 25 %-Quantil. Die Zahlen in den Kacheln zeigen den mittleren Nährstofffluss ( $t\ N\ Jahr^{-1}$ ) für das Referenzjahr und die Veränderungen des Nährstoffflusses ( $t\ N\ Jahr^{-1}$ ) für die Szenarien PS, CBS und LBS im Vergleich zum Referenzjahr an.

Die größte Verringerung der Verluste wurde bei LBS festgestellt. Die Verringerung der Tierzahlen in jedem Szenario führte außerdem zu einer Verringerung der für den Export verfügbaren tierischen Erzeugnisse

(siehe <https://github.com/larscaspersen/DA-nutrient-flow-Kleve> für einen vollständigen Überblick über alle Ströme). Die Akteur\*innen schlugen vor, einen größeren Anteil des Dungs für die Düngung der Ackerfläche zu verwenden. Allerdings führte die Reduktion der Tierzahlen in LBS zu einer geringeren Gesamtmenge an Dung für die lokale Ausbringung. Daher führt im LBS-Szenario die notwendige Versorgung der Pflanzen zu einer größeren zu importierenden Menge Mineraldünger. Der verstärkte Einsatz von Mineraldüngern auf Kosten von tierischem Dünger führt zu geringeren Anbauverlusten aufgrund der höheren N-Nutzungseffizienz von mineralischen Düngemitteln.

Für die drei Szenarien wurden die Zirkularitätsindizes ermittelt, wie dies auch für das Referenzjahr geschehen ist. Die folgenden Indikatoren wurden berücksichtigt: Gesamtinput, Verluste, Recyclingrate, Anteil des wiederverwendeten Inputs am Gesamtinput und Nutzungseffizienz. Der Gesamtinput ist dabei die Summe aller neuen Inputs in das System. Als Verluste wird hier die Summe aller Verluste aus dem System definiert. Die Recyclingrate gibt an, wie viel der lokal erzeugten Biomasse als Input in andere Teilsysteme recycelt wird, hingegen der Anteil des wiederverwendeten Inputs am Gesamtinput zeigt, wie viel des Inputs in die Teilsysteme Pflanzenbau, Tierproduktion und Verbrauch aus lokalen Quellen stammt. Die Nutzungseffizienz gibt an, wie viel Prozent des gesamten N-Inputs in die Pflanzen- und Tierproduktion zu N in Produkten führt.

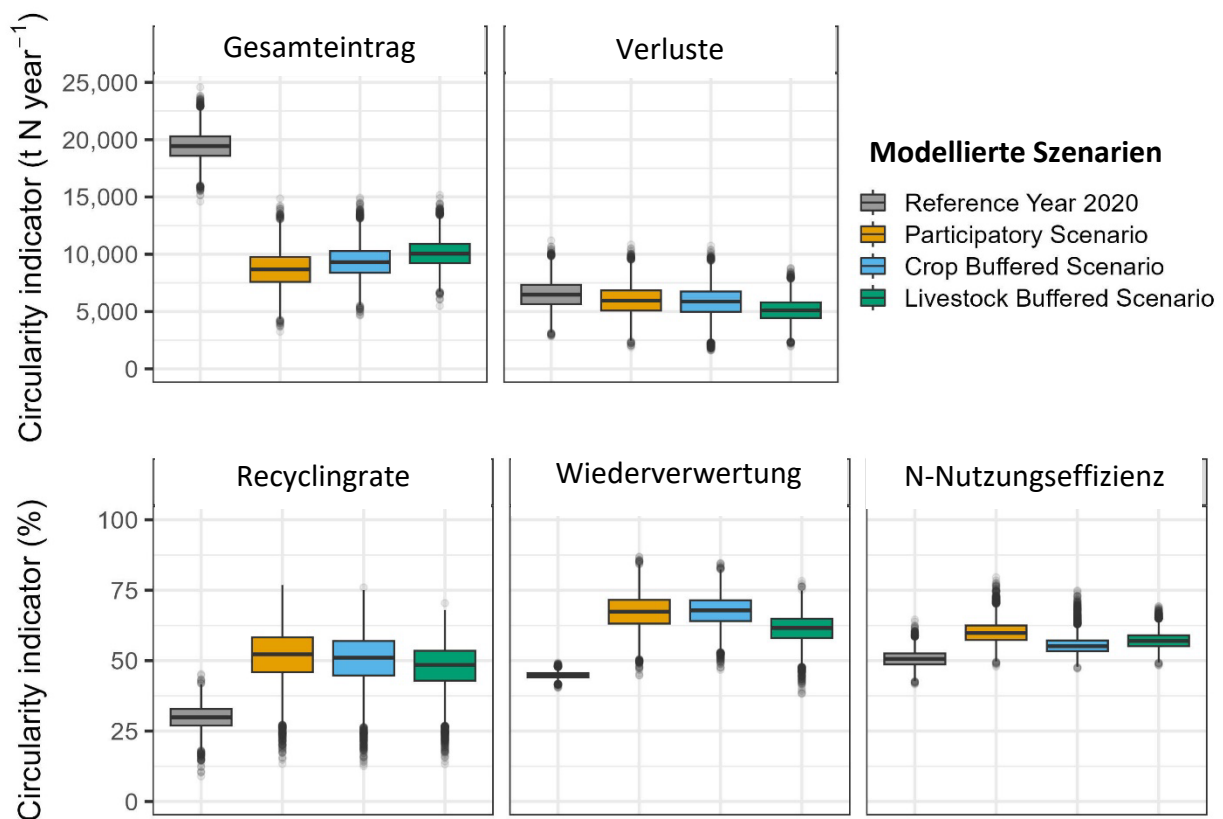


Abbildung 3 Darstellung der Kreislaufwirtschaftsindikatoren für das Referenzjahr (2020) und die drei Szenarien: Partizipatives Szenario (PS), Szenario mit Anpassung der Fläche lokal angebaute Feldfrüchte an die reduzierte Anzahl Tiere (CBS) und Szenario mit Anpassung des Viehbestands an das lokal verfügbare Futter (LBS). Die Fehlerbalken stellen das 16. und 84. Quantil dar; dies repräsentiert die Unsicherheit einer nicht-normalen Datenverteilung, analog zum Mittelwert  $\pm$  sd Notation in der Normalverteilung.



