



Hochschule für  
Technik und Wirtschaft  
Dresden  
University of Applied Sciences

**Fakultät Landbau/ Umwelt/ Chemie**

**Studiengang Produktionsmanagement Agrarwirtschaft**

*„Einfluss mechanischer, biologischer oder elektrophysikalischer  
Verfahren der Unkrautregulierung auf die N-Mineralisierung des  
Bodens im Vergleich zur chemischen Alternative“*

## **Masterarbeit**

*zur Erlangung des akademischen Grades eines*

*Master of Science (M. Sc.)*

*im Studiengang Produktionsmanagement Agrarwirtschaft*

vorgelegt von:

**Robin Schölzke (48477)**

Betreuer: **Prof. Dr. techn. Berthold Ilgen**

Zweitbetreuung: **Dr. Jana Epperlein**

**Anja Schmidt**

Dresden, Februar 2023

## **Erklärung über die eigenständige Erstellung der Arbeit**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorgelegte Arbeit mit dem Titel

„Einfluss mechanischer, biologischer oder elektrophysikalischer Verfahren der Unkrautregulierung die N-Mineralisierung des Bodens im Vergleich zur chemischen Alternative“

selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit als solche und durch Angabe der Quelle gekennzeichnet habe. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Mir ist bewusst, dass die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden Prüfungsarbeiten stichprobenartig mittels der Verwendung von Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift Student

## **Danksagung**

An dieser Stelle sei all denen gedankt, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Ilgen gilt mein Dank für die Übernahme der Betreuung, die entgegengebrachte Geduld und die Zeit für Diskussionen und Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit.

Ebenso richtet sich mein Dank an die Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e.V., welche den Versuch ins Leben gerufen und organisiert sowie alle Daten zur Verfügung gestellt haben. Dabei danke ich insbesondere Frau Dr. Jana Epperlein, die die Zweitbetreuung dieser Arbeit übernommen hat und Frau Anja Schmidt, die ebenfalls jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Weiterhin danke ich dem Landwirtschaftsbetrieb Burkhard Fromme und Landwirtschaftsbetrieb Holger Bese für die Bereitstellung der Flächen, auf denen der Versuch durchgeführt wurde und hierbei insbesondere Herrn Hendrick Fromme für die Unterstützung während der Versuchsdurchführung.

Ein großer Dank gilt auch meinen Freunden, die mich bei der Durchführung der Probennahmen tatkräftig unterstützt haben.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Familie für die entgegengebrachte Geduld und Unterstützung während des gesamten Studiums bedanken.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung .....	9
2. Literaturübersicht .....	10
2.1 Bedeutung von Stickstoff .....	10
2.2 Stickstoffkreislauf .....	11
2.3 Jahresverlauf und Einflussfaktoren der Stickstoffmineralisation .....	15
2.4 Einfluss der Bodenbearbeitung auf die N-Mineralisierung.....	18
2.5 Probleme bei der N-Mineralisierung im Herbst .....	20
2.6 Einfluss der Bodenbearbeitungsintensität auf die Ertragsleistung.....	21
2.7 Einfluss reduzierter Bodenbearbeitung auf die Ökonomie.....	22
2.8 Unkrautunterdrückung mit Hilfe von Zwischenfrüchten .....	24
3. Material und Methoden .....	26
3.1 Standort.....	26
3.2 Klima und Witterung .....	28
3.3 Varianten.....	29
3.4 Versuchsaufbau und -durchführung .....	34
4. Ergebnisse.....	40
4.1 Wassergehalte.....	40
4.2 Stickstoff.....	42
4.3 N-Aufnahme und Pflanzendeckungsgrad.....	49
4.4 Bestandesdichten .....	51
4.5 Erträge .....	52
4.6 Deckungsbeiträge.....	54
4.7 Arbeitswirtschaft.....	56
4.8 Dieselbedarf und CO <sub>2</sub> -Ausstoß.....	58
5. Diskussion .....	60
6. Fazit und Zusammenfassung.....	62
Literaturverzeichnis.....	66
Anhang .....	IX

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stickstoffkreislauf im Boden mit Angabe zu den Größenordnungen der N-Flüsse .....	11
Abbildung 2: Jahresverlauf der N-Mineralisation im Boden .....	17
Abbildung 3: Einfluss der Bodenbearbeitungshäufigkeit nach der Rapsernte auf die Herbst Nmin-Gehalte .....	18
Abbildung 4: NO <sub>3</sub> -N-Gehalt der Winterungen bei den Bodenbearbeitungsvarianten im Winter (LTZ Augustenberg) .....	19
Abbildung 5: Nmin-Werte nach Kultur und Anbausystem 1999 - 2005 - Dauerversuch Rütli .....	20
Abbildung 6: Relativerträge verschiedener Kulturen - Versuch LTZ Augustenberg .....	22
Abbildung 7: Mehrkosten des Glyphosatverzichtes .....	23
Abbildung 8: Klimadaten der Wetterstation Helmstedt-Emmerstedt im langjährigen Mittel und im Versuchszeitraum .....	28
Abbildung 9: Scheibe der Väderstad CrossCutter Disc .....	30
Abbildung 10: Sternradgrubber – Kerner Corona .....	31
Abbildung 11: Großfederzinkenegge – Köckerling Allrounder .....	32
Abbildung 12: Elektroherb – Zasso XPower .....	33
Abbildung 13: Schema der Versuchsanlage .....	35
Abbildung 14: Vergleich der gravimetrischen Wassergehalte zwischen den Schlägen – Mittelwerte aller Varianten .....	40
Abbildung 15: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 1 (Mittelwerte) .....	43
Abbildung 16: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 2 (Mittelwerte) .....	43
Abbildung 17: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 3 (Mittelwerte) .....	44
Abbildung 18: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 4 (Mittelwerte) .....	44
Abbildung 19: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 5 (Mittelwerte) .....	44
Abbildung 20: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 1 (Schlag: „Großer Plan“) .....	45
Abbildung 21: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 2 (Schlag: „Großer Plan“) .....	45
Abbildung 22: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 3 (Schlag: „Großer Plan“) .....	46
Abbildung 23: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 4 (Schlag: „Großer Plan“) .....	46
Abbildung 24: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 5 (Schlag: „Großer Plan“) .....	46
Abbildung 25: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 1 (Schlag: „Franke Weide“) .....	47
Abbildung 26: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 2 (Schlag: „Franke Weide“) .....	47
Abbildung 27: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 3 (Schlag: „Franke Weide“) .....	47
Abbildung 28: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 4 (Schlag: „Franke Weide“) .....	48

Abbildung 29: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 5 (Schlag: „Franke Weide“)	48
Abbildung 30: Pflanzendeckungsgrad inkl. Unkraut in % in Abhängigkeit der Versuchsvariante und Schläge	50
Abbildung 31: Bestandesdichten in Abhängigkeit von Versuchsvarianten und Schlägen	51
Abbildung 32: Winterweizenertrag 2021 in Abhängigkeit von Versuchsvarianten und Schlägen	52
Abbildung 33: dreijähriger Ertrag in GE/ha in Abhängigkeit der Versuchsvarianten (Mittelwerte)	54
Abbildung 34: Vergleich Deckungsbeiträge in Abhängigkeit von Versuchsvarianten und Schlägen	56
Abbildung 35: Vergleich der Arbeitskraftstunden je ha in Abhängigkeit der Versuchsvarianten (Mittelwerte)	57
Abbildung 36: Vergleich des Dieselvebrauchs in Abhängigkeit der Varianten (Mittelwerte)	58
Abbildung 37: Vergleich CO <sub>2</sub> -Ausstoß im Verhältnis zum Ertrag in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: relativ A1=100 (Mittelwerte)	59

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: N-Dynamik des Bodens in Abhängigkeit vom C:N-Verhältnis	16
Tabelle 2: Zwischenfruchtarten mit Einschätzung Unkrautunterdrückungsvermögen und Fruchtfolgeeignung	25
Tabelle 3: Standorteigenschaften der Versuchsschläge	27
Tabelle 4: Variantenplan des Versuches	34
Tabelle 5: Fruchtfolge im Versuch	35
Tabelle 6: ackerbauliche Maßnahmen – Großer Plan	37
Tabelle 7: Termine der Bodenprobennahmen	38
Tabelle 8: Vergleich Wassergehalte (%) in 0-30 cm in Abhängigkeit der Versuchsvarianten – Mittelwerte in 0 – 30 cm (A1= rel. 100)	41
Tabelle 9: Vergleich Wassergehalte (%) in 0-30 cm in Abhängigkeit der Versuchsvarianten – Mittelwerte in 30 - 60 cm (A1= rel. 100)	41
Tabelle 10: Nmin-Gehalte in 0 – 60 cm in kg/ha in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Termin (Mittelwerte)	42
Tabelle 11: N-Aufnahmen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten und Schläge am 24.03.2021 und 10.05.2021	49
Tabelle 12: Erträge 2019 – 2021 in Abhängigkeit von Versuchsvarianten und Schlägen (Mittelwerte)	53
Tabelle 13: Zusammenfassung Deckungsbeiträge in Abhängigkeit der Versuchsvarianten (Mittelwerte)	55
Tabelle 14: CO <sub>2</sub> -Ausstoß und Erträge in Abhängigkeit der Versuchsvarianten (Mittelwerte)	59

