



Schlussbericht zum Thema

**Gezielte Beregnung im Ökologischen
Landbau zur Steigerung von
Produktivität und Nährstoffeffizienz**

FKZ: 2818OE025 & 2818OE049

**Projektnehmer: Rheinische Friedrich-
Wilhelms – Universität Bonn, Georg
August – Universität Göttingen**

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung
und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des
Deutschen Bundestages im Rahmen des
Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere
Formen nachhaltiger Landwirtschaft.

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische und nachhaltige Land- und Lebensmittelwirtschaft in Deutschland zu verbessern. Es wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert und in der BÖLN-Geschäftsstelle in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in Bonn in die Praxis umgesetzt. Das Programm untergliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder, den Forschungs- und den Informationsbereich.

Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter
www.bundesprogramm.de

Wenn Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich bitte an:

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Tel: 0228-6845-3280
E-Mail: boeln@ble.de

Abschlussbericht des Verbundprojektes

Gezielte **B**eregnung im **Ö**kologischen **L**andbau zur Steigerung
von Produktivität und **N**ährstoffeffizienz

Akronym

BÖLN

FKZ: 2818OE025 & FKZ 2818OE049

Projektlaufzeit: 01. 12. 2018 - 28. 02. 2022 (39 Monate)

Zuwendungsempfänger/ ausführende Stellen:

Rheinische Friedrich - Wilhelms - Universität Bonn

Georg August - Universität Göttingen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

BÖLN

Bundesprogramm Ökologischer Landbau
und andere Formen nachhaltiger
Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Prof. Dr. Thomas Döring & Dr. Daniel Neuhoff

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (UB)
Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz,
Professur Agrar- und Produktionsökologie / Organischer Landbau (INRES-AOL)
Auf dem Hügel 6
D-53121 Bonn
Tel: +49 (228) 73-5135
E-Mail: aol@uni-bonn.de, d.neuhoff@uni-bonn.de

Prof. Dr. Stefan Siebert & Dr. Rüdiger Jung

Georg-August-Universität Göttingen
Department für Nutzpflanzenwissenschaften
Abteilung Pflanzenbau
Von-Siebold-Str. 8
37075 Göttingen
Telefon: 0551-39-24359 (Siebert) oder -24354 (Jung)
E-Mail: stefan.siebert@uni-goettingen.de, rjung@gwdg.de
<https://www.uni-goettingen.de/de/40486.html>

Weitere Beteiligte

Projekt Leitbetriebe ÖL-NRW, Dipl. Ing. agr. Christoph Stumm,
E-Mail: leitbetriebe@uni-bonn.de
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Till Belau, Dr. Jens Grube)
E-Mail: T.Belau@ktbl.de, J.Grube@ktbl.de

Inhaltsverzeichnis

I: Kurzfassung	1
II: Abstract	2
1: Einführung	3
1.1: Gegenstand des Vorhabens	3
1.2: Ziele und Aufgabenstellung des Projektes	4
1.3: Planung und Ablauf des Projektes.....	5
2: Stand des Wissens	7
3 Material und Methoden,	16
3.1. Versuchsstandorte	16
3.2. Versuchsdesign und -durchführung	20
3.3 Datenerfassung und statistische Auswertung.....	27
4. Ergebnisse.....	29
4.1. Feldversuche Ackerbohne	29
4.1.1. klimatische Wasserbilanzen und Verlauf der Bodenfeuchte	29
4.1.2. Bestandesentwicklung.....	33
4.1.3. Ertrag und Ertragsstruktur.....	34
4.1.4. NdfA-Werte und N ₂ -Fixierleistung.....	37
4.2. Feldversuche Klee gras	40
4.2.1. Trockenmasseerträge	40
4.2.2. Klee / Gras-Verhältnis.....	42
4.2.3. Phosphor und Kalium: Gehalte, Aufnahme und Bilanzen	43
4.2.4. N ₂ -Fixierung	45
4.3. Feldversuche Sommerweizen.....	47
4.4. Feldversuch Bodendämpfung.....	49
4.5. Wirtschaftlichkeitsberechnungen Beregnung.....	50
5: Diskussion.....	53
6: Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse; Möglichkeiten der Umsetzung oder Anwendung der Ergebnisse für die Praxis und Beratung.....	65
7: Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen	66
8: Zusammenfassung.....	68
9: Literaturverzeichnis.....	71
10: Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt, bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse.....	76
11 Anhang zum Schlussbericht: kurz gefasster Erfolgskontrollbericht	77

I: Kurzfassung

Im Zuge des Klimawandels wird lokal verstärkt Frühjahrs- und Frühsommertrockenheit beobachtet. Folge können ertragsmindernde Effekte u.a. auf Leguminosen sein. Hohe Stickstofffixierleistungen von Leguminosen sind jedoch für die Produktivität ökologischer Anbausysteme entscheidend. Unklar ist, inwieweit Zusatzberegnung zu Leguminosen ertragssteigernd wirkt und betriebswirtschaftlich rentabel ist. Im vorliegenden Projekt wurden auf Basis von 18 faktoriellen Feldversuchen auf drei ökologisch bewirtschafteten Standorten über zwei Jahre (2019 - 2020) sowie weiteren Versuchen die Effekte von Feldberegnung (mit/ohne) und Düngung (PKS+Mikronährstoffe/ohne) auf Ertrag, Nährstoffflüsse und Wirtschaftlichkeit von Sommerackerbohnen, Rotklee gras und Sommerweizen (hier organische Düngung) quantifiziert und analysiert.

Gemittelt über alle sechs Versuche wurde nach Beregnung ein um etwa 50% höherer Kornertrag von Ackerbohnen festgestellt. Das durchschnittliche Ertragsniveau war jedoch mit etwa 29 dt ha⁻¹ gering. Mit den beregnungsinduziert höheren Biomasseerträgen gingen idR auch höhere Kornstickstoffträge einher (max. +116 kg N ha⁻¹). Der prozentuale Anteil von aus der Luft fixiertem Stickstoff (Ndfa-Wert) wurde durch Beregnung teils erhöht, war mit im Mittel mit 61% jedoch vergleichsweise niedrig. Es wurden keine Effekte der P- und K-Düngung auf die Kornerträge festgestellt. Der Kornertrag wurde in einem Versuch in 2021 (nasser Sommer) durch Bodendämpfung signifikant um 23% auf 48,7 dt ha⁻¹ erhöht.

Der Trockenmasseertrag von Rotklee gras wurde durch Beregnung signifikant um 42% auf im Mittel 116,5 dt ha⁻¹ gesteigert. Beregnung hatte in beiden Jahren eine signifikante Zunahme der fixierten N₂-Menge zur Folge. Die absoluten Unterschiede waren jedoch mit weniger als 50 kg N ha⁻¹ vglw. gering. Im Gegensatz zu Ackerbohnen unterlagen die Ndfa-Werte nur geringen Schwankungen und waren mit knapp 80% im Gesamtmittel hoch. Die K - Bilanzsalden waren in allen Versuchen und Varianten negativ (häufig > - 200 kg ha⁻¹). Die Beregnung von Ackerbohnen und Rotklee gras hatte keinen Einfluss auf den Kornertrag der Nachfrucht Winterweizen. Mit einer Ausnahme (Ackerbohnen 2019) war die Beregnung bei Annahme von Vollkosten von etwa 800 € je ha nicht rentabel. Die zusätzliche N₂-Fixierung wurde hier nicht mitbewertet. Beregnung und Düngung hatten nur geringfügige ertragssteigernde Effekte auf Sommerweizen.

Ein pflanzenbaulich relevantes Ergebnis sind die fördernden Effekte der Beregnung auf die Ndfa-Werte und die N₂ - Fixierleistung von Ackerbohnen und Rotklee gras sowie die damit verbundenen Systemeffekte. Gelingt es, diese mit einer kostensparenden Beregnung (Mengen, Technik, Wasserkosten) zu kombinieren, ergibt sich möglicherweise betriebsspezifisch ein ökonomischer Nutzen, insbesondere bei der Beregnung von Ackerbohnen und ggf. anderen Körnerleguminosen.

II: Abstract

In the course of climate change, increased spring and early summer drought is observed locally. This can have yield-reducing effects on a.o. legumes. However, high nitrogen-fixing capacity of legumes is crucial for the productivity of organic farming systems. It is unclear to what extent supplementary irrigation of legumes increases yields and is economically profitable. In the present project, the effects of field irrigation (with/without) and fertilisation (PKS+micronutrients/without) on yield, nutrient flows and profitability of spring field beans, red clover grass and spring wheat (here organic fertilisation) were quantified and analysed on the basis of 18 factorial field trials on three organically managed sites over two years (2019 - 2020) and further trials.

Averaged over all six trials, grain yield of field beans was about 50% higher after irrigation. However, the average yield level was low (29 dt ha⁻¹). The irrigation-induced higher biomass yields resulted in higher grain nitrogen yields (max. +116 kg N ha⁻¹). The percentage of nitrogen fixed from atmosphere (NdfA value) was partly increased by irrigation, but was comparatively low (Ø 61%). No effects of P and K fertilisation on grain yield were noted. Soil steaming in a trial in 2021 resulted in a significant increase (+23%) of grain yield to 48.7 dt ha⁻¹.

The dry matter yield of red clover grass was significantly increased by 42% to an average of 116.5 dt ha⁻¹ by irrigation. Irrigation resulted in a significant increase in the amount of fixed N₂ in both years. However, the absolute differences were relatively small, less than 50 kg N ha⁻¹. In contrast to field beans, the NdfA values of red clover were stable at a high level of about 80%. The K balances were negative in all trials and treatments (often > - 200 kg ha⁻¹). The irrigation of field beans and red clover grass had no influence on grain yield of subsequent winter wheat. With one exception (field beans 2019), irrigation was not profitable assuming full costs of about 800 € per ha. Additional N₂-fixation was not factored in. Irrigation and fertilisation had only minor yield increasing effects on spring wheat.

A result relevant to crop production is the beneficial effect of irrigation on NdfA values and N₂ fixation of field beans and red clover grass, as well as the associated system effects. If it is possible to combine these effects with cost-saving irrigation (rates, technology, water costs), farm-specific economic benefits may be possible, especially when irrigating field beans and other pulses.

1: Einführung

Die durch den Klimawandel verursachte veränderte Niederschlagsverteilung mit ausgeprägten Trockenphasen während der Vegetation und hohen Niederschlägen im Winterhalbjahr beeinflusst das Wachstum und den Nährstoffhaushalt von Kulturpflanzenbeständen. Zu einer verminderten Nährstoffverfügbarkeit in Trockenphasen kommen Nährstoffverluste durch Auswaschung und Erosion. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Effekte im Ökologischen Landbau durch die begrenzte Nährstoffzufuhr von außen und bspw. die Konkurrenz durch Krankheiten, Schädlinge und Unkräuter stärker als im konventionellen Landbau auswirken. Vergleichsweise starke jährliche Ertrags- und Qualitätsschwankungen aufgrund der Jahreswitterung können im Ökolandbau die Folge sein.

Strategien zur Vermeidung von Nährstoffverlusten im Ökologischen Landbau sind weitgehend bekannt und praxisverfügbar. Es fehlt bislang jedoch an Erkenntnissen, wie stark der Einfluss der Wasserversorgung, insbesondere des Wassermangels auf die Nährstoffdynamik in kritischen Phasen der Ertragsbildung im ökologischen Ackerbau ist. Neben der verringerten Nährstoffverfügbarkeit durch Einschränkung von Mineralisation und Wurzelwachstum als direkte Wirkung führt Trockenstress auch indirekt über die Ertragsreduktion der Leguminosen zu geringerer N_2 -Fixierung und als Folge zu niedrigerer N-Zufuhr in das System und zu niedrigeren Erträgen bei Nicht-Leguminosen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage nach der Berechnungswürdigkeit von bestimmten Kulturen, insbesondere trockenstressempfindlichen Leguminosen, unter den Bedingungen des Ökologischen Landbaus.

1.1: Gegenstand des Vorhabens

Das Vorhaben quantifiziert und analysiert auf Basis von faktoriellen Feldversuchen die Effekte von Feldberegnung und Düngung auf Ertrag, Nährstoffflüsse und Wirtschaftlichkeit der ökologisch angebauten Kulturen Sommerweizen, Sommerackerbohnen und Rotklee gras. Neben der Quantifizierung der wasserlimitierten Erträge der einzelnen Kulturen steht deren Berechnungswürdigkeit aus pflanzenbaulicher und betriebswirtschaftlicher Sicht im Fokus.

1.2: Ziele und Aufgabenstellung des Projektes

Oberziel des Projektes ist die Erhöhung der Produktivität im ökologischen Ackerbau auf Kulturarten- und Systemebene (Fruchtfolge). Exemplarisch werden für das Fruchtfolgeglied Leguminose - Getreide die Zusammenhänge zwischen Wasserversorgung und Nährstoffdynamik untersucht und Daten zur Berechnungswürdigkeit bereitgestellt. Hierzu wurden Feldversuche auf Versuchs- und Praxisbetrieben mit neuen Ansätzen der Wasser- und Nährstoffversorgung von Futter- und Körnerleguminosen sowie Getreide durchgeführt und einer systematischen gesamt- und überbetrieblichen Auswertung unterzogen. Im Einzelnen werden folgende Teilziele verfolgt:

- Quantifizierung der durch Wassermangel induzierten Ertragslücken, d.h. der wasserlimitierten Erträge
- Erfassung des Einflusses differenzierter Nährstoffversorgung (N und P) mit angereicherten Gärrestekomposten und Recycling P-Düngern auf die Ertragsleistung sowie deren Interaktion mit der Wasserversorgung
- Messung der N_2 - Fixierleistung von Futter- und Körnerleguminosen in Abhängigkeit der Wasser- und Nährstoffversorgung *in situ* und Berechnung der Ndfa-Werte
- systematische Analyse der Ressourceneffizienz durch Berechnung der Nährstoffaufnahme- und Verwertungseffizienz der applizierten Dünger bei differenzierter Wasserversorgung
- Quantifizierung und Bewertung der Beregnungs- und Düngungseffekte auf die Nährstoffbilanzen auf Schlag- und erweiterter Hoftorebene
- Berechnung der ökonomischen Berechnungswürdigkeit der untersuchten Kulturen unter Einbeziehung der Systemeffekte, vor allem des N-Inputs durch die N_2 - Fixierung
- Ableitung von Praxisempfehlungen zur wassergesteuerten Erhöhung der Produktivität

Das hier vorgestellte Projekt deckt maßgebliche förderrelevante Schwerpunkte der BÖLN-Bekanntmachung ‚Optimierung des Nährstoffmanagements im Ökologischen Landbau‘ vom 31. August 2017 ab. Die Potentiale zur Weiterentwicklung des betriebsspezifischen Nährstoffmanagements hinsichtlich Nährstoffdynamik und -verfügbarkeit werden durch den Forschungsansatz Wasserversorgung innovativ aufgegriffen.

Der Einbezug von Nährstoffbilanzen und die Analyse von Wechselwirkungen zwischen Leguminosen- und Fruchtfolgeertrag führen zu einem vertieften Systemverständnis. Die untersuchten Optimierungsansätze (Beregnung, Kompostanwendung) werden hinsichtlich ihrer möglichen Wirkungen auf die Ressourceneffizienz überprüft, insbesondere über die kurz- und mittelfristige Verbesserung der Nährstoffversorgung. Durch Nutzung regional erzeugter neuer Kompostprodukte werden die Betriebe in regional erweiterte Stoffkreisläufe eingebunden.

1.3: Planung und Ablauf des Projektes

Das Projekt zielt auf eine Optimierung von Betrieben, die das Grundprinzip des Organischen Landbaus als ein weitgehend in sich geschlossener Betriebsorganismus (KÖPKE 1993) in der Regel als Gemischtbetrieb verfolgen bzw. legumen Feldfutterbau mit alternativen Nutzungsoptionen betreiben bspw. Cut & Carry (STUMM & KÖPKE 2017). Auf dieser Basis wurden komplementäre, nicht substitutive Ansätze des Nährstoffmanagements verfolgt. Die Leitbetriebe ÖL-NRW und das KTBL wurden eingebunden, um den fachlichen Austausch mit Praxis und Beratung und die Praxisrelevanz zu gewährleisten. Das Projekt bestand aus zwei konsekutiven Arbeitspaketen:

Arbeitspaket 1: Feldversuche Ertragsanalyse zur Bestimmung der nährstoff- und wasserlimitierten Erträge

Beteiligte Partner: INRES-AOL, UNI Göttingen, Leitbetriebe ÖL-NRW

Ziel: Erarbeitung einer experimentellen Datengrundlage zur Quantifizierung von Ertragslücken (tatsächlich versus erzielbar).

Hierfür wurden Biomasseentwicklung des Sprosses, Erträge und Nährstoffgehalte (NPK) in Abhängigkeit kulturartenspezifischer Faktorvariation für Fruchtfolgeausschnitte [Rotklee-gras - Wintergetreide] und [Ackerbohnen - Zwischenfrucht – Wintergetreide] sowie von Sommergetreide erfasst. Durch die Möglichkeit des Zwischenfruchtanbaus bzw. des Frühjahrsumbruchs sind Sommergetreide hinsichtlich der Vermeidung von Nährstoffverlusten als günstig zu beurteilen, während sie hinsichtlich der Wasserversorgung durch die schlechte Ausnutzung der Winterfeuchte insbesondere bei späten Saatterminen problematisch sind. Geprüft werden soll zum einen Sommerweizen, der auf eine Zusatzberegnung mit steigendem Ertrag, jedoch bei begrenzter N-Versorgung mit potentiell niedrigerer Backqualität reagiert. Zum anderen wurde untersucht, ob eine verbesserte Wasserversorgung zu Hafer ertrags- und qualitätssteigernd wirkt.

Die Feldversuche wurden auf drei ökologisch bewirtschafteten Standorten zweijährig durchgeführt (Standortbeschreibungen und Versuchsdurchführung in Kapitel 3, Material und Methoden).

Arbeitspaket 2: Praxisversuche Ertragsoptimierung

Beteiligte Partner: INRES-AOL, UNI Göttingen, Leitbetriebe ÖL-NRW

Ziel: Analyse der Berechnungswürdigkeit von Körner- und Futterleguminosen sowie Sommerweizen.

Hierfür sollten zeitversetzt ab 2020 standortspezifische Optimierungsmaßnahmen für Rotkleegras, Ackerbohnen und Sommerweizen zweijährig auf Praxisflächen geprüft werden.

Es wurden Flächen des Netzwerks ‚Leitbetriebe Ökologischer Landbau in NRW‘ mit unterschiedlichen Standortbedingungen genutzt. Im Gegensatz zu den Feldversuchen sollten die Praxisversuche in den regulären Anbau des Betriebs integriert werden. Dies erfolgte nach einem Standardmuster mit vier Varianten (1: Beregnung; 2: Düngung; 3: 1+2; und 4: Praxiskontrolle) und drei bis vier Feldwiederholungen.

Die Beregnung der Kleinparzellen erfolgte entweder unter Nutzung betrieblicher Technik bzw. im Einzelfall manuell. Erfasst werden sollten die Trockenmasseerträge sowie die N- und P- Bilanzen auf Schlag- und Systemebene. Die statistische Auswertung erfolgte varianzanalytisch.

2: Stand des Wissens

Die Erträge nichtlegumer Ackerkulturen sind im Ökologischen Landbau (ÖL) geringer verglichen mit konventionellen Referenzwerten (SEUFERT et al. 2012, PONISIO et al. 2015). Gründe hierfür sind systemimmanente Beschränkungen u.a. der Nährstoffzufuhr insbesondere mit Stickstoff (DÖRING & NEUHOFF 2021). Die insgesamt geringere Bewirtschaftungsintensität im ÖL weist im Gegenzug jedoch prozessqualitative Vorteile für wichtige Umweltwirkungskategorien auf wie bspw. den Gewässerschutz (KRAMER et al. 2016) oder den Artenschutz (HOLE et al. 2005, TUCK et al. 2014). Die Umweltleistungen des ÖL (SANDERS & HESS 2019) begründen die Sonderstellung des ÖL im agrarpolitischen Kontext. Im Ampel-Koalitionsvertrag wird eine Flächenausdehnung des ÖL bis 2023 auf 30% der LN angestrebt (Bundesregierung 2021).

Unabhängig von Systemvergleichen ist unklar, wie groß die Ertragslücke zwischen den im ÖL erzielbaren und den tatsächlichen Erträgen ist und in wieweit diese Lücke ressourceneffizient geschlossen werden kann. Grundlage für die Produktivitätssteigerung, also der Reduzierung des Verhältnisses zwischen erzielbaren und tatsächlichen Erträgen, ist eine hinreichende Nährstoffversorgung der Kulturen.

Die Produktivität von Fruchtfolgen ökologischer Landbausysteme, d.h. der erzielbare Rotationsertrag, hängt maßgeblich vom Stickstoffinput (KÖPKE, 1995; BERRY et al., 2002; DAVID et al., 2005) und dessen zeitlicher Verfügbarkeit zu kritischen Entwicklungsstadien der Kulturpflanzen ab (KRAMER et al., 2002).

Entscheidend für einen hohen Stickstoffinput ist die Leistung der legumen N_2 -Fixierung. Diese wiederum hängt maßgeblich ab vom Leguminosenanteil der Fruchtfolge, von deren Erträgen sowie vom Anteil des aus der Atmosphäre fixierten Stickstoffs (Nitrogen derived from atmosphere, NdfA) ab (NIMMO et al., 2013).

Standortabhängig können auch andere Nährstoffe ertragslimitierend wirken, insbesondere Phosphor. Eine jüngst erfolgte Metastudie ergab im Mittel von etwa 3500 untersuchten ökologisch bewirtschafteten Ackerschlägen einen negativen P Saldo ($- 5 \text{ kg ha}^{-1}$). Etwa 40% der Schläge befanden sich für P in der Versorgungsstufe A und B (KOLBE 2015). Korrigierende Eingriffe sind grundsätzlich für alle Nährstoffe möglich, die praktischen, d.h. auch wirtschaftlich machbaren Möglichkeiten sind aber insbesondere für die Makronährstoffe N und P begrenzt.

Die starke rechtliche und betriebswirtschaftliche Einschränkung der externen Zufuhr von Stickstoffdüngern in das System ökologischer Landbau erzeugt ein permanentes Spannungsfeld. Diesem versucht der ökologisch wirtschaftende Betrieb durch Maximierung

der biologischen N₂ Fixierung bei gleichzeitiger Minimierung von N-Verlusten, insbesondere durch Auswaschung und gasförmige N-Emissionen, zu begegnen.

Hinsichtlich der Phosphordüngung bestehen flexiblere Optionen durch Zukauf von Rohphosphat. Diese sind jedoch häufig nur in geringem Maße pflanzenverfügbar. In einer umfassenden Auswertung experimenteller Daten zur Ertragswirksamkeit von P-Düngung im ÖL wurde festgestellt, dass ab einen P - Gehalt (DL/CAL) des Bodens von 3,5 mg 100 g⁻¹ in der Regel keine relevanten Ertragszuwächse bei wichtigen Kulturarten zu erwarten sind. Bei P-Gehalten im Boden bis zu 2,5 mg 100 g⁻¹ wurde bei insgesamt 162 Vergleichen ein im Mittel 8 % höherer Ertrag als Folge von P - Düngung festgestellt (KOLBE 2019). Der Autor schließt, dass bei Unterschreitung von Werten unterhalb von 2,5 mg P je 100 g Boden zur Vermeidung von P -Mangel entsprechend gedüngt werden sollte.

Die weiteren Makro- und Mikronährstoffe können im Bedarfsfall gemäß Anhang II der EU Verordnung 848/2018 in verfügbarer Form zugekauft werden. Dieser Sachverhalt begründet den Schwerpunkt der Projektskizze auf das N- und P - Management von wichtigen Ackerbaukulturen.

Zur Sicherung der nachhaltigen Produktivität im ÖL sind ausgeglichene Humus- und Stickstoffbilanzen sowie hinreichende Versorgungsstufen mit P und K im Boden unbedingt erforderlich (WATSON et al. 2002). Positive N-Bilanzen, wie sie laut KOLBE (2015) häufig in der Praxis des ÖL vorliegen, sind mit Hinblick auf die standortspezifisch erzielbaren Erträge kein hinreichender Indikator für N-Mangel als ertragslimitierenden Faktor. Grund hierfür ist, dass die N-Bilanzen jeweils auf Basis der tatsächlichen Erträge erstellt werden. Im Falle ausgeglichener Nährstoffbilanzen hängt der standortspezifisch erzielbare Ertrag einer Kultur maßgeblich vom Nährstoffinput, insbesondere N und dessen zeitlicher Verfügbarkeit, der Wasserversorgung und der Intensität ertragsreduzierend wirkender Faktoren (z.B. Krankheiten) ab (TITONELL et al. 2013).

Zur Intensivierung der inneren Stoffkreisläufe schlägt KOLBE (2015) weite Fruchtfolgen sowie den Anbau von Tiefwurzlern und Gründüngung vor. Negative Nährstoffbilanzen für N und P können bspw. durch Applikation von Gärresten (GRUBER et al. 2015, Levin et al. 2017) ausgeglichen werden. Ein neuartiger Ansatz besteht in der gemeinsamen Kompostierung von Grünschnitt und Gärresten zwecks Herstellung nährstoffreicher Substrate. Durch Verengung des C/N-Verhältnisses des Komposts soll die Stickstoffmineralisation erhöht werden (RIEBAU 2016).

Klimawandel in Deutschland und NRW

Die Abschätzung erwartbarer Effekte des Klimawandels auf den Ackerbau in Mitteleuropa ist komplex und mit vielen Unsicherheiten versehen. Maßgebliche Gründe für letztere sind die Komplexität des Phänomens, die hohe Variabilität künftiger globaler Treibhausgasemissionen als Funktion nicht vorhersagbaren menschlichen Verhaltens, sowie die uneinheitlichen Effekte der erwarteten Änderungen auf das Pflanzenwachstum. Dennoch lassen sich auf Basis der Wetterstatistik der letzten hundert Jahre bereits klimatische Änderungen in Deutschland erkennen, die von hoher ackerbaulicher Relevanz sind. Die folgenden Ausführungen fassen die bundesweiten Daten zusammen und präzisieren diese für das Kernuntersuchungsgebiet des vorliegenden Projektes, d.h. NRW.

Die Erderwärmung der letzten etwa 140 Jahre spiegelt sich in Deutschland in der zunehmenden Häufigkeit von Wetteranomalien insbesondere seit den 2000er Jahren wider. In diesen lag die jährliche Durchschnittstemperatur mit einer Ausnahme deutlich über dem Vergleichsmittel (1971 - 2000). Insgesamt berechnet der DWD für den Zeitraum 1881 bis 2020 eine Zunahme von 1,6 K (Abb. 1).

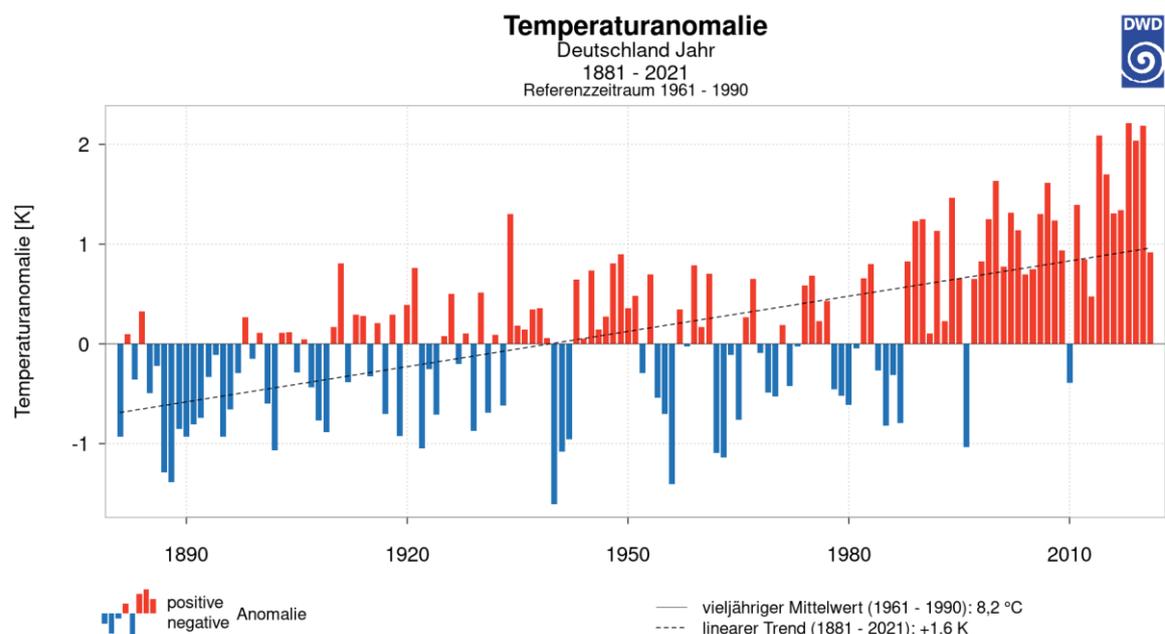


Abb. 1: Jahresdurchschnittstemperaturen in Deutschland im Zeitraum 1881 bis 2020 als Anomalien vom Bezugszeitraum 1971 bis 2000, Q: DWD 2022

Allgemein erkennbare Indikatoren für die Erderwärmung sind die Verfrühung phänologischer Entwicklungsstadien von Pflanzen (v.a. Blütezeit) sowie die Abnahme von Schneetagen.

Im Gegensatz zur Lufttemperatur sind die Veränderungen der jährlichen Niederschlagssumme geringer. Hier berechnete der DWD für den Zeitraum 1881 bis 2021 eine Zunahme von 62,8 mm (Abb. 2).