Die Zirkularitätsindizes zeigen, dass der Wegfall der Futtermittelimporte den Gesamtinput an N für jedes Szenario reduziert, am wenigsten jedoch für das LBS, da die geringere Gülleproduktion durch die Einfuhr von Mineraldünger kompensiert wurde (Abbildung 3). Dies geht auf Kosten der Recyclingrate und der Wiederverwendung zum Gesamteinsatz, die bei LBS höher sind. Die Stickstoffverluste gehen im LBS am stärksten zurück, da die wenigsten Tiere gehalten werden und es werden verhältnismäßig mehr Mineraldünger anstelle von Gülle verwendet. Die Nutzungseffizienz ist sodann am höchsten in der PS am höchsten. Der Gesamteinsatz ist für das PS am niedrigsten, allerdings ist die Bestandsbilanz für das Teilsystem Tierproduktion negativ, was bedeutet, dass die anderen Indikatoren unzutreffend sind.

Aufgrund der oben geschilderten Umstände ist es nicht gelungen ein Akteur\*innennetzwerk zur Entwicklung und Implementierung von überbetrieblichen Maßnahmen der Nährstoffkreislaufwirtschaft im Kreis Kleve aufzubauen. Zukünftige wissenschaftliche Projekte und Umsetzungsbestrebungen sollten vermehrt auf die positive Vorreiterrolle von Praktiker\*innen setzen und diese Pioniere und Pionierinnen als Beispiele weiteren Nährstoffmanager\*innen als Lernort öffnen. Exkursionen von interessierten Landwirt\*innen und anderen Akteur\*innen zu eben diesen Pionier\*innen könnte eine Maßnahme zur Förderung des überbetrieblichen Austauschs von Nährstoffen und somit zur Optimierung von Nährstoffflüssen im Kreis Kleve und letztlich zur Reduktion von Nährstoffverlusten und negativen Umwelteffekten beitragen.

## Veröffentlichungen, Vorträge und studentische Arbeiten

Pressemitteilungen und Erwähnung in der Presse

Auf Basis des Artikels van der Wiel et al. (2021)) wurde von der Hochschule eine Pressemitteilung (siehe Anhang oder hier: <https://www.hochschule-rhein-waal.de/de/news/untersuchung-zeigt-naehrstoffueberschuss-im-kreis-kleve-hochschule-bietet-unterstuetzung>) herausgegeben. Diese Mitteilung wurde von der lokalen Presse aufgegriffen und in Artikeln dokumentiert.

[https://rp-online.de/nrw/staedte/kleve/neue-studie-guellebelastung-im-kreis-kleve-ist-zu-hoch\\_aid-64611633](https://rp-online.de/nrw/staedte/kleve/neue-studie-guellebelastung-im-kreis-kleve-ist-zu-hoch_aid-64611633)

[https://www.lokalkompass.de/bedburg-hau/c-ratgeber/untersuchung-zeigt-naehrstoffueberschuss-im-kreis\\_a1667650](https://www.lokalkompass.de/bedburg-hau/c-ratgeber/untersuchung-zeigt-naehrstoffueberschuss-im-kreis_a1667650)

<https://www.invest-in-niederrhein.de/de/detail/untersuchung-zeigt-naehrstoffueberschuss-im-kreis-kleve.html>

<https://www.nrz.de/staedte/kleve-und-umland/landwirtschaft-sorgt-fuer-ueberschuss-an-naehrstoffen-in-kleve-id234042147.html>

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Der Artikel mit dem Titel "Restoring nutrient circularity in a nutrient-saturated area in Germany requires systemic change" wurde in der wissenschaftliche Zeitschrift „Nutrient Cycling in Agroecosystems“ als open access Artikel veröffentlicht (van der Wiel et al., 2021). In diesem Artikel ist das entwickelte Grundmodell der Nährstoffflussanalyse dargestellt und werden die Nährstoffflüsse des Jahres 2016 vorgestellt. Die Arbeit diente als Basis für das Projektvorhaben mit der Anpassung der Daten an das Referenzjahr 2020.

Link zum Artikel: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-021-10172-3>

Der Artikel mit dem Titel “Challenges and opportunities for nutrient circularity: an innovation platform approach”, ist ebenfalls in der wissenschaftlichen Zeitschrift „Nutrient Cycling in Agroecosystems” als open access Artikel erschienen (van der Wiel et al., 2023).

Link zum Artikel: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-023-10285-x>

Die Szenarienentwicklung und deren Ergebnisse für die Stickstoffflüsse ist als wissenschaftlicher Artikel mit dem Titel “ Participatory modelling of scenarios to restore nitrogen cycles in a nutrient-saturated area” bei der Zeitschrift „Science of the Total Environment“ erschienen.