## Abkürzungsverzeichnis

%	- Prozent (1/100)
°C	- Grad Celsius
Akh	- Arbeitskraftstunden
BBCH	- Code für Entwicklungsstadium einer Pflanze
C	- Kohlenstoff
cm	- Zentimeter
CO <sub>2</sub>	- Kohlenstoffdioxid
dt	- Dezitonne
g	- Gramm
GE	- Getreideeinheit
GKB e.V.	- Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e.V.
ha	- Hektar
kg	- Kilogramm
km	- Kilometer
km/h	- Kilometer pro Stunde
Kö	- Körner
l	- Liter
LfL	- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LLH	- Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen
m	- Meter
m ü. NN	- Meter über Normalnull
m <sup>2</sup>	- Quadratmeter
m <sup>3</sup>	- Kubikmeter
mg	- Milligramm
mm	- Millimeter
N	- Stickstoff

$N_2$	- Distickstoff
$N_2O$	- Lachgas
$NH_3$	- Ammoniak
$NH_4^+$	- Ammonium
$N_{min}$	- mineralisierter Stickstoff
Pfl.	- Pflanzen
pH	- pondus Hydrogenii (Konzentration der Wasserstoff-Ionen in einer Lösung)
rel.	- relativ
t	- Tonne
UBA	- Umweltbundesamt



## 1. Einleitung und Zielsetzung

Der Einsatz von Glyphosat ist im pfluglosen Ackerbau in vielerlei Hinsicht ein wichtiger Baustein zur Regulierung von Unkräutern. So wurden im Jahr 2018 in Deutschland ca. 3.447 t des Wirkstoffes abgesetzt [LfL Bayern – online]. Ein nicht unerheblicher Teil dieser Menge wird jedoch nicht von der Landwirtschaft verbraucht, sondern entfällt auf die Anwendung im Haus- und Kleingartenbereich sowie auf den Einsatz durch die Deutsche Bahn. Im Ackerbau wird der größte Teil des Herbizides zur Stoppel- und Nacherntebehandlung ausgebracht. Weitere Einsatzgebiete sind die Vorsaats- und Vorauflaufbehandlung, zur Rekultivierung von Flächen, zur Sikkation, zur Einzelpflanzenbehandlung sowie aus Gründen des Resistenzmanagements.

Doch trotz des hohen Nutzens für die Landwirte steht der Wirkstoff immer wieder vor allem gesellschaftlich in der Kritik. So wird Glyphosat als vermutlich krebserregend eingestuft und gemeinhin als bienengefährlich bezeichnet. Ergebnisse zahlreicher Studien fallen in diesen Gesichtspunkten jedoch zumeist nicht eindeutig aus. Doch auch wenn diese Zweifel an den Herbizidwirkstoff nicht endgültig belegt sind, scheint ein Verbot des Mittels ab dem Jahr 2024 als nahezu sicher. Hierzu hat die Bundesregierung im Juni 2021 ein Maßnahmenpaket zum Insektenschutz beschlossen, welches starke Einschränkungen zum Einsatz des Herbizides und den Glyphosat-Ausstieg bis Ende 2023 vorsieht.

Aus diesem Grunde werden nun Alternativen benötigt, um den Einsatz des Totalherbizides zukünftig möglichst effektiv kompensieren zu können. Da im chemischen Pflanzenschutz derzeit nicht mit neuen Wirkstoffen in diese Richtung zu rechnen ist, müssen folglich andere Wege eingeschlagen werden. Die Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e.V. (GKB e.V.) beschäftigt sich hierzu seit dem Jahr 2019 innerhalb eines vierjährigen Projektes mit der Entwicklung von Strategien zu alternativen Anbausystemen bei Glyphosatverzicht, um auch zukünftig pfluglosen Ackerbau und Direktsaat mit all seinen Vorteilen betreiben zu können. Dieses Projekt wird durch die Europäische Union im Rahmen der Fördermaßnahme Europäische Innovationspartnerschaft „Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft (EIP Agri)“ gefördert und trägt den Projekttitel „Smarte UNkraut Kontrolle – Entwicklung innovativer Anbaustrategien zum Glyphosatverzicht im pfluglosen Ackerbau – SUNK“. Innerhalb dieses Projektes werden unterschiedliche mechanische, biologische und elektrophysikalische Verfahren der Unkrautbekämpfung mit der derzeitigen chemischen Variante des Glyphosateinsatzes erprobt und hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte miteinander verglichen.

Das Ziel des EIP-Agri Projektes „Smarte UNkraut Kontrolle – Entwicklung innovativer Anbaustrategien zum Glyphosatverzicht im pfluglosen Ackerbau – SUNK“ soll es sein, chemische, mechanische, elektrophysikalische und biologische Verfahren im pfluglosen Ackerbau auf ihre Eignung zur Unterdrückung von Unkräutern zu evaluieren. Daraus ergibt sich das Ziel der Entwicklung innovativer Strategien zum Glyphosatverzicht im pfluglosen Ackerbau. Es sollen innovative Unkrautbekämpfungsstrategien unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten erprobt und über ein Jahr bzw. über die Fruchtfolge hinweg analysiert werden. Zur Auswertung werden Smart Farming-Lösungsansätze wie Drohnentechnik, Multispektralkameras, Bodenscanner und Satellitendaten genutzt, um die Ergebnisse der Praxis anhand eines Entscheidungsmodells zur Verfügung zu stellen.

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit soll es sein, die innerhalb des oben genannten Projektes erprobten Verfahren hinsichtlich ihres Einflusses auf die Stickstoffmineralisierung des Bodens im Vergleich zur chemischen Variante mit Glyphosat zu überprüfen. Hierzu werden an mehreren Terminen Bodenproben in unterschiedlichen Tiefen gesammelt, welche dann auf ihre Stickstoffgehalte untersucht werden. Des Weiteren sollen die Wassergehalte der untersuchten Proben ermittelt werden, um Rückschlüsse darauf zu ziehen, wie die verschiedenen Varianten den Wasserhaushalt des Bodens beeinflussen. Außerdem soll die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten verglichen werden.

Abschließend soll anhand der untersuchten Gesichtspunkte des Gesamtprojektes ein Ansatz zur Entscheidung gegeben werden, ob und in welchem Maß die erprobten Strategien als Alternative zum Einsatz von Glyphosat im pfluglosen Ackerbau anzusehen sind.

## **2. Literaturübersicht**

### **2.1 Bedeutung von Stickstoff**

Auf unseren Planeten sind riesige Stickstoffvorräte vorhanden. Etwa 79,5 % davon sind in der Atmosphäre hauptsächlich als nicht reaktives  $N_2$ -Gas zu finden. 20,1 % befinden sich in der Lithosphäre und Pedosphäre. Mit unter 1 % ist der Anteil an Stickstoff, der sich in der Hydrosphäre und Biosphäre befindet, nahezu vernachlässigbar. Dennoch stellt Stickstoff für Pflanzen und Mikroorganismen das bedeutendste Nährelement dar. Da Stickstoff ein wesentlicher Bestandteil von Rubisco ist, dem Enzym, welches die Photosynthese katalysiert, kann ohne ihn keine Photosynthese stattfinden. Trotz des hohen Vorkommens an N in der Pedosphäre steht dieser den Pflanzen nicht unmittelbar zur Biomasseproduktion zur Verfügung. Denn der überwiegende Anteil dessen liegt im Boden organisch gebunden vor und macht im Oberboden einen Anteil von 90 – 98 % vom Gesamt-N aus.

Zudem sind im Unterboden höhere Gehalte an fixierten Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) zu finden. Aus diesem Grunde sind Pflanzen auf zusätzliche N-Einträge angewiesen. Diese können auf natürlichen Wege aus der Luft durch trockene und nasse Disposition oder biologische N-Fixierung sowie durch Düngung geschehen. [Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 518-519]

## 2.2 Stickstoffkreislauf

Da im Boden nur geringe N-Anteile in mineralischer Form vorliegen, muss durch Mineralisierung Stickstoff aus der organischen Bodensubstanz in pflanzenverfügbare Formen umgewandelt werden. Zwar können u.U. auch niedermolekulare organische N-Formen aufgenommen werden, jedoch ist dies für die landwirtschaftliche Produktion nicht relevant.