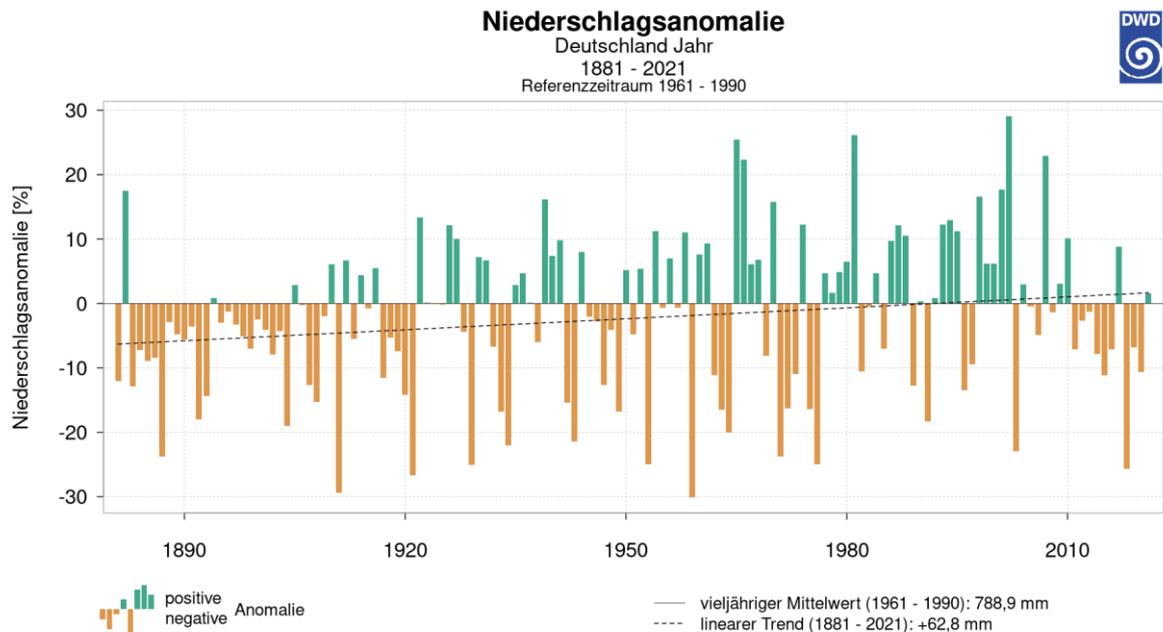


Abb. 2: Jährliche Niederschlagssummen in Deutschland im Zeitraum 1881 bis 2020 als Anomalien vom Bezugszeitraum 1971 bis 2000, Q: DWD 2022

Perspektivisch wird jedoch im Zuge des Klimawandels für Deutschland bei insgesamt gleichbleibenden annuellen Niederschlagssummen eine Zunahme regionaler Frühsommertrockenheit erwartet. Darüber hinaus zeigen sich vermehrt Wetterextreme. So ist die Zahl der Hitzetage, bei denen die Höchsttemperatur mehr als 30° C beträgt, in Mitteleuropa von im Mittel drei Tagen pro Jahr auf acht Tage gestiegen (UMWELTBUNDESAMT 2015). Zugleich ist auch das Auftreten von Trockenperioden mit mindestens zehn aufeinander folgenden Tagen ohne Niederschlag um 0,3 Ereignisse pro Jahr gestiegen (UMWELTBUNDESAMT 2015). Neuere Analysen zeigen für Deutschland ebenfalls deutlich zunehmende Häufigkeiten von Trockenperioden (LÜTTGER & FEIKE 2018).

Klimawandel in NRW

Vergleichbare klimatischen Veränderungen zeigen sich auch in NRW. Einem erkennbaren Trend zur Zunahme der Lufttemperatur steht jedoch seit den 1990er Jahren ein Trend zur Abnahme der jährlichen Niederschlagssumme gegenüber (Abb. 3).

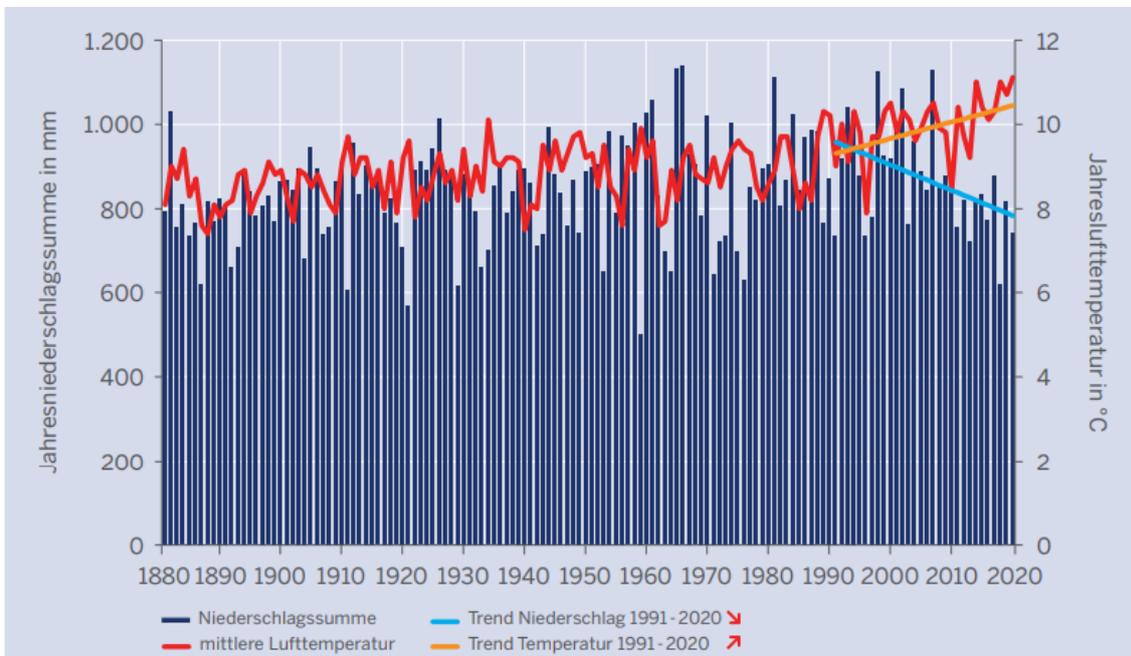


Abb. 3: Mittlere Jahresniederschlagssumme und Jahreslufttemperatur in NRW im Zeitraum 1881 bis 2021, Q: LANUV 2021

Entscheidend für die Produktivität des Ackerbaus ist die Niederschlagsverteilung, insbesondere die hinreichende Wasserversorgung der Kulturpflanzenbestände in den Hauptwachstumsmonaten Mai bis Juli. Erste Hinweise auf sich abzeichnende Änderungen sind die klimatischen Wasserbilanzen, in denen die Wasserabgabe von Boden und Pflanzen (Evapotranspiration) mit den Niederschlägen saldiert wird.

In NRW lag die klimatische Wasserbilanz im meteorologischen Frühjahr (März - Mai) der 2010er Dekade in acht von zehn Jahren unter dem dekadisch gleitenden Vergleichsmittel. In Einzeljahren betrug das Defizit mehr als 100 mm (Abb. 4). Vergleichbare Befunde zeigten sich auch im meteorologischen Sommer (Juni bis August). In diesem lag die klimatische Wasserbilanz in der letzten Dekade in sechs von zehn Fällen unter dem dekadisch gleitenden Vergleichsmittel, davon in drei Jahren größer 100 mm (Abb. 4).

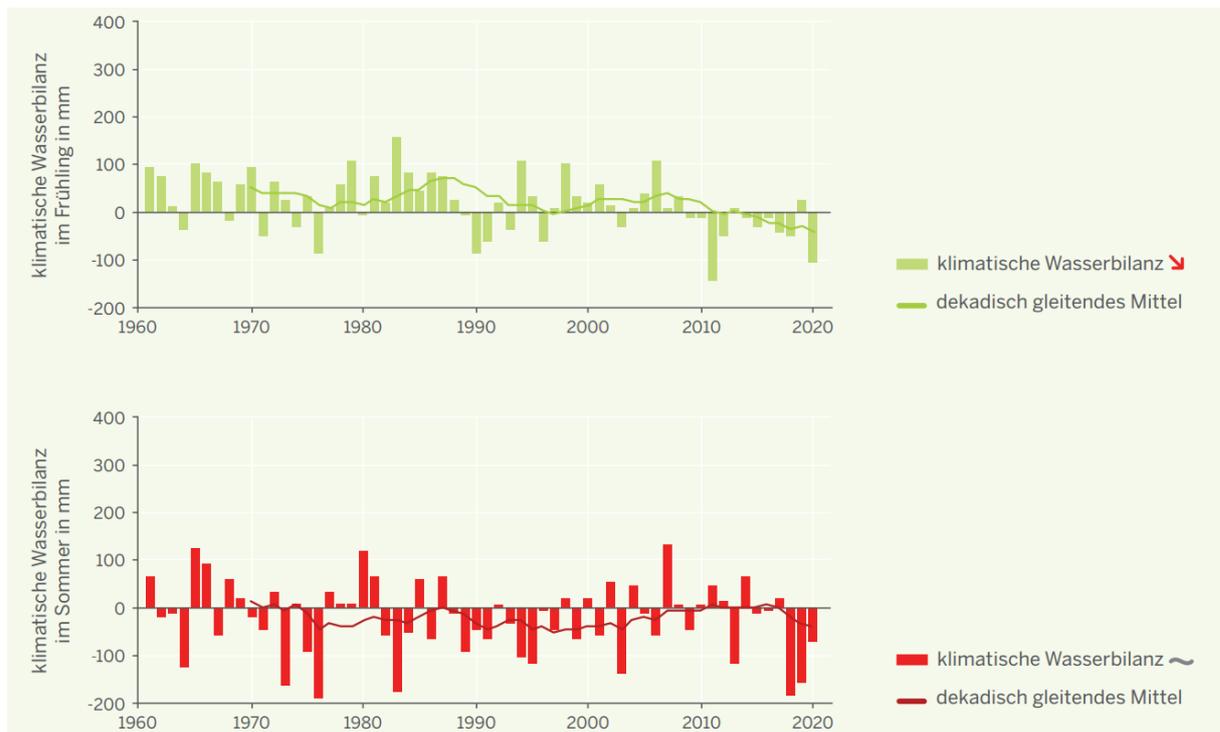


Abb. 4: Mittlere klimatische Wasserbilanz im meteorologischen Frühjahr und Sommer im Zeitraum 1961 -2020 sowie die dekadisch gleitenden Mittel (Q: LANUV 2021)

Agronomische Konsequenzen

Als Folge der höheren Temperaturen sind höhere unproduktive Evaporationsverluste erwartbar (BOUWER et al. 2014). So steigt bei einer Erhöhung der Lufttemperatur von 1 K die Evaporation um ca. 5% (PARRY 1990). Wird der Anstieg der potenziellen Verdunstung nicht durch Niederschläge kompensiert, nimmt der Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser im Boden zunehmend ab und kann den Wasserbedarf der Pflanze nur noch bedingt decken (HERBST & FRÜHAUF 2017). Als Folge wird von der Pflanze die Transpiration reduziert, um so Wasserverluste zu begrenzen und sich vor Austrocknung zu schützen. Damit einher gehen eine geringere Nettophotosyntheseleistung der Bestände und folglich geringere Erträge. Klar ersichtlich wird aus diesem Sachverhalt die entscheidende Bedeutung der standortspezifischen Bodeneigenschaften. Böden mit hoher nutzbarer Feldkapazität (nFk) sind von Niederschlagsanomalien messbar geringer betroffen. Ökologischer Landbau findet in Deutschland überwiegend auf weniger günstigen Standorten mit entsprechend geringerem Wasserspeichervermögen statt (BICHLER & HÄRING 2003).

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit gezielte Wasserzufuhr durch Beregnung im ÖL ertragssteigernd und profitabel wirken kann. Als Strategieelement ökologischer Intensivierung (CASSMANN 1999) könnte die Beregnung von Ackerkulturen zudem dazu beitragen, die Ertragssicherheit der angebauten Kulturen zu erhöhen.

Beregnung von Ackerkulturen

Empirische Daten zur Quantifizierung und Analyse wasserlimitierter Erträge unter ökologischen Anbaubedingungen liegen mit Ausnahme für Kartoffeln und Feldgemüse soweit bekannt nicht vor. Demgegenüber existieren Studien zu Beregnungseffekten unter konventionellen Bedingungen, u.a. zu Futterleguminosen. In siebenjährigen Feldversuchen auf Alluvialböden östlich von Breslau (580 mm Jahresniederschläge), wurde festgestellt, dass eine Zusatzberegnung von 180 mm in trockenen Jahren, 110 mm in normalen Jahren und 60 mm in nassen Jahren zu gleichmäßigeren Erträgen über die Jahre führte und den Trockenmasseertrag von Rotklee im Mittel um 20 dt ha^{-1} (+27%) erhöhte (TRYBALA 1979). Auch in zweijährigen Feldversuchen auf lehmigen Sandböden an der Versuchsstation Berge, am Rande der Nauener Platte, nordöstlich von Berlin (580 mm Jahresniederschlag), wurde durch eine Zusatzberegnung des Rotklees ein Mehrertrag (+62%) erreicht (RICHTER & SCHALITZ 1987). Die Landwirtschaftskammer Niedersachsen führt seit vielen Jahren Beregnungsversuche mit verschiedenen Kulturen unter konventionellen Bedingungen an einem leichten Standort mit 90 mm Feldkapazität durch. Diesen zufolge kann in trockenen Jahren (bspw. 2011, 2018) eine Zusatzberegnung auch bei Getreide rentabel sein, ist dies jedoch idR nicht. Aufgrund der hohen Wasserkosten und begrenzten Wasserentnahmemengen (z.B. in Niedersachsen meist 70 mm pro Jahr) rücken zunehmend Verfahren in den Vordergrund, die mit einer Minimalberegnung ab einer nFK von 35% auf Ertragssicherung abzielen (LK Niedersachsen 2022).

Insgesamt haben Niederschlagsverteilungen mit dürreartigem Ausmaß, wie sie in den letzten Jahren regional wiederholt beobachtet wurden (UFZ 2018), insbesondere auf Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität (nFK) und geringer kapillarer Nachlieferung bei trockenheitsempfindlichen Kulturen, bspw. Ackerfutter (KOLBE et al. 2006) oder Ackerbohnen (BERG 2017) deutliche Mindererträge zur Folge. Im Fall der Ackerbohne wirkt unproduktiver Wasserverlust durch höhere Evaporation als Folge später Entwicklung der Spross- und Wurzelmasse zusätzlich negativ auf den Bodenwasserhaushalt. Retardierte Bestandesentwicklung von Getreide, z.B. als Folge von Stickstoffmangel, erhöht generell den Anteil der Evaporation an der Evapotranspiration und verringert somit die Wassernutzungseffizienz (EHLERS 1997). Trockenstress führt zu verringerter Transpiration und damit zu einer Aufheizung des Bestandes, insbesondere an Tagen mit hohem Strahlungseinfall (Hochdruckwetterlagen). So konnte gezeigt werden, dass die Bestandestemperatur in Roggenbeständen mit Trockenstress um bis zu 10 K höher war, als jene in benachbarten bewässerten Beständen. Dies führte dazu, dass kritische Temperaturschwellwerte zur Blüte überschritten wurden und in Folge zu deutlich verringerter Kornzahl pro Ähre (SIEBERT et al., 2014).

Vor diesem Hintergrund stellt sich insbesondere im ÖL die Frage nach der Berechnungswürdigkeit verschiedener Kulturen, da dort aufgrund der höheren Erzeugerpreise der Grenznutzen des Mehrertrags höher ist. Die Kosten der Beregnung sind zudem betriebsspezifisch variabel, da sie vornehmlich von den Wasserbereitstellungskosten und den Kosten für Beregnungstechnik abhängen.

Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage sind verlässliche Aussagen zu den Effekten der Beregnung auf Ertrag, Nährstoffeffizienz und -bilanzen und Wassernutzungseffizienz derzeit kaum möglich. Unklar ist daher auch, ob beregnungsinduzierte Mehrerträge von Leguminosen auch zu einer proportionalen Zunahme der N₂ Fixierung führen, die NdfA-Werte folglich unverändert bleiben, oder ob – erwartbar aufgrund höherer bodenbürtiger N-Mineralisation nach Beregnung – die NdfA – Werte in beregneten im Vergleich zu unberegneten Beständen geringer sind.

Bislang unzureichend wissenschaftlich untersucht wurden auch die Interaktionen zwischen den Wachstumsfaktoren im System ÖL. Suboptimale biotische und abiotische Wachstumsfaktoren können neben Ertragsminderungen kumulativ sich verstärkende negative Effekte auf die Produktivität der Fruchtfolge haben. Die Nichtausschöpfung standortspezifischer Ertragspotenziale von Futterleguminosen, beispielsweise als Folge von Leguminosenmüdigkeit (SERIKSTAD et al. 2013, FUCHS et al. 2014), mindert über das Wirkungsgefüge Futter- und Mistproduktion indirekt auch die Produktivität der Fruchtfolge. Gleiches gilt für temporären Wassermangel. Futterleguminosen reagieren auf anhaltende Trockenheitsphasen mit signifikanten Ertragseinbußen, Wassermangel während der Blüte führt bei Körnerleguminosen zu Mindererträgen (MC DONALD & PAULSEN 1997, LINK et al. 1999). Körnerleguminosen sind generell durch eine vglw. geringe Ertragsstabilität gekennzeichnet (RECKLING et al. 2015), die neben biotischen Faktoren auch mit der unzureichenden Wasserversorgung in kritischen Entwicklungsstadien zusammenhängen kann.

Biotische Faktoren werden häufig unter dem Begriff Leguminosenmüdigkeit subsumiert, da eine eindeutige Zuordnung zu einem spezifischen Schaderreger häufig nicht möglich ist. Zur Quantifizierung des Einflusses der Leguminosenmüdigkeit auf den Kornertrag von Ackerbohnen unter Feldbedingungen ist daher in Anlehnung an die Differentialdiagnostik nach FUCHS et al. (2014) eine oberflächliche Desinfektion des Bodens erforderlich. Auf diese Weise kann der Einfluss der biotisch bedingten Leguminosenmüdigkeit an der Gesamtvarianz der Erträge abgeschätzt werden. Hierfür werden die entsprechenden Einzelparzellen auf einer Tiefe von 15 cm für 30 min bei 65° C mit Hilfe einer Dämpfhaube oder -egge behandelt. Diese Vorgehensweise lässt eine weitgehende Sterilisierung des Bodens (GUDEHUS 2005) und somit auch eine Reduktion von Leguminosenpathogenen erwarten. Unter Laborbedingungen hatte eine Dämpfung von inokulierten Böden bei Temperaturen von 50 - 60° C über sich drei

Minuten ein vollständiges Abtöten von bodenbürtigen Pathogenen (u.a. *Vertillium dahliae*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Pythium ultimum*) zur Folge (VAN LOENEN et al. 2003). Ähnliche Beobachtungen wurden bereits in früheren Untersuchungen gemacht (BOLLEN 1969). Zur experimentellen Quantifizierung der Effekte von Leguminosenmüdigkeit auf Erträge unter Feldbedingungen bietet sich daher eine parzellenweise Bodendämpfung an.

Die nachfolgend beschriebenen Feldversuche wurden alle auf zertifiziert ökologischen Flächen durchgeführt.

3 Material und Methoden,

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 wurden von 2019 bis 2020 insgesamt 19 faktorielle Feldversuche mit den Kulturen Ackerbohne, Klee gras und Sommerweizen auf drei Standorten durchgeführt. Diese waren der Campus Wiesengut (WG), Universität Bonn, das Versuchsgut Deppoldshausen (DH), Universität Göttingen und der ökologische Leitbetrieb Büsch in Weeze am Niederrhein (Wz). Ergänzend erfolgte in 2021 noch ein Bodendämpfungsversuch mit Ackerbohnen am Standort WG. Mit Ausnahme des Standortes WG wurden alle Versuche rotierend auf dem gleichen Feld eines Standorts angelegt. Die Standortbeschreibungen erfolgen daher kulturartenunabhängig. Anschließend wird auf den Versuchsaufbau der einzelnen Kulturen eingegangen.

3.1. Versuchsstandorte

Der Versuchsstandort Biohof Büsch befindet sich in der Gemeinde Weeze im Kreis Kleve am unteren Niederrhein im Westen von Nordrhein-Westfalen. Es handelt sich um einen Gemischtbetrieb (Fleckvieh Mutterkühe, ca. 0,7 GV ha⁻¹), welcher seit 1984 nach den Richtlinien des Ökologischen Landbaus anfangs als Bioland- und seit 2011 als Demeter-Betrieb bewirtschaftet wird. Angebaut werden Rotklee gras, Sommerweizen, Winterweizen, Winterroggen, Kartoffeln, Emmer und Sommerackerbohnen.

Der Versuchsstandort Campus Wiesengut befindet sich in der Siegniederung bei Hennef, östlich von Bonn. Das Wiesengut ist ein klassischer Gemischtbetrieb mit Mutterkuhhaltung (Limousin, ca. 0,8 GV ha⁻¹) und wird seit 1985 nach den Richtlinien des Ökologischen Landbaus als ein weitgehend in sich geschlossenes System bewirtschaftet. Ackerkulturen sind Rotklee gras, Sommerweizen, Winterweizen, Winterroggen, Kartoffeln, Hafer und Sommerackerbohnen.

Der dritte Versuchsstandort, das Klostersgut Deppoldshausen (Lehr- und Versuchsstation Universität Göttingen) befindet sich auf einem Höhenzug des Göttinger Waldes (ca. 345 m NHN) nördlich Göttingens. Der Versuch wurde im Jahr 2019 auf dem Schlag „Dreisch“ und im Jahr 2020 auf dem Schlag „Im Lehne“ in Deppoldshausen durchgeführt, welche nach den gesetzlichen Richtlinien des ökologischen Landbaus langjährig bewirtschaftet werden. Die am Standort übliche Fruchtfolge besteht aus Klee gras, Winterweizen, Erbsen und Winterroggen.

3.1.1. Böden

Die Standorte unterscheiden sich mit Hinblick auf ihre Pedogenese und Gründigkeit und decken bei insgesamt mittleren Ackerzahlen ein weites Spektrum an Wasserspeichervermögen ab. Die alluvialen Auenlehme am Standort Wiesengut besitzen eine zum

Teil hohe nFk (224 mm), während diese auf den lehmigen Sanden aus Braunerde in Weeze maximal 140 mm beträgt (Tab. 1). Wegen der flachgründigen und steinreichen Böden am Standort Deppoldshausen (Kalkstein des mittleren und unteren Muschelkalkes) waren Bodenbeprobungen generell nur bis zu einer Tiefe von 30 cm möglich (Tab. 1).

Tab. 1: Charakterisierung der Versuchsstandorte Weeze (Wz), Wiesengut (WG) und Deppoldshausen (DH);
Quellen: DWD (2020), LBEG (2021), GEOPORTAL.NRW (2021).

	Wz		WG		DH	
Lage	Weeze, Niederrhein		Hennef, Siegaue		Deppoldshausen, Göttingen	
Meter über NN [m]	13		65		345	
Temperaturmittel [°C]	9,2		10		10,5	
Niederschlag Jahr [mm]	740		840		650	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Bodenart	IS	IS	sL, uL, L	sL, uL, L	Tu3	Tu3
nFK	112 mm	79 mm	224 mm	108 mm	70 mm	110 mm
Ackerzahl	60	62	61	60	50	45
pH	5,3	5,2	6,3	6,5	7,2	7,4

Die Makronährstoffversorgung der Versuchsböden ist für Phosphor als gering, für Kalium als mittel und für Magnesium als hoch einzustufen.

Tab. 2: Pflanzenverfügbare Makronährstoffe der Böden der sechs Umwelten im Mittel der Bodentiefe von 0 - 90 cm (0-30 cm in DH) und Einstufung in die Gehaltsklassen A, B, C, D, E (Empfehlung der VDLUFA) (LWK NRW 2018) Daten der Probenahmen: 14.08.2019 und 03.06.2020, Standorte Weeze (Wz); 19.09.2019 und 08.04.2020 Deppoldshausen (DH), Schlag „Dreisch“ und Schlag „Im Lehne“; 14.08.2019 und 03.06.2020, Wiesengut (WG), Schlag 5 und 6

		Bodenart	Einheit	Phosphor (P ₂ O ₅)	Kalium (K ₂ O)	Magnesium (Mg)
Wz	2019	IS	mg 100 g ⁻¹	8 B	7 B	7 D
	2020	IS	mg 100 g ⁻¹	8 B	7 B	7 D
DH	2019	uL	mg 100 g ⁻¹	3 A	16 C	44 E
	2020	tL	mg 100 g ⁻¹	5 B	17 D	46 E
WG	2019	Tu3	mg 100 g ⁻¹	4 B	7 B	9 D
	2020	Tu3	mg 100 g ⁻¹	3 A	8 B	6 C

Die Mikronährstoffgehalte im Oberboden (0-30 cm) waren für Eisen, Zink, Mangan, Kupfer und Bor (Ausnahme WG 2020) soweit untersucht ausreichend. Demgegenüber war die Molybdänversorgung der untersuchten Versuchsböden bis zu einer Tiefe von 90 cm unzureichend (Versorgungsstufe A) (Tab. 3).

Tab. 3: Pflanzenverfügbare Makro- und Mikronährstoffe der Versuchsböden abgestuft nach Bodentiefe von 0-90 cm und Einstufung in die Gehaltsklassen A, C, E (Empfehlung der VDLUFA) (LWK NRW 2018), Daten der Probenahmen: 04.04.2019, Weeze (Wz); 19.09.2019 und 08.04.2020, Deppoldshausen (DH), Schlag „Dreisch“ und Schlag „Im Lehne“; 27.03.2019 und 07.04.2020, Wiesengut (WG-Ackerbohnen),

Einheit			2019			2020			Richtwert C
			Wz (IS, S)	WG (sL)	DH (Tu3)	(Wz) (IS, S)	WG (sL)	DH (Tu3)	
pH			5,3	6,3	7,2	5,2	6,5	7,4	
Fe	(0-30)	mg/kg	200	290	59	200	210	58	/
	(30-60)	mg/kg	190	230	-	190	110	-	/
	(60-90)	mg/kg	96	140	-	96	79	-	/
Cu	(0-30)	mg/kg	1,9 C	4,4 E	3,6 C	1,9 C	4,4 E	2,4 C	1,2-4,0
	(30-60)	mg/kg	1,9 C	2,5 C	-	1,9 C	2,1 C	-	1,2-4,0
	(60-90)	mg/kg	1,2 C	1,2 A	-	1,2 C	0,9 A	-	1,2-4,0
Mn	(0-30)	mg/kg	68 E	385 E	157 E	68 E	270 E	93 E	5,0-60,0
	(30-60)	mg/kg	57 E	217 E	-	57 E	106 E	-	5,0-60,0
	(60-90)	mg/kg	32 E	128 E	-	32 E	70 E	-	5,0-60,0
Zn	(0-30)	mg/kg	2,8 E	11 E	3,6 E	2,8 E	7 E	3,2 E	1,0-3,0
	(30-60)	mg/kg	4,4 E	4,2 E	-	4,4 E	2 C	-	1,0-3,0
	(60-90)	mg/kg	1,0 C	1,4 A	-	1,0 C	1,1 A	-	1,0-3,0
B	(0-30)	mg/kg	0,25 C	0,34 C	0,61 C	0,25 C	0,18 A	0,53 C	0,25-0,80
	(30-60)	mg/kg	0,21 A	0,22 A	-	0,21 A	<0,10 A	-	0,25-0,80
	(60-90)	mg/kg	0,16 A	0,14 A	-	0,16 A	<0,10 A	-	0,25-0,80
Ca	(0-30)	mg/kg	816	1478	2190	816	1675	2600	/
	(30-60)	mg/kg	800	1010	-	800	917	-	/
	(60-90)	mg/kg	478	1018	-	478	596	-	/
Mo	(0-30)	mg/kg	<0,040 A	<0,040 A	<0,030 A	<0,040 A	<0,040 A	0,031 A	0,09-0,60
	(30-60)	mg/kg	<0,040 A	<0,040 A	-	<0,040 A	<0,040 A	-	0,09-0,60
	(60-90)	mg/kg	<0,040 A	<0,040 A	-	<0,040 A	<0,040 A	-	0,09-0,60

3.1.2. Witterungsbedingungen 2019 und 2020

In beiden Versuchsjahren kamen in der Mehrheit der Fälle während der kritischen Wachstumsperiode in Mai und Juni unterdurchschnittliche Niederschlagsereignisse vor. Am Standort Wiesengut war die Vegetationsperiode 2019 geprägt durch deutlich unterdurchschnittliche Niederschlagssummen in den Monaten Juni und Juli, gepaart mit zwei Hitzewellen jeweils am Ende der Monate Juni und Juli (Abb. 5). Das Jahr 2020 war an diesem Standort durch eine lange Frühjahrstrockenheit von Mitte März bis Anfang Juni bei durchschnittlichen Temperaturen geprägt. Am Standort Weeze waren beide Versuchsjahre durch überdurchschnittliche Niederschlagsereignisse in den Monaten April bis Juni mit zwei Hitzewellen (analog zu WG) gekennzeichnet. Am Standort Dippoldshausen war das Frühjahr in beiden Jahren vergleichsweise trocken. Im zweiten Versuchsjahr fielen im Juni überdurchschnittlich hohe Mengen an Niederschlag (Abb. 5).

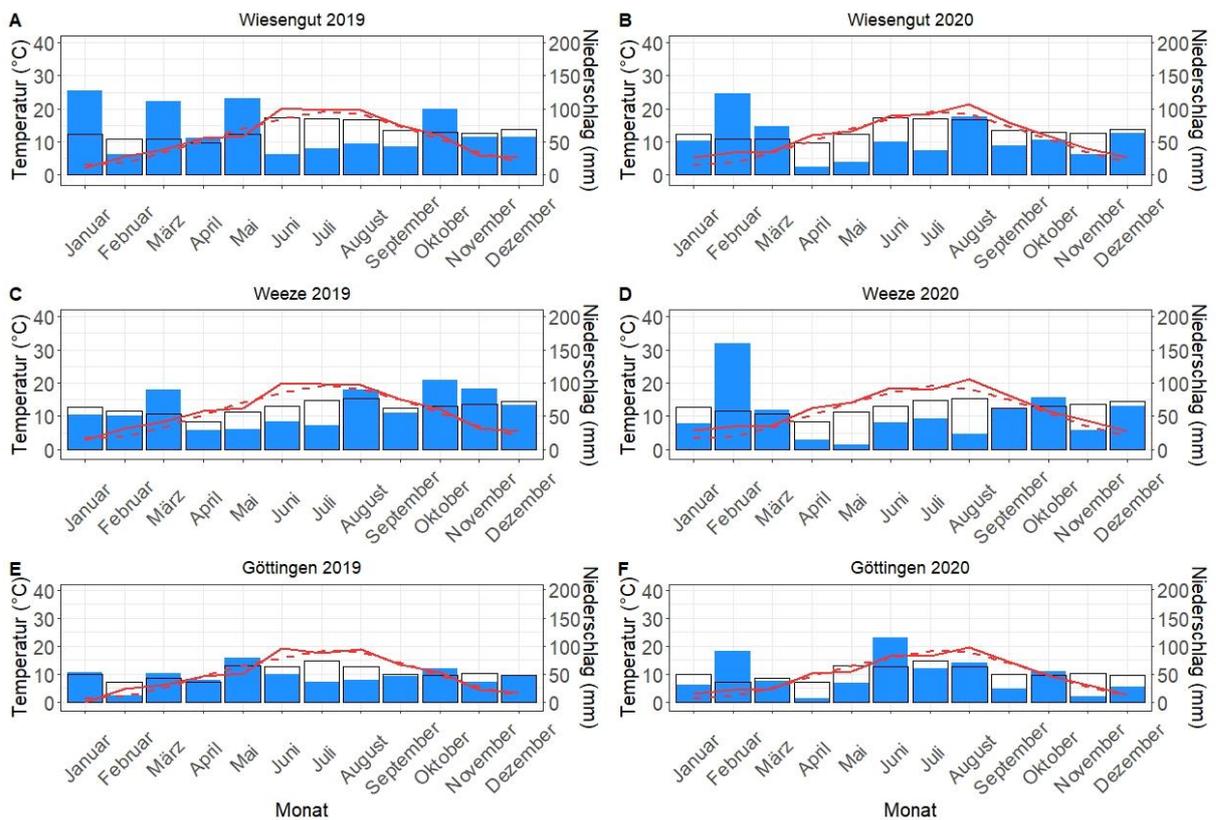


Abb. 5: Monatliche Durchschnittstemperaturen und Niederschlagssummen in 2019 und 2020 an den drei Versuchsstandorten im Vergleich zum langjährigen Mittel, schwarze Balkenlinie bzw. gestrichelte rote Linie

3.2. Versuchsdesign und -durchführung

Alle Versuche wurden mehrfaktoriell unter ökologischen Anbaubedingungen unter Nutzung eines standortübergreifenden Designs und gleicher Betriebsmittel inklusive Saatgutquelle angelegt. Einzige Ausnahme bildete die Verwendung von verschiedenen Komposten in den Feldversuchen mit Sommerweizen im Jahr 2020.