Link zum Artikel: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170335>

### Konferenzteilnahme

- 5<sup>th</sup> International European Forum (Iglis-Forum) (177th EAAE Seminar) on System Dynamics and Innovation in Food Networks. 22 – 26 of February 2021. Präsentation: “Challenges and opportunities for circular biomass management in the agro-food-waste system: An application of the innovation platform approach in a nutrient-saturated area”. Online
- Wissenschaftliches Seminar Agrarwirtschaft. 23.4.2021. Präsentation: “Simultaneously improving N, P and K cycles in agro-food-waste systems at a localized scale: An application of the innovation platform approach in a nutrient-saturated area”. Kleve
- Circling Back symposium: Designing, Safeguarding, Accelerating and Scaling for the Circular Bio-economy. 5.9.2023. Wageningen
- The XXI International N Workshop. 24 – 28 of October 2022. Präsentation: “A local and participatory perspective on restoring nutrient circularity in nutrient-saturated agro-food-waste systems”. Madrid

### Teilnahme an Workshops

- Präsentation DBU-Projekt an der HSRW nach der Elternzeit. 8.12.2021. “Restoring nutrient circularity”
- Calibration training, Universität Bonn, 28.4.2022. Digitale Teilnahme
- Course on Writing propositions for your PhD

### Studentische Arbeiten

- Suzanne Loosbroek – From Biomass to Fertilizer, on the Assessment of Technologies for Recovering & Reusing Nutrients – Dezember 2020
- Luca Tripodi - Economic viability of systemic changes that contribute to the restoration of nutrient circularity on a local scale – Mai 2021

## Fazit

Das hier beschriebene Projekt hatte zum Ziel ein Netzwerk an umsetzungswilligen Akteur\*innen in der Region zu etablieren, welches konkrete Maßnahmen zur Reduzierung von negativen Umwelteffekten der Pflanzennährstoffe Stickstoff und Phosphor definiert und in einen Handlungsplan übersetzt. Damit sollte zudem die Abhängigkeit von Nährstoffimporten reduziert und der Mehrwert der Kreislaufführung vorhandener Nährstoffe gehoben werden. Es ist festzustellen, dass dieses Ziel nicht erreicht wurde. Die Ursachen sind zahlreich. Mit dem Beginn des Projektes verhinderte die Coronapandemie die geplanten partizipatorischen Ansätze der Gruppendiskussionen. Da diese nicht nur dazu dienten fachliches Wissen zum Nährstoffmanagement im Kreis Kleve auszutauschen, sondern auch den Prozess der Netzwerkbildung zu unterstützen, lag hierin ein gewichtiger Grund für das Verfehlen des oben genannten Ziels. Auch im Laufe und am Ende des Projektes wirkten die eingeschränkten Kommunikationsmöglichkeiten auf die Wirksamkeit des Projektes, welches sich auch in einer gewissen Kommunikationsmüdigkeit der Akteur\*innen in der Region widerspiegelte. Auch die Bereitstellung von Informationen und Daten seitens verschiedener Akteur\*innen war eingeschränkt. Die alternativ gewählten Kommunikationspfade und Informationsbeschaffungen konnten diese Lücken nur bedingt schließen. Allerdings gibt es auch fachlich-inhaltliche Gründe für die Grenzen der Transformation von Nährstoffflüssen im Kreis Kleve.

Inhaltlich ergab sich aus den diversen Gesprächen und dem Austausch mit verschiedenen Akteur\*innen eine gemeinsame Einschätzung, dass Umweltprobleme die aus dem Nährstoffstrommanagement im Kreis Kleve resultieren zwar sehr vielschichtig sind und durch diverse Praktiken insbesondere der Landwirtschaft verursacht sind, die hohe Anzahl gehaltener Nutztiere und die notwendigen Futtermittelimporte allerdings der hauptsächliche Treiber sei. Die für das Jahr 2020 durchgeführte Nährstoffstromanalyse bestätigte die Bedeutung der Nutztierhaltung und des Futtermittelimports als große Nährstoffströme im Kreis Kleve. Die auf dieser Basis durchgeführte partizipatorische Modellierung für die Stickstoffflüsse resultierte in drei Szenarien deren Prämisse es war die Futtermittelimporte zu eliminieren. Es sei erwähnt, dass der Wegfall von Futtermittelimporten in den Kreis Kleve für die Regionen der Futtermittelproduktion (positive und negative) Konsequenzen hat, die nicht Fokus dieser Untersuchung waren. Zukünftig muss dieses in die Gesamtbewertung einfließen, welches jedoch nur in umfangreicheren Untersuchungen als die hier vorliegende möglich ist.

Im Ergebnis der Szenarien zeigte sich, dass die Beseitigung der Futtermittelimporte, die im Referenzjahr mehr als die Hälfte des an die Tiere verfütterten Stickstoffs ausmachten, und die Anpassung des Viehbestands an die lokal verfügbaren Futtermittel eine Halbierung des Tierbestands erfordern würde. Eine Reduktion der Tierhaltung um 30% wie durch die Akteur\*innen im Durchschnitt geschätzt und einer Verwendung von 60% der pflanzlichen Produktion für Futtermittel, würde die Versorgung der Tiere nicht sicherstellen können. Für die Versorgung der um 30% reduzierten Tierhaltung würde fast die gesamte pflanzliche Erzeugung benötigt. Dieses würde allerdings auch in der Notwendigkeit münden deutlich mehr pflanzliche Lebensmittel für den menschlichen Konsum zu importieren. Gleichzeitig würden Produkte der Tierhaltung weiterhin aus der Region exportiert. Alle drei Szenarien führen zu reduziertem Stickstoffimport (in Futtermitteln) und Stickstoffexport in Form von Gülle, sowie einem höheren Maß an regionaler Wiederverwertung der Nährstoffen (aus Gülle und Biogasgärresten). Bei angenommener gleichbleibender pflanzenbaulicher Düngeintensität werden in den Szenarien allerdings primär Verluste in der Tierhaltung und bei der Gülleausbringung reduziert. Für eine weitergehende Reduktion von Stickstoffverlusten im Kreis Kleve bedürfte es einer weitreichenderen Reduktion der Tierhaltung oder einer Reduzierung der Düngungsintensität oder einer substanziellen Verbesserung der