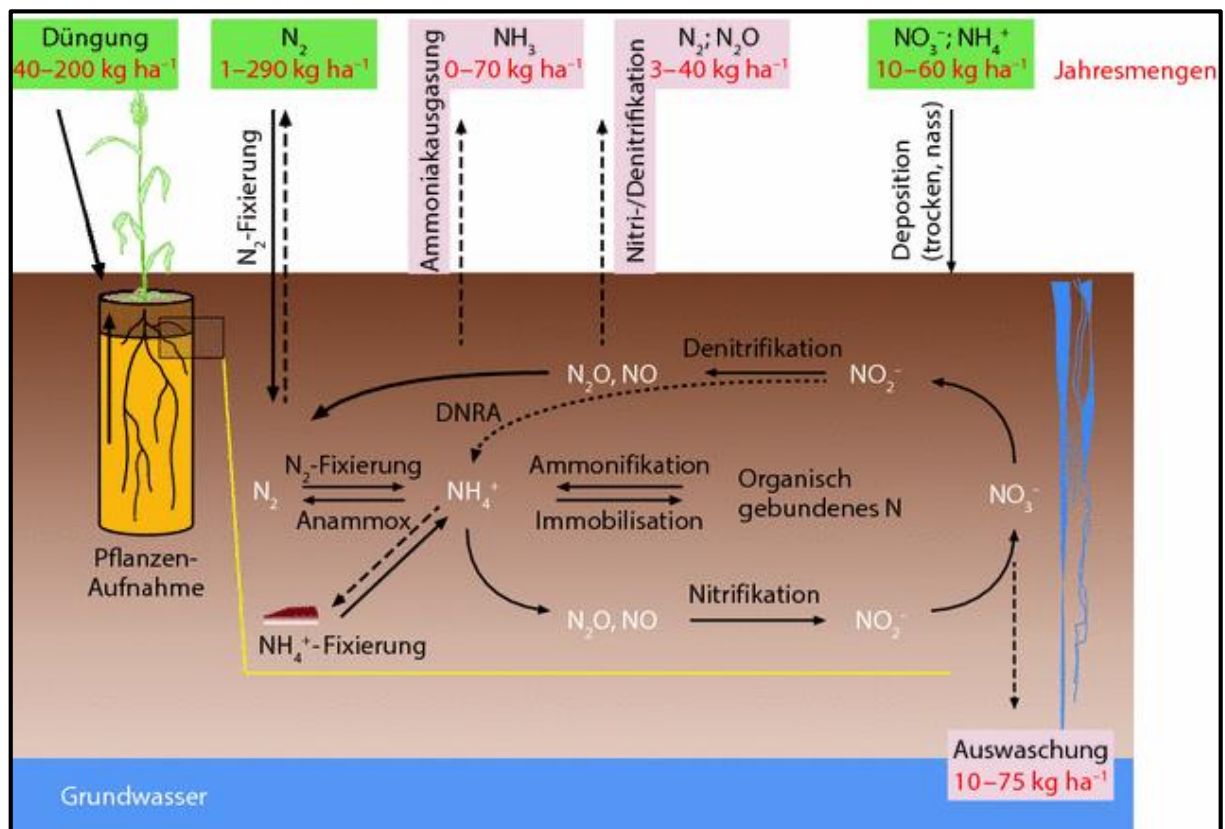


Abbildung 1: Stickstoffkreislauf im Boden mit Angabe zu den Größenordnungen der N-Flüsse

(Quelle: Scheffer / Schachtschabel 2018; S. 519)

Der Eintrag von Stickstoff in den Boden über natürliche Pfade erfolgt unter anderen über Deposition. Hierbei lagern sich ammoniumhaltige Stäube auf den Pflanzen- und Bodenoberflächen ab. Durch Blitze und elektrische Entladungen kann so das N<sub>2</sub> oxidiert werden und als Salpetersäure oder salpetrige Säure in den Boden gelangen (nasse Deposition). Außerdem können industriell oder im Straßenverkehr freigesetzte Stickoxide mit den Regen aus der Atmosphäre ausgewaschen oder trocken deponiert werden.

In Deutschland betragen diese atmosphärischen Einträge durchschnittlich 28 kg/ha und Jahr, was für das Pflanzenwachstum allein jedoch nicht ausreichend wäre. Weitere natürliche N-Einträge sind die biologische N<sub>2</sub>-Bindung durch verschiedene Bakterienarten. Die Menge liegt hier bei 1 – 30 kg N/ha und Jahr und wird zum Teil begrenzt durch das Angebot an leicht zersetzbarer organischer Substanz im Boden sowie durch N-Düngung weiter reduziert. Durch symbiotische N<sub>2</sub>-Bindung kann zudem je nach Bedingungen 20 – 350 kg N/ha eingebracht werden. Hierbei gehen Rhizobien (Knöllchenbakterien) eine Symbiose mit Leguminosen ein. Neben den natürlichen Pfaden kann Stickstoff auch durch mineralische oder organische Düngung in den Boden eingebracht werden. Durch das aufwendige Haber-Bosch-Verfahren werden mineralische Düngemittel aus Luftstickstoff hergestellt.

[Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 519-520]

Die N-Mineralisierung beschreibt den Prozess der Umwandlung von organisch gebundenen Stickstoff in Ammonium oder Nitrat durch Mikroorganismen. Diese führt zu einer jährlichen Freisetzung von 0,2 – 2 % des insgesamt im Boden gespeicherten Stickstoff in mineralische Form. Je nach N-Vorrat und Abbaubedingungen können das 10 – 220 kg N/ha und Jahr sein. Als Ammonifikation wird die spezifische Umwandlung von organischen N-Verbindungen in NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Ionen bezeichnet. Hierbei werden Makromoleküle wie z.B. Proteine durch eine Reihe extrazellulärer, hauptsächlich mikrobieller Enzyme in kleinere Bestandteile (Aminosäuren) zerlegt. Durch die Desaminisierung werden schließlich NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Ionen frei. Dieser Abbau dient den Mikroorganismen zur Deckung ihres Energie- und Stoffwechselbedarfs. Je nach Bodenbeschaffenheit werden hierfür jedoch weitere organische Substanzen wie Kohlenhydrate als Energielieferanten benötigt. Die freigesetzte NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Ionen gehen aus der Bodenlösung in die adsorbierte Form über oder werden in Nitrat umgewandelt (=Nitrifikation). Außerdem können diese NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Ionen in silicatreichen Böden durch Tonminerale fixiert werden. Bei der Nitrifikation oxidiert durch Mikroorganismen Ammonium zu Nitrat. Dieser Prozess erfolgt in zwei Schritten, wobei die erste Reaktion in mehreren Teilschritten mit der Bildung von NO und N<sub>2</sub>O ablaufen kann. Diese Reaktionen liefern den Mikroorganismen Energie. Sie sind exergonisch und benötigen dafür Sauerstoff. Auslöser der Reaktionen sind vor allem die aerob lebenden, chemoautotrophen Bakteriengattungen Nitrosomonas und Nitrobacter, welche miteinander vergesellschaftet auftreten. In bestimmten Organismen sind diese beiden Reaktionen auch in einer Zelle möglich. Dies wird als Comammox-Reaktion bezeichnet. Durch diese Nitrifikationsprozesse findet in den belüfteten Böden des gemäßigten Klimas eine schnelle Umwandlung von NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Ionen aus der Ammonifikation zu NO<sub>3</sub><sup>-</sup> statt, weshalb in diesen Böden i.d.R. wenig NH<sub>4</sub><sup>+</sup> vorzufinden ist. Lediglich bei niedrigeren Temperaturen unter 6 °C und schlechter Durchlüftung läuft die Ammonifikation schneller ab als die Nitrifikation.

Durch den Einsatz von Nitrifikationshemmern kann die Umwandlung von  $\text{NH}_4^+$  zu  $\text{NO}_2^-$  ebenfalls verzögert werden und das in adsorbierter Form gebundene  $\text{NH}_4^+$  bleibt länger stabil. Nitrifikationshemmer werden eingesetzt, um  $\text{N}_2\text{O}$ -Verflüchtigungen und Nitratauswaschungen zu reduzieren. [Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 524-525]

Der gegenläufige Prozess zur N-Mineralisierung ist die N-Immobilisation. Hierbei wird mineralischer Stickstoff von den Mikroorganismen aufgenommen und in der mikrobiellen Biomasse gespeichert. Dies führt dazu, dass der Stickstoff vorübergehend festgelegt und somit nicht unmittelbar pflanzenverfügbar ist. Dieser Vorgang wird auch als N-Sperre bezeichnet und geschieht häufig in Böden mit weiten C:N-Verhältnis ( $>25$ ) und beim Abbau von N-armer Streu (C:N-Verhältnis  $>60$ ). [Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 524]

Denitrifikation wird die Reduktion von Nitrat über Nitrit zu gasförmigen Stickoxiden ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) und molekularem Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) bezeichnet. Dieser Vorgang findet überwiegend bei einer hohen Wassersättigung des Bodens oberhalb 70 – 80 % des Gesamtporenvolumens und damit einhergehender eingeschränkter Durchlüftung. Beteiligte Bodenmikroorganismen dieses Prozesses zählen zu den Gattungen *Pseudomonas*, *Alcaligenes* u.a. Diese Organismen sind in der Lage, bei den o.g. Bedingungen sauerstoffhaltige N-Verbindungen anstelle von molekularem Sauerstoff als Elektronenakzeptoren zu verwenden. Hierbei benötigen sie zusätzlich leicht verfügbare Kohlenstoffquellen als Energiequellen. Dieser Kohlenstoff stammt v.a. aus der organischen Bodensubstanz. Der Vorgang der Denitrifikation findet hauptsächlich im Oberboden statt. Jedoch werden i.d.R. nur geringe Mengen der Denitrifikationsprodukte in die Atmosphäre transferiert. Förderliche Bedingungen für diese Reaktionskette ist eine gewisse Temperatur. Die Bildung von  $\text{N}_2$  beginnt bei etwa 5 °C und hat ihr Maximum bei über 50 °C. Durch eine mehrjährige hohe Stickstoffdüngung sowie die Zufuhr von leicht zersetzbarer organischer Substanz wie Gülle oder Gründüngung wird die mikrobielle Aktivität zusätzlich erhöht, was zu einem höheren Mineralisierungspotenzial und damit einhergehend zu einer höheren Denitrifikation führt. Der optimale pH-Wert hierfür liegt im Bereich 6 – 8. [Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 524-526]

Das Ziel in Agrarökosystemen sollte es sein, die Bilanz zwischen N-Zufuhr und N-Abfuhr durch die Ernte möglichst ausgeglichen zu halten. Jedoch ist Stickstoff nur schwierig effizient im Boden zu halten, da die Düngeneffizienz meist nur bei 50 – 60 % liegt. Das heißt, dass die Hälfte des applizierten Stickstoffes die Pflanzen nicht erreicht. Die Gründe hierfür liegen zum einen in der mikrobiellen Immobilisation, den Einbau von Stickstoff in die organische Bodensubstanz sowie den realen Stickstoffverlusten aus dem Ökosystem.