3.2.1. Ackerbohnen

Versuchsdesign

In den Versuchsjahren 2019 und 2020 wurden an allen drei Standorten jeweils eine zweifaktorielle Spaltanlage mit den Prüffaktoren Beregnung und Düngung und vier Wiederholungen angelegt. Der Prüffaktor Beregnung beinhaltete die Faktorstufen „regenbasiert“ und „beregnet“. Bei letzterer erfolgte ab einer nFK von 50 % im Unterboden (40 cm) eine Beregnungsgabe von etwa 25 mm (Tab. 4). Der Prüffaktor Düngung unterteilte sich in die Faktorstufen „0“, „PKS“ und „PKSM“. Die Faktorstufe „PKS“ erhielt eine Düngung auf Basis des geschätzten Entzugs mit Hyperphosphat (29% P₂O₅) sowie Kalimagnesia mit 30% K₂O, 10% MgO und 17% Schwefel. Der Faktorstufe „PKSM“ wurde zusätzlich zweimalig mit dem Flüssig - Blattdünger WUXAL® Multimicro (Aufwandmenge 2,0 Liter ha⁻¹) mit den Mikronährstoffen Bor (0,3%), Kupfer (0,5%), Eisen (1,1%), Mangan (1,5%), Molybdän (0,01%), Zink (1,1%), sowie Magnesiumoxid MgO (3,4%) und Schwefel (5,4%) behandelt. Die Faktorstufe „0“ blieb ohne Düngung. Nachfolgend sind die Versuchsfaktoren mit den entsprechenden Faktorstufen zusammengefasst.

- 1: Bewässerungsstrategie: I: regenbasiert (natürlicher NS)
II: beregnet (30 mm ab 50% nFK)
- 2: Düngungsstrategie a: PKS Entzug
b: I + Mikronährstoffe Entzug
c: ungedüngt
- zusätzlich: 7+ 8: ii-a und -c beschränkt regenbasiert (15 mm ab 25% nFK)*
9: Referenzfrucht Hafer, regenbasiert, ungedüngt
10: Referenzfrucht Hafer, beregnet, ungedüngt

* nur am Standort WG

Parzellengröße: 1,5*10=15 m²

Versuchsgröße: 40*15=600 m²

Der ursprüngliche vorgesehene Faktor Bodendämpfung konnte nicht in die Versuche integriert werden, weil die technisch anspruchsvolle Dienstleistung in beiden Versuchsjahren nicht bereitgestellt werden konnte. Daher wurde zusätzlich in 2021 ein Feldversuch mit Ackerbohnen mit den Faktoren Beregnung, Düngung und Bodendämpfung angelegt (siehe 3.2.4 weitere Versuche).

Versuchsdurchführung

Die Anlage der Versuche erfolgte mit ortüblicher Versuchstechnik nach Pflugbearbeitung und Vorfrucht Getreide. Die Aussaatstärke richtete sich nach der angestrebten Bestandesdichte, die standortspezifisch zwischen 40 und 60 Körnern je m² lag. Es wurde einheitlich zertifiziertes Ökosaatgut der Sorte Mallory aus gemeinsamer Beschaffung verwendet. Gleiches galt für die verwendeten Dünger. Die Unkrautregulierung erfolgte standortspezifisch sowohl maschinell als auch händisch. Pflanzenschutzmaßnahmen wurden keine durchführt.

Die Beregnung der Ackerbohnen erfolgte standortspezifisch am Wiesengut und in Weeze mittels Tröpfchenbewässerung (Typ „Streamline Plus 16080“, Fa. Netafirm, Frankfurt, Deutschland) bzw. mit Überkopfberegnung (Typ „Rainstar T31“, Fa. Bauer, Voitsberg, Österreich) in Deppoldshausen. Fachliche Implikationen der Beregnungstechnik werden in der Diskussion aufgegriffen. Ausgebrachte Mengen sind der Tab. 4 zu entnehmen.

Tab. 4: Kerndaten zur Beregnung der Ackerbohnen

Standort	Jahr	Niederschlags- summe in mm*	Beregnungssumme in mm	Anzahl Beregnungen	Beregnungszeitraum
Weeze	2019	317	133	6	29.05. – 04.07.19
Weeze	2020	190	143	6	14.05. – 26.06.20
Wiesengut	2019	401	75	3	14.06. – 09.07.19
Wiesengut	2020	279	154	7	05.05. – 10.07.20
Deppoldshausen	2019	316	106	8	06.06. – 26.07.19
Deppoldshausen	2020	311	75	8	14.05. – 31.07.20

*: jeweils von Aussaat bis Ernte

3.2.2. Klee gras

Versuchsdesign

In 2019 und 2020 wurde an allen drei Standorten jeweils eine zweifaktorielle Spaltanlage mit den Prüffaktoren Beregnung und Düngung und vier Wiederholungen angelegt. Der Prüffaktor Beregnung beinhaltete die Faktorstufen „regenbasiert“ und „beregnet“. Analog zu Ackerbohnen erfolgte diese ab einer nFK von 50 % im Unterboden (40 cm) jeweils mit einer Beregnungsgabe von etwa 25 mm (Tab. 5). Die Düngung erfolgte ebenfalls in Analogie zu Ackerbohnen. Am Standort Weeze konnten flächenbedingt nur die Faktorstufen „0“ und „PKS“ für den Prüffaktor Düngung in den Versuch integriert werden, ergo sechs statt acht Varianten mit vier Wiederholungen.

Nachfolgend sind die Versuchsfaktoren mit den entsprechenden Faktorstufen zusammengefasst.

1: Bewässerungsstrategie: I: regenbasiert (natürlicher NS)
II: beregnet (30 mm ab 50% nFK)

2: Düngungsstrategie a: PKS Entzug
b: I + Mikronährstoffe Entzug
c: ungedüngt

zusätzlich: 7: W. Weidelgras I: regenbasiert, ungedüngt
8: W. Weidelgras I: beregnet + PKS Entzug

Parzellengröße: $3 \cdot 10 = 30 \text{ m}^2$ Versuchsgröße: $40 \cdot 15 = 960 \text{ m}^2$

Als Nachfrucht zu Klee gras wurde einheitlich Winterweizen (Sorte Aristaro, 350 bis 370 keimf. Körner pro m^2) ausgesät. Am Standort Deppoldshausen wurde die Nachfrucht Winterweizen sowohl nach Rotklee gras als auch nach Ackerbohnen angesät.

Versuchsdurchführung

Aus praktischen Gründen wurden standortspezifische Anbausysteme ausgewählt. In Weeze und Deppoldshausen wurden die Versuche neu angelegt, d.h. im Frühjahr 2019 wurde gesät. Während in Weeze eine zweijährige Nutzung erfolgte, wurde das Rotklee gras in Deppoldshausen an verschiedenen Ackerschlägen (2019: Dreisch, 2020: Im Lehne) einjährig genutzt. Am Wiesengut wurde in beiden Jahren ein bereits im Vorjahr (Blanksaat im August) angesäter Bestand verwendet (erstes Hauptnutzungsjahr). Referenzgräser für die Isotopenanalyse wurden am WG aus umliegenden Grasflächen entnommen.

Die Anlage der Versuche erfolgte mit standortüblicher Technik. Es wurde einheitlich Saatgut derselben Provenienz verwendet. Das Gemenge bestand aus Rotklee (*Trifolium pratense*), Sorte Taifun und Einjährigem Weidelgras (*Lolium westerwoldicum*), Sorte Pollanum, die mit Saatstärken von 20 bzw. 4 kg ha⁻¹ ausgebracht wurden. In Reinsaat wurden 12 kg ha⁻¹ Weidelgras gesät.

Die Beregnung der Klee grasbestände erfolgte standortspezifisch entweder mittels Tröpfchenbewässerung (Wiesengut 2020 und Weeze) bzw. mit Überkopfberegnung in Deppoldshausen (Abb. 6) und Wiesengut 2019. Die Beregnungsmengen sind in Tab. 5 angegeben.



Abb. 6: Ersteininsatz der Sprinkleranlage Rainstar im Feldversuch Deppoldshausen am 6.6.2019.

Tab. 5: Kerndaten zur Beregnung von Rotklee gras

Standort	Jahr	Niederschlags- summe in mm*	Beregnungssumme in mm	Anzahl Beregnungen	Beregnungszeitraum
Weeze	2019	317	133	6	29.05. – 04.07.19
Weeze	2020	190	143	6	14.05. – 26.06.20
Wiesengut	2019	401	75	3	14.06. – 09.07.19
Wiesengut	2020	279	154	7	05.05. – 10.07.20
Deppoldshausen	2019	316	114	8	06.06. – 09.08.19
Deppoldshausen	2020	311	127	8	14.05. – 17.09.20

*: jeweils von Aussaat bis Ernte

3.2.3. Sommerweizen

Versuchsdesign

In 2019 und 2020 wurde an allen drei Standorten jeweils eine zweifaktorielle Spaltanlage mit den Prüffaktoren Beregnung und Düngung und vier Wiederholungen angelegt. Der Prüffaktor Beregnung beinhaltete die Faktorstufen „regenbasiert“ und „beregnet“. Diese erfolgte ab einer nFK von 50 % im Unterboden (40 cm) mit einer Beregnungsgabe von etwa 25 mm (Tab. 6). Der Prüffaktor Düngung unterteilte sich in die Faktorstufen „0“, „Rottemist 60 kg N ha⁻¹“, „Rottemist 120 kg N ha⁻¹“, „Kompost 60 kg N ha⁻¹“ und „Kompost 120 kg N ha⁻¹“. Beim Düngemittel „Kompost“ handelt es sich um einen mit Gärresten angereicherten-Grünschnittkompost mit 1,2% N idTM. Der Rinderrottemist hatte einen N-Gehalt von 2,1 % idTM.

Die Düngung erfolgte unmittelbar vor der Aussaat.

Nachfolgend sind die Versuchsfaktoren mit den entsprechenden Faktorstufen zusammengefasst:

Bewässerungsstrategie: I: regenbasiert (natürlicher NS)
II: beregnet (30 mm ab 50% nFK)

Düngungsstrategie a: Rottemist 60 N ha⁻¹
b: Rottemist 120 N ha⁻¹
c: Kompost 60 N ha⁻¹
d: Kompost 120 N ha⁻¹
e: ungedüngt

Parzellengröße 1,5 * 10 m = 15 m²

Versuchsdurchführung:

Die Aussaat des Sommerweizens (Sorte Sonett, 350 Körner m⁻²) erfolgte nach Pflugbearbeitung, Ausbringung der jeweiligen organischen Dünger (Abb. 7) mit anschließendem Einfräsen mit betriebsüblicher Technik. Die Parzellen wurden bei Bedarf gestriegelt. Weitere Maßnahmen wurden nicht durchgeführt.

Tab. 6: Kerndaten zur Beregnung von Sommerweizen

Standort	Jahr	Niederschlags- summe in mm*	Beregnungssumme in mm	Anzahl Beregnungen	Beregnungszeitraum
Weeze*	2019	317	133	6	29.05. – 04.07.19
Wiesengut	2019	390	112	3	07.06. – 04.07.19
Wiesengut	2020	206	143	6	19.05. – 10.07.20
Deppoldshausen	2019	241	106	8	06.06. – 26.07.19
Deppoldshausen	2020	284	75	8	14.05. – 31.07.20

- in 2020 wg. Flächenmangels keine Versuchsdurchführung



Abb. 7: Manuelle Ausbringung der organischen Dünger zu Sommerweizen, Wiesengut, März 2019.

3.2.4. Weitere Versuche

3.2.4.1 Dämpfversuch Ackerbohne 2021

Versuchsanlage und -durchführung

Der Versuch wurde auf Schlag 2 des Wiesenguts mit den Versuchsfaktoren i) Dämpfung (mit/ohne), ii) Düngung (mit/ohne) und iii) Beregnung (mit/ohne) mit drei Feldwiederholungen angelegt. Die Dämpfung der Flächen auf eine Tiefe von etwa 15 cm mit einer Temperatur von 70-80° erfolgte unter Nutzung der Technik der Firma Mobildampf Koch aus Waiblingen. Verwendet wurde ein Hochleistungsdampfkessel S350. Der Dampf wurde für etwa drei Stunden auf mit Folien abgedeckte Flächen eingeleitet, bis die Zieltemperatur im Boden erreicht war (Abb. 8). Die Düngung erfolgte in Analogie zu den anderen Versuchen mit Ackerbohnen. Ergänzend wurden noch 200 g Molybdän je Hektar in Form von Natriummolybdat-Dihydrat gegeben. Aufgrund der hohen Niederschläge während der Vegetationszeit 2021 kam der Versuchsfaktor Beregnung nicht zur Anwendung. Die Aussaat erfolgte mit betriebsüblicher Technik am 31. März 2021 (Sorte Mallory, 60 Körner m², Parzellengröße = 15m²). Unkräuter wurden maschinell bzw. händisch beseitigt. Weitere ackerbauliche Maßnahmen erfolgten nicht.



Abb. 8: Bodendämpfung am Standort Wiesengut am 26. März 2021

3.2.4.2. Praxisversuche Beregnung

Die in Arbeitspaket 2 vorgesehenen Praxisversuche in 2020 konnten aufgrund der epidemischen Lage größtenteils nicht durchgeführt werden. Die verfügbaren Daten fließen in die Abschlussdiskussion mit ein, werden aber nicht explizit dargestellt. Im Versuchsjahr 2021 war zudem aufgrund der nasskalten Witterung keine Beregnung erforderlich (siehe 3.2.4.1).

3.3 Datenerfassung und statistische Auswertung

Feldparameter

Erhoben wurden die Nährstoffgehalte des Bodens, die Bodenfeuchte, Parameter des Pflanzenwachstums (u.a. Feldaufgang, Länge, SPAD-Werte, Biomasse zu verschiedenen Entwicklungsstadien, NPK-Gehalte und -aufnahme des Sprosses) sowie Ertrag und Ertragsstruktur. Beprobungsflächen und -umfang wurden an kulturartenspezifische Standards angepasst.

Die Berechnung der klimatischen Wasserbilanzen sowie der Auswertung des Bodenfeuchteverlaufs erfolgte nach der „Geisenheimer Bewässerungssteuerung“ (PASCHOLD 2010; PASCHOLD 2019) auf Basis der Annahme, dass jeweils zu Vegetationsbeginn eine nutzbare Feldkapazität (nFK) und damit eine Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen von 100% vorlag.

Labormethoden

Pflanzenproben wurden im Labor des INRES-AOL analysiert. Die Messung der N-Gehalte erfolgte elementaranalytisch (Eurovector). Die P- und K-Gehalte wurden nach Mikrowellenveraschung photometrisch (SEAL-Quattro) bzw. flammenphotometrisch (Perkin Elmer) gemessen. Bodenproben wurden von der LK-NRW nach VDLUFA Standardmethoden analysiert.

Zur Bestimmung der symbiotischen Stickstofffixierung bei Leguminosen (relative Ndfa-Werte in % sowie absolute Werte in kg N pro ha) wurde die Natural Abundance-Methode (UNKOVICH et al. 1994, 2008) sowie die erweiterte Differenzmethode (STÜLPNAGEL 1982) verwendet. In Laboren der Georg-August-Universität Göttingen wurden zur Ermittlung der benötigten Daten N-Elementaranalysen (Dumas-Methode) sowie N-Isotopenanalysen (atom-% ^{15}N und atom-% ^{14}N , $\delta^{15}\text{N}$) mittels Massenspektroskopie durchgeführt. Mit Hilfe der relativen Anteile des luftbürtigen Stickstoffs in den Leguminosen (Ndfa) und den Stickstoffgehalten in der Spross-Trockenmasse bzw. in der Korn-Trockenmasse der Kulturpflanzen wurden die fixierten Stickstoffmengen in kg N pro Hektar berechnet. Generell sind alle Feldmethoden zur Ermittlung der symbiotischen Stickstofffixierung bei Leguminosen abhängig von nicht-legumen Referenzpflanzen, deren N-Aufnahme ausschließlich aus dem Boden erfolgt (UNKOVICH et al. 2008). In den Versuchen mit Ackerbohnen wurde entsprechend Sommerhafer oder Sommerweizen eingesetzt. Bei den Klee gras-Versuchen wurde Einjähriges Weidelgras in Reinsaat als Referenz verwendet.

Die erhobenen Daten wurden mit Hilfe des Statistik Programms R (Version 4.0.3) (THE R FOUNDATION 2020) in RStudio (Version 1.1.456, © 2009-2018 RStudio, Inc.) statistisch ausgewertet. Zunächst wurde mit Hilfe eines Interaction Plots untersucht, ob Interaktion zwischen Versuchsfaktoren vorliegen. Die Varianzhomogenität wurde mit Hilfe der varIdent-

Matrix, die Normalverteilungsbedingung der standardisierten Residuen visuell überprüft. Im Anschluss erfolgte die statistische Auswertung versuchsspezifisch mit mehrfaktoriellen Varianzanalysen (ANOVA) zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$. Signifikante Wechselwirkungen zwischen den Versuchsfaktoren ergeben sich aus der gewählten Darstellungsform. Sofern keine vorliegen, werden die Datensätze über Standort und Jahr gepoolt.

4. Ergebnisse

Es wurden insgesamt 18 Exaktversuche angelegt und erfolgreich abgeschlossen. Analog zur Methodenbeschreibung erfolgt die Ergebnisdarstellung kulturartenabhängig, beginnend mit der Leguminose Ackerbohne, gefolgt von Rotklee gras und Sommerweizen. Beide Versuchsjahre erwiesen sich mit Hinblick auf die Herausarbeitung von Beregnungseffekten häufig als günstig.

4.1. Feldversuche Ackerbohne

4.1.1. klimatische Wasserbilanzen und Verlauf der Bodenfeuchte

Im Versuchsjahr 2019 konnte sowohl in Weeze als auch am Wiesengut in der Zeit der generativen Wachstumsperiode die Bodenfeuchte als Folge von Beregnung oberhalb von 50% gehalten werden (Abb. 9 & Abb. 10). Am Standort Weeze lag 2019 mit 112 mm eine mittlere nFK im durchwurzelbaren Bodenraum vor, während diese am Wiesengut mit 224 mm deutlich höher war.

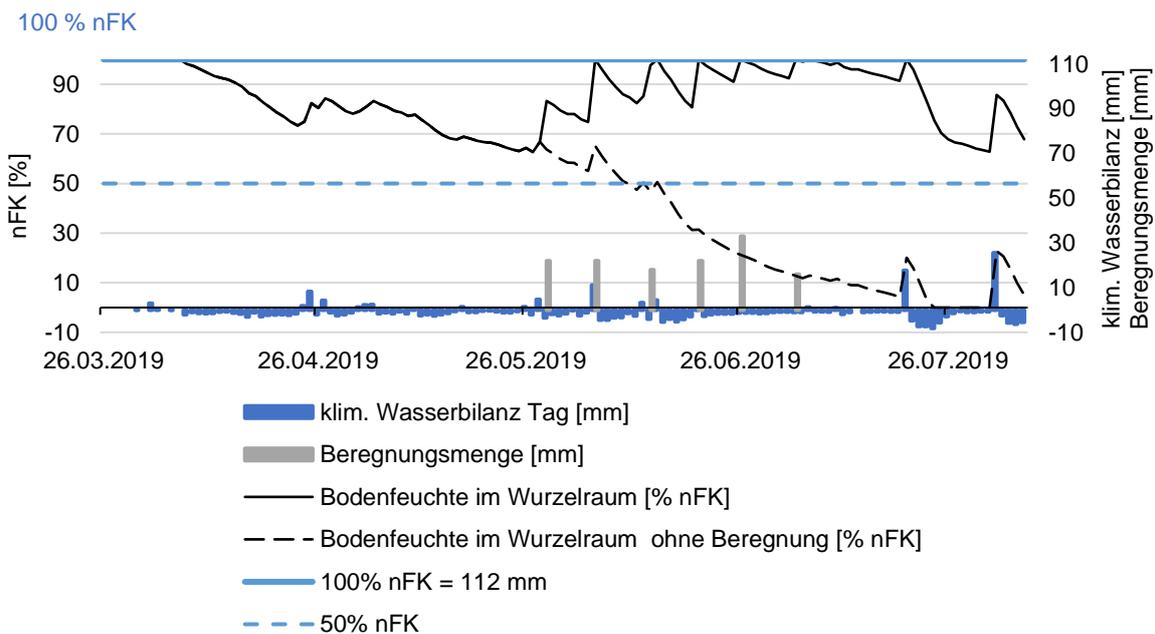


Abb. 9: Verlauf der Bodenfeuchte; Standort Weeze 2019; lehmiger Sand; Bilanz = Differenz zwischen Wasserzufuhr (Beregnung, Niederschlag) und Wasserabfuhr (potenzielle Evapotranspiration)

Am Standort Deppoldshausen war die nFK mit 90 mm im Versuchsjahr 2019 vglw. gering. (Abb. 11). Als Folge fiel ab Ende Mai die nFK in allen Varianten unterhalb von 50%. Aufgrund beschränkter Verfügbarkeit von Wasser konnte die nFK in Deppoldshausen nicht auf Werte oberhalb von 50% zurückgeführt werden. Dennoch zeigt sich verglichen mit unberegnet ein erkennbarer Effekt der Beregnung auf die klimatische Wasserbilanz (Abb. 11).

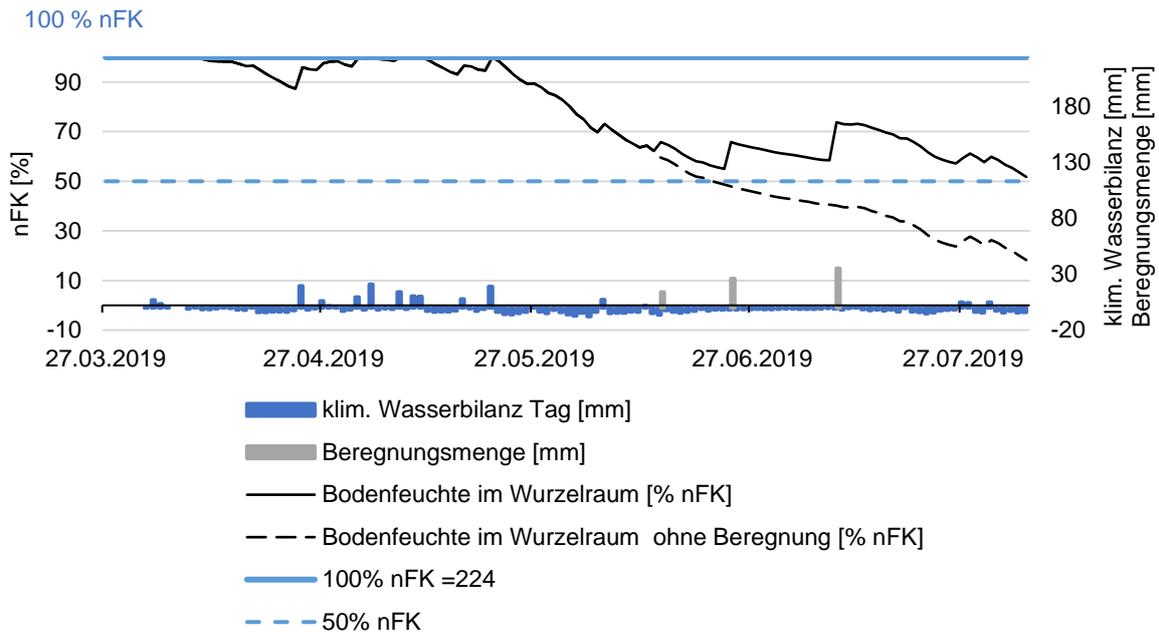


Abb. 10: Verlauf der Bodenfeuchte; Standort Wiesengut 2019; sandiger bis schluffigen Lehm; Bilanz = Differenz zwischen Wasserzufuhr (Beregnung, Niederschlag) und Wasserabfuhr (potenzielle Evapotranspiration)

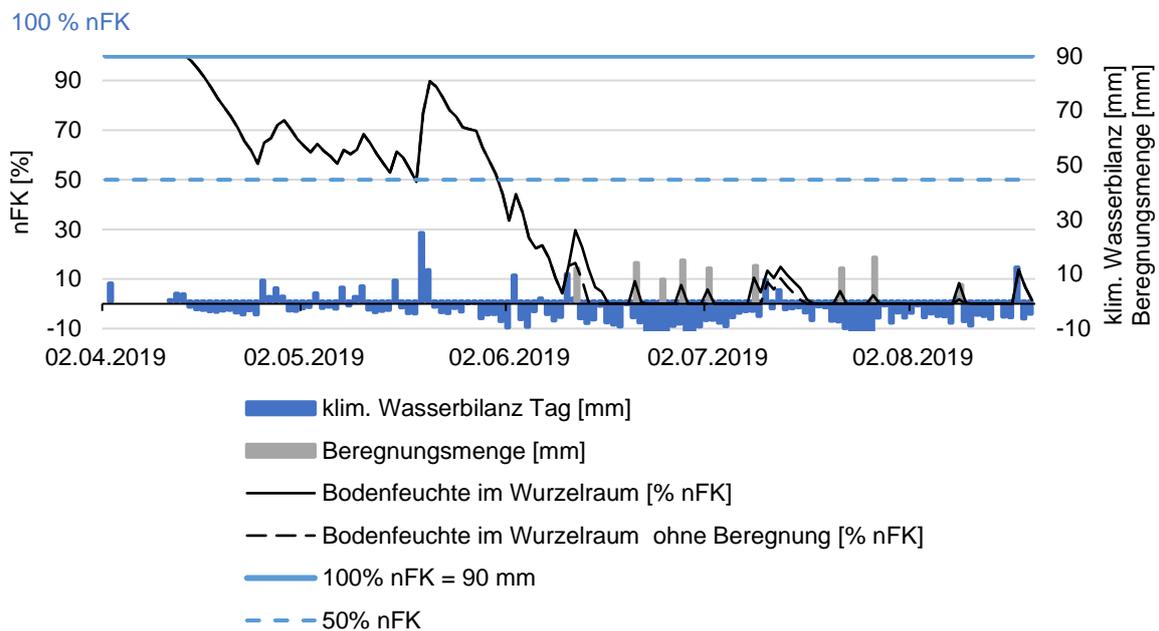


Abb. 11: Verlauf der Bodenfeuchte; Standort Deppoldshausen 2019; Pararendzina-Braunerde aus schluffigem Lehm; Bilanz = Differenz zwischen Wasserzufuhr (Beregnung, Niederschlag) und Wasserabfuhr (potenzielle Evapotranspiration)

Im Versuchsjahr 2020 entwickelten sich die Bodenfeuchtegehalte der jeweiligen Standorte analog zum Vorjahr. In der ertragsrelevanten Wachstumsphase wurde die Bodenfeuchte in

Weeze durch die Beregnung oberhalb von 50% nFK gehalten und fiel erst ab Mitte Juli unterhalb dieses Bereichs (Abb. 12).

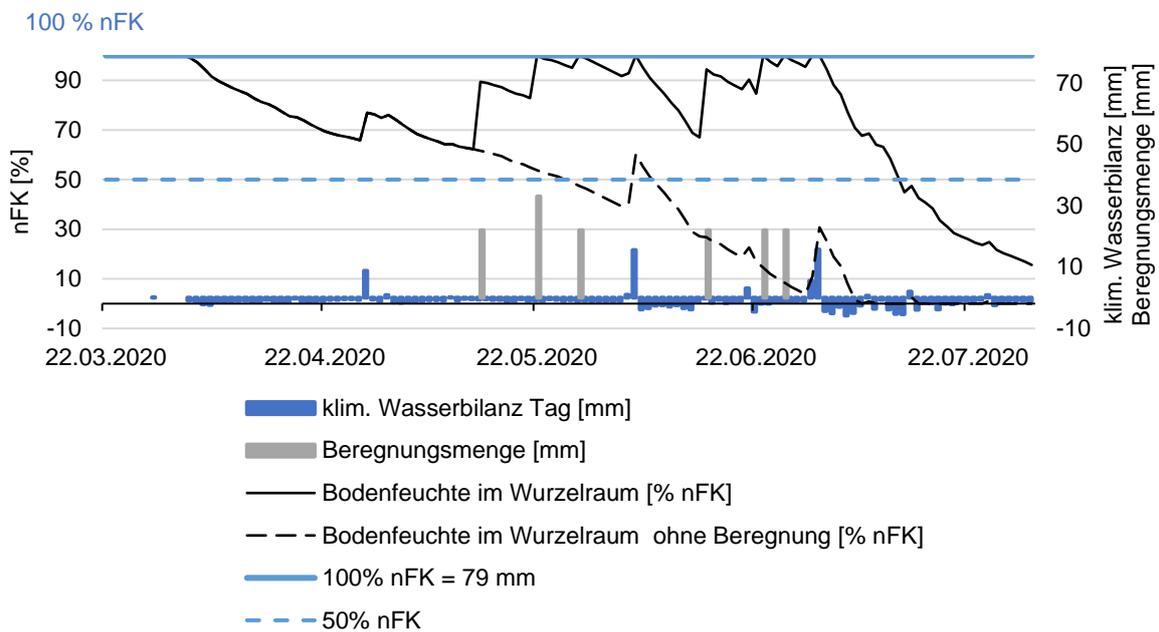


Abb. 12: Verlauf der Bodenfeuchte; Standort Weeze 2020; lehmiger Sand; Bilanz = Differenz zwischen Wasserzufuhr (Beregnung, Niederschlag) und Wasserabfuhr (potenzielle Evapotranspiration)

Am Versuchsstandort Wiesengut 2020 lag die maximale nFK mit 108 mm im mittleren Bereich (Abb. 13). Durch eine lange Trockenperiode im März und April und damit zu Beginn der Vegetationszeit fiel die Bodenfeuchte Mitte April unter den 50% nFK und wurde durch die Beregnung innerhalb der ertragsrelevanten Wachstumsphase von Anfang Mai bis Juli über 50% gehalten.