Stickstoffnutzungseffizienz. Für die Aufrechterhaltung der Produktionsintensität im Pflanzenbau bedarf es bei reduzierter Tierhaltung eines stärkeren Einsatzes von Mineraldünger, der importiert werden muss. Sämtliche Maßnahmen haben weitreichende ökonomische und strukturelle Folgen für die landwirtschaftlichen Betriebe, die in ihrer Vielfalt für Landwirte nicht überschaubar sind. Auch die Wissenschaft kann hier aufgrund begrenzter Ressourcen nur grobe Einschätzungen zu den erwarteten Änderungen geben und keine betriebspezifische Szenarien entwickeln. Die Fokussierung einzelner Regionen, wie im Kreis Kleve auf intensive landwirtschaftliche Produktion (Tierhaltung und Pflanzenbau) ist für die Versorgung insbesondere urbaner Regionen notwendig, so dass eine Reduktion der Produktionsintensität nur in begrenztem Maße erfolgen kann. Die Kreislaufführung der Nährstoffe kann die Verluste in geringem Maße reduzieren. Allerdings ist zur Reduktion von Nährstoffverlusten, insbesondere Stickstoffverlusten eine höhere Stickstoffnutzungseffizienz auch im Pflanzenbau notwendig. Für die Reduktion von negativen Umwelteffekten durch Nährstoffverluste und zur Steigerung der Unabhängigkeit von Nährstoffimporten (Futtermittel, Düngemittel) bedarf es in den Intensivproduktionsregionen daher (i) der substanziellen Steigerung der Nährstoffnutzungseffizienz in der Landwirtschaft, (ii) der vermehrten Wiederverwertung regionaler Nährstoffe und (iii) der Veränderung der Konsumgewohnheiten der Konsument\*innen mit reduziertem Gesamtkonsum und reduziertem Konsum tierischer Produkte.

Festzustellen ist, dass trotz der guten Vernetzung der Projektnehmer\*innen in der Region, des Bewusstseins der Notwendigkeit von Veränderungen des Nährstoffmanagements im Kreis Kleve bei den meisten Akteur\*innen und der politischen Wahrnehmung eben dieser, sowie das insistieren auf kooperative und freiwillige Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffüberschüssen in der Region die Bereitschaft einzelner Interessensgruppenvertreter\*innen sich zu beteiligen und Kenntnisse zu teilen erstaunlich passiv ist. Wir mussten feststellen, dass es in diesem Stadium nicht möglich war, ein Umsetzungsnetzwerk für die Entwicklung von Maßnahmen eines optimierten überbetrieblichen Nährstoffmanagements einzurichten. Unsere Beobachtung war, dass Fortschritte im Nährstoffmanagement in der Tierhaltung und im Düngemanagement durch bestehende Machtverhältnisse seitens der Interessensgruppen behindert werden und die Bereitschaft für echte Veränderungsprozesse begrenzt ist. In einem der während der Projektlaufzeit durch die Projektnehmer\*innen veröffentlichten Artikel wurde darauf hingewiesen, dass das Zusammenbringen von Akteur\*innen mit unterschiedlicher Macht die Machtpositionen der Akteure nur stärkt (van der Wiel et al., 2023). Dies gibt den Akteur\*innen, die an der Macht sind, die Möglichkeit, das derzeitige System, das sie begünstigt, zu erhalten. Es hat sich gezeigt, dass es effektiver ist, die Vorreiter\*innen in den Mittelpunkt des Transformationsprozesses zu stellen und sie als Lehrmeister\*innen andere änderungswillige Landwirt\*innen inspirieren zu lassen. Daher werden zukünftig Betriebsbesuche bei Landwirt\*innen und Unternehmen die erfolgreich ein Kreislaufsystem auf ihrem Betrieb oder in ihrer Region etabliert haben und damit ein gutes Betriebseinkommen erzielen können durchgeführt.

## Literaturangaben

- Ahmed, M., Ahmad, S., Fayyaz ul, H., Qadir, G., Hayat, R., Shaheen, F. A., & Raza, M. A. (2019). Innovative processes and technologies for nutrient recovery from wastes: A comprehensive review. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(18). doi:10.3390/su11184938
- Aschemann-Witzel, J., & Stangherlin, I. D. C. (2021). Upcycled by-product use in agri-food systems from a consumer perspective: A review of what we know, and what is missing. *Technological Forecasting and Social Change*, *168*, 120749.
- Bijon, N., Wassenaar, T., Junqua, G., & Dechesne, M. (2022). Towards a sustainable bioeconomy through industrial symbiosis: Current situation and perspectives. *Sustainability*, *14*(3), 1605.
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B., . . . Sanz-Cobena, A. (2021). Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*, *4*(6), 839-850. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>
- Coppens, J., Meers, E., Boon, N., Buysse, J., & Vlaeminck, S. E. (2016). Follow the N and P road: High-resolution nutrient flow analysis of the Flanders region as precursor for sustainable resource management. *Resources, Conservation and Recycling*, *115*, 9-21. doi:10.1016/j.resconrec.2016.08.006
- Cordell, D., Neset, T. S. S., & Prior, T. (2012). The phosphorus mass balance: Identifying 'hotspots' in the food system as a roadmap to phosphorus security. *Current Opinion in Biotechnology*, *23*(6), 839-845. doi:10.1016/j.copbio.2012.03.010
- de Boer, I. J., & van Ittersum, M. K. (2018). *Circularity in agricultural production*. Retrieved from <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/470625>
- De Vries, W., Kros, J., Kroeze, C., & Seitzinger, S. P. (2013). Assessing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *5*(3-4), 392-402. doi:10.1016/j.cosust.2013.07.004
- Egan, A., Saju, A., Sigurnjak, I., Meers, E., & Power, N. (2022). What are the desired properties of recycling-derived fertilisers from an end-user perspective? *Cleaner and Responsible Consumption*, *5*, 100057. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100057>
- Granstedt, A., Schneider, T., Seuri, P., & Thomsson, O. (2008). Ecological recycling agriculture to reduce nutrient pollution to the baltic sea. *Biological Agriculture and Horticulture*, *26*(3), 279-307. doi:10.1080/01448765.2008.9755088
- Hamilton, H. A., Brod, E., Hanserud, O., Müller, D. B., Brattebø, H., & Haraldsen, T. K. (2017). Recycling potential of secondary phosphorus resources as assessed by integrating substance flow analysis and plant-availability. *Science of the Total Environment*, *575*, 1546-1555. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.056
- Harder, R., Giampietro, M., Mullinix, K., & Smukler, S. (2021). Assessing the circularity of nutrient flows related to the food system in the Okanagan bioregion, BC Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, *174*, 105842.
- Hare, M. (2011). Forms of participatory modelling and its potential for widespread adoption in the water sector. *Environmental Policy and Governance*, *21*(6), 386-402.
- Kahiluoto, H., Kuisma, M., Havukainen, J., Luoranen, M., Karttunen, P., Lehtonen, E., & Horttanainen, M. (2011). Potential of agrifood wastes in mitigation of climate change and eutrophication - Two case regions. *Biomass and Bioenergy*, *35*(5), 1983-1994. doi:10.1016/j.biombioe.2011.01.058
- Koole, B. (2022). Veganism and plant-based protein crops: Contentious visioning almost obstructing a transition. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, *42*, 88-98. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eist.2021.12.003>