Diese Verluste bedeuten zum einen finanzielle Verluste für den Landwirt, andererseits auch Umweltbelastungen durch Austräge über die Gasphase, Auswaschung und Erosion. [Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 527]

Gasförmige Verluste entstehen meist in Form von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) bei der Ausbringung von ammoniumhaltigen Düngern wie Gülle und anderen organischen Düngern sowie bei Ammoniumsalzen oder Harnstoff auf neutralen bis alkalischen Böden. Ammonium beginnt hierbei zu Ammoniak zu dissoziieren, welches ausgast. Umso höher dabei der pH-Wert ist, desto intensiver läuft dieser Prozess ab. Diese Verluste können u.U. 25 – 40 % des ausgebrachten  $\text{NH}_4\text{-N}$  ausmachen, was bis zu 70 kg N/ha und Jahr entspricht. Die Höhe der Verluste nehmen bei zunehmender Temperatur, erhöhter  $\text{NH}_4^+$ -Konzentration in der Bodenlösung, abnehmenden Adsorptionsvermögen des Bodens und durch weitere bodenphysikalische und meteorologische Faktoren weiter zu. Durch die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern auf den Boden und nicht auf die Blattoberfläche, eine bandförmige Applikation sowie die zeitnahe Einarbeitung des Düngers in den Boden können diese N-Verluste reduziert werden. Die Stickstoffverluste über die Denitrifikation sind indes nur schwierig zu erfassen und liegen schätzungsweise bei 30 – 30 kg N/ha und Jahr. In tonreichen Böden mit einer dichten Lagerung sind sie jedoch höher.

[Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 528]

Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) gilt als relevantes Spurengas für den Treibhauseffekt und entsteht als Zwischenprodukt bei der mikrobiellen Denitrifikation sowie bei der mikrobiellen Nitrifikation. Verluste dessen entstehen durch den Gasaustausch vom Boden in die Atmosphäre.  $\text{N}_2\text{O}$  entsteht häufig unter nicht wassergesättigten Bedingungen und gleichzeitig stark erniedrigten Sauerstoff-Partialdrücken im Boden, aber auch beim Wechsel von Regen- und Trockenphasen. Mit einem erhöhten N-Düngungsniveau steigt die Emission von Lachgas. Ein hoher Gehalt an leicht zersetzbarer organischer Substanz im Boden und pH-Werte von 5,5 – 6,5 fördern die N-Verluste als Lachgas ebenfalls.

[Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 529]

Mit dem Sickerwasser geht ebenfalls Stickstoff, überwiegend in Form von Nitrat, aus dem Boden verloren. Auf sandigen und durchlässigen Böden kann Stickstoff auch in Form von Ammonium und in löslichen organischen Verbindungen ausgewaschen werden. Diese N-Auswaschung ist abhängig von der Sickerwassermenge und der Nitrat-Konzentration. Die Menge an Sickerwasser ist abhängig von der Höhe und der Intensität der Niederschläge, der Wasserspeicherkapazität des Bodens sowie dem Wasserverbrauch der Pflanzen. Durch eine ganzjährige Begrünung kann die Sickerwassermenge weiter verringert werden.

In den tiefgründigen Lössböden der ostdeutschen Trockengebiete sind indes N-Überschüsse noch mehrere Jahre aufgrund der geringen Sickerwasserbildung nutzbar.

Im Herbst findet häufig eine hohe N-Mineralisierung aus den Ernteresten statt, was zu hohen Nitratgehalten und damit auf sandigen Böden zu einer starken Nitrat Auswaschung während des Winters führt. Durch den Anbau von Wintergetreide, Winterraps oder Zwischenfrüchten kann diese Nitrat-Auswaschung deutlich verringert werden. Die Verluste durch Auswaschung betragen in Deutschland zwischen 10 – 75 kg N/ha und Jahr. Nitrat-Einträge in Oberflächengewässer und damit einhergehende Eutrophierungsvorgänge entstehen durch lateral abfließendes Grundwasser, Drainage sowie oberflächliche Abschwemmung und Bodenerosion. Der Nitratreintrag aus diesen Quellen beträgt 65 – 86 % des gesamten N-Eintrages in Fließgewässern und ca. 73 – 76 % des Eintrages in die deutschen Teile der Nord- und Ostsee. [Scheffer / Schachtschabel, 2018; S. 530-532]

### 2.3 Jahresverlauf und Einflussfaktoren der Stickstoffmineralisation

Die Höhe der N-Mineralisierung unterliegt im Verlauf des Jahres teils großen Schwankungen und wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst.

Die Temperatur beeinflusst maßgeblich alle physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse. So auch die Aktivität der Bodenorganismen. Ist die N-Mineralisierungsrate bei Temperaturen um 0 °C sehr gering, erhöht sie sich mit steigender Temperatur und erreicht ihr Maximum bei ca. 50 °C.

Von großer Bedeutung für die Intensität der N-Mineralisierung ist der pH-Wert. Das Optimum liegt hier bei 5 – 8. Bei Werten über oder unter diesem Bereich nimmt die Aktivität der Mikroorganismen ab.

Die Bodenfeuchte hat ebenfalls Einfluss auf die Mineralisierungsprozesse von Stickstoff im Boden. Zwar laufen diese über einen weiten Bereich unabhängig vom Wassergehalt des Bodens ab, jedoch werden sie stark gehemmt bei Wassersättigung bzw. Staunässe sowie Trockenheit. Durch den Wechsel von Trockenphasen und feuchten Phasen wird die Mineralisierung zusätzlich gefördert.

Das Verhältnis von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden sowie der zugeführten organischen Substanz ist entscheidend dafür, wie viel Stickstoff mineralisiert wird. Bei einem engen C:N-Verhältnis findet eine schnelle Mineralisierung statt, während diese bei weiten C:N-Verhältnis deutlich verlangsamt wird und unter Umständen eine N-Bindung möglich ist.

[Amlinger et al., 2003; S. 17-18]

In Tabelle 1 wird die N-Dynamik in Abhängigkeit vom C:N-Verhältnis des Bodens deutlich:

Tabelle 1: N-Dynamik des Bodens in Abhängigkeit vom C:N-Verhältnis

Grünland C:N-Verhältnis	Ackerland C:N-Verhältnis	Trend
< 7,5	< 8	N-Freisetzung deutlich
7,5 – 8,5	8 – 9	N-Freisetzung
8,5 – 9,5	8 – 11	Ausgeglichen
9,5 – 10,5	11 – 14	N-Bindung
> 10,5	> 14	N-Bindung deutlich

(Quelle: Husz, 1999 in Amlinger et al. – S.18)

Auch die Bodenart und der Bodentyp sind entscheidend dafür, in welchen Maße Stickstoff mineralisiert wird. So ist die N-Mineralisationsrate auf sandige Böden zum Teil 1,5 – 2-mal so hoch wie auf Tonböden. Dies ist damit zu begründen, dass bei höheren Tongehalten das Porenvolumen und dementsprechend das Sauerstoffangebot sinkt und tonige Böden im Frühjahr zudem langsamer erwärmen. Amberger (1983) gibt für die verschiedenen Bodentypen folgende jährliche Mineralisierungsraten an:

Podsole und N-arme Braunerden: 20 – 50 kg N/ ha

Parabraunerden: 50 – 75 kg N/ha

N-reiche Braunerden, Gleye, Pseudogleye: 60 – 90 kg N/ha

Schwarzerden: 75 – 160 kg N/ha

[Amlinger et al., 2003, S.18]

Die organische Düngung spielt zudem eine große Rolle bei der Intensität der Stickstoffmineralisierung. Durch den regelmäßigen Einsatz von organischen Düngemitteln steht den Bodenorganismen ein höheres Angebot an stickstoffhaltiger, organischer Substanz zur Verfügung, was mittel- und langfristig die Grundlage für eine hohe Mineralisierung bildet. [Peter, 2020]

Als Folge des Einflusses der o.g. Faktoren ergeben sich im Verlauf des Jahres Zeiträume, in denen mit einer stärkeren Mineralisation von Stickstoff gerechnet werden kann und dementsprechend auch Zeiträume, in denen weniger Stickstoff aus der organischen Bodensubstanz mineralisiert wird.