Am Versuchstandort Deppoldshausen lag die maximale nFK in 2020 mit 140 mm ebenfalls im mittleren Bereich (Abb. 14). Der Bodenfeuchteverlauf zeigte ähnlich wie am Standort Wiesengut einem Abfall unter 50% nFK gegen Ende April. Die Beregnung ab Beginn der Blüte führte aus Kapazitätsgründen nicht zu einer nFK von über 50%. Wie im Jahr zuvor wurde die Bodenfeuchte v.a. durch die Niederschläge und aber auch die Beregnung immer wieder oberhalb des permanenten Welkepunktes (PWP) gehoben.

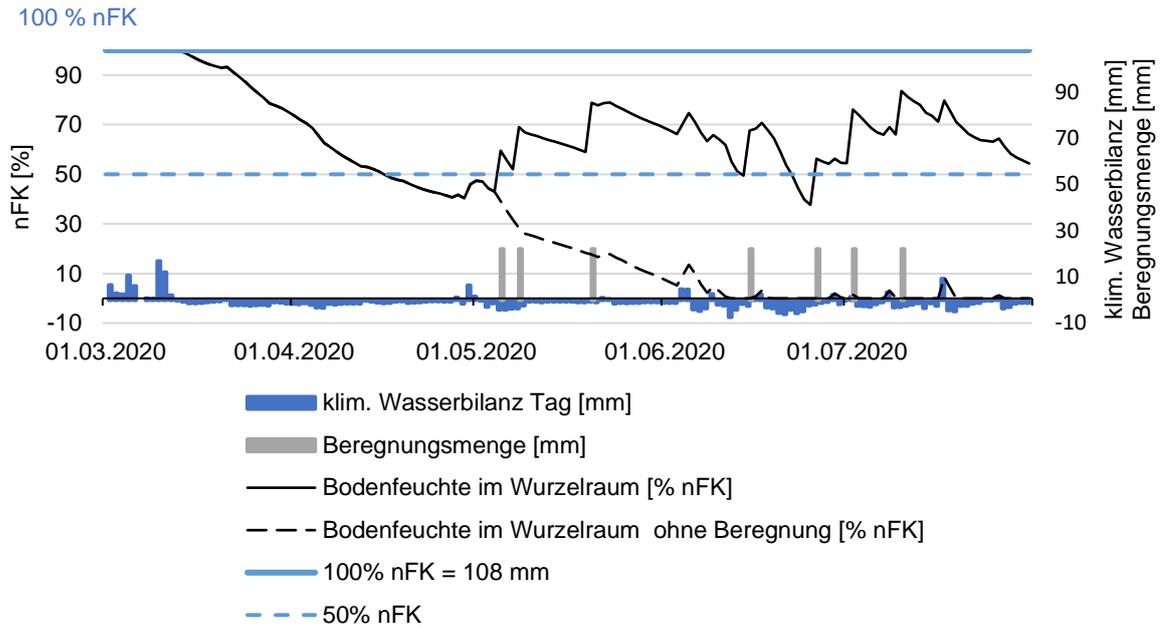


Abb. 13: Verlauf der Bodenfeuchte; Standort Wiesengut 2020; sandiger bis schluffigen Lehm; Bilanz = Differenz zwischen Wasserzufuhr (Beregnung, Niederschlag) und Wasserabfuhr (potenzielle Evapotranspiration)

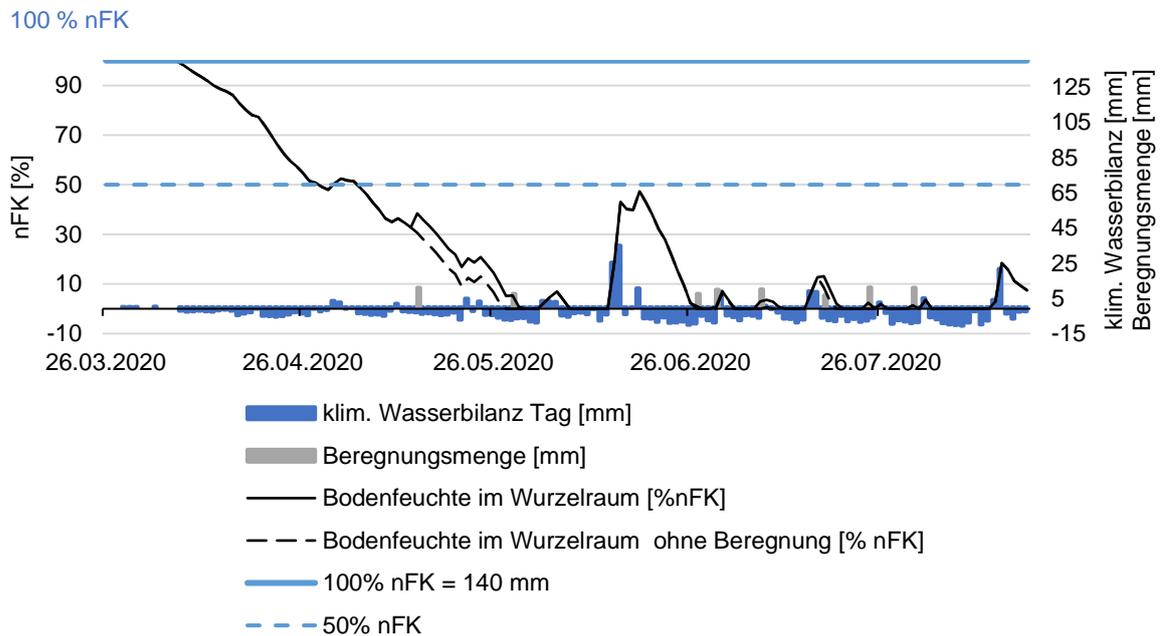


Abb. 14: Verlauf der Bodenfeuchte; Standort Deppoldshausen 2020; Pararendzina aus tonigem Lehm; Bilanz = Differenz zwischen Wasserzufuhr (Beregnung, Niederschlag) und Wasserabfuhr (potenzielle Evapotranspiration)

4.1.2. Bestandesentwicklung

Zusatzberegnung führte auf den Standorten Weeze und Wiesengut in beiden Versuchsjahren zu einer signifikanten Zunahme der Sprossmasse zum Stadium Ende Blüte (Abb. 15). Im Mittel der vier Umwelten nahm diese um 45% zu. Überdurchschnittliche beregnungsinduzierte Zuwächse wurden im Jahr 2020 bei zugleich geringerer durchschnittlicher Sprossmasse erzielt. Am Standort Deppoldshausen wurde kein Beregnungseffekt festgestellt. Die Düngung hatte in keinem der Versuche einen Effekt auf die Sprossmasse (Tab. 7).

Tab. 7: Einfluss einer zusätzlichen Beregnung und Nährstoffversorgung auf den Trockenmasseertrag (TME) von Ackerbohnen zur Zeiternte (ZE), Ende der Blüte, Standorte Weeze (Wz), Wiesengut (WG), Deppoldshausen (DH); P=Phosphor, K=Kalium, S=Schwefel, M=Mikronährstoffe; Werte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant; Tukey-Test, $\alpha = 0,05$

ZE	2019						2020					
	Beregnung		Düngung			\emptyset 2019	Beregnung		Düngung			\emptyset 2020
TME [dt ha ⁻¹]	ohne	mit	ohne	PKS	PKSM		ohne	mit	ohne	PKS	PKSM	
Wz A	46,0 a	63,6 b	54,1	57,0	53,2	54,8	25,8 a	50,7 b	36,6	38,5	39,9	38,2
WG A	56,5 a	64,8 b	60,2	60,6	61,1	60,6	34,3 a	58,1 b	47,1	46,2	45,3	46,2
DH B	37,7	38,7	37,5	38,7	38,4	38,2	29,3	30,1	28,0	30,3	30,8	29,7



Abb. 15: Ackerbohnen zum Zeitpunkt der Fruchtentwicklung ohne (links) und mit (rechts) Beregnung, Juni 2019, Standort: Weeze

4.1.3. Ertrag und Ertragsstruktur

Gemittelt über alle sechs Versuche wurde nach Beregnung ein um etwa 50% höherer Druschertrag im Vergleich zu unberegnet festgestellt. Das durchschnittliche Ertragsniveau war jedoch mit etwa 25 dt ha⁻¹ Trockenmasse vglw. gering. Die Kornerträge waren am Standort Deppoldshausen signifikant höher verglichen mit Weeze und Wiesengut. Analog zur Sprossmasse zur Zeiternte hatte die Düngung keinen Effekt auf die Kornerträge (Abb. 16).

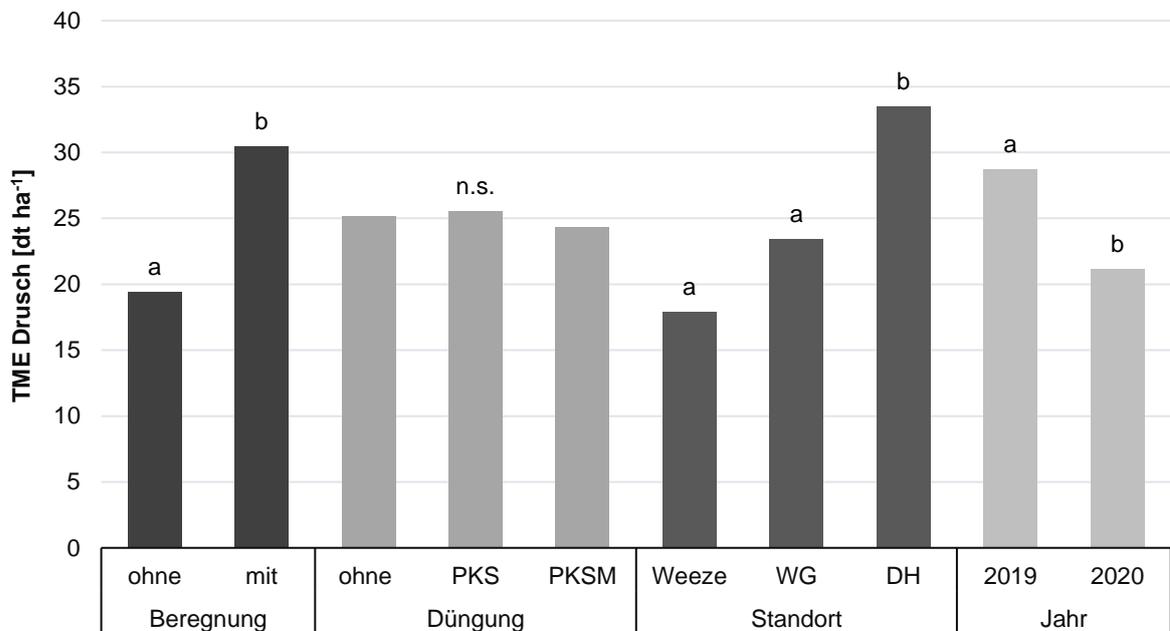


Abb. 16: Einfluss einer zusätzlichen Beregnung und Nährstoffversorgung sowie von Standort und Anbaujahr auf den Korntrockenmasseertrag (TME). Versuchsstandorte Weeze (Wz), Wiesengut (WG), Deppoldshausen (DH); P=Phosphor, K=Kalium, S=Schwefel, M=Mikronährstoffe; Werte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant; Tukey-Test, $\alpha = 0,05$



Abb. 17: Beregnete (links) und unberegnete (rechts) Ackerbohnen, Zeitpunkt der Reife, 24.07.19, Standort Wiesengut.

Die beregnungsinduzierten Mehrerträge an Gesamtbiomasse (ohne Wurzeln) und Korn wiesen standortsspezifische Unterschiede auf. Hohe Ertragszuwächse für beide Parameter wurde an den Standorten Weeze und Wiesengut in beiden Jahren beobachtet. Auf den sandigen Böden in Weeze führte die Beregnung in etwa zu einer Verdoppelung der Biomasse. Das mittlere Kornerntragsniveau war jedoch in 2020 mit 17,7 dt ha⁻¹ niedrig (Tab. 8). Sowohl der Hülsenansatz als auch das TKM wurden in beiden Jahren durch Beregnung signifikant erhöht, während die Kornzahl je Hülse unverändert blieb (Tab. 8).

Tab. 8: Einfluss einer zusätzlichen Beregnung und Nährstoffgabe auf die Ertragsstruktur von Ackerbohnen am Standort Weeze (Wz): Trockenmasseertrag (TME), TME Korn, TME Stroh, Hülsen pro Trieb (Hül. Tr.⁻¹), Körner pro Hülse (Kör. Hül.⁻¹), Tausendkorngewicht (TKG); P=Phosphor, K=Kalium, S=Schwefel, M=Mikronährstoffe; Werte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant; Tukey-Test, $\alpha = 0,05$

Wz	2019						2020					
	Beregnung		Düngung			Ø 2019	Beregnung		Düngung			Ø 2020
Parameter	ohne	mit	ohne	PKS	PKSM		ohne	mit	ohne	PKS	PKSM	
TME [dt ha ⁻¹]	47,5 a	91,6 b	73,0	70,9	64,8	69,5 A	26,7 a	63,0 b	44,1	43,4	46,9	44,8 B
TME Korn [dt ha ⁻¹]	24,8 a	56,4 b	43,2	41,9	36,8	40,6 A	11,1 a	24,2 b	16,8	16,5	19,7	17,7 B
TME Stroh [dt ha ⁻¹]	22,7 a	35,1 b	29,8	29,0	28,0	28,9 A	15,6 a	38,7 b	27,3	26,9	27,3	27,2 B
Hül. Tr.⁻¹	5,0 a	8,2 b	6,6	6,7	6,4	6,6 A	3,6 a	6,5 b	4,8	4,8	5,6	5,1 B
Kör. Hül.⁻¹	3,6	3,9	3,7	3,7	3,7	3,7 A	1,1	1,2	1,2	1,0	1,2	1,1 B
TKG [g]	368 a	480 b	432	425	415	424	308 a	375 b	331	347	352	343

Vergleichbare Resultate wurden auch am Standort Wiesengut erzielt. Besonders stark war der Effekt im Versuchsjahr 2020, das durch eine ausgeprägte Frühjahrstrockenheit gekennzeichnet war. Dort wurde der Kornerntrag durch Beregnung auf 37,4 dt ha⁻¹ (+ 280%) im Vergleich zu unberegneter erhöht (Tab. 9).

Im Gegensatz hierzu wurde am Standort Deppoldshausen nur im Jahr 2019 ein beregnungsinduzierter Korn-Mehrertrag festgestellt. Dieser war jedoch verglichen mit den beiden anderen Standorten mit + 43% weniger stark ausgeprägt. Im Jahr 2020 wurde kein Beregnungseffekt auf den Kornerntrag festgestellt. Strohertrag und die Körnerzahl je Ähre wurden demgegenüber durch Beregnung signifikant erhöht (Tab. 10).

Tab. 9: Einfluss einer zusätzlichen Beregnung und Nährstoffversorgung auf die Ertragsstruktur von Ackerbohnen am Standort Wiesengut (WG): Trockenmasseertrag (TME), TME Korn, TME Stroh, Hülsen pro Trieb, Körner pro Hülse, Tausendkorngewicht (TKG); P=Phosphor, K=Kalium, S=Schwefel, M=Mikronährstoffe; Werte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant; Tukey-Test, $\alpha = 0,05$

WG	2019						2020					
	Beregnung		Düngung			Ø 2019	Beregnung		Düngung			Ø 2020
Parameter	ohne	mit	ohne	PKS	PKSM		ohne	mit	ohne	PKS	PKSM	
TME [dt ha ⁻¹]	65,9 a	106,4 b	86,5	88,9	83,1	86,2 A	24,6 a	47 b	35,9	37,4	34,1	35,8 B
TME Korn [dt ha ⁻¹]	28,0 a	56,5 b	42,0	42,9	41,8	42,3 A	13,4 a	37,4 b	25	27,4	23,9	25,4 B
TME Stroh [dt ha ⁻¹]	37,9 a	49,9 b	44,5	46,0	41,3	43,9 A	11,2 a	9,6 b	10,9	10,0	10,2	10,4 B
Hülsen Trieb⁻¹	5,1 a	8,0 b	6,7	6,2	6,8	6,6 A	3,7 a	5,4 b	4,5	4,7	4,6	4,6 B
Körner Hülse⁻¹	3,2 a	3,7 b	3,5	3,4	3,4	3,5 A	1,4 a	2,0 b	1,8	1,7	1,8	1,7 B
TKG [g]	412 a	513 b	460	455	474	463 A	399 a	480 b	436	446	441	440 B

Tab. 10: Einfluss einer zusätzlichen Beregnung und Nährstoffversorgung auf die Ertragsstruktur von Ackerbohnen am Standort Deppoldshausen (DH): Trockenmasseertrag (TME), TME Korn, TME Stroh, Hülsen pro Trieb (Hülse Tr.⁻¹), Körner pro Hülse (Kör. Hül.⁻¹), Tausendkorngewicht (TKG); P=Phosphor, K=Kalium, S=Schwefel, M=Mikronährstoffe; Werte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant; Tukey-Test, $\alpha = 0,05$

DH	2019						2020					
	Beregnung		Düngung			Ø 2019	Beregnung		Düngung			Ø 2020
Parameter	ohne	mit	ohne	PKS	PKSM		ohne	mit	ohne	PKS	PKSM	
TME [dt ha ⁻¹]	36,3 a	46,6 b	39,6	41,9	42,9	41,5 A	58,2	56,1	57,7	52,7	61,1	57,2 E
TME Korn [dt ha ⁻¹] Drusch	30,0 a	43,0 b	39,2	38,2	32,3	36,5 A	29,6	31,3	28,9	29,0	33,5	30,5 E
TME Stroh [dt ha ⁻¹]	36,3 a	46,6 b	39,6	41,9	42,9	41,5 A	28,6 a	24,8 b	28,8 a	23,7 b	27,6 a	26,7 E
Hülse Tr.⁻¹	5,7 a	8,3 b	7,1	6,8	7,1	7,0 A	4,9	5,8	5,6	5,7	4,8	5,4 E
Kör. Hül.⁻¹	2,4	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5 A	3,7 a	2,8 b	3,5	3,0	3,2	3,2 E
TKG [g]	473 a	421 b	488 a	468 a	384 b	447 A	496	490	501	482	495	493 E

4.1.4. Ndfa-Werte und N₂-Fixierleistung

Mit den berechnungsinduziert höheren Biomasseerträgen ging idR auch eine höhere Stickstoffaufnahme von Korn und Stroh einher. Der Kornstickstofftrag war in fünf von sechs Versuchen, die Stickstoffaufnahme des Strohs in drei von sechs Versuchen signifikant höher nach Beregnung im Vergleich zu unberegneter. Der höchste Kornstickstofftrag (245 kg N ha⁻¹) wurde am Standort Wiesengut in 2019 festgestellt (Tab. 11). Ein wichtiger Befund ist, dass die Ndfa-Werte von Korn und Stroh durch Beregnung idR ebenfalls erhöht wurden, in zwei von sechs Fällen (Korn) signifikant. Im Mittel aller Versuche war der Ndfa Wert der Sprossmasse mit Beregnung um etwa 13% höher verglichen mit unberegneter. Insgesamt waren die Ndfa-Werte der Ackerbohnen mit im Mittel 61% (ohne den Ausreißer 3%) jedoch vergleichsweise niedrig. Für die Produktivität ökologischer Anbausysteme förderliche hohe Ndfa Werte von > 80% wurden nur in einem Versuch (Deppoldshausen 2020) gemessen. Dennoch wurde die N₂ Fixierleistung der Ackerbohnen als Produkt aus N-Aufnahme und Ndfa Werten durch Beregnung zT signifikant erhöht. Am Standort Wiesengut 2019 war die N₂ Fixierleistung nach Beregnung mit 172 kg N ha⁻¹ mehr als doppelt so hoch wie in der Kontrolle. Im Mittel der sechs Versuche war die N₂ Fixierleistung nach Beregnung um 52 kg N ha⁻¹ höher verglichen mit unberegneter.

Tab. 11: Einfluss der Beregnung auf Stickstoffaufnahme, Ndfa Werte und N₂ - Fixierung von Ackerbohnen (Korn, Stroh, Gesamt)

Standort	Versuchsfaktor	Korn			Stroh			Spross
		N-Aufn. (kg N ha ⁻¹)	Ndfa (%)	Nfix (kg N ha ⁻¹)	N-Aufn. (kg N ha ⁻¹)	Ndfa (%)	Nfix (kg N ha ⁻¹)	Nfix (kg N ha ⁻¹)
Weeze	mit Beregnung	209,9 a	53	111,1 a	50,5 a	42	21,1 a	96,3 a
	Kontrolle	99,1 b	42	40,1 b	32,9 b	17	5,4 b	42,8 b
Wiesengut	mit Beregnung	244,9 a	78 a	191,56 a	23,9	74	17,5	172,1 a
	Kontrolle	128,9 b	64 b	81,8 b	26,3	58	15,2	80,0 b
Göttingen	mit Beregnung	171,3 a	55	95,2	61,3 a	53	32,1 a	130,2
	Kontrolle	119,7 b	51	62,4	41,4 b	43	16,9 b	83,9
Weeze	mit Beregnung	103,2 a	46 a	48,3 a	44,4 a	35	15,6	59,3 a
	Kontrolle	58,2 b	3 b	0,6 b	23,9 b	32	7,6	15,8 b
Wiesengut	mit Beregnung	180,9 a	65	118,6 a	50,0	73	36,4	122,4 a
	Kontrolle	70,6 b	52	36,6 b	450,0	54	27,0	55,5 b
Göttingen	mit Beregnung	126,5	85	107,4	36,3	76	27,4	136,0
	Kontrolle	116,9	81	94,8	37,1	75	28,0	124,6

4.1.5 Nährstoffaufnahme und -bilanzen

Die Beregnung hatte mit einer Ausnahme keinen Effekt auf die P - Gehalte der Ackerbohnen. Auch die Düngung mit Phosphat führte nicht zu einer Erhöhung der P-Gehalte der Körner. Analoge Befunde wurden für den K-Gehalt der Körner festgestellt. Von einer Ausnahme abgesehen wurden diese weder durch Beregnung noch durch Düngung erhöht (Tab. 12). Die beregnungsinduziert höheren Kornerträge führten jedoch in allen vier Versuchen zu einem deutlich, zum Teil mehr als verdoppelten Entzug von Phosphor und Kalium.

Tab. 12: Einfluss von Beregnung und Düngung auf die P- und K-Gehalte und -aufnahme von Ackerbohnenkörnern, Versuchsstandorte Weeze und Wiesengut, P=Phosphor, K=Kalium, S=Schwefel, M=Mikronährstoffe; Tukey-Test, $\alpha = 0,05$

		Weeze				Wiesengut			
		P-Gehalt (%)	P-Aufnahme (kg P ha ⁻¹)	K-Gehalt (%)	K-Aufnahme (kg K ha ⁻¹)	P-Gehalt (%)	P-Aufnahme (kg P ha ⁻¹)	K-Gehalt (%)	K-Aufnahme (kg K ha ⁻¹)
2019	mit Beregnung	0,47	22,71 a	1,37	66,98 a	0,46	25,79 a	1,34 b	75,31 a
	Kontrolle	0,47	11,09 b	1,32	31,24 b	0,58	16,12 b	1,49 a	31,24 b
	PKS	0,47	17,28	1,32	50,25	0,54	22,56	1,41	59,20
	PKSM	0,46	15,46	1,36	45,32	0,57	19,90	1,43	52,20
	Kontrolle	0,48	17,98	1,36	51,76	0,50	17,22	1,40	51,23
2020	mit Beregnung	0,45	10,69 a	1,47 a	35,25 a	0,49 b	18,36 a	1,38	67,40 a
	Kontrolle	0,40	4,48 b	1,29 b	14,34 b	0,61 a	8,09 b	1,41	40,83 b
	PKS	0,43 ab	7,30	1,39	23,45	0,55	14,13	1,39	55,18
	PKSM	0,40 b	8,06	1,37	27,35	0,58	10,72	1,42	52,99
	Kontrolle	0,45 a	7,40	1,38	23,58	0,57	11,64	1,41	50,53

Die deutlich höheren Nährstoffentzüge von P und K nach Beregnung hatten entsprechende Änderungen der Bilanzen auf Schlagebene zur Folge. Mit Düngung und ohne Beregnung waren die Bilanzen für P und K in allen Fällen positiv (Tab. 13). Demgegenüber wurden die P- und K-Bilanzen durch Beregnung mit zusätzlicher Düngungsgabe in der Regel negativ.

Die Variante mit Beregnung und ohne Düngung führte 2019 ebenfalls an beiden Standorten zu negativen P- und K-Bilanzen. Im Jahr 2020 waren die Bilanzen für die genannte Faktorkombination nur für die K-Bilanz am WG negativ (-16,8 kg ha⁻¹).

Tab. 13. Einfluss von Beregnung und Düngung auf die P- und K- Schlagbilanzen von Ackerbohnen,
 Versuchsstandorte Weeze und Wiesengut, P=Phosphor, K=Kalium, S=Schwefel, M=Mikronährstoffe; Tukey-Test, α
 = 0,05

			P-Bilanz (kg P ha ⁻¹)	K-Bilanz (kg K ha ⁻¹)
2019	Weeze	mit Beregnung (gedüngt)	-1,11 b	-14,18 b
		Kontrolle (gedüngt)	10,51 a	21,56 a
	Wiesengut	mit Beregnung (gedüngt)	-4,19 b	-22,51 b
		Kontrolle (gedüngt)	5,48 a	11,52 a
2020	Weeze	mit Beregnung (gedüngt)	10,91 b	17,55 a
		Kontrolle (gedüngt)	17,12 a	38,46 b
	Wiesengut	mit Beregnung (gedüngt)	3,24 b	-14,60 b
		Kontrolle (gedüngt)	13,51 a	11,52 a
Haupteffekte				
Beregnung	mit		2,21 b	-8,43 b
	ohne		11,66 a	20,88 a
Düngung	Kontrolle		7,87	7,20
	PKSM		7,71	6,71
	PKS		6,28	5,78
Standort	Weeze		9,36 a	15,85 a
	Wiesengut		5,86 b	-0,30 b
Jahr	2019		3,18 b	1,13 b
	2020		11,54 a	12,11 a

4.2. Feldversuche Klee gras

Die Rotklee grasbestände entwickelten sich standort- und altersabhängig unterschiedlich. Die Nachteile einer Frühjahrsansaat im Vergleich zu einer Sommerblanksaat wurden an zwei Standorten deutlich.

4.2.1. Trockenmasseerträge

Im Mittel aller sechs Versuche wurde ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen der kumulierte Trockenmasseertrag durch Beregnung verglichen mit unberegneter signifikant um 42% auf 116,5 dt ha⁻¹ gesteigert (Abb. 18). Demgegenüber hatte die Düngung keinen Effekt auf die Trockenmasseerträge. Das Ertragsniveau war am Standort Wiesengut mit im Zweijahresmittel 147,8 dt ha⁻¹ deutlich höher als in Weeze (88,9 dt ha⁻¹) und Deppoldshausen (56,3 dt ha⁻¹). Das mittlere Ertragsniveau war in 2020 mit 129,5 dt ha⁻¹ deutlich höher als in 2019 (79,0 dt ha⁻¹).

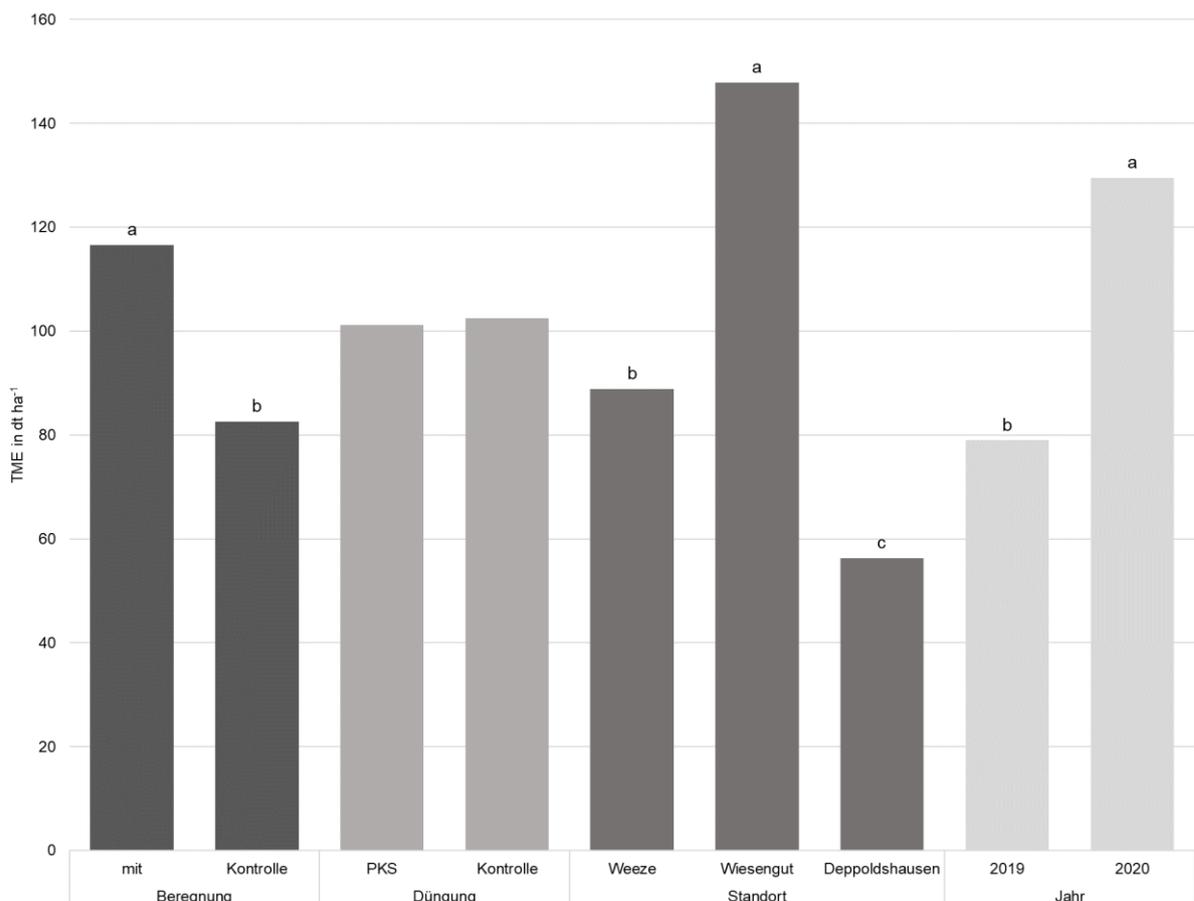


Abb. 18: Kumulierte Trockenmasseerträge (dt TM ha⁻¹) von Rotklee gras in Abhängigkeit von Beregnung, Düngung, Standort und Jahr, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$.