- Koppelmäki, K., Helenius, J., & Schulte, R. P. (2021). Nested circularity in food systems: a Nordic case study on connecting biomass, nutrient and energy flows from field scale to continent. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105218.
- Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Bodiroza, V., Amon, B., & Amon, T. (2009). Anaerobic digestion of by-products of sugar beet and starch potato processing. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), 620-627. doi:10.1016/j.biombioe.2008.10.003
- Kuokkanen, A., Mikkilä, M., Kuisma, M., Kahiluoto, H., & Linnanen, L. (2017). The need for policy to address the food system lock-in: A case study of the Finnish context. *Journal of Cleaner Production*, 140, 933-944. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.171>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. doi:10.1126/science.1097396
- Le Noë, J., Billen, G., Esculier, F., & Garnier, J. (2018). Long-term socioecological trajectories of agro-food systems revealed by N and P flows in French regions from 1852 to 2014. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 265, 132-143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.006>
- Lindqvist, A., & von Malmborg, F. (2004). What can we learn from local substance flow analyses? The review of cadmium flows in Swedish municipalities. *Journal of Cleaner Production*, 12(8), 909-918. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.012>
- Lüdeke-Freund, F., Gold, S., & Bocken, N. M. P. (2019). A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 36-61. doi:10.1111/jiec.12763
- Luedeling, E., & Shepherd, K. (2016). Decision-focused agricultural research. *Solutions*, 7(5), 46-54.
- Maurer, M., Muncke, J., & Larsen, T. (2002). Technologies for nitrogen recovery and reuse. *Lens, P., Hulshoff Pol, L., Wilderer, P. and Asano*, 491-510.
- Mayer, N., & Kaltschmitt, M. (2022). Closing the phosphorus cycle: Current P balance and future prospects in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 347. doi:10.1016/j.jclepro.2022.131272
- Metson, G. S., Aggarwal, R., & Childers, D. L. (2012). Efficiency through proximity: Changes in phosphorus cycling at the urban–agricultural interface of a rapidly urbanizing desert region. *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 914-927. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00554.x>
- Mitchell, R. K., Agle, B. R., & Wood, D. J. (1997). Toward a theory of stakeholder identification and salience: Defining the principle of who and what really counts. *Academy of Management. The Academy of Management Review*, 22(4), 853-886.
- Naidoo, D., Nhamo, L., Lottering, S., Mpandeli, S., Liphadzi, S., Modi, A. T., . . . Mabhaudhi, T. (2021). Transitional Pathways towards Achieving a Circular Economy in the Water, Energy, and Food Sectors. *Sustainability*, 13(17), 9978.
- Nanda, M., Kansal, A., & Cordell, D. (2020). Managing agricultural vulnerability to phosphorus scarcity through bottom-up assessment of regional-scale opportunities. *Agricultural Systems*, 184, 102910. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102910>
- NRW, L. (2014). Nährstoffbericht NRW 2014. *Münster, Germany: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.[Google Scholar]*.
- Rhisiart, M., Miller, R., & Brooks, S. (2015). Learning to use the future: Developing foresight capabilities through scenario processes. *Technological Forecasting and Social Change*, 101, 124-133. doi:10.1016/j.techfore.2014.10.015
- Sattler, C., Rommel, J., Chen, C., García-Llorente, M., Gutiérrez-Briceño, I., Prager, K., . . . Kelemen, E. (2022). Participatory research in times of COVID-19 and beyond: Adjusting your methodological toolkits. *One Earth*, 5(1), 62-73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.006>
- Senthilkumar, K., Nesme, T., Mollier, A., & Pellerin, S. (2012). Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: The importance of agricultural production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 92(2), 145-159. doi:10.1007/s10705-011-9478-5