Abbildung 2 zeigt den typischen Jahresverlauf der N-Mineralisation im Boden ohne organische Düngung sowie mit regelmäßiger organischer Düngung:

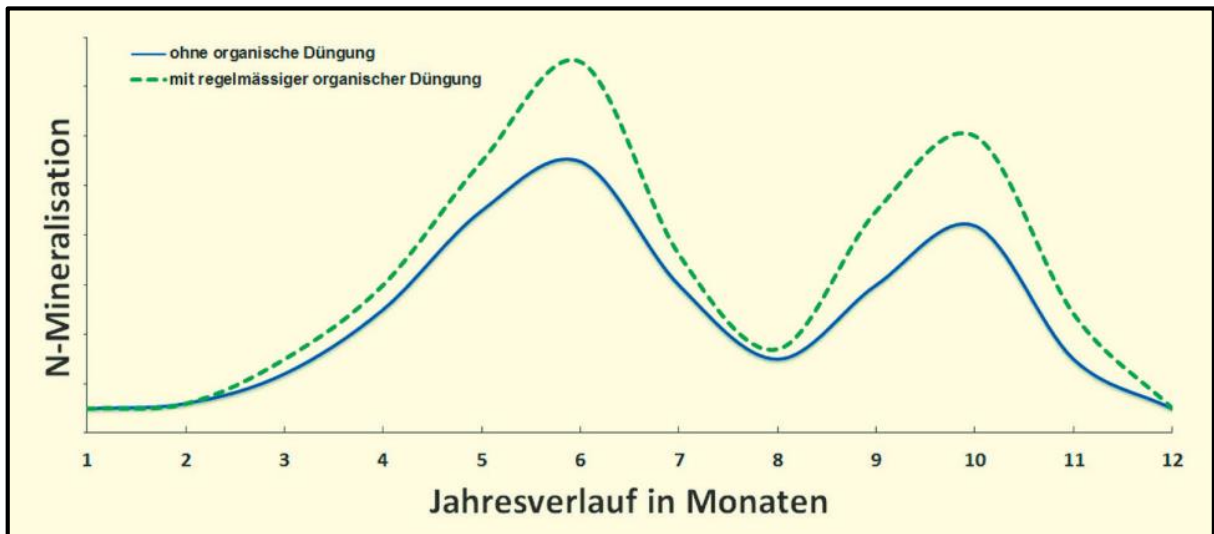


Abbildung 2: Jahresverlauf der N-Mineralisation im Boden

(Quelle: Peter, M. in RBZ – 2020)

Wie Abbildung 2 verdeutlicht, ist die erste Spitze der Mineralisierung im späten Frühjahr – beginnenden Frühsommer zu erwarten. Dies ist zu begründen durch die steigende Temperatur und der damit verbundenen Verringerung der Bodenfeuchte und dementsprechenden Zunahme des Sauerstoffgehaltes des Bodens. Da es anschließend im Hochsommer zu trocken ist, nimmt die Mineralisierung wieder ab und erreicht im Herbst eine zweite Spitze durch die Wiederbefeuchtung des Bodens. Aufgrund der sinkenden Temperaturen und der oft nassen Bedingungen ist die Mineralisationsrate im Winter i.d.R. sehr gering.

Da der freigewordene Stickstoff in der ersten Mineralisationsspitze durch die angebauten Kulturen im Normalfall aufgenommen und verwertet wird, ist diese als wenig problematisch anzusehen. Bei der zweiten Spitze ist das allerdings anders. Da im Herbst u.U. kein ausreichender Pflanzenbestand vorhanden ist, besteht die Gefahr von Stickstoffverlusten durch Auswaschung und damit einhergehenden Nitratbelastung des Grundwassers. Aus diesem Grund ist ein möglichst geringer Reststickstoffgehalt zum Vegetationsende anzustreben. [Peter, 2020]

## 2.4 Einfluss der Bodenbearbeitung auf die N-Mineralisierung

Da die Bodenbearbeitung die unter Kapitel 2.3 genannten Faktoren direkt beeinflusst, wirkt sich diese auch auf die Stickstoffmineralisationsrate aus.

Die Höhe Mineralisationsrate ist hierbei abhängig vom angewendeten Bodenbearbeitungsverfahren, der Tiefe und der Häufigkeit der Bearbeitung.

Bei den Verfahren unterscheidet man zwischen der wendenden (konventionellen) und der nichtwendenden (konservierenden) Bodenbearbeitung wobei bei der wendenden Bodenbearbeitung eine stärkere Mineralisation von Stickstoff zu erwarten ist. Als Gründe hierfür ist einerseits die gleichmäßige Verteilung der Nährstoffe und organischen Substrate im Oberboden zu nennen. Andererseits aber auch die verbesserte Zufuhr von Sauerstoff im Boden. Des Weiteren erwärmen sich intensiv bearbeitete Böden i.d.R. schneller als unbearbeitete, was ebenfalls durch die bessere Durchlüftung des Bodens zu begründen ist. Zudem weisen bearbeitete Böden meist eine dunklere Färbung aufgrund geringerer organischer Rückstände auf und erwärmen sich so schneller durch die Sonneneinstrahlung. So liegt die Rate der Mineralisation bei der wendenden Bodenbearbeitung ca. 150 % höher als bei der konservierenden Bodenbearbeitung. (Epperlein, 2002) [Krawutschke, 2007]

Bei der konservierenden Bodenbearbeitung wird der Boden zwar gelockert, jedoch nicht gewendet, weshalb auch von reduzierter Bodenbearbeitung gesprochen wird. Hierdurch konzentrieren sich die Bodenmikroorganismen und deren Nahrungsressourcen in den oberen Bodenschichten von 0 – 10 cm. [Scheffer & Schachtschabel 2018, S. 143]

Wie Abbildung 3 zeigt, ist die Häufigkeit der Bearbeitung entscheidend für die N-Mineralisierung im Boden:

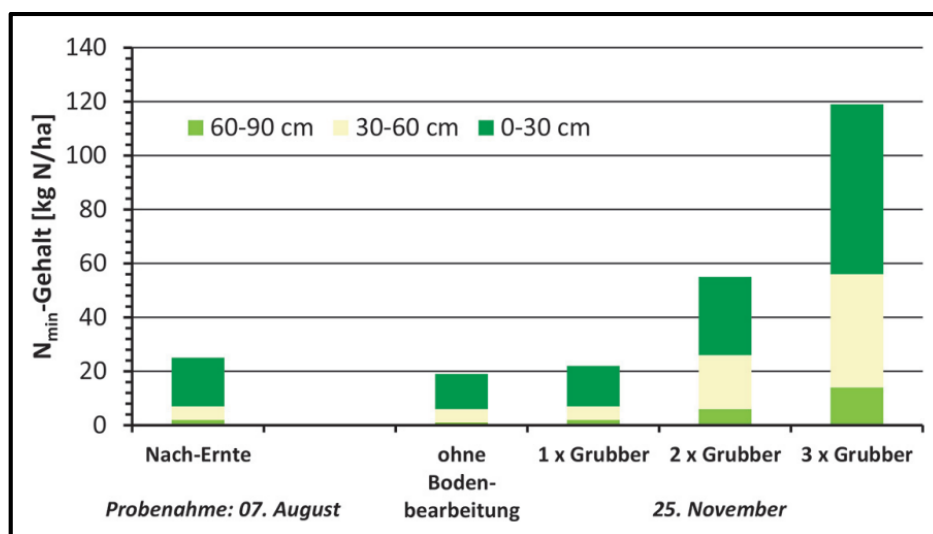


Abbildung 3: Einfluss der Bodenbearbeitungshäufigkeit nach der Rapsernte auf die Herbst Nmin-Gehalte

[Quelle: Peter in RBZ, 2020]

Da jede mechanische Bearbeitung die Mineralisierung anregt, steigt somit die Mineralisationsrate mit jeder Bearbeitung. Erkennbar ist außerdem, dass der Hauptanteil des Stickstoffs in den oberen 30 cm, welche i.d.R. auch bearbeitet werden, zu finden ist. Die  $N_{\min}$ -Gehalte können so unter günstigen Bedingungen auf über 100 kg N/ha bei mehrmaliger Bearbeitung ansteigen (Peter, 2020)

Auch das landwirtschaftliche Technologiezentrum Augustenberg führte im Jahr 2017 einen Versuch durch, welcher sich mit der Stickstoffmineralisierung durch Bodenbearbeitung beschäftigte. Hier wurden die Anbausysteme Pflug-, Mulch- und Direktsaat unter anderem auch auf die Nitratgehalte im Boden zur Vegetationsruhe untersucht. Trotz drastischer Unterschiede in der Bodenbearbeitungsintensität sind auch hier die Differenzen marginal, was die Ergebnisse dieses Versuches widerspiegelt, wie Abbildung 4 darstellt.

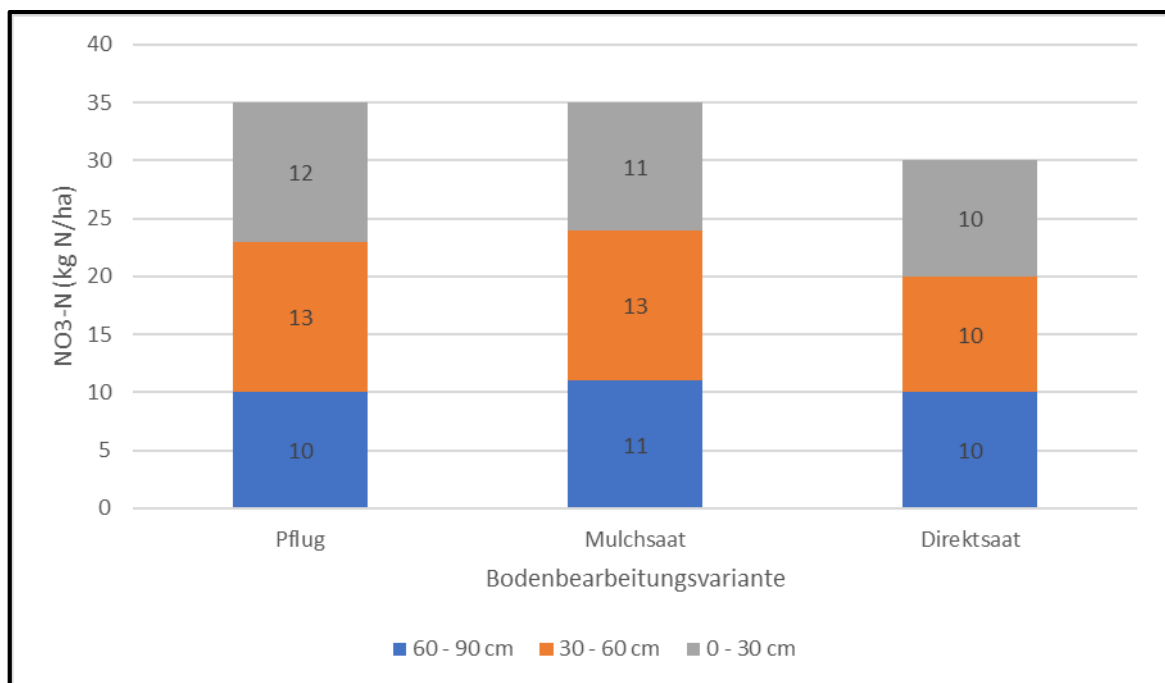


Abbildung 4: NO<sub>3</sub>-N-Gehalt der Winterungen bei den Bodenbearbeitungsvarianten im Winter (LTZ Augustenberg)