Am Standort Wiesengut wurde bei insgesamt hohem Ertragsniveau ($> 100 \text{ dt ha}^{-1}$) in keinem der beiden Versuchsjahre ein beregnungsinduziert ertragssteigernder Effekt festgestellt. Demgegenüber wurden an den beiden anderen Standorten in beiden Jahren die Trockenmasseerträge durch Beregnung signifikant gesteigert (Abb. 19). Im Mittel der vier Versuche nahm der Trockenmasseertrag durch Beregnung um 47 dt ha^{-1} zu.

Am Standort Weeze zeigte sich der ertragssteigernde Effekt der Beregnung in 2019 in allen drei Schnitten und im Gesamtertrag. In 2020 wurde der ertragssteigernde Effekt der Beregnung nur bei den Schnitten zwei bis vier und beim Gesamtertrag festgestellt. In diesem Versuch war der ertragssteigernde Effekt der Beregnung mit $62,5 \text{ dt ha}^{-1}$ am höchsten. Das Ertragsniveau in Weeze war im zweiten Nutzungsjahr der Bestände mit $127,5 \text{ dt TM ha}^{-1}$ deutlich höher als im Ansaatjahr ($50,5 \text{ dt ha}^{-1}$).

Am Standort Deppoldshausen war das mittlere Ertragsniveau mit am geringsten (s.o.). Vergleichbar zu Weeze wurden im Mittel beider Jahre beregnungsinduzierte Mehrerträge kumuliert über alle Schnitte von $38,6 \text{ dt ha}^{-1}$ festgestellt. Mit $47,9 \text{ dt ha}^{-1}$ waren die Mehrerträge nach Beregnung in 2019 deutlich höher als in 2020 ($29,3 \text{ dt ha}^{-1}$).

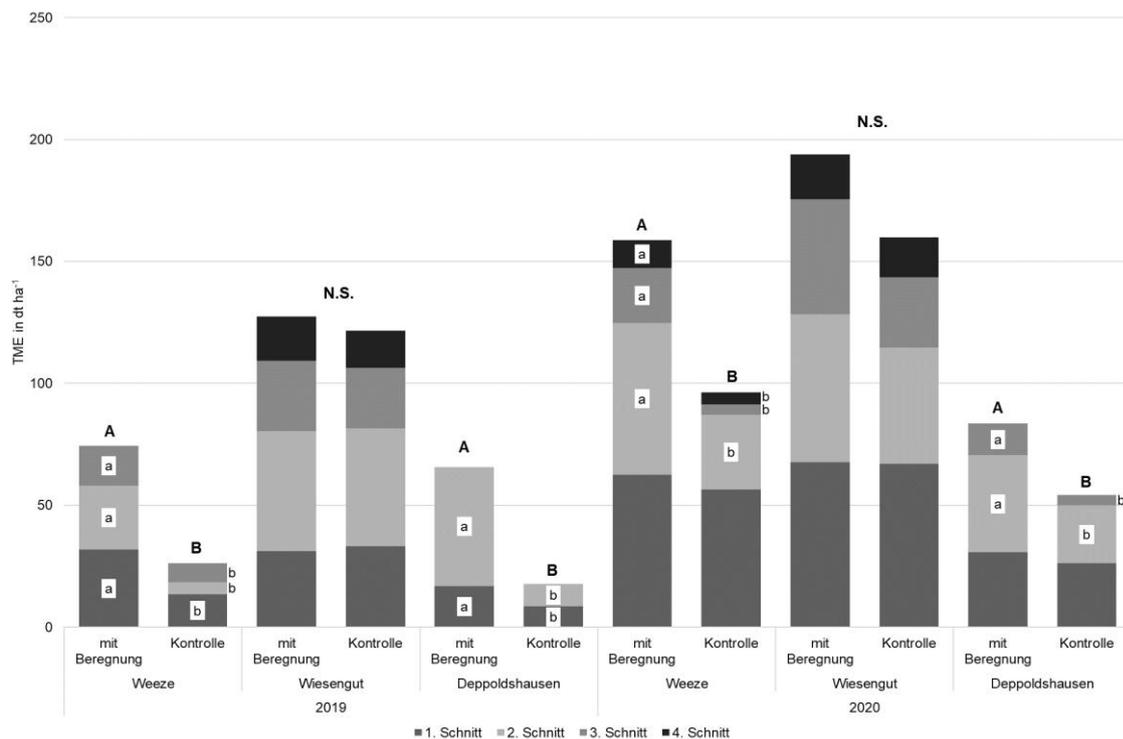


Abb. 19: Standort und jahresabhängiger Effekt der Beregnung auf Einzelschnitt- und Gesamttrockenmasseerträge von Rotklee, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$.

4.2.2. Klee / Gras-Verhältnis

Das Klee-Gras Verhältnis wurde in einem von sechs Versuchen (Weeze 2019) durch Beregnung in den ersten beiden Schnitten signifikant erhöht. In diesen war der mittlere Kleeanteil beider Schnitte nach Beregnung mit etwa 60% etwa doppelt so hoch verglichen mit unberegnung (Tab. 14). Mit Ausnahme von Weeze 2020 waren alle Standorte kleebetont (Abb. 20). Ein standort bzw. schnittzeitpunktabhängiges Muster war nicht erkennbar.

Tab. 14: Einfluss von Beregnung auf die Rotklee -und Grasanteile der einzelnen Schnitte, drei Standorte, zwei Jahre, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$.

			1. Schnitt		2. Schnitt		3. Schnitt		4. Schnitt	
			Klee	Gras	Klee	Gras	Klee	Gras	Klee	Gras
2019	Weeze	mit Beregnung	40,3 a	26,4	82,1 a	17,5	58,7	37,2		
		Kontrolle	27,3 b	33,5	43,1 b	32,4	58,9	36,8		
	WG	mit Beregnung	73,0	27,0	87,2	12,8	97,7	2,3	87,9	12,1
		Kontrolle	75,2	24,8	88,8	11,2	97,7	2,3	89,8	10,2
	DH	mit Beregnung	60,2	18,7	97,0 a	2,8				
		Kontrolle	50,6	28,5	76,0 b	9,0				
2020	Weeze	mit Beregnung	23,6	76,4	45,3	54,6	81,9	18,1	69,4	24,9
		Kontrolle	31,7	67,9	59,1	40,5	76,5	23,5	62,8	37,2
	WG	mit Beregnung	64,8	35,2	85,1	14,9	92,2	7,8	77,3	22,7
		Kontrolle	61,4	38,6	86,3	13,6	96,5	3,5	85,6	14,5
	DH	mit Beregnung	50,5	12,5	94,1	3,8	91,5	7,6		
		Kontrolle	50,4	11,2	87,1	10,1	88,0	11,8		



Abb. 20: Vergleich der Bestände von Rotklee-Gras mit Beregnung (links) und Regenfeldbau (rechts), Standort Göttingen-Deppoldshausen am 12.08.2020.

4.2.3. Phosphor und Kalium: Gehalte, Aufnahme und Bilanzen

Bei sechs von insgesamt 24 Paarvergleichen der ersten drei Schnitte war der P-Gehalt von Klee bzw. Grasproben nach Beregnung signifikant höher verglichen mit unberegneter. In der Mehrheit der Fälle hatte die Beregnung keinen Effekt auf den P-Gehalt von Klee-Gras. Von wenigen Ausnahmen abgesehen lagen die P-Gehalte im Bereich von 0,3 - 0,5% P idTM. In fast allen Fällen war der P-Gehalt des einjährigen Weidelgrases höher als in Rotklee (Tab. 15).

Im Gegensatz hierzu wurde der K-Gehalt von Klee bzw. Grasproben in zehn von 24 Fällen signifikant, in den meisten anderen tendenziell durch Beregnung erhöht. Von wenigen Ausnahmen mit K-Gehalten < 2 % abgesehen, lagen die K-Gehalte von Rotklee-Gras zwischen 2,5 und 4 % idTM.

Die P-Aufnahme von Rotklee-Gras als Produkt von Trockenmasseertrag und P-Gehalt wurde in sieben, die K-Aufnahme in acht von 24 Vergleichen durch Beregnung signifikant erhöht. Die Kaliumaufnahme und damit die Abfuhr vom Feld war in Versuchen mit hohem Trockenmasseerträgen (bspw. WG 2020) bereits mit dem ersten Schnitt mit > 200 kg K ha⁻¹ vglw. hoch (Tab. 15).

Als Folge der hohen P und K-Entzüge durch die Rotklee-Grasernte ergaben sich in fast allen Fällen trotz Düngung (12 kg P und 31,2 kg K ha⁻¹ nach jedem Schnitt) negative Schlagbilanzsalden, v.a. für K.

Der höchste negative P-Saldo (-30,6 kg ha⁻¹) wurde im Versuch WG 2020 mit hohem Trockenmasseerträgen (> 150 dt ha⁻¹) festgestellt.

Die K-Bilanzsalden waren in allen Versuchen und Varianten negativ. In fünf von acht Vergleichen war der negative K-Saldo > 200 kg ha⁻¹.

Die Beregnung hatte in allen Versuchen eine signifikante Zunahme der negativen K-Salden zur Folge. Im Mittel von vier Versuchen war der Kaliumentzug mit 325 kg ha⁻¹ um 135 kg ha⁻¹ höher als ohne Beregnung (nicht dargestellt).

Tab. 15: Einfluss von Beregnung auf die P und K-Gehalte (% id TM) und -aufnahme von Rotklee gras, PG = Phosphorgehalt in %, PA = Phosphoraufnahme in kg P ha⁻¹, KG = Kaliumgehalt in %, KA = Kaliumaufnahme in kg K ha⁻¹. Kleinbuchstaben stehen für signifikante Unterschiede bei Klee, Großbuchstaben für signifikante Unterschiede bei Gras, p < 0,05 Tukey-HSD

				1. Schnitt				2. Schnitt				3. Schnitt			
				PG-(%)	PA-(kg P ha ⁻¹)	KG-(%)	KA-(kg K ha ⁻¹)	PG-(%)	PA-(kg P ha ⁻¹)	KG-(%)	KA-(kg K ha ⁻¹)	PG-(%)	PA-(kg P ha ⁻¹)	KG-(%)	KA-(kg K ha ⁻¹)
2019a	Weeze	mit-Beregnung	Klee	0,20 ^{ab}	2,94 ^{ab}	4,49 ^{ab}	86,39 ^{ab}	0,23 ^{ab}	4,95 ^{ab}	3,72 ^{ab}	79,53 ^{ab}	0,29 ^h	2,90 ^{ab}	3,74 ^{ab}	37,32 ^{ab}
			Gras	0,29 ^{Ab}	3,79 ^{Ab}	2,43 ^{Ab}	32,57 ^{Ab}	0,32 ^{bB}	1,50 ^h	3,90 ^h	17,72 ^{Ab}	0,42 ^{Bh}	2,74 ^h	3,06 ^h	20,8 ^{ab}
		Kontrolle	Klee	0,16 ^{bb}	1,00 ^{bb}	3,24 ^{bb}	19,84 ^{bb}	0,20 ^{bb}	0,57 ^{bb}	2,83 ^{bb}	8,06 ^{bb}	0,30 ^h	1,41 ^{bb}	3,40 ^{bb}	16,38 ^{bb}
			Gras	0,23 ^{Bh}	1,67 ^{Bh}	1,52 ^{Bh}	12,80 ^{Bh}	0,43 ^{ab}	0,88 ^h	3,65 ^h	7,44 ^{Bh}	0,52 ^{Ab}	1,58 ^h	2,34 ^h	6,20 ^h
	Wiesengut	mit-Beregnung	Klee	0,28 ^h	5,81 ^h	2,49 ^h	52,38 ^h	0,29 ^h	11,97 ^h	2,08 ^h	85,87 ^h	0,35 ^h	9,77 ^h	2,78 ^h	77,99 ^h
			Gras	0,33 ^h	3,38 ^h	3,12 ^h	32,39 ^h	0,44 ^h	3,31 ^h	2,64 ^h	19,60 ^h	0,45 ^h	0,36 ^h	4,23 ^h	3,32 ^h
		Kontrolle	Klee	0,27 ^h	6,17 ^h	2,39 ^h	54,24 ^h	0,28 ^h	11,70 ^h	1,79 ^h	75,31 ^h	0,33 ^h	7,96 ^h	2,20 ^h	52,74 ^h
			Gras	0,32 ^h	3,22 ^h	3,00 ^h	30,51 ^h	0,48 ^h	3,26 ^h	2,57 ^h	17,60 ^h	0,43 ^h	0,31 ^h	3,32 ^h	2,54 ^h
2020a	Weeze	mit-Beregnung	Klee	0,33 ^h	4,79 ^h	4,39 ^h	63,78 ^h	0,28 ^h	7,99 ^h	2,80 ^{ab}	78,81 ^h	0,35 ^{ab}	6,45 ^{ab}	3,40 ^{ab}	63,62 ^{ab}
			Gras	0,29 ^h	13,81 ^h	2,72 ^h	130,36 ^h	0,32 ^h	10,88 ^{Ab}	1,69 ^h	58,83 ^h	0,37 ^h	1,46 ^{Ab}	2,93 ^{Ab}	11,7 ^{ab}
		Kontrolle	Klee	0,30 ^h	5,30 ^h	4,16 ^h	73,45 ^h	0,24 ^h	4,47 ^h	2,42 ^{bb}	46,25 ^h	0,29 ^{bb}	0,95 ^{bb}	2,73 ^{bb}	8,97 ^{bb}
			Gras	0,30 ^h	11,65 ^h	2,60 ^h	100,65 ^h	0,34 ^h	3,91 ^{Bh}	1,61 ^h	18,35 ^h	0,36 ^h	0,34 ^{Bh}	2,32 ^{Bh}	2,34 ^h
	Wiesengut	mit-Beregnung	Klee	0,32 ^h	14,43 ^h	3,84 ^h	172,42 ^h	0,34 ^{ab}	17,38 ^h	3,47 ^{ab}	178,67 ^{ab}	0,35 ^{ab}	15,61 ^h	3,41 ^{ab}	150,52 ^{ab}
			Gras	0,36 ^h	8,19 ^h	3,17 ^{Ab}	73,23 ^h	0,48 ^h	2,49 ^h	2,92 ^h	15,10 ^h	0,43 ^h	1,29 ^h	3,39 ^h	10,17 ^h
		Kontrolle	Klee	0,32 ^h	13,73 ^h	3,97 ^h	168,91 ^h	0,31 ^{bb}	12,73 ^h	2,96 ^{bb}	122,06 ^{bb}	0,32 ^{bb}	8,69 ^h	2,42 ^{bb}	69,65 ^{bb}
			Gras	0,35 ^h	8,29 ^h	2,98 ^{Bh}	71,89 ^h	0,48 ^h	2,02 ^h	2,57 ^h	10,78 ^h	0,46 ^h	0,51 ^h	3,35 ^h	3,75 ^h

4.2.4. N₂-Fixierung

Die Stickstoffaufnahme von Rotklee gras und die N₂ - Fixierleistung von Rotklee unterlag starken standörtlichen und jahresbedingten Schwankungen. Die mittlere N-Aufnahme von Rotklee gras war in 2019 mit knapp 170 kg N ha⁻¹ deutlich geringer als 2020 (320 kg N ha⁻¹). Die höchste mittlere N-Aufnahme wurde am Standort Wiesengut festgestellt (> 400 kg N ha⁻¹), die geringste in Deppoldshausen (Abb. 21). Im Gegensatz zu Ackerbohnen unterlag die die Ndfa-Werte nur geringen Schwankungen und waren im Gesamtmittel von knapp 80% hoch. Aufgrund der hohen Kleeanteile im Gemenge wurden häufig vglw. hohe Anteile an fixiertem Stickstoff (dunkle Säulen) an der Gesamtstickstoffaufnahme der Gemenge festgestellt. Beregnung hatte in beiden Jahren eine signifikante Zunahme der fixierten N₂-Menge zur Folge (Abb. 21). Die absoluten Unterschiede waren jedoch mit weniger als 50 kg N ha⁻¹ vglw. gering. Die durch Beregnung hervorgerufenen Unterschiede in der N-Fixierungsleistung waren geringer als die Unterschiede in der Gesamtstickstoffaufnahme (Abb. 21).

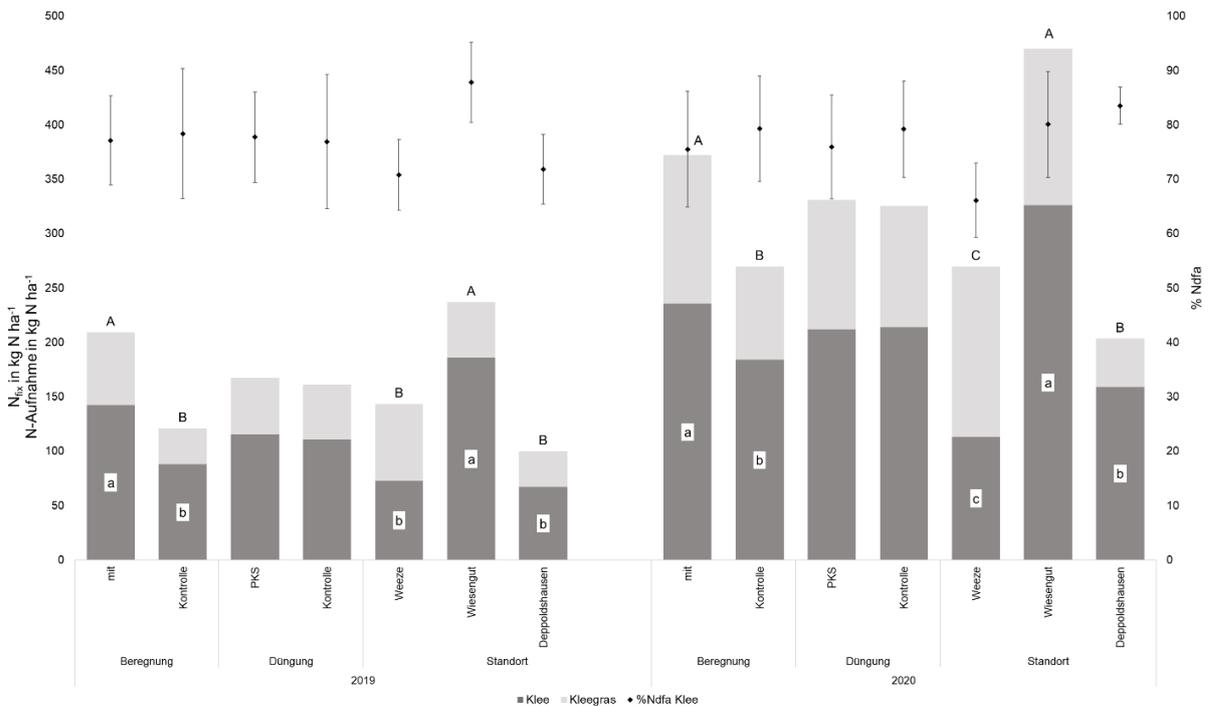


Abb. 21: Stickstoffaufnahme (kg N ha⁻¹) von Rotklee gras, Ndfa-Werte (%) und N₂-Fixierleistung von Rotklee (kg N ha⁻¹, dunkle Säulen) in Abhängigkeit von Beregnung, Düngung, Standort und Jahr, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$.

4.2.5. Winterweizenerträge nach Rotklee gras und Ackerbohnen

Das Winterweizenertragsniveau nach Vorfrucht Rotklee gras bzw. Ackerbohnen war im Mittel von sechs Versuchen mit 30,1 dt TM ha⁻¹ entsprechend 35 dt ha⁻¹ (86% TM) vglw. gering. Die Beregnung der beiden Vorfrüchte hatte in keinem der sechs Feldversuche einen Einfluss auf den Kornertrag. Der höchste Kornertrag (40,3 dt TM ha⁻¹) wurde nach Vorfrucht Rotklee gras am Wiesengut in 2019 erzielt (Tab. 16).

Der direkte Vergleich der beiden Vorfrüchte am Standort Deppoldshausen ergab keine Unterschiede hinsichtlich der Ertragsleistung von Winterweizen. Im Mittel beider Jahre wurden nach Ackerbohne 27,8 und nach Rotklee gras 26,3 dt TM ha⁻¹ gedroschen.

Die Düngung der Vorfrüchte mit Phosphor, Kalium, Schwefel und Mikronährstoffen hatte ebenfalls keinen Einfluss auf den Kornertrag von Winterweizen. Im Mittel von sechs Versuchen war dieser in den gedüngten Varianten mit 30, 3 dt TM ha⁻¹ auf gleicher Höhe wie die ungedüngten Varianten (29,3 dt TM ha⁻¹).

Tab. 16: Einfluss von Beregnung und Düngung der Vorfrüchte Rotklee gras und Ackerbohne auf den Kornertrag (dt TM ha⁻¹) von Winterweizen, Standorte Wiesengut und Deppoldshausen, 2019 und 2020, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$

TME [dt ha ⁻¹]	Kultur	2019/20						2020/21					
		Beregnung		Düngung			Ø 2019/20	Beregnung		Düngung			Ø 2020/21
		mit	Kontrolle	PKS	PKSM	Kontrolle		mit	Kontrolle	PKS	PKSM	Kontrolle	
Wiesengut	Klee gras	40,6	40,0	40,3	39,6	37,8	39,1 A	33,1	31,8	31,7	32,7	33,6	32,8
Deppoldshausen	Klee gras	24,1	22,7	23,5	22,9	23,8	23,3 B	30,0	28,3	30,5	29,9	27,1	29,2
	Ackerbohne	23,0	25,5	25,1	23,7	23,9	24,2 B	30,3	32,5	31,6	32,9	29,7	31,4

4.3. Feldversuche Sommerweizen

Das mittlere Kornertragsniveau (TM) von fünf Feldversuchen betrug 31,4 dt ha⁻¹. Die höchsten Durchschnittserträge wurden am Wiesengut festgestellt (31,9 dt ha⁻¹), gefolgt von Weeze (28,9 dt ha⁻¹) und Deppoldshausen (26,0 dt ha⁻¹). Die Beregnung hatte in keinem der Versuche einen ertragssteigernden Effekt (Tab. 17). Hinsichtlich der Düngung zeigten sich standortspezifische Unterschiede. In Weeze 2019 wurde der Kornertrag durch organische Düngung verglichen mit der ungedüngten Kontrolle tendenziell, im Falle von Kompostanwendung, signifikant erhöht. Nach Gabe von 120 kg N ha⁻¹ via Kompost wurde in diesem Versuch der höchste Ertragszuwachs (+ 5,2 dt ha⁻¹ = +21%) festgestellt. Am Standort Wiesengut nahm der Kornertrag nach hoher Kompostanwendung in 2019 tendenziell in 2020 signifikant verglichen mit ungedüngt zu. Auch hohe Stallmistdüngung und Kompostgaben von 60 kg N ha⁻¹ führten zu einem im Vergleich zu ungedüngt signifikant höheren Kornertrag. Am Standort Deppoldshausen war der Kornertrag in 2019 in allen Düngungsvarianten höher als in der Kontrolle. In 2020 zeigt sich kein einheitlicher Trend, da die hochgedüngte Stallmistvariante den signifikant geringsten Ertrag aufwies.

Tab. 17: Einfluss von Beregnung und organischer Düngung auf Kornertrag (dt TM ha⁻¹), Ährendichte und TKG (g) von Sommerweizen, drei Standorte, zwei Jahre, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$.

		TME Korn (Drusch) [dt ha ⁻¹]			Ähren / m ²			TKG [g]			
		WZ	WG	DH	WZ	WG	DH	WZ	WG	DH	
2019	Beregnung	mit	26,9	37,7	25,6	245	296	349	39,7	39,8	32,7
		Kontrolle	24,7	34,9	22,9	242	299	332	35,8	37,5	31,5
	Düngung	Mist 60	25,6 ab	35,9	24,3 a	229 b	299 b	333	37,9	38,0	32,0
		Mist 120	24,2 b	36,0	24,3 a	233 b	279 b	341	37,8	39,1	32,1
		Kompost 60	26,9 a	36,2	25,1 a	256 ab	334 a	349	37,5	38,3	32,4
		Kompost 120	29,4 a	39,1	26,8 a	279 a	295 b	352	37,3	38,5	32,9
		Kontrolle	24,2 b	35,2	20,9 b	232 b	294 b	329	38,0	39,0	30,9
		2020	Beregnung	mit		27,7	32,4		289	359 a	
Kontrolle				26,7	34,7		275	295 b		38,9	35,9
Düngung	Mist 60			26,2 ab	33,4 a		279	320		39,4	37,0
	Mist 120			29,1 a	28,2 b		287	271		39,6	36,0
	Kompost 60			27,4 ab	35,4 a		276	338		38,5	35,9
	Kompost 120			29,1 a	37,3 a		292	355		38,6	36,3
	Kontrolle			25,7 b	33,4 a		279	350		39,1	36,3

Von der Tendenz her spiegelten sich die Ertragseffekte der Beregnung in der Ährendichte wieder. Diese wurde durch Beregnung tendenziell erhöht. Die steigernde Wirkung organischer Düngung auf die Ährendichte war demgegenüber gering ausgeprägt und nur in zwei Fällen mit Kompostanwendung signifikant (Tab. 17). Das TKG wurde durch die Versuchsfaktoren nicht beeinflusst.

Der Kornstickstoffgehalt als wichtiger Qualitätsindikator betrug im Gesamtmittel 2,0% id TM. Es wurden keine Effekte der Beregnung und der organischen Düngung auf die Kornstickstoffgehalte festgestellt (Tab. 18). In Jahr 2020 waren die Kornstickstoffgehalte (ohne Weeze) bei vergleichbarem Ertragsniveau mit 1,85% idTM deutlich niedriger als 2019 (2,25% idTM)

Tab. 18: Einfluss von Beregnung und organischer Düngung auf den Kornstickstoffgehalte (% idTM) von Sommerweizen, drei Standorte, zwei Jahre, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$.

			N-Gehalt Korn [%]		
			WZ	WG	DH
2019	Beregnung	mit	2,06	2,21	2,22
		Kontrolle	1,93	2,17	2,41
	Düngung	Mist 60	1,99	2,09	2,28
		Mist 120	2,04	2,18	2,30
		Kompost 60	1,98	2,13	2,34
		Kompost 120	2,06	2,20	2,35
		Kontrolle	1,95	2,14	2,32
2020	Beregnung	mit		1,95	1,78
		Kontrolle		1,81	1,89
	Düngung	Mist 60		1,91	1,83
		Mist 120		1,99	1,84
		Kompost 60		1,87	1,81
		Kompost 120		1,88	1,92
		Kontrolle		1,82	1,79

4.4. Feldversuch Bodendämpfung

Das Versuchsjahr 2021 war im Vergleich zu den beiden Vorjahren überdurchschnittlich feucht, insbesondere in den Monaten Juni und Juli (Niederschlagssumme = 277 mm vs. 177 im langjährigen Mittel). Eine Zusatzberechnung war deshalb im Versuch nicht erforderlich. Hohe Niederschläge und vergleichsweise kühle Temperaturen im Frühsommer führten zu einer wüchsigen Entwicklung der Bestände. Der Effekt der Bodendämpfung auf die Ackerbohnen war über die gesamte Wachstumszeit visuell erkennbar. Neben einem deutlich verminderten Unkrautdruck waren die Bestände im Mittel über fünf Messtermine 5,7 cm länger (signifikant) (Tab. 19). Ein Effekt der Bodendämpfung auf die Sprosstrockenmasse zum Stadium Ende Blüte wurde nicht festgestellt. Der Kornertrag wurde durch Bodendämpfung signifikant um 23% auf 41,9 dt ha⁻¹ erhöht. Der Hülsenansatz war nach Bodendämpfung mit 10,6 Hülsen je Pflanze um 43 % höher als in der Kontrolle.

Tab. 19: Einfluss von Bodendämpfung und Düngung (mit P,K,S Mo) auf Wachstum und Ertrag von Ackerbohnen, Wiesengut 2021, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$.

	Bodendämpfung		Düngung	
	ohne	mit	ohne	mit
Wuchshöhe (cm)*	51,9b	57,7a	54,2	55,5
Sprosstrockenmasse (dt ha ⁻¹)**	20,4	18,3	19,2	19,4
Kornertrag (dt TM ha ⁻¹)	34,0b	41,9a	36,9	39,0
Hülsenansatz (je Pflanze)	7,4b	10,6a	8,7	9,4
Strohertrag (dt TM ha ⁻¹)	36,9	39,0	31,4	33,3

* = Mittel von fünf Messterminen, ** Zeiternte am 29. Juni 2021

Die Effekte der Düngung waren in Analogie zu den Beregnungsversuchen nicht signifikant. Der Korntrockenmasseertrag war mit Düngung knapp 6 % höher (nicht signifikant) verglichen mit der Kontrolle.

4.5. Wirtschaftlichkeitsberechnungen Beregnung

Es wurden insgesamt 17 Produktionsverfahren jeweils mit und ohne Beregnung unter Annahme von Direkt- und Arbeiterledigungskosten verglichen. Erwartungsgemäß ergab sich ein differenziertes Bild in Abhängigkeit von Kulturart und Höhe des Beregnungseffektes. Mit Ausnahme eines Vergleichs (Ackerbohne Weeze 2019) erwies sich die Beregnung mit den in den Versuchen gegebenen Mengen als unwirtschaftlich (Tab. 20).