- Sisto, R., Fernández-Portillo, L. A., Yazdani, M., Estepa-Mohedano, L., & Torkayesh, A. E. (2022). Strategic planning of rural areas: Integrating participatory backcasting and multiple criteria decision analysis tools. *Socio-Economic Planning Sciences*, 101248.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., . . . de Wit, C. A. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. doi:10.1126/science.1259855
- Suhartini, S., Heaven, S., & Banks, C. J. (2018). *Can anaerobic digestion of sugar beet pulp support the circular economy? a study of biogas and nutrient potential*.
- Theobald, T. F. H., Schipper, M., & Kern, J. (2016). Regional phosphorus flows Berlin-Brandenburg phosphorus flows in Berlin-Brandenburg, a regional flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, 1-14. doi:10.1016/j.resconrec.2016.04.008
- Tijhuis, M., De Jong, N., Pohjola, M., Gunnlaugsdóttir, H., Hendriksen, M., Hoekstra, J., . . . Van Leeuwen, F. (2012). State of the art in benefit–risk analysis: food and nutrition. *Food and Chemical Toxicology*, 50(1), 5-25.
- Timmermans, V., & Van Holderbeke, M. (2004). Practical experiences on applying substance flow analysis in Flanders: bookkeeping and static modelling of chromium. *Journal of Cleaner Production*, 12(8-10), 935-945.
- Treadwell, J. L., Clark, O. G., & Bennett, E. M. (2018). Dynamic simulation of phosphorus flows through Montreal's food and waste systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 122-133. doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.018
- van der Wiel, B. Z., Neuberger, S., Darr, D., & Wichern, F. (2023). Challenges and opportunities for nutrient circularity: an innovation platform approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. doi:10.1007/s10705-023-10285-x
- van der Wiel, B. Z., Weijma, J., van Middelaar, C. E., Kleinke, M., Buisman, C. J. N., & Wichern, F. (2020). Restoring nutrient circularity: A review of nutrient stock and flow analyses of local agro-food-waste systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 160. doi:10.1016/j.resconrec.2020.104901
- van der Wiel, B. Z., Weijma, J., van Middelaar, C. E., Kleinke, M., Buisman, C. J. N., & Wichern, F. (2021). Restoring nutrient circularity in a nutrient-saturated area in Germany requires systemic change. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. doi:10.1007/s10705-021-10172-3
- Van Grinsven, H. J., Rabl, A., & De Kok, T. M. (2010). Estimation of incidence and social cost of colon cancer due to nitrate in drinking water in the EU: A tentative cost-benefit assessment. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 9(1). doi:10.1186/1476-069X-9-58
- Van Zanten, H. H., Herrero, M., Van Hal, O., Rööös, E., Muller, A., Garnett, T., . . . De Boer, I. J. (2018). Defining a land boundary for sustainable livestock consumption. *Global Change Biology*, 24(9), 4185-4194. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.14321>
- Van Zanten, H. H., van Selm, B., & Frehner, A. (2021). Producing animal source food with respect for human and planetary health. *New Zealand Science Review*, 77, 48-50.
- Vanhamäki, S., Virtanen, M., Luste, S., & Manskinen, K. (2020). Transition towards a circular economy at a regional level: A case study on closing biological loops. *Resources, Conservation and Recycling*, 156, 104716. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104716>
- Velasco-Muñoz, J. F., Mendoza, J. M. F., Aznar-Sánchez, J. A., & Gallego-Schmid, A. (2021). Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105618. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105618>
- Wang, Z., Fang, K., Lun, F., Hartmann, T. E., Hou, Y., Zhang, F., & Wu, J. (2021). Phosphorus flow analysis for megacities using a coupled city-hinterland approach: Case study of Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128866.

- Watson, C., Clemens, J., & Wichern, F. (2019). Plant availability of magnesium and phosphorus from struvite with concurrent nitrification inhibitor application. *Soil use and Management*, 35(4), 675-682.
- Wendland, F., Bergmann, S., Eisele, M., Gömann, H., Herrmann, F., Kreins, P., & Kunkel, R. (2020). Model-Based Analysis of Nitrate Concentration in the Leachate—The North Rhine-Westfalia Case Study, Germany. *Water (Switzerland)*, 12(2), 550.
- Whitney, C. W., Lanzanova, D., Muchiri, C., Shepherd, K. D., Rosenstock, T. S., Krawinkel, M., . . . Luedeling, E. (2018). Probabilistic decision tools for determining impacts of agricultural development policy on household nutrition. *Earth's Future*, 6(3), 359-372.
- Wironen, M. B., Bennett, E. M., & Erickson, J. D. (2018). Phosphorus flows and legacy accumulation in an animal-dominated agricultural region from 1925 to 2012. *Global Environmental Change*, 50, 88-99. doi:10.1016/j.gloenvcha.2018.02.017



# Anhang

Tabelle S1: Neuer, angepasster Arbeits- und Zeitplan im Projekt

2020					2021												
8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Referenzjahranalyse für die Szenarienenwicklung																	
							Analyse Bezugsjahr										
							Experten kontaktieren und Fragebogen verteilen										
												Parental leave					

2022												2023			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
Szenarienenwicklung und Simulationen															
Experten interviews															
Bewertung der Szenariosimulation															
Wissenschaftliche Publikationen															

2023	
5	6
Abschlussbericht	

Tabelle S2: Adaptierte Arbeitspakete im Projekt

	<p><b>1. Partizipativer Expertenworkshop</b></p> <p>→ <b>Meilenstein 1 (07/2021):</b> Erfolgreiche Durchführung des partizipativen Expertenworkshops und ergänzende Bewertung der Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffverlusten mittels Literaturanalyse.</p>
	<p><b>...und Literaturanalyse</b></p> <p>→ <b>Meilenstein 1 (07/2021):</b> Erfolgreiche Durchführung des partizipativen Expertenworkshops und ergänzende Bewertung der Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffverlusten mittels Literaturanalyse.</p>
	<p><b>2. Simulationen, Szenarioentwicklung und Wirksamkeitsanalyse</b></p> <p>→ <b>Meilenstein 2 (07/2022):</b> Erfolgreiche Entwicklung von Szenarien die eine Reduktion von Nährstoffverlusten und eine verbesserte Nährstoffkreislaufwirtschaft im Kreis Kleve versprechen lassen.</p>
	<p><b>3. Experten-Feedbackworkshop, Maßnahmenentwicklung und Etablierung des Umsetzungsnetzwerks</b></p> <p>→ <b>Meilenstein 3 (11/2022):</b> Festlegung eines an die Anforderungen im Kreis Kleve angepassten Maßnahmenbündels und Etablierung eines Umsetzungsnetzwerks zur Weiterführung im Anschluss an das Projekt.</p>
	<p><b>4. Abschlussbericht</b></p> <p>→ <b>Meilenstein 4 (06/2023):</b> Abschlussbericht und Projektdokumentation liegen vor.</p>