[Quelle: LTZ Augustenberg, 2017]

Ein weiterer Versuch, welcher sich ebenfalls mit dieser Thematik auseinandergesetzt hat, wurde am Inforama Rütti in Zollikofen in der Schweiz durchgeführt. Hier wurde bereits 1994 ein Demo-Dauerversuch angelegt, der Direktsaat und Pflugsaat über mehrere Jahre gegenüberstellt.

Die folgende Abbildung 5 zeigt die N<sub>min</sub>-Werte unter verschiedenen Kulturen Mitte November in Abhängigkeit des jeweiligen Anbausystems:

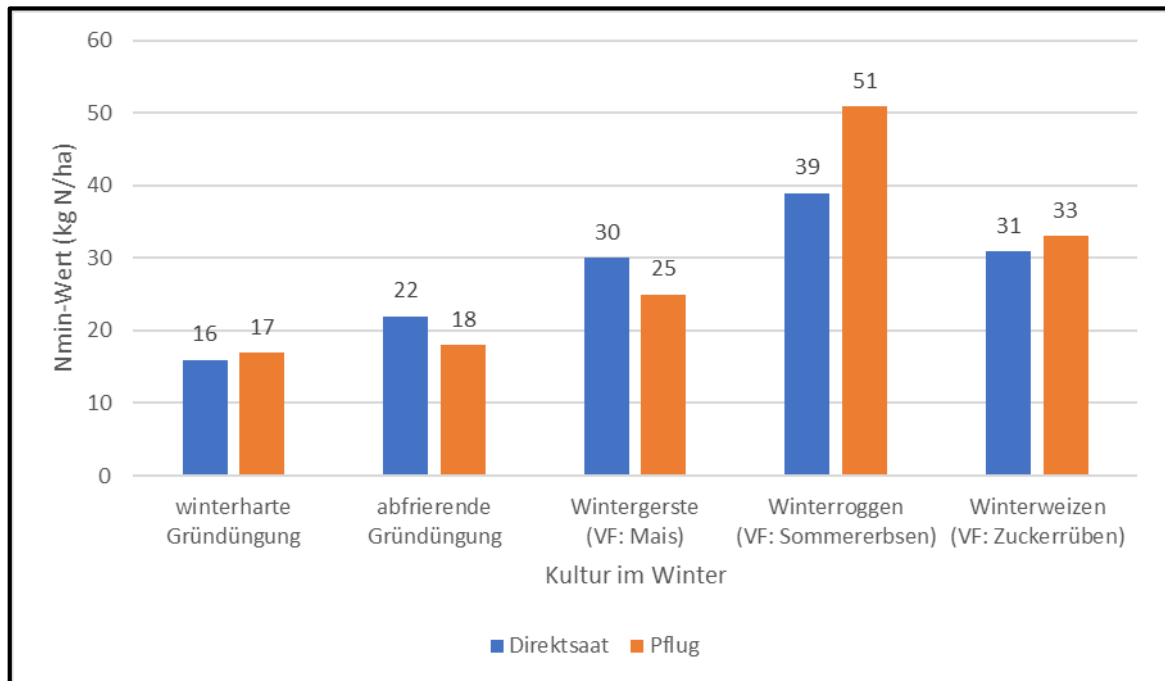


Abbildung 5: N<sub>min</sub>-Werte nach Kultur und Anbausystem 1999 - 2005 - Dauerversuch Rütli

[Quelle: AgrarForschung, 2006]

Lediglich bei dem Winterroggen nach den Sommererbsen sind größere Differenzen zwischen den Anbausystemen erkennbar. Bei den restlichen Kulturen sind die Unterschiede eher gering und sowohl bei der Pflugvariante als auch bei der Direktsaat aus.

## 2.5 Probleme bei der N-Mineralisierung im Herbst

Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, ist im Jahresverlauf während dem Herbst mit einem Anstieg der N-Mineralisationsrate zu rechnen, welche aus verschiedenen Gründen negativ ist. Stickstoff wird zu diesem Zeitpunkt von den Pflanzen nicht mehr aufgenommen und ist gefährdet über Winter in das Grundwasser ausgewaschen zu werden. Das belastet einerseits die Qualität des Grundwassers, andererseits bedeutet es finanzielle Verluste für den Landwirt, da dieser Stickstoff den Pflanzen später nicht mehr zur Verfügung steht. Deshalb sollte das Ziel des Landwirts sein, diesen Mineralisationsschub und die daraus resultierenden N<sub>min</sub>-Gehalte zum Ende der Vegetation möglichst gering zu halten. Auch die Politik sieht dahingehend Handlungsbedarf, um Grund- und Oberflächengewässer nachhaltig in einen guten Zustand zu erhalten bzw. zu überführen.

Dies ist Ziel der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie von 2000. Darin heißt es unter anderem: „Die ordnungsgemäße Landbewirtschaftung ist die Grundlage einer flächendeckenden Natur- und Gewässer schonenden Bodennutzung“ (Verband der Landwirtschaftskammern, 2007)

Laut Umweltbundesamt überschreiten deutschlandweit ca. 17 % der Messstellen des EUA-Grundwassermessnetzes den Schwellenwert von 50 mg/l Nitrat und sind somit in einem schlechten chemischen Zustand. [UBA, 2022] Für den Großteil der Nitratreinträge ist nach Angaben des UBA unter anderen die Landwirtschaft verantwortlich. Um diesen Umstand zu verbessern, regeln zahlreiche gesetzliche Vorschriften die Rahmenbedingungen für einen effektiven Gewässerschutz im Landwirtschaftssektor. Neben der Düngeverordnung stellen auch das Bundes-Bodenschutzgesetz sowie das Pflanzenschutzgesetz u.a. wesentliche gesetzliche Regelungen mit Bezug zum Gewässerschutz für die Landwirte dar (LfULG). Neben den gesetzlichen Vorgaben erhalten Landwirte durch spezielle Förderprogramme zusätzliche Anreize, besondere Maßnahmen, wie beispielsweise Streifen-/ Direktsaat oder überwinternde Stoppeln, durchzuführen und so aktiv zum Gewässerschutz beizutragen. Weitere wichtige Maßnahmen zur Verringerung von Nitratreinträgen durch Auswaschung in das Grundwasser sind:

- der Anbau von Zwischenfrüchten
- die Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität
- die richtige Terminierung der Bodenbearbeitung
- der Anbau von Kulturen mit hohem N-Bedarf im Herbst nach Kulturen, welche einen hohen Reststickstoffgehalt erwarten lassen
- eine an die Bedingungen und Standort angepasste Düngung
- entsprechende Berücksichtigung der mit organischen Düngern applizierten Nährstoffe

[LfULG]

## 2.6 Einfluss der Bodenbearbeitungsintensität auf die Ertragsleistung

Mit zunehmender Bodenbearbeitungsintensität steigt auch die Ertragsfähigkeit. Zu begründen ist das neben einer höheren Stickstoffmineralisierungsrate auch mit einer höheren Unkrautkonkurrenz und einer dementsprechend schlechteren Etablierung der Hauptkulturen bei Verfahren mit reduzierter Bodenbearbeitung. Des Weiteren zeigen Verfahren mit einer höheren Intensität der Bodenbearbeitung i.d.R. bessere Feldaufgänge. Jedoch ist ebenfalls zu sagen, dass die Kulturen unterschiedlich stark auf die Bodenbearbeitungsintensität reagieren.