Tab. 20: Leistungen, Kosten und Erfolgsgrößen der verglichenen Produktionsverfahren, SW= Sommerweizen, ABO = Ackerbohne, RKG = Rotkleegras, ohne bzw. mit Beregnung, Gö = Göttingen - Deppoldshausen, BN = Bonn - Wiesengut, WE = Weeze

Kulturart / Beregnung	Standort & Jahr	Leistung	Direktkosten	Direktkostenfreie Leistung	Maschinenkosten_var	Deckungsbeitrag	Maschinenkosten_fest	Lohnkosten_fest	DAKFL	Arbeiterledigungskosten
SW-ohne	WE, 2019	948,48	260,21	688,27	243,71	444,56	262,55	241,07	-59,06	747,33
SW-mit	WE, 2019	963,84	608,68	355,16	315,35	39,81	444,01	384,34	-788,54	1143,70
SW-ohne	BN, 2019	1309,44	263,18	1046,26	247,81	798,45	273,04	243,02	282,39	763,87
SW-mit	BN, 2019	1524,48	558,29	966,19	295,15	671,04	420,20	315,89	-65,05	1031,24
SW-ohne	BN, 2020	1152,00	261,86	890,14	245,99	644,15	268,30	242,27	133,58	756,56
SW-mit	BN, 2020	1182,72	636,69	546,03	319,76	226,27	461,16	385,58	-620,47	1166,50
SW-ohne	GÖ, 2019	1013,76	260,70	753,06	244,47	508,59	264,47	241,61	2,51	750,55
SW-mit	GÖ, 2019	1167,36	529,21	638,15	326,27	311,88	426,48	433,27	-547,87	1186,02
SW-ohne	GÖ, 2020	1152,00	261,86	890,14	245,97	644,17	268,30	242,27	133,60	756,54
SW-mit	GÖ, 2019	1167,36	529,21	638,15	326,27	311,88	426,48	433,27	-547,87	1186,02
ABO-ohne	WE, 2019	759,58	457,09	302,49	199,57	102,92	233,04	201,74	-331,86	634,35
ABO-mit	WE, 2019	1644,98	821,81	823,17	280,10	543,07	434,12	348,73	-239,78	1062,95
ABO-ohne	WE, 2020	242,32	441,41	-199,09	194,21	-393,30	221,52	199,77	-814,59	615,50
ABO-mit	WE, 2020	643,08	823,41	-180,33	271,88	-452,21	422,56	344,50	-1219,27	1038,94
ABO-ohne	BN, 2019	992,58	455,32	537,26	201,92	335,34	238,19	202,84	-105,69	642,95
ABO-mit	BN, 2019	1295,48	657,52	637,96	242,40	395,56	344,80	275,57	-224,81	862,77
ABO-ohne	BN, 2020	685,02	449,75	235,27	198,83	36,44	231,44	201,47	-396,47	631,74
ABO-mit	BN, 2020	1435,28	867,06	568,22	289,72	278,50	458,35	372,03	-551,88	1120,10
ABO-ohne	GÖ, 2019	1463,24	442,27	1020,97	206,63	814,34	248,80	204,66	360,88	660,09
ABO-mit	GÖ, 2019	2106,32	721,52	1384,80	293,08	1091,72	420,76	397,99	272,97	1111,83
ABO-ohne	GÖ, 2020	1351,40	440,23	911,17	205,36	705,81	245,89	203,77	256,15	655,02
ABO-mit	GÖ, 2020	1318,78	637,45	681,33	279,76	401,57	373,41	394,55	-366,39	1047,72
RKG-ohne	WE, 2019	608,32	229,96	378,36	343,86	34,50	105,78	211,56	-282,84	661,20
RKG-mit	WE, 2019	1533,28	662,18	871,10	762,91	108,19	379,70	441,40	-712,91	1584,01
RKG-ohne	WE, 2020	3708,48	229,96	3478,52	1464,35	2014,17	212,39	409,36	1392,42	2086,10
RKG-mit	WE, 2020	3281,24	937,23	2344,01	1453,76	890,25	567,43	678,11	-355,29	2699,30
RKG-ohne	BN, 2019	2339,16	229,96	2109,20	985,10	1124,10	172,33	335,83	615,94	1493,26
RKG-mit	BN, 2019	2605,12	628,13	1976,99	1173,75	803,24	394,10	543,09	-133,95	2110,94
RKG-ohne	BN, 2020	3428,72	229,96	3198,76	1355,01	1843,75	203,57	394,53	1245,65	1953,11
RKG-mit	BN, 2020	4198,12	934,61	3263,51	1781,19	1482,32	593,79	728,64	159,89	3103,62
RKG-ohne	GÖ, 2019	468,56	191,88	276,68	272,17	4,51	84,88	166,63	-247,00	523,68
RKG-mit	GÖ, 2019	1436,76	473,82	962,94	713,23	249,71	295,93	450,21	-496,43	1459,37
RKG-ohne	GÖ, 2020	1686,52	191,88	1494,64	710,91	783,73	134,63	261,23	387,87	1106,77
RKG-mit	GÖ, 2020	2204,44	501,32	1703,12	1004,56	698,56	351,51	550,40	-203,35	1906,47

Unter Annahme der Direkt- und Arbeitserledigungskosten erweist sich die Beregnung bei Nutzung von Standarddaten des KTBL in der Regel als zu teuer und somit nicht rentabel. Im Fall von Sommerweizen waren die Ergebnisse erwartbar, da die beregnungsinduzierten Mehrerträge häufig nicht signifikant waren. Demgegenüber wurden bei Rotklee gras häufig signifikante Mehrerträge nach Beregnung festgestellt. Beispielsweise wurde der Trockenmasseertrag durch Beregnung auf dem Standort Weeze in 2019 von 40,3 auf 79,9 dt ha⁻¹ nahezu verdoppelt. Der geringe Marktwert von Rotklee gras (84 € je Tonne) und alleine die hohen Wasserkosten (183 mm à 26 ct je m³ = 481 €) machen die Beregnung unrentabel (Tab. 21). Verstärkt wird der Effekt noch durch die fixen und variablen Maschinenkosten, die mindestens 300 € ha⁻¹ betragen.

Tab. 21: Leistungs- Kostenrechnung für beregnetes (183 mm) Rotklee grasgemenge – Anwek silage, Weeze 2019, Ballen, Schlaggröße 2 ha, mittlerer Boden, 67-kW-Mechanisierung, Hof-Feld-Entfernung 2 km

Leistungs-/Kostenart	Menge	Preis	Betrag
Rotklee-Gras-Gemengesilage, ausgeglichen, angewelkt, 1. Schnitt, in der Blüte	7,93 t/ha	84,00 €/t	666,12 €/ha
NEL 2,06 MJ/kg	16,34 GJ/ha		
ME 3,47 MJ/kg	27,52 GJ/ha		
Rotklee-Gras-Gemengesilage, ausgeglichen, angewelkt, 2. Schnitt ff., in der Blüt	11,41 t/ha	76,00 €/t	867,16 €/ha
NEL 1,88 MJ/kg	21,45 GJ/ha		
ME 3,2 MJ/kg	36,51 GJ/ha		
Summe Leistung			1.533,28 €/ha
Klee-Gras-Gemenge, Z-Saatgut, ökologisch	15,00 kg/ha	7,25 €/kg	108,75 €/ha
Kaliumsulfat-Dünger (50 % K₂O), lose	20,00 kg/ha	0,53 €/kg	10,60 €/ha
Kohlensaurer Kalk	1,00 t/ha	54,50 €/t	54,50 €/ha
Rohphosphat, weicherdig	8,00 kg/ha	0,30 €/kg	2,40 €/ha
Wasser, Bewässerungsnetz	1.850,00 m ³ /ha	0,26 €/m ³	481,00 €/ha
Zinskosten (3 Monate)	164,31 €/ha	0,03 €/€	4,93 €/ha
Summe Direktkosten			662,18 €/ha
Direktkostenfreie Leistung			871,10 €/ha
Variable Maschinenkosten			260,11 €/ha
Variable Lohnkosten	0,00 AKh/ha	13,00 €/Akh	0,00 €/ha
Dienstleistungen			497,12 €/ha
Zinskosten (3 Monate)	189,31 €/ha	0,03 €/€	5,68 €/ha
Summe variable Kosten			1.425,09 €/ha
Deckungsbeitrag			108,19 €/ha
Fixe Maschinenkosten			379,70 €/ha
Fixe Lohnkosten	20,53 AKh/ha	21,50 €/Akh	441,40 €/ha
Summe Direkt- und Arbeitserledigungskosten			2.246,19 €/ha
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung			-712,91 €/ha

Profitabel war die Beregnung von Ackerbohnen in 2019 am Standorte Weeze. Hier wurde als Folge von Beregnung eine Mehrleistung von 885 € erzielt (Tab. 22 & Tab. 23). Dieser standen insgesamt Mehrkosten von 793 € gegenüber. Höchster Kostenfaktor waren die Wasserkosten, die bei 133 mm à 26 ct je m³ mit 345 € ha⁻¹ (knapp 95% der Direktkosten) zu Buche schlugen. Weiterhin fallen durch die Beregnung 282 € je ha Maschinenkosten (fix = 201 und var. = 81 € ha⁻¹) sowie Lohnkosten in Höhe von 147 € ha⁻¹ an.

Die den Leistungs- Kostenrechnungen zusätzlicher Berechnung zugrunde liegenden Annahmen (u.a. Marktpreise) und die Vollständigkeit der monetären Bewertung (u.a. zusätzliche N₂ Fixierung) werden in der Diskussion kritisch analysiert.

Tab. 22: Leistungs- Kostenrechnungen für Sommerackerbohnen, Weeze 2019, beregnet (133 mm), wendend, ökologisch, Schlaggröße 2 ha, Ertragsniveau mittel, mittlerer Boden, 67-kW-Mechanisierung, Hof-Feld-Entfernung 2 km

Leistungs-/Kostenart	Menge	Preis	Betrag
Ackerbohnen, ökologisch	3,53 t/ha	466,00 €/t	1.644,98 €/ha
NEL 7,58 MJ/kg	26,76 GJ/ha		
ME 11,99 MJ/kg	42,32 GJ/ha		
Summe Leistung			1.644,98 €/ha
Ackerbohnen, Z-Saatgut, ökologisch	260,00 kg/ha	1,14 €/kg	296,40 €/ha
Kali-Magnesia (30 % K ₂ O, 10 % MgO), lose	180,00 kg/ha	0,36 €/kg	64,80 €/ha
Kohlensaurer Kalk	1,00 t/ha	54,50 €/t	54,50 €/ha
Rohphosphat, weicherdig	80,00 kg/ha	0,30 €/kg	24,00 €/ha
Hagelversicherung	1.640,00 €/ha	18,41 €/1000 €	30,19 €/ha
Wasser, Bewässerungsnetz	1.330,00 m ³ /ha	0,26 €/m ³	345,80 €/ha
Zinskosten (3 Monate)	203,92 €/ha	0,03 €/€	6,12 €/ha
Summe Direktkosten			821,81 €/ha
Direktkostenfreie Leistung			823,17 €/ha
Variable Maschinenkosten			275,02 €/ha
Variable Lohnkosten	0,00 AKh/ha	13,00 €/Akh	0,00 €/ha
Dienstleistungen			3,00 €/ha
Zinskosten (3 Monate)	69,51 €/ha	0,03 €/€	2,08 €/ha
Summe variable Kosten			1.101,91 €/ha
Deckungsbeitrag			543,07 €/ha
Fixe Maschinenkosten			434,12 €/ha
Fixe Lohnkosten	16,22 AKh/ha	21,50 €/Akh	348,73 €/ha
Summe Direkt- und Arbeiterledigungskosten			1.884,76 €/ha
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung			-239,78 €/ha
Arbeiterledigungskosten			1.062,95 €/ha

Tab. 23: Leistungs- Kostenrechnung für Sommerackerbohnen, Weeze 2019, unberegnet, wendend, ökologisch, Schlaggröße 2 ha, mittlerer Boden, 67-kW-Mechanisierung, Hof-Feld-Entfernung 2 km

Leistungs-/Kostenart	Menge	Preis	Betrag
Ackerbohnen, ökologisch	1,63 t/ha	466,00 €/t	759,58 €/ha
NEL 7,58 MJ/kg	12,36 GJ/ha		
ME 11,99 MJ/kg	19,54 GJ/ha		
Summe Leistung			759,58 €/ha
Ackerbohnen, Z-Saatgut, ökologisch	260,00 kg/ha	1,14 €/kg	296,40 €/ha
Kali-Magnesia (30 % K ₂ O, 10 % MgO), lose	180,00 kg/ha	0,36 €/kg	64,80 €/ha
Kohlensaurer Kalk	1,00 t/ha	54,50 €/t	54,50 €/ha
Rohphosphat, weicherdig	80,00 kg/ha	0,30 €/kg	24,00 €/ha
Hagelversicherung	760,00 €/ha	18,41 €/1000 €	13,99 €/ha
Zinskosten (3 Monate)	113,42 €/ha	0,03 €/€	3,40 €/ha
Summe Direktkosten			457,09 €/ha
Direktkostenfreie Leistung			302,49 €/ha
Variable Maschinenkosten			195,08 €/ha
Variable Lohnkosten	0,00 AKh/ha	13,00 €/Akh	0,00 €/ha
Dienstleistungen			3,00 €/ha
Zinskosten (3 Monate)	49,52 €/ha	0,03 €/€	1,49 €/ha
Summe variable Kosten			656,66 €/ha
Deckungsbeitrag			102,92 €/ha
Fixe Maschinenkosten			233,04 €/ha
Fixe Lohnkosten	9,38 AKh/ha	21,50 €/Akh	201,74 €/ha
Summe Direkt- und Arbeiterledigungskosten			1.091,44 €/ha
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung			-331,86 €/ha
Arbeiterledigungskosten			634,35 €/ha

5: Diskussion

Die Feldversuche haben gezeigt, dass umweltabhängig erhebliche wasserlimitierte Ertragslücken für Ackerboden und Rotklee gras bestehen. In der nachfolgenden Diskussion werden die pflanzenbaulichen Aspekte der Beregnung und Düngung kulturartenspezifisch diskutiert. Abschließend werden die Ergebnisse im bestehenden betriebswirtschaftlichen Kontext und unter Einbezug von Systemeffekten erweiternd diskutiert.

5.1. Ackerbohnen

Die Ackerbohnen reagierten am stärksten auf die Beregnung. Die Gründe hierfür liegen in deren physiologischen und morphologischen Eigenschaften. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wurzeln von Ackerbohnen Bodenwasser nur bis zu einer Tiefe von 80 cm effizient (bis 30% nFK) ausnutzen können (KNOBLAUCH 2009). Im Vergleich zu Hafer (12 - 18 km m⁻²) besitzen Ackerbohnen mit etwa 2 km m⁻² eine deutlich geringere Wurzellänge, während das spezifische Wasseraneignungsvermögen der Wurzeln höher ist (MÜLLER et al. 1985). Hinzu kommt, dass die Entwicklung und der Hauptwasserbedarf dieser Kulturart im Vergleich zu Getreide vglw. spät ist und somit die unproduktiven Wasserverluste durch Evaporation und Interzeption temperaturbedingt höher sind. Wassermangel während der generativen Phase mit nFK-Werten < 50% kann zu erheblichen Ertragseinbußen führen (KRUGMANN et al. 1980).

Ertragsleistung und Beregnungseffekte

Die Beregnung von Ackerbohnen führte in fünf von sechs Umwelten (2019: alle Standorte; 2020: Wz, WG) zu signifikant höheren Druscherträgen (+13,2 dt ha⁻¹ = +101,2%). Am Standort Dippoldshausen wurde 2020 kein ertragssteigernder Effekt der Beregnung festgestellt.

Das Ertragsniveau in den Feldversuchen war insgesamt jedoch niedrig. Mit 23 dt ha⁻¹ (unberegnet) bzw. 35 dt ha⁻¹ (beregnet) waren die über Jahre und Standorte übermittelten Kornerträge (in der Diskussion immer als 86% TM angegeben) deutlich geringer als in den Landessortenversuchen der gleichen Jahre. In diesen wurde für Öko - Ackerbohnen in Nordwestdeutschland ein Standardmittel von knapp 42 dt ha⁻¹ ermittelt (MÜCKE & GRAB 2021). Am einzigen Standort in Nordrhein-Westfalen wurde demgegenüber ebenfalls ein deutlich niedrigeres Ertragsniveau von knapp 18 dt ha⁻¹ festgestellt. Diese Ergebnisse weisen auf die regionale Trockenheit der Jahre 2019 und 2020 hin. Auch im Vergleich zu anderen Versuchen war das Ertragsniveau im vorliegenden Projekt gering (vgl. KÖPKE 1996: 32-62 dt ha⁻¹; JUNG & RAUBER 2017: 34-66 dt ha⁻¹).

Aufgrund der geringen Anbaubedeutung der Ackerbohne in Mitteleuropa liegen nur wenige Untersuchungen zu Ertragseffekten von Zusatzberegnung im gemäßigten Klima vor. Vergleichbare Resultate wurden in älteren zweijährigen Beregnungsversuchen (1986-1987) mit Ackerbohnen an drei verschiedenen konventionell bewirtschafteten Standorten in der

Schweiz erzielt. Hier führte im ersten Versuchsjahr eine Beregnung von Ackerbohnen auf sandigem Lehm zu einer signifikanten Erhöhung der Kornerträge um durchschnittlich +41%. Im zweiten Versuchsjahr wurde kein Beregnungseffekt festgestellt (HÜGI 1989).

Demgegenüber ist die ertragssteigernde Wirkung einer Beregnung von Ackerbohnen unter semi-ariden Bedingungen hinreichend bekannt. Beispielsweise wurde in einem Beregnungsversuch in Tabriz, Iran (sandiger Lehm, pH 8,1, FK 28,8%, 285 mm Jahresniederschlag, 10 °C Jahresmitteltemperatur) durch Beregnung der Kornertrag um 214% erhöht (GHASSEMI-GOLEZANI et al. 2009).

Die beregnungsinduzierten Ertragseffekte an den Standorten Wiesengut und Weeze stehen in enger Beziehung zu den Standortbedingungen (Boden und Klima). Am Wiesengut lagen Böden mit vergleichsweise hoher nFK vor. Dort waren die Effekte der Beregnung insbesondere in 2020 aufgrund der langen Frühjahrstrockenheit deutlich. Am Standort Weeze begründet sich der ertragssteigernde Effekt der Beregnung sowohl mit der geringen nFK des Bodens als auch mit den unterdurchschnittlichen Niederschlägen von April bis Juni beider Jahre.

Im Gegensatz zum Wiesengut 2020 konnte in Deppoldshausen 2020 trotz Beregnung die Bodenfeuchte über die Vegetationsperiode nicht mehr über 50% nFK gebracht werden. Hier liegt die Vermutung nahe, dass die Beregnungsmengen aus kapazitativen und logistischen Gründen zu gering, terminlich zu spät und die Applikationsintervalle zu groß waren. Hinzu kommt die Beregnungstechnik in Form einer Überkopfberegnung, bei der vermutlich ein Teil der Beregnungsmenge vor Eintritt in den Wurzelraum unproduktiv verdunstete (SOURELL 2014). Im Gegensatz dazu erfolgte die Applikation am den Standorten Weeze und Wiesengut über eine Tröpfchenbewässerung, welche eine höhere Wasserausnutzung aufweist und somit in etwa die gleiche Menge an Wasser in der Pflanze ankommt, wie appliziert wurde (SOURELL 2014). Die unterschiedliche Stärke des Beregnungseffektes spiegelte sich entsprechend im Druschertrag wider (Weeze 2019: +112%; Weeze 2020: +150% Wiesengut 2019: +69%; Wiesengut 2020: +132%; Deppoldshausen 2019: +43%).

In vier der fünf Umwelten (2019: Wz, WG; 2020: Wz, WG) wurde bereits zur Blüte ein Beregnungseffekt auf die Trockenmasse festgestellt, ein Hinweis auf die höhere Wasserversorgung in dieser für Ackerbohnen kritischen Phase. Maßgeblicher Grund für die höheren Erträge zur Endernte war die beregnungsinduziert signifikant höhere Anzahl an Hülsen pro Trieb. Zwischen diesen und dem Kornertrag besteht eine enge Korrelation (STÜTZEL & AUFHAMMER, 1992, LOSS & SIDDIQUE, 1997), während die Anzahl Körner pro Hülse vorwiegend genetisch bestimmt wird. Zusätzlich hierzu wird durch Beregnung die Seneszenz verzögert und somit die Blattflächendauer, wodurch Photosyntheserate und Assimilation erhöht werden

(COSTA et al. 1997). Wichtige Voraussetzung hierfür ist eine leistungsfähige biologische N₂ - Fixierung.

Diese wurde ebenfalls durch Zusatzberegung in der Mehrheit der Fälle signifikant erhöht. Ein pflanzenbaulich relevantes Ergebnis der Versuche besteht darin, dass die Beregung häufig einen fördernden Effekt auf die Ndfa Werte von Ackerbohnen ausübte. In einem Gewächshausversuch mit Ackerbohnen zeigten sich indirekt ähnliche Effekte auf den Ndfa-Wert. Künstlich erzeugter Trockenstress nach der Blüte über 20 Tage führte zu sinkenden Ndfa- Werten (- 37%) und Stickstoffgehalten (- 21%) von Ackerbohnen (ABDELHAMID et al. 2011). Hinsichtlich der Wasserführung sind Gefäßversuche jedoch nicht mit Praxisbedingungen vergleichbar.

Die absolute Höhe der Ndfa-Werte der beregneten Bestände (im Mittel 61,7%) war dennoch im Vergleich mit Daten zu konventionellen Ackerbohnen (76-80%, HUBER, 1988) und ökologischen Ackerbohnen (50-80%, FREYER al. 2005) eher niedrig und vergleichbar mit den Werten, die SEEHUBER (2015) in Ackerbohnen (31-52%) mit der Differenzmethode festgestellt hat. In einer Literaturstudie von ANGLADE et al. (2015) wurde festgestellt, dass der mittlere Ndfa-Wert (Median) beim Anbau von Ackerbohnen 75% beträgt (Variationsbreite 68 bis 85% auf Basis von 91 Studien). Als Folge geringfügig höherer Ndfa-Werte und deutlich höherer Stickstoffträge nach Beregung wurde die biologische N₂ Fixierleistung der Ackerbohnen deutlich erhöht. Dieser Aspekt ist von systemischer Bedeutung und wird abschließend diskutiert.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Daten wie auch die überwiegende Mehrheit der bisher veröffentlichten Literaturdaten zur biologischen N₂-Fixierung bei Leguminosen beruhen auf der Ermittlung der luftbürtigen Stickstoffanteile (% Ndfa) in der Sprossmasse oder in den Ernteprodukten (z.B. Körner). Es ist jedoch bekannt, dass z.B. über die Wurzeln und deren Ausscheidungen teilweise erhebliche N-Mengen umgesetzt oder freigesetzt werden (sogenannte N-Rhizodeposition: UNKOVICH et al. 2010, HAMMELEHLE et al. 2018, WANG et al. 2020). Bei Ackerbohnen kann damit gerechnet werden, dass in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren (Vegetationszeitpunkt, Bodentiefe, Wurzelmasse) diese N-Rhizodeposition im Mittel 130 kg N beträgt (WANG et al. 2020).

Düngungseffekte auf Wachstum und Kornertrag

Die Düngung der Ackerbohnenbestände mit Mikronährstoffen sowie mit Makronährstoffen hatte in keiner der sechs Umwelten einen Effekt, weder auf den Trockenmasse- noch auf den Stickstofftrag. Insgesamt über alle sechs Umwelten erzielten die ungedüngten Varianten einen Druschertrag von durchschnittlich 25,2 dt ha⁻¹ und die „PKSM“-Varianten von 24,3 dt ha⁻¹.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur reduzierten Bodenbearbeitung von Körnerleguminosen wurden in 2010 Feldversuche zur Düngung von Ackerbohnen auf vier Standorten, drei davon ökologisch bewirtschaftet, angelegt. Es wurden unter anderem die Düngungsvarianten Kaliumsulfat ($80 \text{ kg K} + 35 \text{ kg S ha}^{-1}$, Rohphosphat (40 kg P ha^{-1}) und Natriummolybdat (1 kg Mo ha^{-1}) geprüft. Die P- und K-Gehalte der Versuchsböden lag in allen Fällen mindestens in der Versorgungsstufe C. Neben Indikatoren der Nährstoffversorgung wurden auch die Kornerträge samt Ertragsstruktur erfasst. An zwei der vier Standorte war das Ertragsniveau zu gering ($< 11 \text{ dt ha}^{-1}$), um potentielle Düngungseffekte herauszuarbeiten. Am Standort Klein-Altendorf (konventionell) wurde kein ertragssteigernder Effekt der Düngungsvarianten bei einem mittleren Ertragsniveau von $25,9 \text{ dt ha}^{-1}$ festgestellt. Demgegenüber hatte am Wiesengut sowohl die Düngung mit Rohphosphat, Kaliumsulfat als auch Natriummolybdat eine signifikante Steigerung der Erträge zur Folge. Der Korntrockenmasseertrag war in den Düngungsvarianten Rohphosphat ($21,5 \text{ dt ha}^{-1}$), Natrium-Molybdat ($23,1 \text{ dt ha}^{-1}$) und Kaliumsulfat ($30,9 \text{ dt ha}^{-1}$) signifikant höher als in der Kontrolle ($17,5 \text{ dt ha}^{-1}$). Die Autorin führte den starken Effekt der Kaliumsulfatdüngung auf den Schwefelanteil zurück, der über eine höhere N_2 Fixierleistung einen signifikant höheren Hülsenansatz induzierte (SEEHUBER 2015).

Die eigenen Resultate zur P-Düngung sind standortspezifisch unterschiedlich erklärbar. Die mangelnde Ertragswirksamkeit am Standort Weeze erklärt sich vermutlich mit den hohen P-Gehalten von $> 3,5 \text{ mg P } 100 \text{ g}^{-1}$ Boden, die gemäß KOLBE (2019) hinreichend für die Anbauverhältnisse des ÖL sind. In Deppoldshausen erklärt sich der ausgebliebene Effekt vermutlich mit dem hohen pH-Wert > 7 , welcher ungünstig für die P-Löslichkeit ist (MARSCHNER 2012), insbesondere für den verwendeten P-Dünger auf Basis von Ca-Phosphaten. Schwieriger erklärbar sind die Ergebnisse am Standort Wiesengut, weil hier grundsätzlich ein Düngeeffekt angesichts der P-Gehalte erwartbar gewesen wäre (vgl. SEEHUBER 2015). Angesichts der fehlenden Effekte der P-Düngung auch bei Rotklee gras bei dort zugleich hohem Ertragsniveau auch in den ungedüngten Varianten, sind biotische Ursachen zur Erklärung wenig wahrscheinlich.

Die Nichtwirksamkeit der K-Düngung auf allen Standorten erklärt sich vermutlich mit der hinreichenden Versorgung der Böden. Zudem ist Kalium anders als Phosphor in der Regel nicht ertragslimitierend bei Leguminosen (BONILLA & BOLANJOS, 2009).

Die an in keinem Versuch festgestellte Wirksamkeit der Schwefeldüngung steht weder im Einklang mit SEEHUBER (2015), noch zu neueren Untersuchungen zu Klee gras. Sie bestätigen demgegenüber Versuche auf neun verschiedenen ökologisch bewirtschafteten Versuchsstandorten in Mitteleuropa in drei Versuchsjahren erbrachte die Anwendung

verschiedener Schwefeldünger in Ackerbohnen ebenfalls keine Mehrerträge an Korn und Stickstoff (PÖTZSCH et al., 2019).

Unklar bleibt, ob sich der fehlende Düngereffekt, insbesondere in den „PKSM“-Varianten, mit der deutlichen Unterversorgung der Böden mit Molybdän erklärt, da alle Versuchsböden in der Versorgungsstufe A lagen ($<0,04 \text{ mg kg}^{-1}$, Richtwert: $0,09\text{-}0,6 \text{ mg kg}^{-1}$). Als Bestandteil des Nitrogenasekomplexes in Form des Mo-Fe-Proteins ist Mo für die biologische Stickstofffixierung essenziell (SADOWSKY 2005). Die Applikationsmenge des Blattdüngers mit einem Anteil an Molybdän von 0,01% (Ausbringungsmenge: 2 l ha^{-1}) war möglicherweise nicht ausreichend. Gegen diese Theorie sprechen zumindest am Standort Wiesengut die hohen Rotkleeerträge, aber auch die fehlende Wirkung von Na-Molybdätdüngung im Dämpfversuch 2021.

Die letztgenannten Aspekte sind möglicherweise im Kontext der untersuchten Anbausysteme unter Verwendung von Stallmist erklärbar. Als Volldünger mit geringer Stickstoff- und hoher Kaliumwirkung (NEUHOFF & KÖPKE 2002) trägt Rinderstallmist zu einer ausgeglichenen Pflanzenernährung bei. Die Versorgung von Ackerkulturen mit Mikronährstoffen (HERBST et al. 2018), aber auch mit Schwefel (KANAL et al. 2003) kann durch Stallmistanwendung verbessert werden.

Der Dämpfversuch 2021 hat gezeigt, dass eine Bodenerhitzung zu signifikanten Mehrerträgen (+23%) auch bei einem hohen Ertragsniveau (mit Dämpfung $48,7 \text{ dt ha}^{-1}$ [86% TM]) führen kann. Eine Quantifizierung der Knöllchen zum Zeitpunkt Ende Blüte ergab, dass nach Dämpfung sowohl die mengenmäßige, insbesondere aber die gewichtsmäßige Nodulierung der Ackerbohnenwurzeln deutlich höher war. Noch deutlicher waren die entsprechenden Unterschiede bei den aktiven Knöllchen, deren Massen- und Mengenanteil dreimal höher war verglichen mit den ungedämpften Varianten. Eine Zuordnung dieser Effekte auf biotische oder abiotische Faktoren ist mit dem gewählten Versuchsdesign jedoch nicht möglich. Vorrangiges Ziel des Versuches war es, die Effekte von Bodendämpfung auf das Wachstum der Ackerbohne zu quantifizieren. Künftig gilt es, die Gründe für die beobachteten Effekte genauer zu analysieren. Zugleich hat der Dämpfversuch 2021 auch gezeigt, wie stark der Effekt der Jahreswitterung auf die Produktivität von Ackerbohnen ist. Die mit hoher Niederschlagsintensität in der Regel einhergehende Abkühlung der Lufttemperatur interagiert erwartbar positiv mit der Ertragsbildung, ein Prozess der bei künstlicher Beregnung nicht eintritt. Aus praktischen Gründen stellt sich eine Bodendämpfung im Ackerbau aus ökonomischen und ökologischen Gründen jedoch nicht. Begründet sich die Nichtausschöpfung der standortspezifischen Ertragspotenziale von Ackerbohnen mit biotischen Faktoren, kann dem ackerbaulich nur mit Fruchtfolge und ggf. mit der Nutzung suppressiver Komposte begegnet werden (BRUNS et al. 2013).

5.2. Klee gras

Futterleguminosen - Grasgemenge, insb. Rotklee gras, spielen in ökologischen Fruchtfolgen als Motor der Bodenfruchtbarkeit eine entscheidende Rolle (WATSON et al. 1999). Diese begründet sich vorwiegend mit der biologischen N₂-Fixierung sowie der Humusreproduktionswirksamkeit dieser Gemenge (DHAMALA et al. 2016). Darüber hinaus erfüllt Rotklee gras weitere ackerbauliche Funktionen wie hochwertige Futterbereitstellung, Unkrautregulierung und Erosionsschutz (Mc KENNA et al. 2018). Aufgrund der Verdrängung von Rotklee gras seit den 1960er Jahren durch Futtergräser und später durch Mais, ist die empirische Datenlage zu agronomischen Fragen dieser Kulturartengemenge unter temperierten klimatischen Bedingungen unzureichend. Auch die Ausweitung des ökologischen Landbaus seit den neunziger Jahren hat nicht zu einer intensivierten Erforschung von Rotklee grasgemengen geführt. Entsprechend gering ist die Datenlage zum Rotklee anbau, insbesondere unter ökologischen Anbaubedingungen.