Fragebogen

**Fragen zur gemeinsamen Entwicklung eines Szenarios zur Wiederherstellung des lokalen Nährstoffkreislaufs im Kreis Kleve, keine Futtermiteinfuhr**

Sehr geehrte Damen und Herren,

mein Name ist Bernou van der Wiel, ich promoviere an der Hochschule Rhein-Waal und der Wageningen University zum Thema lokale Nährstoffkreisläufe am Niederrhein. Im Rahmen eines Projekts der Deutschen Bundesstiftung Umwelt untersuche ich (zusammen mit anderen Wissenschaftlern beider Universitäten) wie sich der lokale Nährstoffkreislauf im Agro-Food-Waste-System von Kleve verbessern lässt.

Wir haben die Nährstoffströme der Jahre 2016 und 2020 im Kreis Kleve analysiert. In einem nächsten Schritt wollen wir gemeinsam mit den Akteuren des Systems ein Zukunftsszenario entwerfen. Ein Szenario beschreibt, wie das Management von Nährstoffen in Zukunft aussehen könnte. Mithilfe Szenarien spielen wir Ansätze zur Erhöhung der Nährstoffzirkularität im Kreis Kleve durch.

Die Analysen für 2016 und 2020 haben gezeigt, dass die derzeitigen Nährstoffströme eher linear verlaufen (das heißt viel Nährstoffimport, viel Nährstoffexport und vergleichsweise wenig Zirkularität innerhalb des Systems). Vor allem der Import von Futtermitteln treibt den derzeitigen linearen Fluss von Nährstoffen im System an. Um einen hohen Grad an Kreislaufwirtschaft zu erreichen ist es notwendig, dass die lokale Lebensmittelproduktion auf lokale Ressourcen basiert. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass ein erhöhter Grad an lokal produzierten Futtermitteln ein besonderes Potenzial zur Verbesserung der Nährstoffzirkularität birgt. Daher beginnen wir die Erkundung künftiger Bewirtschaftungsmöglichkeiten mit dem Szenario des Verzichts auf Futtermittelimporte. Anschließend benutzen wir dieses Szenario, um die bereits ermittelten Stoffstrommodell von Kleve anzupassen.

Uns interessiert besonders, welche Auswirkungen die Szenarien auf die verschiedenen Subsysteme in Kleve haben. Für diese Szenarien werden wir Indikatoren berechnen, um Aspekte der Kreislaufwirtschaft zu erfassen, z. B. den Prozentsatz der Nährstoffe, die der lokalen Produktion aus lokalen Quellen zugeführt werden, und die Nährstoffverluste in die Umwelt.

Dafür brauchen wir die Expertise von Ihnen, damit wir die Auswirkungen der Szenarien so realistisch wie möglich abbilden können.

Dieser Fragebogen dient der Erstellung eines Szenarios, in dem keine Futtermittel im Kreis Kleve mehr importiert werden. Er besteht aus insgesamt vier Fragen und das Ausfüllen des Fragebogens wird etwa 15 Minuten dauern.

Wir bitten Sie, alle Fragen nach bestem Wissen und Gewissen zu beantworten. Alle Antworten werden anonymisiert bearbeitet.

Wir danken Ihnen im Voraus für Ihre Mitarbeit,

Das Forschungsteam

Bernou van der Wiel, Florian Wichern, Lars Caspersen, Jan Weijma und Corina van Middelaar

1. Wenn kein Futter mehr importiert werden darf, dann ist insgesamt weniger Futter verfügbar. Der Anteil des lokal verfügbaren Futters liegt bei 45% (gemessen am Stickstoffanteil N des

Futters). Würde die reduzierte Menge an Futter durch eine gesteigerte lokale Produktion an Futter (auf Kosten von Flächen für Lebensmittel- oder Biogassubstratproduktion) kompensiert werden?

- a. In dem Referenzjahr 2020 wurden Ackerbauliche Erzeugnisse, die nicht aus dem Kreis Kleve exportiert wurden, zu 67% für die Tierproduktion, 9% für lokalen menschlichen Konsum und zu 24% als Substrat für Biogasproduktion verwendet. Expecten Sie eine Veränderung dieser Aufteilung in Anbetracht des Szenarios einer ausschließlich lokalen Fütterung?

Antwort:

- b. Expecten Sie einen Anstieg in dem Anbau bestimmter Kulturen in dem Szenario der ausschließlich lokalen Fütterung? Wenn ja, welche Kulturen wären betroffen?

Antwort:

2. Wenn kein Futter mehr importiert werden darf, dann ist insgesamt weniger Futter verfügbar. Der Anteil des lokal verfügbaren Futters liegt bei 45% (gemessen am Stickstoffanteil N des Futters). Expecten Sie eine Anpassung der Menge an lokal gehaltenem Vieh an die reduzierte Menge des lokal verfügbaren Futters?