Während die Unterschiede beispielsweise bei Weizen eher gering sind, sind bei Zuckerrüben die Erträge durch eine Reduktion der Bodenbearbeitung stärker rückläufig. [Möller, 2018]

Ein Versuch des LTZ Augustenberg hat sich ebenfalls mit dieser Thematik auseinandergesetzt. Die Ergebnisse dieses Versuches zeigt Abbildung 6:

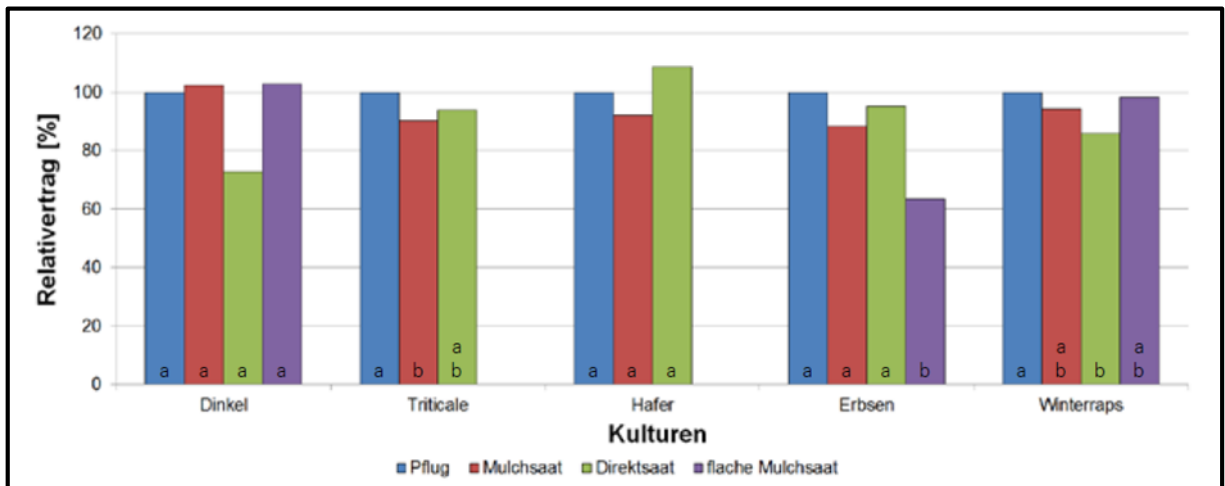


Abbildung 6: Relativerträge verschiedener Kulturen - Versuch LTZ Augustenberg

(Quelle: LTZ Augustenberg, 2017)

Es zeigt sich, dass die Erträge in diesem Versuch bei einer intensiveren Bodenbearbeitung i.d.R. etwas höher sind als bei der Direktsaat. Insgesamt sind die Ertragsunterschiede zwischen den Varianten jedoch eher gering und auch zwischen den Kulturen mehr oder weniger stark ausgeprägt.

## 2.7 Einfluss reduzierter Bodenbearbeitung auf die Ökonomie

Durch eine Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität kann sowohl der Arbeitszeitbedarf als auch der Maschinenbedarf in landwirtschaftlichen Betrieben reduziert werden. Hierdurch können die Kosten je ha verringert und die damit verbundenen Ertragseinbußen kompensiert werden.

Durch das drohende Verbot des Wirkstoff Glyphosat und einer damit einhergehenden Zunahme von Bodenbearbeitungsgängen zur Unkrautbekämpfung ist demzufolge von höheren Arbeitserledigungskosten zu rechnen. Die folgende Abbildung 7: Mehrkosten des Glyphosatverzichtes Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse einer Berechnung Schultes, welcher für verschiedene Betriebsmodelle die Mehrkosten durch den Glyphosatverzichtes simuliert hat.

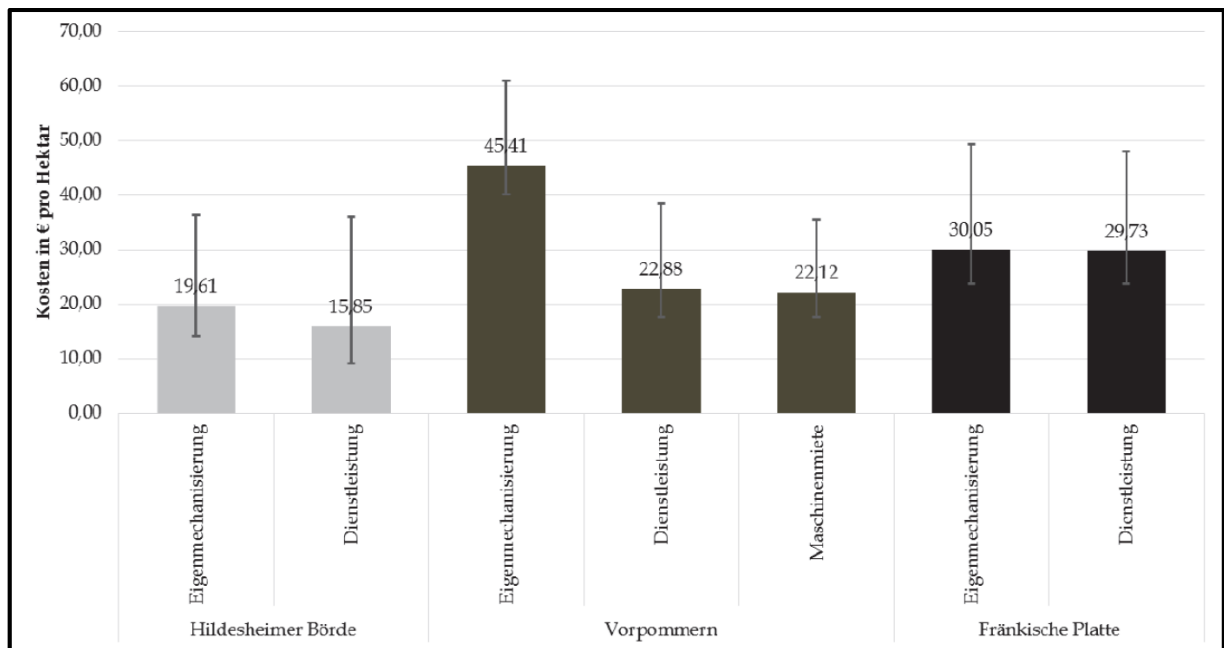


Abbildung 7: Mehrkosten des Glyphosatverzichtes

(Quelle: Schulte et al., 2016)

Es ist zu erkennen, dass abhängig von der Lage und der Mechanisierungsstrategie der Betriebe die Kosten je ha um ca. 15 – 45 € steigen. Die Erhöhung des Arbeitszeitbedarfs wird durch Schulte innerhalb dieser Beispielbetriebe um 33 h/Jahr bis zu 175 h/Jahr angegeben.

Durch die i.d.R. geringere Flächenleistung der Bodenbearbeitung im Vergleich zur Behandlung mit einem Totalherbizid werden bestehende Arbeitsspitzen zusätzlich verstärkt, da der Zeitpunkt der Bearbeitung in diese fallen. Zudem sind die Betriebe stärker abhängig von den vorherrschenden Bedingungen (Witterung, Befahrbarkeit, organische Masse etc.) als dies bei der chemischen Variante der Fall ist, was die Zeitfenster für die Bodenbearbeitung weiter einschränkt.

Des Weiteren ist zu bedenken, dass die Maschinenausstattung für die zusätzlichen Arbeitsgänge in vielen Betrieben nicht bzw. nicht ausreichend vorhanden ist und somit zusätzliche Investitionen notwendig sind.

[Schulte et al., 2016]

## 2.8 Unkrautunterdrückung mit Hilfe von Zwischenfrüchten

Die Regulierung von Unkräutern ist ein wichtiger positiver Aspekt jeder Bodenbearbeitung. Doch auch der Anbau von Zwischenfrüchten kann eine Möglichkeit sein, Unkräuter wirkungsvoll zu unterdrücken. Das ist zum einen mit der Konkurrenz um Wasser, Nährstoffe und Licht zu begründen, andererseits aber auch mit eventuellen allelopathischen Effekten zu begründen. Unter Allelopathie versteht man eine zwischenartlich vermittelte, meist hemmende Wirkung einer Pflanze auf die Entwicklung einer anderen. [Tschuy, F. et al., 2014]

Grundlage für die effektive Unkrautunterdrückung von Zwischenfrüchten ist jedoch ein möglichst dichter Bestand dieser. Hierfür ist die termingerechte Aussaat mit einem möglichst guten Saatbett und exakter Saatgutablage entscheidend. [Kolbe et al., 2004]

So kann ein zügiger Feldaufgang mit einer guten Jugendentwicklung der Zwischenfrüchte sichergestellt werden. Weiterhin ist die Wahl der richtigen Zwischenfrucht entscheidend für die Konkurrenzkraft gegenüber Unkräutern. Ausschlaggebend für das Unkrautunterdrückungsvermögen ist eine möglichst schnelle ganzflächige Bodenbedeckung durch die Zwischenfrüchte, die durch die Auswahl von Kulturen mit einer zügigen Jugendentwicklung erreicht wird. Hier ist jedoch darauf zu achten, dass es innerhalb der Fruchtfolge nicht zu Konflikten mit angebauten Kulturpflanzen hinsichtlich Krankheiten und Schädlingen kommt oder die Zwischenfrucht in den Folgekulturen nicht selbst zum Unkrautproblem werden. [LLH Hessen, 2020]



Die Tabelle 2 zeigt eine Auswahl von Zwischenfruchtarten, deren Unkrautunterdrückungsvermögen sowie die Hauptkulturen, bei denen die Art nicht geeignet ist:

Tabelle 2: Zwischenfruchtarten mit Einschätzung Unkrautunterdrückungsvermögen und Fruchtfolgeeignung

Zwischenfruchtart	Unkrautunterdrückungs- vermögen	Nicht geeignet in Fruchtfolgen mit
<b>Buchweizen</b>	gut	Rüben
<b>Ölrettich</b>	sehr gut	Raps
<b>Gelbsenf</b>	sehr gut	Raps, Kartoffeln
<b>Sonnenblumen</b>	gut	Raps
<b>Ramtillkraut</b>	sehr gut	(Raps)
<b>Phacelia</b>	sehr gut	Kartoffeln, (Rüben)
<b>Rauhafer</b>	sehr gut	-
<b>Kleearten</b>	mittel	Leguminosen, Raps

(Quelle: eigene Darstellung nach LLH Hessen, 2020)

Neben den Unkrautunterdrückungsvermögen bieten Zwischenfrüchte zahlreiche Vorteile, die einen Anbau und die damit verbundenen Aufwendungen durchaus rechtfertigen:

- Zufuhr organischer Substanz, somit Humusaufbau
- Verbesserung bodenphysikalischer Eigenschaften
- Förderung des Bodenlebens und Verbesserung der biologischen Aktivität
- Schutz vor Wind- und Wassererosion
- Biologische Bekämpfung von Schädlingen (z.B. Rübennematoden)
- Speicherung von Nährstoffen und  
Erhöhung der Nährstoffverfügbarkeit der Folgekultur
- Reduktion von Phosphatverlusten durch Eutrophierung und Nitratauswaschung
- Lieferung von hochwertigen Wirtschaftsfutter und Biomasse [Kolbe et al., 2004]

### **3. Material und Methoden**

#### **3.1 Standort**

Die Anlage des Versuches erfolgt auf zwei Schlägen. Beide Schläge befinden sich in Niedersachsen in der Gemeinde Königslutter am Elm im Landkreis Helmstedt. Die Schläge liegen etwa 4 km Luftlinie voneinander entfernt.