Die Stickstoff erträge des Klees sowie die Gesamttrockenmasse erträge der Rotklee grasbestände lagen in der vorliegenden Untersuchung im schwach mittleren bis hohen Bereich. Die höchsten Durchschnittserträge wurden am Standort Wiesengut (147,8 dt ha⁻¹) auf Auenlehmen erzielt. In früheren Untersuchungen am Standort Wiesengut wurden Rotklee gras erträge von 90 bis 130 dt ha⁻¹ erreicht und weisen auf das an diesem Standort vglw. hohe Ertragspotential dieser Kulturart hin (HAAS et al. 2003).

Deutlich geringere Erträge wurden auf den Kalkverwitterungsböden in Deppoldshausen erzielt (56,3 dt ha⁻¹). Einschränkend ist hier festzustellen, dass am Standort Deppoldshausen in beiden Jahren eine Frühjahr ssaat erfolgte, während am Wiesengut in beiden Jahren das erste Hauptnutzungsjahr nach Sommerblanksaat geerntet wurde.

Auch am dritten Standort, an dem im ersten Versuchsjahr eine Frühjahr ssaat erfolgte (Weeze 2019) waren die Erträge im Ansaatjahr gering. Grund für die geringe Produktivität dieser Bestände war die überdurchschnittlich trockenen Frühjahre, verbunden mit der geringen Durchwurzelungstiefe in der Jugendentwicklung.

Die berechnungsinduzierten Ertragszuwächse waren zwar in den meisten Fällen statistisch signifikant blieben jedoch in der absoluten Höhe gemessen an den Berechnungsmengen gering. Der maximale berechnungsinduzierte Mehrertrag (62,5 dt ha⁻¹) wurde am Standort Weeze mit einer Gabe von 143 mm erzielt.

Die Gründe für die variable Ertragswirksamkeit sind standortspezifisch zu interpretieren. Während am Standort Wiesengut überdurchschnittlich hohe Erträge auch ohne Berechnung erzielt wurden, bei zugleich geringem berechnungsinduzierten Ertragszuwachs, war am

Standort Deppoldshausen die Beregnungsmenge auf den flachgründigen Kalkverwitterungsböden vermutlich unzureichend.

Deutliche beregnungsinduzierte Ertragszuwächse eines Weissklee-Weidelgras Gemenges (60 versus 111 dt ha⁻¹) wurden auch auf einem Standort in Neuseeland mit 600 bis 750 mm Jahresniederschlag festgestellt (GOH et al. 2005).

Die N₂-Fixierleistung von Rotklee gras hängt vom Stickstoff ertrag des Klees und dessen NdfA-Wert ab. Vorteilhaft für eine potenziell hohe N₂ - Fixierleistung war in den meisten Versuchen der hohe Kleeanteil im Gemenge. Ein wichtiges Ergebnis besteht darin, dass die Beregnung den Kleeanteil nur gering beeinflusste, ein Ergebnis, das nicht so zu erwarten war.

Auch die in der Regel hohen NdfA-Werte von etwa 80% sind mit Hinblick auf die N₂ - Fixierleistung als positiv zu bewerten. Vergleichbare hohe Werte wurden in Rotklee-Reinsaaten auch in dänischen Untersuchungen an der Universität Aarhus festgestellt (DHAMALA et al. 2017). In einer Studie mit einjährigem, diploiden Rotklee (drei bis vier Aufwüchse von April bis Oktober) am Standort Göttingen-Reinshof (tiefgründige Parabraunerde) wurden Ndfa-Werte zwischen 55 und 71% gemessen (REITER et al. 2002). Die biologische N₂-Fixierung des Rotklees variierte zwischen 147 und 212 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Die in der vorliegenden Studie erreichte biologische N₂-Fixierung des Rotklee grasses im Jahr 2020 am Standort Göttingen-Deppoldshausen lag bei etwa 150 kg N pro ha und Jahr (Abb. 21). Im relativ trockenen Jahr 2019 war dieser Wert mit etwa 60 kg N pro ha und Jahr erheblich geringer.

Aus pflanzenbaulicher Sicht von Interesse ist der versuchsübergreifend ausgebliebene Effekt der Düngung mit Phosphor, Kalium, Schwefel und Mikronährstoffen auf die Trockenmasseerträge. Die P - und K-Ernährung des Rotklee grasses war vermutlich analog zu Ackerbohnen als Folge hinreichender Gehalte im Boden in der Regel nicht limitierend (KOLBE 2019). Im Gegensatz hierzu wären Trockenmasse- bzw. Stickstoff ertragszuwächse zumindest durch Schwefel erwartbar gewesen. Der hohe Schwefelbedarf von Leguminosen ist bekannt (SCHERER et al. 2008) und führte unter anderem dazu, dass wiederholt durch Sulfatdüngung signifikante Mehrerträge von Rotklee grass im ökologischen Landbau erzielt wurden (FISCHINGER ET AL. 2011, BÖHM 2013). In letztgenannter Untersuchung wurde der Trockenmasseertrag eines Rotklee grassgemenges durch eine Schwefelgabe von 30 kg S ha⁻¹ im Mittel von drei Schnitten um 18 % (signifikant) gesteigert. Überproportional hoch war die Zunahme des Schwefelgehaltes in der Trockenmasse (Verdopplung) und des Rohproteingehaltes von 14,5% (ungedüngt) auf 19,4 % (gedüngt) in der Trockenmasse. Demgegenüber führte in den eigenen Untersuchungen die Düngung mit Kaliumsulfat weder zu mehr Erträgen noch zu einer Änderung des Rohproteingehaltes von Klee grass. Es liegt die Vermutung nahe, dass die auf den Standorten gängige organische Düngung für eine hinreichende Schwefelversorgung gesorgt hat.

Die fehlende Ertragswirksamkeit der Mikronährstoffdüngung, unter anderem mit Molybdän, bei zugleich geringen Bodengehalten (Versorgungsstufe A) auf allen Standorten erklärt sich möglicherweise mit den unzureichenden Ausbringungsmengen. Zugleich weist jedoch das insgesamt mittlere bis hohe Ertragsniveau von Rotklee in den Versuchen nicht auf einen deutlichen Molybdänmangel hin. Unterstützt werden diese Ergebnisse durch Versuche in Norwegen. Auch dort führte eine Zusatzdüngung zu Rotklee mit Molybdän weder zu Ertragszuwächsen noch zu einer Zunahme des Stickstoffertrages. Die Autoren schlossen, dass oberhalb eines Molybdängehaltes des Bodens von 0,2 ppm kein Molybdänmangel erwartbar ist (BAKKEN et al. 2004). Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass in den eigenen Untersuchungen die Molybdängehalte des Bodens mit 0,04 ppm deutlich unter dem Grenzwert lagen. Dieser Aspekt wird in der Generaldiskussion aufgegriffen.

5.3 Sommerweizen

Wichtige Ziele auch im ökologischen Backweizenanbau sind hohe Kornerträge bei zugleich hinreichend hohen Rohprotein-, bzw. Feuchtklebergehalten. Beide Zielgrößen korrelieren negativ miteinander. Hohe Backqualitäten von Ökoweizen werden daher häufig mit geringen Erträgen erkaufte. Stickstoffmangel wirkt häufig ertragslimitierend im ökologischen Getreideanbau (DAVID et al. 2005). Nachhaltige Getreideerträge werden im ökologischen Anbau dann erzielt, wenn ausgeglichene Stickstoffbilanzen bei zugleich hohem Stickstoffumsatzniveau auf den Flächen vorherrschen (DÖRING & NEUHOFF 2021). Wichtigster Stickstoffimport in ökologischen Anbausystem ist die biologische N_2 - Fixierung durch Leguminosen. Der via Leguminosen fixierte Stickstoff kommt einer Getreidenachfrucht in Form des Vorfruchtwertes (residualer Stickstoff) und im Falle einer Verfütterung der Leguminosen zusätzlich indirekt in Form von Stallmist zu Gute (CASSMANN et al. 2002). Diese Systemeffekte werden in der Abschlussdiskussion aufgegriffen.

Ökologische Getreideerträge hängen aber nicht nur von der biologischen N_2 Fixierung der Leguminosen ab. Die tatsächlich erzielbaren Erträge sind vorwiegend eine Funktion der Stickstoffverfügbarkeit im Laufe der Vegetation und des entwicklungsabhängigen Bedarfs des Weizens. Aufgrund der witterungsabhängigen Stickstoffmineralisation wird der Bedarf des Weizens in wichtigen Entwicklungsstadien wie dem Schossen häufig nicht gedeckt (KRAMER et al. 2002) und führt zu entsprechend geringeren Erträgen. Sofern hinreichende Mengen an potenziell mineralisierbarem Stickstoff, bspw. nach Vorfrucht Leguminose, im Boden vorliegen, hängt die tatsächliche Freisetzung vornehmlich an der Bodenfeuchte und -temperatur.

Ansatzpunkt im vorliegenden Projekt war daher die Beregnung von Sommerweizen und die damit erwartete höhere Stickstoffmineralisation in kritischen Wachstumsphasen. Zugleich

wurde erwartet, dass die Stickstofffreisetzung aus zugeführten organischen Düngern sich durch Beregnung erhöht. Es wurden eine höhere N Aufnahme der Bestände und final höhere Rohproteingehalte im Korn erwartet.

Die theoretischen Grundlagen wurden in den Versuchen in keiner Weise bestätigt. Die Beregnung hatte weder einen ertragssteigernden Effekt noch einen mineralisationsfördernden Effekt auf die organischen Dünger (keine signifikante Interaktion Beregnung * Düngung) bei insgesamt niedrigen Ertragsniveau. Mit im Mittel knapp 34 dt ha⁻¹ (86% TM) war der Ertrag deutlich niedriger als das Dreijahresmittel (2017-2019) der Landessortenversuche der LfL Bayern mit 44,6 dt ha⁻¹ (LfL-Bayern 2022). Die organische Düngung hatte in einigen Versuchen eine signifikant ertragssteigernde Wirkung. Nach Anwendung von Stallmist (120 kg N ha⁻¹) wurde ein maximaler Mehrertrag von 16 % (signifikant) im Vergleich zu ungedüngt erzielt. Der höchste Ertragszuwachs wurde durch Kompostanwendung (120 kg N ha⁻¹) am Standort Weeze 2019. Erklärend ist hier zu bemerken, dass im ersten Versuchsjahr der Kompost mit Stickstoff in Form von Schweineborstenpelletts (ca. 40 kg N ha⁻¹) angereichert wurde. Grund war, dass die ursprünglich geplante Stickstoffanreicherung des Grünschnittkompostes durch Zugabe von Gärreste -Substrat nicht hinreichend erfolgreich war. Diese aus praktischer Sicht nicht opportune Vorgehensweise förderte zugleich den wissenschaftlich interessanten Effekt zu Tage, der bereits eingangs erwähnt wurde, nämlich dass die temporäre Stickstoffverfügbarkeit im ökologischen Weizenanbau ertragslimitierend wirkt. Der Produktivität ökologischer Weizenanbausysteme sind somit erkennbare Grenzen gesetzt (DÖRING & NEUHOFF 2021).

5.4. Abschließende Betrachtungen

Die betriebswirtschaftlichen Auswertungen haben gezeigt, dass mit Ausnahme eines Falls die Beregnung von Ackerbohnen, Rotklee gras und Sommerweizen im ökologischen Landbau nicht rentabel ist. Den Kostenrechnungen lagen Annahmen des KTBL zu Grunde, welche dieses für Wirtschaftlichkeitsberechnungen standardmäßig nutzt. Die Kosten sind aber unter Praxisbedingungen häufig geringer, unter anderen durch Nutzung eines eigenen Brunnens (geringere Wasserkosten) oder durch Nutzung von vorhandenen nicht ausgelasteten Beregnungskapazitäten.

Maßgebliches Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Beregnungseffekte kulturartenspezifisch zu quantifizieren. Entsprechend wurde in den Beregnungsvarianten versucht, jeglichen Wassermangel zu vermeiden. Es ist daher nicht auszuschließen, dass betriebswirtschaftlich relevante Effekte der Beregnung mit deutlich geringeren Mengen hätten erzielt werden können. Auf eine Optimierung der Berechnungsverfahren war das vorliegende Projekt nicht ausgerichtet. Neuere Untersuchungen der Landwirtschaftskammer

Niedersachsen zeigen jedoch, dass reduzierte Beregnung betriebswirtschaftlich häufig rentabler ist als eine Vollberegnung (LK - Niedersachsen 2022). Implikationen für weitere Forschungsarbeiten zu Beregnung im ökologischen Landbau werden in Kapitel 7 diskutiert. Ein weiterer betriebswirtschaftlich relevanter Aspekt sind die Erzeugerpreise. Annahme für die durchgeführten Leistung - Kostenrechnungen war das fünfjährige Mittel der entsprechenden Erzeugerpreise. In trockenen Jahren könnte jedoch eine Verknappung des Angebots zu höheren Preisen führen.

Um eine generelle Einordnung der Ergebnisse vorzunehmen ist es desweiteren wichtig zu untersuchen, wie repräsentativ die Versuchsbedingungen an den Standorten und in den Versuchsjahren gewesen sind. Bezüglich der Witterungsbedingungen war das Jahr 2020 durch eine eher gute Wasserversorgung durch regelmäßige Niederschläge geprägt, insbesondere am Standort Deppoldshausen. Die Trockenperiode im Frühjahr hat sich dort nicht ausgewirkt, da alle Kulturen jeweils neu angesät wurden. Im Jahr 2019 traten längere Trockenperioden auf, allerdings verstärkt im Sommer ab Ende Juni. Insofern ist die deutlich geringe Ertragswirkung der Bewässerung im Sommerweizen verglichen mit jener im Rotklee gras auf Grund der unterschiedlichen Wachstumsperiode zu erwarten gewesen. Da im langjährigen Mittel in den deutschen Ackerbaugebieten das Defizit in der klimatischen Wasserbilanz in den Sommermonaten generell am höchsten ist, können die durch die Niederschlagsverteilung hervorgerufenen Trockenstresswirkungen in den Versuchsjahren als durchaus repräsentativ angesehen werden. Dies trifft jedoch weniger zu auf das Ausmaß des Trockenstresses ohne Beregnung. So lagen die Niederschlagsmengen in beiden Versuchsjahren deutlich über jenen in extremen Trockenjahren wie z.B. im Jahr 2018. In solchen Trockenjahren ist der Ertragsunterschied durch Bewässerung deutlich höher bei zugleich höheren Preisen der Ernteprodukte, so dass Bewässerung dann deutlich rentabler sein kann. Zudem ist insbesondere in Betrieben mit Feldfutterbau (Klee gras) auch die deutlich erhöhte Ertragssicherheit durch Bewässerung in Trockenjahren zu berücksichtigen, da der Aufwuchs auf Wiesen und Weiden dann deutlich verringert ist und somit der Feldfutterbau stärker zur Versorgung der Wiederkäuerbestände beiträgt.

Für die Bewertung der Beregnungswürdigkeit der einzelnen Kulturen sind zudem mögliche Systemeffekte mit einzubeziehen. Während die Beregnung, wie bereits dargelegt, keinen ertragssteigernden Effekt auf die Nachfrucht Winterweizen hatte, übt die verbesserte Wasserversorgung indirekte Effekte auf den Stickstoffhaushalt des Systems Boden - Pflanze aus. An erster Stelle zu nennen sind hier die zusätzliche N_2 - Fixierleistung und deren monetärer Wert. Eine ökonomische Bewertung vorzunehmen ist jedoch komplex, da die Nutzungsart der Leguminosen hier entscheidend ist. Im Falle des Verkaufs von Ackerbohne bzw. Klee gras ist die zusätzliche N_2 -Fixierung ohne Systemwert, da überschlagsmäßig der mit dem Ernteprodukt abgefahrene Stickstoff dieser in etwa entspricht (KÖPKE 1996, KÖPKE &

NEMECEK 2010). Allerdings bleibt zu konstatieren, dass eine zusätzliche N_2 -Fixierung möglicherweise über im Boden verlaufende Prozesse (N-Rhizodeposition, N-Transfer) Nachfrüchten zur Verfügung stellen könnte. Eine spezifische, näherungsweise Quantifizierung dieser N-Mengen ist nach derzeitigem Wissensstand nur mit hohem Aufwand möglich (HAMMELEHLE et al. 2018, WANG et al. 2020). Im Falle einer innerbetrieblichen Verfütterung von Ackerbohne bzw. Rotklee gras ist demgegenüber bei beregnungsinduziert höheren Erträgen mit einem höheren innerbetrieblichen Umsatz durch höheren Stallmistgewinn zu rechnen. Die direkte Ertragswirksamkeit einer Stallmistanwendung ist idR jedoch gering (NEUHOFF et al. 2002). Näherungsweise könnte man jedoch die Hälfte des zusätzlich fixierten Stickstoffs als N-Input mit entsprechendem Wert veranschlagen.

Führt man die eingangs genannten Aspekte der kostensparenden Beregnung (Mengen, Technik, Wasserkosten) mit den letztgenannten systemischen Effekten zusammen, ergibt sich möglicherweise betriebsspezifisch ein ökonomischer Nutzen, insbesondere bei der Beregnung von Ackerbohnen und ggf. anderen Körnerleguminosen.

Entschließt sich ein Betrieb, Beregnungsmaßnahmen bspw. in Ackerbohnen durchzuführen, muss jedoch auch ein weiterer Systemeffekt, nämlich der zusätzliche Nährstoffentzug angemessen berücksichtigt werden, und gegebenenfalls durch Düngungsmaßnahmen kompensiert werden.

Ein weiteres pflanzenbaulich relevantes Ergebnis sind die tendenziell fördernden Effekte der Beregnung auf die N_{dfA} -Werte von Ackerbohnen. Dieser Effekt wurde nicht notwendigerweise erwartet, da verbesserte Wasserversorgung auch die N-Mineralisation des Bodens fördert, ein Sachverhalt der kompensierend auf die N_2 - Fixierung hätte wirken können. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Beregnung in zweifacher Weise die Stickstoffträge fördert, namentlich durch höhere N_{min} - Aufnahme aus dem Boden und durch höhere biologische N_2 - Fixierung.

Die Einordnung und Generalisierbarkeit der Ergebnisse wird auch dadurch erschwert, dass die Versuche nur in zwei Jahren stattfanden und zudem in den beiden Jahren auf unterschiedlichen Schlägen angelegt wurden. Viele relevante Fragestellungen, wie z.B. die Auswirkung der Beregnung auf die Ertragsstabilität oder Systemeffekte der Beregnung, lassen sich jedoch nur durch längerfristige Untersuchungen quantifizieren. So könnten sich Unterschiede in Bodeneigenschaften wie im Humusgehalt und die damit verbundenen Effekte auf die Wasser- und Nährstoffversorgung der Kulturen erst durch langjährige kumulative Effekte der Bewässerung zeigen. Dies betrifft auch das Nährstoffrecycling durch organische Düngemittel. Durch die erhöhte Produktivität unter Einsatz der Beregnung ist langfristig von einer generellen Zunahme der Nährstoffflüsse im Betrieb auszugehen. Da solche Wirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit für ökologisch wirtschaftende Betriebe besonders relevant sind, werden hiermit solche langfristigen Untersuchungen ausdrücklich angeregt.

Die in der vorliegenden Untersuchung festgestellten vglw. geringen NdfA-Werte von Ackerbohnen von häufig weniger als 65% sind für das System ökologischer Landbau als nachteilig zu bewerten (siehe auch Kapitel 7). Ziel des ökologischen Leguminosenanbaus sollte sein, dass die fixierte N₂ - Menge (d.h. das Produkt aus Stickstoffertrag und NdfA-Wert) maximal ist. Hierfür sind idR hohe NdfA-Werte von Vorteil.

Mit Hinblick auf die Frage nach den ertragslimitierenden Faktoren im ökologischen Ackerbau haben die Versuche zT neue Erkenntnisse gebracht und Bekanntes bestätigt. So war die Erhöhung der Sommerweizenerträge vornehmlich eine Frage der N-Versorgung, wie die Düngungsversuche gezeigt haben. Eine deutliche Reduzierung der Ertragslücke zwischen konventionell und ökologisch erzeugtem Getreide ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen des ökologischen Landbaus insbesondere auf Hohertragsstandorten nur bedingt möglich (DÖRING & NEUHOFF 2021).

Die Nichtwirksamkeit der P - Düngung auf zT gering versorgten Böden erklärt sich möglicherweise mit den verwendeten P - Dünger und dessen Löslichkeit im schwach sauren Milieu. Keine Hinweise ergaben sich auf Kalium- oder Schwefelmangel an den untersuchten Standorten. Möglicher Erklärungsgrund hierfür ist die regelmäßige organische Düngung auf den jeweiligen Betrieben.

Genauere Untersuchungen sind hinsichtlich der Molybdänversorgung erforderlich, da sich alle Böden in der Versorgungsstufe A befanden. Möglicherweise waren die in der Düngungsvariante mit Mikronährstoffen gegebenen Mo-Mengen unzureichend.

Die Bodendämpfung in 2021 hat gezeigt, dass diese eine deutliche Ertragssteigerung bewirken kann. Das Versuchsdesign gibt jedoch keinen Aufschluss darüber, ob diese Folge von reduziertem biotischem Stress oder von hitzeinduziert verbesserter Nährstoffversorgung ist. Der im Versuchsjahr 2021 nach Bodendämpfung erzielte Ackerbohnen-Kornertrag von 48,5 dt ha⁻¹ (86% TM) weist in jedem Fall auf ein hohes nicht ausgeschöpftes Ertragspotenzial dieser Kulturart hin.

Das für Feldversuche insgesamt vergleichsweise niedrige Ertragsniveau von Ackerbohnen, aber auch Winter- und Sommerweizen ist aus agronomischer Sicht als sehr kritisch zu betrachten und weist auf erheblichen Forschungsbedarf hinsichtlich Ertragsphysiologie und Analyse der ertragslimitierenden und -reduzierenden Faktoren von ökologisch angebauten Ackerkulturen hin.

6: Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse; Möglichkeiten der Umsetzung oder Anwendung der Ergebnisse für die Praxis und Beratung

Die zuvor beschriebenen, umfangreichen Aktivitäten des Projektes haben zu interessanten und durchaus praxisrelevanten Ergebnissen geführt. So konnten Ergebnisse zur Ertragswirkungen der Bewässerung auf Sommergetreide, Körnerleguminosen und Klee gras aus Versuchen mit konventioneller Bewirtschaftung, z.B. der LWK Niedersachsen bestätigt werden. Die größten Wirkungen der Bewässerung auf die Produktivität ergaben sich bei Kulturen deren Hauptwachstumsphase in den Sommermonaten mit stark negativer klimatischer Wasserbilanz liegt, hier dem Rotklee gras, während Sommergetreide (hier Sommerweizen) nur wenig profitieren. Das Ausmaß der Wirkung der Bewässerung auf die Produktivität wird dabei wesentlich von Standorteigenschaften (Wasserspeicherkapazität des Bodens) sowie der Witterung im Versuchsjahr beeinflusst.

Eine mögliche Konsequenz aus den Ergebnissen ist die weitere Priorisierung von Bewässerungsmassnahmen auf Kulturen die im Sommer wachsen wie Zuckerrüben, Mais, Kartoffeln aber auch Leguminosen wie Sojabohnen oder Klee gras gemengen. In Bezug auf die Bewässerung von Leguminosen ist ein sehr relevantes Ergebnis, dass die positiven Vorfruchtwirkungen der Leguminosen auf nachfolgende Getreide durch die Bewässerung scheinbar nicht verstärkt werden. Der dafür verantwortliche Mechanismus ist scheinbar, dass das Wachstum der Leguminosen und die damit verbundene Stickstoffaufnahme durch Bewässerung stärker gefördert wird als die Stickstofffixierung. Dieses Ergebnis ist interessant und hat hohen Neuigkeitswert, bedarf aber noch der Bestätigung durch systematische Untersuchungen mit unterschiedlichen Leguminosen sowie Nährstoffversorgungssituationen im Boden.

Die geringe Wirksamkeit der Applikation verschiedener Düngemittel auf Wachstum und Ertrag der untersuchten Kulturen in Verbindung mit Bewässerung ist etwas überraschend, kann aber eventuell mit dem generell recht niedrigen Ertragsniveau in den Versuchen erklärt werden. Das Ergebnis bestätigt aber dass insbesondere im ÖL die Möglichkeiten der Ad-hoc Verbesserung der Nährstoffversorgung durch Applikation von Düngemitteln begrenzt ist und das Hauptaugenmerk somit auf längerfristige Effekte und Verfügbarkeit von Nährstoffen in der Fruchtfolge zu legen ist. Der Einsatz von Bewässerung scheint hieran nichts zu ändern.

Größere Unsicherheiten ergaben sich bei der Bewertung der wirtschaftlichen Rentabilität der Bewässerungsmassnahmen. Hier sind Versuchsergebnisse aus 2 Jahren nicht ausreichend um generelle Schlussfolgerungen zu ziehen. Prinzipiell ergibt sich eine hohe Berechnungswürdigkeit bei Kulturen die sehr werthaltig sind und in denen Bewässerung Erträge und Qualität stark steigert. Belastungsfähige quantitative Aussagen erfordern jedoch längere Zeitreihen, die die Variabilität der Witterung sowie die Volatilität der Preise abbilden. Zudem sind Standortfaktoren sowie betriebliche Ausrichtung zu berücksichtigen.

7: Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen

Bei gesamthafter der Betrachtung sind die wesentlichen Projektziele trotz der erschwerten Bedingungen erreicht worden. Unterbleiben mussten größtenteils die in Arbeitspaket 2 vorgesehenen Kleinfeldversuche. Als Ausgleich wurden die Feldversuche konzentriert mit hoher Datenerfassungsintensität erfolgreich durchgeführt. Mit Hinblick auf die Teilziele des Projektes ist festzustellen: (*kursiv = formuliertes Ziel*, normal = erreichtes Ziel)

1: *Quantifizierung der durch Wassermangel induzierten Ertragslücken, d.h. der wasserlimitierten Erträge* Das Ziel wurde erreicht.

2: *Erfassung des Einflusses differenzierter Nährstoffversorgung (N und P) mit angereicherten Gärrestekomposten und Recycling P-Düngern auf die Ertragsleistung sowie deren Interaktion mit der Wasserversorgung* Das Ziel wurde teilweise erreicht. Die verwendeten Komposte konnten nur bedingt mit Stickstoff angereichert werden und hatten eine entsprechend geringe Ertragswirksamkeit. Wie dem Geldgeber bereits frühzeitig mitgeteilt, konnten die Recycling P-Dünger final in den Versuchen nicht eingesetzt werden. Gründe hierfür waren nicht hinreichende mengenmäßige Verfügbarkeit von aufbereiteter Klärschlammasche sowie die mangelnde Zulässigkeit von Struviten auf zertifizierten Ökoflächen. Aus pragmatischen Gründen kam daher fein gemahlene Rohphosphat zur Anwendung.

3: *Messung der N_2 - Fixierleistung von Futter- und Körnerleguminosen in Abhängigkeit der Wasser- und Nährstoffversorgung in situ und Berechnung der NdfA-Werte* Das Ziel wurde vollumfänglich erreicht.

4: *systematische Analyse der Ressourceneffizienz durch Berechnung der Nährstoffaufnahme- und Verwertungseffizienz der applizierten Dünger bei differenzierter Wasserversorgung*
Die Voraussetzungen zur Erfüllung dieses Ziels wurden durch entsprechende Datenerfassungen sichergestellt. Aufgrund der nicht vorhandenen Wirkungen der eingesetzten Dünger wurde das Ziel obsolet.

5: *Quantifizierung und Bewertung der Beregnungs- und Düngungseffekte auf die Nährstoffbilanzen auf Schlag- und erweiterter Hoftorebene* Das Ziel wurde erreicht.

6: *Berechnung der ökonomischen Beregnungswürdigkeit der untersuchten Kulturen unter Einbezug der Systemeffekte, vor allem des N-Inputs durch die N_2 - Fixierung* Das Ziel wurde im Wesentlichen erreicht, der Einbezug der Systemeffekte erfolgte nur deduktiv.

7: *Ableitung von Praxisempfehlungen zur wassergesteuerten Erhöhung der Produktivität*
Das Ziel wurde bedingt erreicht. Aufgrund des hohen standort- und betriebsspezifischen Einflusses auf die Beregnungswürdigkeit einzelner Kulturen, können die Ergebnisse nicht

verallgemeinert werden. Praxisrelevante Empfehlungen wurden in einem Merkblatt zusammengefasst.

Aus wissenschaftlicher Sicht sind die Projektergebnisse in mehrfacher Hinsicht von Relevanz. Klar aufgezeigt werden konnte, dass für nicht N-düngungsabhängige Kulturen, d.h. Leguminosen, ein unausgeschöpftes Ertragspotenzial durch optimierte Wasserversorgung besteht. Die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme gilt es durch innovative Berechnungsmethoden samt Steuerung sicherzustellen. Im Vordergrund stehen hier kulturartenspezifisch die treffgenaue Festlegung des Beregnungsbeginns und die Minimierung des Wassereinsatzes und somit die Etablierung eines effizienten Beregnungsregimes.

Im vorliegenden Projekt erwies sich die verlässliche Messung der Bodenfeuchte mit der Impedanzmethode als nicht praktikabel.

Hinsichtlich der Mikronährstoffversorgung von Leguminosen sollte ein verstärktes Augenmerk auf die Molybdänversorgung gelegt werden.

Mit zunehmender Flächenausdehnung des ökologischen Landbaus und der damit verbundenen Zunahme des Anbaus von Leguminosen gewinnt die Sicherstellung hoher N_2 -Fixierleistungen zunehmend an Bedeutung. Neben der systematischen Erforschung der Leguminosenmüdigkeit samt Entwicklung von Lösungsansätzen, sollte das spezifische Ziel verfolgt werden, die Gründe für geringe NdfA-Werte zu untersuchen und Lösungsstrategien für die landwirtschaftliche Praxis zu entwickeln.

8: Zusammenfassung

In den Jahren 2019 bis 2021 wurden insgesamt 17 faktorielle Feldversuche mit Beregnung (mit/ohne) und Düngung (ohne, PKS, PKS+ Mikronährstoffe) mit Ackerbohnen, Rotkleegras und Sommerweizen durchgeführt. Weiterhin wurden sechs Nachfruchtversuche mit Winterweizen und ein Bodendämpfversuch mit Ackerbohnen durchgeführt. Die drei ökologisch bewirtschafteten Standorte lagen in Nordrhein-Westfalen (Weeze und Wiesengut) und Niedersachsen (Deppoldshausen). Zwei Standorte wiesen eine eher geringe und ein Standort (Wiesengut) eine vglw. hohe nutzbare Feldkapazität auf. In 14 von 17 Beregnungsversuchen waren die Monate April bis Juni unterdurchschnittlich niederschlagsreich. Es wurden umfangreiche Daten zur Produktivität der Bestände erfasst und varianzanalytisch ausgewertet.