- a. Die Zusammensetzung der Großvieheinheiten (GVE) im Kreis Kleve im Referenzjahr 2020 lag bei: 63% Rind, 28% Schwein, 4% Geflügel und 4% andere Tiere (wie etwa Schafe, Ziegen, Pferde). Wie würde sich die Zusammensetzung in Anbetracht des oben genannten Szenarios verändern?

Antwort:

3. Sofern Sie eine Veränderung in der Zusammensetzung der lokal gehaltenen Nutztierarten erwarten, erwarten Sie, dass sich die Verteilung der Gülle auf die Bereiche (i) Gülleexport, (ii) lokal ausgebrachte Gülle und (iii) Gülle als Biogassubstrat verändern?
  - a. Die bisherige Verteilung der Gülle im Referenzjahr 2020 betrug: 53% Gülleexport, 36% lokale Ausbringung und 10% Gülle als Biogassubstrat. Was für eine Veränderung in der Zusammensetzung auf diese drei Bereiche erwarten Sie in Anbetracht des Szenarios einer ausschließlich lokalen Fütterung?

Antwort:

Fußnote: Der Anteil des Gülleexports ist hoch. Es könnte sein, dass ein Teil des Exportierten Gülles ursprünglich aus den Niederlanden importiert wurde, also Kleva lediglich „Transitkreis“ der niederländischen Gülle ist und die obgenannte Zusammensetzung deshalb verzerrt ist.

Pressemitteilung auf der Website der Universität

## Untersuchung zeigt Nährstoffüberschuss im Kreis Kleve: Hochschule bietet Unterstützung

Weltweit sind Regionen mit intensiver Landwirtschaft auf große Importe von Futter- und Düngemitteln angewiesen. Während die damit erzeugten Lebensmittel größtenteils außerhalb der Region auf dem Teller landen, bleibt die sogenannte Restmasse der Produktionskette, also zum Beispiel Abwasser und Gülle, vor Ort – ein Fall von Nährstoffüberschuss. Davon ist auch der Kreis Kleve betroffen, wie eine jüngst veröffentlichte Untersuchung eines Teams um Professor Dr. Florian Wichern zeigt.

Der Professor für Bodenkunde und Pflanzenernährung und die Doktorandin Bernou Zoë van der Wiel von der Hochschule Rhein-Waal untersuchten dafür zusammen mit Kolleg\*innen aus den Niederlanden die gesamte Lieferkette von Produzent\*in bis Konsument\*in und analysierten die Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumflüsse im gesamten Kreis Kleve. Professor Wichern erklärt: „Unsere Studie bestätigt, dass es jährlich zu einem Überschuss dieser Nährstoffe kommt und das hat negative Folgeeffekte, die zur Schädigung von Gewässern und dem Verlust der Artenvielfalt beitragen.“ Van der Wiel ergänzt: „In einer idealen Welt würden wir natürlich vor Ort nur das produzieren, was auch vor Ort verbraucht wird, aber das entspricht natürlich nicht der Realität, da viele Regionen auf den Import von Nahrungsmitteln angewiesen sind und der Niederrhein großes Potenzial hat, für andere Regionen Lebensmittel zu produzieren“.

Die von den Forscher\*innen festgestellte notwendige Transformation betrifft die Wiederherstellung von Nährstoffkreisläufen auf regionaler Ebene durch verstärkte Verbindung von Pflanzenproduktion und Tierhaltung bei geringeren Nährstoffimporten. „Dafür gibt es natürlich nicht die eine Lösung, sondern wir müssen an verschiedenen Stellen ansetzen“, so Wichern. „Das können zum Beispiel technische Lösungen sein, bei der Gülle weiterverarbeitet und die Nährstoffe gezielt exportiert werden oder das kann beispielsweise bedeuten, dauerhaft die Tierhaltung in der Region zu reduzieren.“ Das Wichtigste sei es dabei, gemeinsam mit den regionalen Landwirt\*innen und anderen involvierten Personen und Unternehmen die verschiedenen Möglichkeiten auszuloten. Dafür bieten die Wissenschaftler\*innen der Hochschule Rhein-Waal ihre Unterstützung an. „Mit dem gerade erschienenen Nährstoffbericht der Landwirtschaftskammer sehen wir, dass Landwirt\*innen im Kreis Kleve auf dem Weg sind, Nährstoffüberschüsse zu reduzieren. Wir möchten dabei unterstützen, für diesen Weg weitere Lösungsmöglichkeiten zu finden“, ergänzt van der

Wiel. „Wir freuen uns über jeden Landwirt, jede Landwirtin, Unternehmer\*innen und Vertreter anderer Interessensgruppen, die sich bei uns melden, um mit uns gemeinsam nach Lösungen zu suchen.“

### **Hintergrund**

Die im Artikel beschriebene Untersuchung ist unter dem Titel „Restoring nutrient circularity in a nutrient-saturated area in Germany requires systematic change“ in der Fachzeitschrift *Nutr Cycl Agroecosyst* erschienen. Autor\*innen sind Bernou Zoë van der Wiel, Matthias Kleinke und Florian Wichern von der Hochschule Rhein-Waal sowie Jan Weijma, Corina Everda van Middelaar, und Cees Jan Nico Buisman von der Universität Wageningen (Niederlande).

### **Ansprechpartnerin**

An einer Kooperation mit der Hochschule Rhein-Waal interessierte Landwirt\*innen, Unternehmer\*innen und Vertreter anderer Interessensgruppen aus der Region Kleve können sich per E-Mail an Bernou Zoë van der Wiel, [bernouzoe.vanderwiel@hochschule-rhein-waal.de](mailto:bernouzoe.vanderwiel@hochschule-rhein-waal.de), wenden.

### **Bildnachweis**

Wissenschaftlerin und Ansprechpartnerin für regionale Landwirt\*innen und Unternehmen, Bernou Zoë van der Wiel, von der Hochschule Rhein-Waal © Juliette Fotografie