Ergebnisse Ackerbohnen

- Zusatzberegnung führte auf den Standorten Weeze und Wiesengut in beiden Versuchsjahren zu einer signifikanten Zunahme der Sprossmasse zum Stadium Ende Blüte. Im Mittel der vier Umwelten nahm diese um 45% zu.
- Die Düngung mit PKS und Mikronährstoffen hatte in keinem der Versuche einen Effekt auf die Sprossmasse zum Stadium Ende Blüte.
- Gemittelt über alle sechs Versuche wurde nach Beregnung ein um etwa 50% höherer Druschertrag im Vergleich zu unberegnet festgestellt. Das durchschnittliche Ertragsniveau war jedoch mit etwa 25 dt ha⁻¹ Trockenmasse vglw. gering.
- Mit den beregnungsinduziert höheren Biomasseerträgen ging idR auch eine höhere Stickstoffaufnahme von Korn und Stroh einher. Der Kornstickstoffertrag war in fünf von sechs Versuchen, die Stickstoffaufnahme des Strohs in drei von sechs Versuchen signifikant höher nach Beregnung im Vergleich zu unberegnet.
- Der höchste Kornstickstoffertrag (245 kg N ha⁻¹) wurde am Standort Wiesengut in 2019 festgestellt.
- Die NdfA-Werte von Korn und Stroh wurden durch Beregnung idR ebenfalls erhöht, in zwei von sechs Fällen (Korn) signifikant.
- Insgesamt waren die NdfA-Werte der Ackerbohnen mit im Mittel 61% jedoch vergleichsweise niedrig.
- Die Beregnung hatte mit einer Ausnahme keinen Effekt auf die P - Gehalte der Ackerbohnenkörner.
- Auch die Düngung mit Phosphat führte nicht zu einer Erhöhung der P-Gehalte der Körner.
- Die beregnungsinduziert höheren Kornerträge führten jedoch in allen vier Versuchen zu einem deutlich, zum Teil mehr als verdoppelten Entzug von Phosphor und Kalium.
- Die deutlich höheren Nährstoffentzüge von P und K nach Beregnung hatten entsprechende Änderungen der Bilanzen auf Schlagebene zur Folge. Mit Düngung und ohne Beregnung waren die Bilanzen für P und K in allen Fällen positiv

- Als Folge von Beregnung wurden die P- und K- Bilanzen durch Beregnung mit zusätzlicher Düngungsgabe in der Regel negativ.
- Der Kornertrag wurde durch Bodendämpfung signifikant um 23% auf 48,7 dt ha⁻¹ (86% TM) erhöht. Der Hülsenansatz war nach Bodendämpfung mit 10,6 Hülsen je Pflanze um 43 % höher als in der Kontrolle.

Ergebnisse Klee gras

- Im Mittel von sechs Versuchen wurde ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen der kumulierte Trockenmasseertrag durch Beregnung verglichen mit unberegneter signifikant um 42% auf 116,5 dt ha⁻¹ gesteigert.
- Die Düngung mit PKS und Mikronährstoffen hatte in keinem der Versuche einen Effekt auf die Trockenmasseerträge.
- Das Klee-Gras Verhältnis wurde in einem von sechs Versuchen (Weeze 2019) durch Beregnung in den ersten beiden Schnitten signifikant erhöht und blieb des weiteren unverändert.
- Mit Ausnahme von Weeze 2020 waren alle Rotklee gras-Bestände klee betont .
- Die P - Aufnahme von Rotklee gras als Produkt von Trockenmasseertrag und P Gehalt wurde in sieben, die K - Aufnahme in acht von 24 Vergleichen durch Beregnung signifikant erhöht.
- Die Kaliumaufnahme und damit die Abfuhr vom Feld war in Versuchen mit hohen Trockenmasseerträgen (bspw. WG 2020) bereits mit dem ersten Schnitt mit über 200 kg K ha⁻¹ vglw. hoch.
- Als Folge der hohen P- und K - Entzüge durch die Rotklee grasernte ergaben sich in fast allen Fällen trotz Düngung (12 kg P und 31,2kg K ha⁻¹ nach jedem Schnitt) negative Schlagbilanzsalden, v.a. für K.
- Der höchste negative P - Saldo (-30,6 kg ha⁻¹) wurde im Versuch WG 2020 mit hohen Trockenmasseerträgen (> 150 dt ha⁻¹) festgestellt.
- Die K - Bilanzsalden waren in allen Versuchen und Varianten negativ. In fünf von acht verglichen war der negative K Saldo > 200 kg ha⁻¹
- Die Stickstoffaufnahme von Rotklee gras und die N₂ - Fixierleistung von Rotklee unterlag starken standörtlichen und jahresbedingten Schwankungen. Die mittlere N-Aufnahme von Rotklee gras war in 2019 mit knapp 170 kg N ha⁻¹ deutlich geringer als 2020 (etwa 320 kg N ha⁻¹).
- Die höchste mittlere N-Aufnahme wurde am Standort Wiesengut festgestellt (> 400 kg N ha⁻¹), die geringste in Deppoldshausen.
- Im Gegensatz zu Ackerbohnen unterlagen die NdfA-Werte nur geringen Schwankungen und waren im Gesamtmittel von knapp 80% hoch.
- Beregnung hatte in beiden Jahren eine signifikante Zunahme der fixierten N₂-Menge zur Folge. Die absoluten Unterschiede waren jedoch mit weniger als 50 kg N ha⁻¹ vglw. gering

- Das Winterweizenertragsniveau nach Vorfrucht Rotklee gras bzw. Ackerbohnen war im Mittel von sechs Versuchen mit 30,1 dt TM ha⁻¹ entsprechend 35 dt ha⁻¹ (86% TM) vglw. gering. Die Beregnung der beiden Vorfrüchte hatte in keinem der sechs Feldversuche einen Einfluss auf den Kornertrag.

Ergebnisse Sommerweizen

- Die Beregnung hatte in keinem der Versuche einen ertragssteigernden Effekt auf Sommerweizen.
- Hinsichtlich der Düngung zeigten sich standortspezifische Unterschiede. In Weeze 2019 wurde der Kornertrag durch organische Düngung verglichen mit der ungedüngten Kontrolle tendenziell, im Falle von Kompostanwendung, signifikant erhöht (max. + 16%).

Wirtschaftlichkeit der Beregnung

- Unter Annahme der vollen Direkt- und Arbeiterledigungskosten erweist sich die Beregnung bei Nutzung von Standarddaten des KTBL in der Regel als zu teuer und somit nicht rentabel.
- Beispielsweise wurde der Trockenmasseertrag von Rotklee gras durch Beregnung auf dem Standort Weeze in 2019 von 40,3 auf 79,9 dt ha⁻¹ nahezu verdoppelt. Der geringe Marktwert von Rotklee gras (84 € je Tonne) und alleine die hohen Wasserkosten (183 mm à 26 ct je m³ = 481 €) machen die Beregnung unrentabel. Verstärkt wird der Effekt noch durch die fixen und variablen Maschinenkosten, die mindestens 300 € ha⁻¹ betragen.
- Profitabel war die Beregnung von Ackerbohnen in 2019 am Standorte Weeze. Hier wurde als Folge von Beregnung eine Mehrleistung von 885 € erzielt. Dieser standen insgesamt Mehrkosten von 793 € gegenüber. Höchster Kostenfaktor waren die Wasserkosten, die bei 133 mm à 26 ct je m³ mit 345 € ha⁻¹ (knapp 95% der Direktkosten) zu Buche schlugen.

9: Literaturverzeichnis

- ABDELHAMID, M. T., J. A. PALTA, E. J. VENEKLAS, C. ATKINS, N. C. TURNER & K.H.M. SIDDIQUE, (2011): Drying the surface soil reduces the nitrogen content of faba bean (*Vicia faba* L.) through a reduction in nitrogen fixation. *Plant and Soil* 339, 351-362
- ANGLADE, J., G. BILLEN, AND J. GARNIER. (2015). Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* 6(3):37. <http://dx.doi.org/10.1890/ES14-00353.1>
- BAKKENA K , SYNNE O M & SISSEL HANSEN (2004) Nitrogen fixation by red clover as related to the supply of Cobalt and Molybdenum from some Norwegian soils, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 54:2, 97-101, DOI: 10.1080/09064710410024408
- BERG, M., (2017): mündliche Mitteilung, Betriebsleiter Wiesengut, Uni Bonn.
- BERRY P. M., SYLVESTER-BRADLEY R., PHILIPPS L., HATCH D. J., CUTTLE S. P., RAYNS F. W., GOSLING P. (2002) Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? *Soil Use and Management*, **18**, 248-255.
- BICHLER, B., HÄRING, A. M. (2003) Die räumliche Verteilung des ökologischen Landbaus in Deutschland und ihre Bestimmungsgründe. BÖL Abschlussbericht, 2004, <http://www.orgprints.org/5046>.
- BÖHM, H. (2013). Auswirkungen einer Schwefeldüngung auf den Ertrag und die Nährstoffzusammensetzung eines Klee grasbestandes.in: D. Neuhoff, C. Stumm, S. Ziegler, G. Rahmann, U. Hamm & U. Köpke (Hrsg.) (2013): Ideal und Wirklichkeit - Perspektiven Ökologischer Landbewirtschaftung. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 5. - 8. März 2013 Verlag Dr. Köster, Berlin.216-219.
- BOLLEN GJ (1969) The selective effect of heat treatment on the microflora of a greenhouse soil. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 75: 157–163
- BONILLA, I. & L. BOLANJOS, (2009): Mineral Nutrition for Legume-Rhizobia Symbiosis: B, Ca, N, P, S, K, Fe, Mo, Co, and Ni: A Review. In: LICHTFOUSE, E. (Hrsg.): *Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants*, 253-274. Springer, London.
- BOUWER, L. GEORGOPOULOU, E., JACOB, D., MARTIN, E., ROUNSEVELL, M., SOUSSANA, JF. (2014): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. 23: Europe. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*, 1267-1326.
- BRUNS, C., WERREN, D., BACANOVIC, J., FUCHS, J., HER, J., & FINCKH, M. R. (2013). Kontrolle bodenbürtiger Krankheiten des Fusskrankheits-komplexes an Erbsen mit Komposten. in: D. Neuhoff, C. Stumm, S. Ziegler, G. Rahmann, U. Hamm & U. Köpke (Hrsg.) (2013): Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 5. - 8. März 2013 Verlag Dr. Köster, Berlin., 249-251.
- CASSMANN, K. (1999): Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 96, pp. 5952–5959, May 1999.
- CASSMANN, K. G., DOBERMANN, A. & WALTERS, D. T. (2002) Agroecosystems, nitrogen use efficiency and nitrogen management. *J. Human Environ.* 31, 132–140 (2002). 38.
- COSTA, W.A.J.M. de, M. D. DENNETT, U. RATNAWEERA & K. NYALEMEGBE, 1997: Effects of different water regimes on field-grown determinate and indeterminate faba bean (*Vicia faba* L.). I. Canopy growth and biomass production. *Field Crops Research* **49**, 83-93.
- DAVID C., JEUFFROY M., HENNING J., MEYNARD J. (2005) Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 213.
- DHAMALA, N. R., RASMUSSEN, J., CARLSSON, G., SØEGAARD, K., & ERIKSEN, J. (2016). Nitrogen fixation in red clover grown in multi-species mixtures with ryegrass, chicory, plantain and caraway. *Grassland Science in Europe*, **21**, 576-578.
- DHAMALA, N.R., ERIKSEN, J., CARLSSON, G. *et al.* Highly productive forage legume stands show no positive biodiversity effect on yield and N₂-fixation. *Plant Soil* **417**, 169–182 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3249-2>
- DÖRING, T.F. & NEUHOFF, D. (2021). Upper limits to sustainable organic wheat yields. *Scientific reports*, **11**(1), 1-10

- EHLERS, W. (1997): Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. *Pflanzenbauwissenschaften*, 1 (3), 97-108.
- FISCHINGER, S. A., BECKER, K., & LEITHOLD, G. (2011). Auswirkungen unterschiedlicher S - Versorgungszustände auf den N Flächenertrag eines Luzerne-Klee grasbestandes.
- FUCHS, JACQUES G.; THÜRIG, BARBARA; BRANDHUBER, ROBERT; BRUNS, CHRISTIAN; FINCKH, MARIA R.; FLIEßBACH, ANDREAS; MÄDER, PAUL; SCHMIDT, HARALD; VOGT-KAUTE, WERNER; WILBOIS, KLAUS-PETER UND LUCIUS, TAMM (2014) Evaluation of the causes of legume yield depression syndrome using an improved diagnostic tool. *Applied Soil Ecology*, 79, S. 26-36.
- GHASSEMI-GOLEZANI, K., S. GHANCHPOOR & A. D. MOHAMMADI-NASAB, (2009): Effect of water limitations on growth and grain filling of faba bean cultivars. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 7 (3&4), 442-447.
- GOH, K. M., & BRUCE, G. E. (2005). Comparison of biomass production and biological nitrogen fixation of multi-species pastures (mixed herb leys) with perennial ryegrass-white clover pasture with and without irrigation in Canterbury, New Zealand. *Agriculture, ecosystems & environment*, 110(3-4), 230-240.
- GRUBER, HARRIET; WEGNER, CAROLINA UND TITZE, ANDREAS (2015) Einfluss der organischen Düngung mit Gärresten auf Ertrag und Qualität von Getreide. Beiträge zum Ökologischen Landbau. Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Dezember 2015, 56, S. 53-61.
- GUDEHUS, H.C., (2005): Dämpfen im Gartenbau. Osnabrücker Beiträge zum Gartenbau, 6/2005.
- HAAS, G., A. SCHLONSKI UND U. KÖPKE (2003): Rotklee gras im Organischen Landbau: Einfluss von Arten- und Sortenwahl auf Ertrag und Entwicklung. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, 109, 67 Seiten.
- HAMMELEHLE, A., OBERSON, A., LÜSCHER, A., MÄDER, P., & MAYER, J. (2018). Above- and belowground nitrogen distribution of a red cloverperennial ryegrass sward along a soil nutrient availability gradient established by organic and conventional cropping systems. *Plant and Soil*, 425(1–2), 507–525. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/s11104-018-3559-z](https://doi.org/10.1007/s11104-018-3559-z)
- HERBST, F., GANS, W., & VÖLKER, U. (2018) Verlauf der Bodenreaktion und der pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte im 140-jährigen Ewigen Roggenbau in Halle/Saale. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 69(1), 61-72
- HERBST, M. & C. FRÜHAUF, 2017: Wird das Wasser knapp? Wasserbedarf und -verfügbarkeit heute und in Zukunft. In: SCHIMMELPFENNIG, S., J. ANTER, C. HEIDECHE, S. LANGE, K. RÖTTCHER & F. BITTNER (Hrsg.): Bewässerung in der Landwirtschaft, Braunschweig, 1-10.
- HOLE D. G., PERKINS A. J., WILSON J. D., ALEXANDER I. H., GRICE F., EVANS A. D. (2005) Does organic farming benefit biodiversity? *Biological Conservation*, 122, 113-130.
- HUBER, R., (1988): Biologische N-Fixierung der Ackerbohnen und deren Auswirkungen auf den N-Haushalt des Bodens im Rahmen Getreidebetonter Fruchtfolgen. Dissertation, Zürich. 161 S
- HÜGI, K., (1989): Der Einfluss von Bestandesdichte, Wachstumsregulatoren und Bewässerung auf den Ertrag und die Ertragssicherheit von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.), Dissertation ETH Zürich. 163 S.
- JUNG, R. & RAUBER, R., (2017): Stickstoff-Fixierleistung von Ackerbohnen in Reinsaat und Gemengen auf Auenboden. In: REENTS, H. J., H. HEUWINKEL, S. WOLFRUM, K. WIESINGER & K.-J. HÜLSBERGEN (Hrsg.): Ökologischen Landbau weiterdenken - Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken. Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, 350-351. Dr. Köster, Berlin, 1. Aufl.
- KANAL, A., KAUTZ, T., ELLMER, F., & RÜHLMANN, J. (2003). Einfluss langjährig differenzierter Düngungsmassnahmen auf die Schwefel-und Stickstoffversorgung von Sommergerste in Berlin-Dahlem (D) und Tartu (Est). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 49(5), 543-553.
- KNOBLAUCH, S. (2009). "Langjährige Ergebnisse über das pflanzenspezifische Aneignungsvermögen von Bodenwasser landwirtschaftlicher Kulturen auf einem tiefgründigen Braunerde-Tschernosem aus Löss." (2009): 13. Gumpensteiner Lysimetertagung 2009, 13. Gumpensteiner Lysimetertagung 2009, 131 – 136 ISBN: 978-3-902559-31-9 ISBN: 978-3-902559-3 131-136.

- KOLBE, H., (2019): Einfluss mineralischer P- und K-Düngung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung des Bodens unter den Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus in Deutschland. *Journal für Kulturpflanzen*, 71 (6), 161-181.
- KOLBE, H., SCHUSTER, M., HÄNSEL, M., SCHLIEßER, I., PÖHLITZ, B., STEFFEN, E., POMMER, R., (2006): Feldfutterbau und Gründüngung im Ökologischen Landbau. Hrsg: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 01326 Dresden
- KOLBE, HARTMUT (2015) Wie ist es um die Bodenfruchtbarkeit im Ökolandbau bestellt: Nährstoffversorgung und Humusstatus? In: Bodenfruchtbarkeit - Grundlage erfolgreicher Landwirtschaft (BAD Tagungsband 2015), Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Frankfurt/Main, S. 89-123.
- KÖPKE U. (1995) Nutrient Management in Organic Farming Systems - the Case of Nitrogen. *Biological Agriculture & Horticulture*, 11, 15-29.
- KÖPKE, U. 1993: Nährstoffmanagement durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen. In: BMELF (Hrsg.): 5. Colloquium zur Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, „Nährstoffhaushalt“. Berichte über Landwirtschaft 71, 207. Sonderheft, 181-203.
- KÖPKE, U., & NEMECEK, T. (2010). Ecological services of faba bean. *Field crops research*, 115(3), 217-233.
- KÖPKE, U., 1996: Symbiotische Stickstoff-Fixierung und Vorfruchtwirkung von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.). Dr. Köster, Berlin. 113 S
- KRAMER A. W., DOANE T. A., HORWATH W. R., VAN KESSEL C. (2002) Combining fertilizer and organic inputs to synchronize N supply in alternative cropping systems in California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91, 233-243.
- KRAMER S. B., REGANOLD J. P., GLOVER J. D., BOHANNAN B. J. M., MOONEY H. A. (2006) Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *PNAS*, 103, 4522–4527.
- KROGMANN, K. K.; HOBBS, E. H.; MCKENZIE, R. C. (1980): Response of fababean yield, protein production, and water use to irrigation. *Canadian journal of plant science*, 1980, 60. Jg., Nr. 1, S. 91-96.
- LANUV (2021): Klimabericht NRW 2021. LANUV Fachbericht 120.
- LEVIN, K, SIMON, A.; REENTS, H, HÜLSBERGEN, KJ (2017) Maiserträge und Humusbilanzen in ökologischen Energiepflanzen-Fruchtfolgen mit Gärrestdüngung. In: Wolfrum, Sebastian; Heuwinkel, Hauke; Wiesinger, Klaus; Reents, Hans Jürgen und Hülsbergen, Kurt-Jürgen (Hrsg.) *Ökologischen Landbau weiterdenken: Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken*, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 332-333.
- LINK, W., ABDELMULA, A.A., KITTLITZ, E. VON, BRUNS, S., RIEMER, H., STELLING, D., (1999) Genotypic variation for drought tolerance in *Vicia faba*. *Plant Breed*. 118, 477– 483.
- LOSS, S. P., & SIDDIQUE, K. H. M. (1997). Adaptation of faba bean (*Vicia faba* L.) to dryland Mediterranean-type environments I. Seed yield and yield components. *Field Crops Research*, 52(1-2), 17-28.
- LÜTTGER, A.B., FEIKE, T. (2018) Development of heat and drought related extreme weather events and their effect on winter wheat yields in Germany. *Theor Appl Climatol* 132, 15–29 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2076-y>
- MCDONALD, G.K., PAULSEN, G.M., (1997). High temperature effects on photosynthesis and water relations of grain legumes. *Plant Soil* 196, 47–58.
- MCKENNA, P., CANNON, N., CONWAY, J., & DOOLEY, J. (2018). The use of red clover (*Trifolium pratense*) in soil fertility-building: A Review. *Field Crops Research*, 221, 38-49.
- MÜLLER, U., MEYER, C., EHLERS, W., & BÖHM, W. (1985) Wasseraufnahme und Wasserverbrauch von Ackerbohne und Hafer auf einer Löß-Parabraunerde." *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 148.4 (1985): 389-404.
- NEUHOFF, D. & U. KÖPKE, (2002): Speisekartoffelproduktion im Organischen Landbau: Einfluss von Düngung und Sortenwahl auf Ertrag und Knolleninhaltsstoffe. *Pflanzenbauwissenschaften*. 6(2), 49-56.
- NIMMO J., LYNCH D., OWEN J. (2013) Quantification of nitrogen inputs from biological nitrogen fixation to whole farm nitrogen budgets of two dairy farms in Atlantic Canada. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 96, 93-105.

- PARRY, M. L., 1990: Climate change and world agriculture. Earthscan Publ, London, 157 S.
- PASCHOLD, P.-J., 2010: Bewässerung im Gartenbau. Ulmer, Stuttgart. 167 S.
- PONISIO L. C., M'GONIGLE L. K., MACE K. C., PALOMINO J., DE VALPINE P., KREMEN C. (2015) Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 282, 20141396.
- PÖTZSCH, F., LUX, G., & SCHMIDTKE, K. (2019). Schwefel Bedarf, Akkumulation und Düngung von *Vicia faba* L. unter Feldbedingungen. *Innovatives Denken für eine nachhaltige Land-und Ernährungswirtschaft. Beiträge zur 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel, 5. bis 8. März 2019, S. 232-233.*
- RECKLING, M., DÖRING, F. STEIN-BACHINGER, K, BLOCH, R., BACHINGER, J., 2015: Yield stability of grain legumes in an organically managed monitoring experiment Aspects Appl. Biol. 128, 57–62.
- REITER, K., SCHMIDTKE, K., & RAUBER, R. (2002). The influence of long-term tillage systems on symbiotic N₂ fixation of pea (*Pisum sativum* L.) and red clover (*Trifolium pratense* L.). Plant and Soil, 238(1), 41-55.
- RICHTER, K.-H. & G. SCHALITZ, 1987: Ergebnisse und Empfehlungen für die Effektivität der Beregnung von Futterpflanzen. Feldwirtschaft (5), 200-203.
- RIEBAU (2016): mündliche Mitteilung, Firma Wachtberg Kompost, Alte Str. 902, 53343 Wachtberg. <http://www.wachtberg-kompost.de/>
- SADOWSKY, M. J., (2005): Soil Stress Factors Influencing Symbiotic Nitrogen Fixation. In: WERNER, D. & W. E. NEWTON (Hrsg.): Nitrogen fixation in Agriculture, Forestry, Ecology, and the Environment, 89-102. Springer, Dordrecht
- SANDERS J, HESS J (eds) (2019) Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 364 p, Thünen Rep 65, DOI:10.3220/REP1547040572000
- SCHERER, H. W., PACYNA, S., SPOTH, K. R., & SCHULZ, M. (2008). Low levels of ferredoxin, ATP and leghemoglobin contribute to limited N₂ fixation of peas (*Pisum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S deficiency conditions. *Biology and fertility of Soils*, 44(7), 909-916.
- SERIKSTAD, GRETE LENE; DE BOER, A. UND MAGNUSSON, C. (2013) Clover fatigue - a reason for precaution in organic farming? In: Løes, Anne-Kristin; Askegaard, Margrethe; Langer, Vibeke; Partanen, Kirsi; Pehme, Sirli; Rasmussen, Ilse A.; Salomon, Eva; Sørensen, Peter; Ullvén, Karin und Wivstad, Maria (Hrsg.) Organic farming systems as a driver for change, NJF Report, Nr. 9 (3), S. 59-60.
- SEUFERT V., Ramankutty N., Foley J. A. (2012) Comparing the yields of organic and conventional agriculture. Nature, 485, 229–232
- SIEBERT, S., EWERT, F., EYSHI REZAEI, E., KAGE, H., GRAß, R. (2014). Impact of heat stress on crop yield—on the importance of considering canopy temperature. Environmental Research Letters 9, 044012. DOI:10.1088/1748-9326/9/4/044012
- SOURELL, H., (2014): Bewässerungstechniken und -technologien. In: MICHEL, R. & H. SOURELL (Hrsg.): Bewässerung in der Landwirtschaft, 65-72. Erling Verlag, Clenze.
- STUELPNAGEL R., (1982): Schätzung der von Ackerbohnen symbiontisch fixierten Stickstoffmenge im Feldversuch mit der erweiterten Differenzmethode. Z. Acker und Pflanzenbau 151, 446–458
- STUMM, C. & U. KÖPKE (2017): Düngung mit Sprossmasse von Futterleguminosen: Lachgasemissionen und Nitratverluste. In: Wolfrum S. et al. (Hrsg.): Ökologischen Landbau weiterdenken: Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken. Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, 7. bis 10. März 2017 in Freising-Weihenstephan, Verlag Dr. Köster, 342-345
- STÜTZEL, H. & W. AUFHAMMER, (1992): Grain yield in determinate and indeterminate cultivars of *Vicia faba* with different plant distribution patterns and population densities. Journal of Agriculture Science **118** (3), 343-352.
- TITTONELL P., GILLER K. E. (2013) When yield gaps are poverty traps: the paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. Field Crops Research, 143, 76-90.
- TRYBALA, M., (1979): Der Einfluss der Beregnung und Mineraldüngung auf den Rotkleeertrag. Internationale Zeitschrift der Landwirtschaft (3), 231-233

- TUCK, S., WINQUIST, C., MOTA, F., AHNSTRÖM, J., TURNBULL, L. (2014) Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. *Journal of Applied Ecology* 51, 3, 746-755.
- UFZ (2018): Dürremonitor Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ. <http://www.ufz.de/index.php?de=37937> URL Zugriff am 29. Januar 2018
- UMWELTBUNDESAMT (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. URL aufgerufen am 13.09.2018, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2015>.
- UNKOVICH M.J., HERRIDGE DF, PEOPLES MB, BODDEY RM, CADISCH G, GILLER K, ALVES B, CHALK PM (2008) Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. *ACIAR Monograph No.136*. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.
- UNKOVICH M.J., PATE J.S., SANFORD P., ARMSTRONG E.L. (1994) Potential precision of the $\delta^{15}\text{N}$ natural abundance method in field estimates of nitrogen fixation by crop and pasture legumes in south-west Australia. *Aust J Agric Res* 45: 119–132.
- van LOENEN, M.C.A. 1, TURBETT1, Y., MULLINS, C:E:, FEILDEN, N:E:H:, WILSON, M:J:, LEIFERT, C:, SEEL, W.E., (2003) Low temperature–short duration steaming of soil kills soil-borne pathogens, nematode pests and weeds. *European Journal of Plant Pathology* 109: 993–1002, 2003.
- WANG X, YANG Y, PEI K, ZHOU J, PEIXOTO L, GUNINA A, ZENG Z, ZANG H, RASMUSSEN J, KUZYAKOV Y (2020) Nitrogen rhizodeposition by legumes and its fate in agroecosystems: a field study and literature review. *Land Degrad Dev* 32:410–419. <https://doi.org/10.1002/ldr.3729>
- WATSON C., BENGSSON H., EBBESVIK M., LØES A. K., MYRBECK A., SALOMON E., SCHRODER J., STOCKDALE E. (2002) A review of farm-scale nutrient budgets for organic farms as a tool for management of soil fertility. *Soil Use and Management*, 18, 264-273.
- WATSON, C. A., YOUNIE, D., & ARMSTRONG, G. (1999). Designing crop rotations for organic farming: importance of the ley/arable balance. *Designing and testing crop rotations for organic farming. DARCOF report*, (1), 91-98.

Internetquellen:

Bundesregierung 2021: Koalitionsvertrag.

<https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>, aufgerufen am 17. Januar 2022

DWD 2022: Zeitreihen und Trends.

<https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>, aufgerufen am 20. Januar 2022

Lk Niedersachsen (2022) Webseite Beregnung,

https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/thema/567_Bew%C3%A4sserung_Beregnung, , aufgerufen am 9. Februar 2022

LfL-Bayern 2022: Sortenversuche Ökologischer Landbau

<https://www.lfl.bayern.de/oekosorten>

MÜCKE, M., GRAB, V., 2021, Ergebnisse der Öko-Landessortenversuche Ackerbohnen 2021 LK-Niedersachsen

https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/38667_Ergebnisse_der_Landessortenversuche_%C3%96ko-Ackerbohnen_2021

PASCHOLD, P.-J., 2019: Geisenheimer Bewässerungssteuerung 2019.

<https://www.hs-geisenheim.de/gemuesebau/bewaesserung/geisenheimer-bewaesserungssteuerung/>

THE R FOUNDATION, 2020: The R Project for Statistical Computing

<https://www.r-project.org>

^

10: Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt, bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse

Publikationen und Vorträge

1. Neuhoff, D., (2019): Der Dürre trotzen-7 Tipps, Agrarheute, November 2019, 140 – 143.
2. Neuhoff, D., (2020): Feldberegnung im Ökolandbau. Lumbrico, Mai 2020, 32-36
3. Polkowski, C., J. Jungbluth, D. Neuhoff, R. Jung, S. Siebert 2021. Beregnung von Ackerbohnen im Ökologischen Landbau: Effekte auf Kornertrag und N₂-Fixierung. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 32 , 63. Jahrestagung, 28. - 30. September, 2021, Rostock, Germany. Verlag Liddy Halm, Göttingen: 52 - 53
zugleich Vortrag
4. Polkowski, C. (2019): Gezielte Beregnung im Ökologischen Landbau zur Steigerung von Produktivität und Nährstoffeffizienz. Leitbetriebe NRW - Versuchsbericht 2019
https://www.oekolandbau.nrw.de/fileadmin/redaktion/pdf/leitbetriebe/2019_VB/15_FF_Beregnung_19.pdf

Projektbezogene Feldtage und Veranstaltungen

1. Ökofeldtage 2019, Staatsdomäne Frankenhausen 3 -4 Juli2019
2. Feldtag Futterpflanzenanbau und Klimaanpassung, Hofgut Oberfeld in Darmstadt am 17. September 2020

Sonstiges

2 Masterarbeiten (Uni Bonn)

1 Bachelorarbeit (Uni Bonn)

Geplant

Praxis-Fachzeitschriften

1: Beitrag für ‚Bioland‘ Beregnung von Leguminosen

Wissenschaftliche Veröffentlichungen:

Irrigation increases yield and nitrogen fixation in organic grass-clover swards (European Journal of Agronomy)

Effect of irrigation and fertilization on productivity of faba beans (Field Crops Research)