Der Schlag „Großer Plan“ gehört zum Landwirtschaftsbetrieb Fromme und liegt etwa 1 km nordwestlich der Ortschaft Glentorf auf einer Höhe von 102 m ü. NN. Der vorherrschende Bodentyp ist eine Pararendzina. Die Bodenklasse wird als lehmiger Sand bis stark sandiger Lehm angegeben, welcher diluvial bzw. durch Verwitterung entstanden ist. Die Ackerzahl liegt zwischen 47 – 55.

Der zweite Schlag „Franke Weide“ wird von dem Landwirtschaftsbetrieb Bese bewirtschaftet. Dieser ist ca. 1 km südöstlich der Ortschaft Rotenkamp gelegen auf einer Höhe von 97 m ü. NN. Der hier vorherrschende Bodentyp ist Gley- bzw. Podsol-Braunerde. Als Bodenklasse liegt lehmiger Sand bis stark sandiger Lehm vor, welcher diluvial entstanden ist. Die Ackerzahl liegt zwischen 44 – 58.

[Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)]

Einen Überblick der Merkmale der Versuchsflächen ist in Tabelle 3 zusammengefasst:

Tabelle 3: Standorteigenschaften der Versuchsschläge

	<b>Schlag „Großer Plan“</b>	<b>Schlag „Franke Weide“</b>
<b>Betrieb</b>	LWB Fromme	LWB Bese
<b>Höhe</b>	102 m ü. NN	97 m ü. NN
<b>Bodentyp</b>	Pararendzina	Gley-Braunerde Podsol-Braunerde
<b>Bodenklasse</b>	sL4DV / SL4D	SL3D / IS4D
<b>Ackerzahl</b>	47 – 55	44 – 58
<b>Einstufung Bodenfruchtbarkeit/ Ertragsfähigkeit</b>	mittel – hoch	gering
<b>Effektive Durchwurzelungstiefe</b>	7 – <9 dm (mittel) - $\geq 11$ dm (sehr hoch)	7 – <9 dm (mittel)
<b>nFK des effektiven Wurzelraumes</b>	>90 – 140 mm (mittel)	>90 – 140 mm (mittel)
<b>Pflanzenverfügbares Bodenwasser</b>	100 – <150 mm (gering)	100 – <150 mm (gering)
<b>Sickerwasserrate</b>	>150 – 200 mm /Jahr	>150 – 200 mm /Jahr
<b>Standörtliches Verlagerungspotenzial (Austauschhäufigkeit des Bodenwassers)</b>	0,7x pro Jahr (sehr gering) – 1,0-1,5x pro Jahr (mittel)	1,5-2,5x pro Jahr (groß)
<b>Denitrifikationspotenzial</b>	Gering (-20 kg N/ha und Jahr)	Gering (-20 kg N/ha und Jahr)
<b>Potenzielle Nitratkonzentration 2016</b>	75 – 100 mg/l	50 – 75 mg/l (bis 100-150 mg/l)

Quelle: nach NIBIS Kartenservers (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG))

### 3.2 Klima und Witterung

Die Versuchsstandorte liegen räumlich nah beieinander. Somit ist von einer ähnlichen Witterung auszugehen. Die Standorte können in warm-gemäßigtes, humides Klima eingeordnet werden.

Die Betrachtung der klimatischen Rahmenbedingungen der Versuchsschläge wurde anhand der Daten der nächstgelegenen Wetterstation Helmstedt-Emmerstedt ermittelt. Diese Station liegt auf einer Höhe von 110 m ü. NN und befindet sich etwa 15 km entfernt von den Schlägen, weshalb die Werte von der tatsächlichen Witterung an den Standorten abweichen können. Die langjährigen Mittelwerte sind für den Zeitraum von 1991 bis 2020 angegeben. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei etwa 9,8 °C, die mittlere Niederschlagsmenge beträgt 588 mm. Regenreichste Monate sind der Juli und August, der Februar (36 mm) und April (35 mm) sind die niederschlagsärmsten Monate.

Abbildung 8 zeigt die langjährigen Mittelwerte des Niederschlages und der Temperatur sowie die gemessenen Werte im Zeitraum des Versuchs von August 2020 bis Juli 2021:

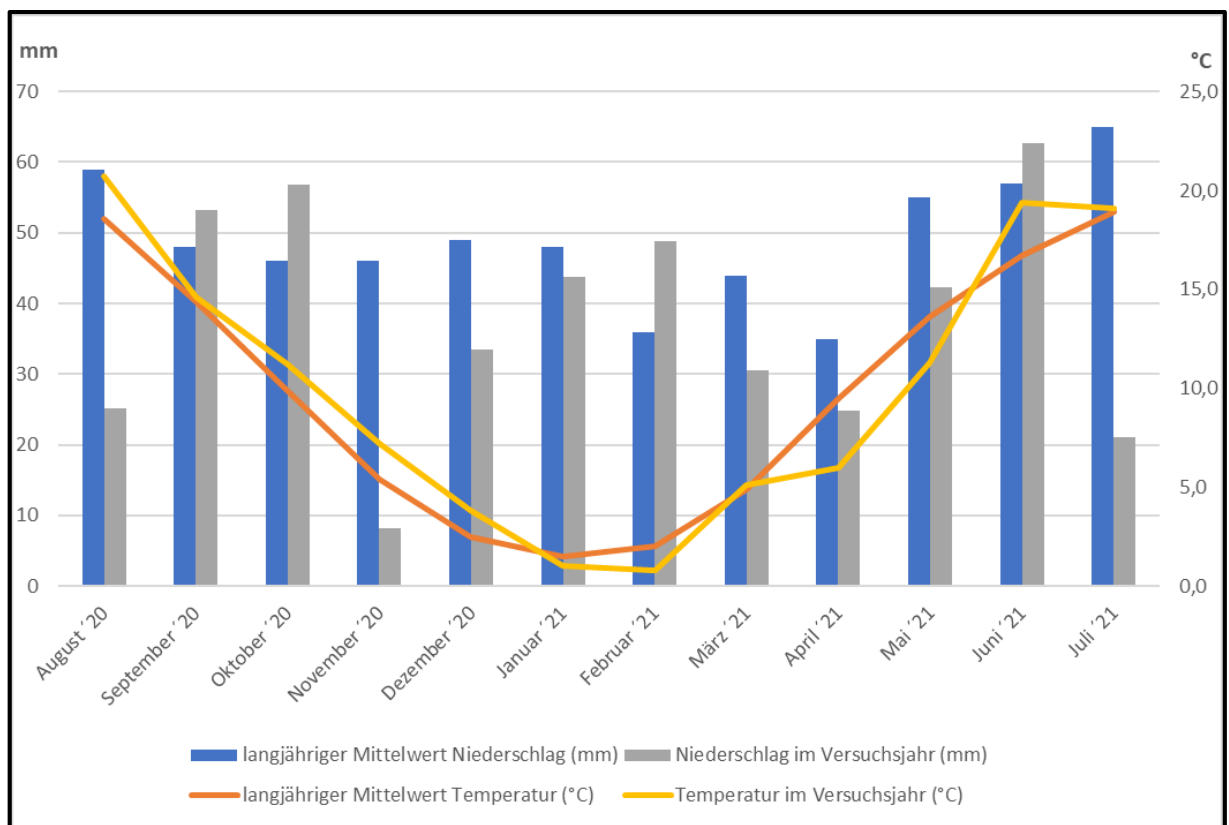


Abbildung 8: Klimadaten der Wetterstation Helmstedt-Emmerstedt im langjährigen Mittel und im Versuchszeitraum

(Quelle: eigene Darstellung nach Wetterkontor; Deutscher Wetterdienst)

Zu Beginn des Versuches im August 2020 waren die Niederschläge 57% geringer als im langjährigen Durchschnitt. Auch wenn in den Monate September, Oktober, Februar und Juni mehr Niederschlag fiel als im langjährigen Durchschnitt, lag der Gesamtniederschlag in diesen Zeitraum bei etwa 450 mm und somit nur bei 77 % des langjährigen Mittelwertes. Die Durchschnittstemperaturen lagen im Zeitraum von August 2020 bis Dezember 2020 durchgehend höher als im langjährigen Mittel. Von Januar 2021 bis Mai 2021 war es hingegen meist kälter als im Durchschnitt des Vergleichszeitraumes. Lediglich der März war mit +0,2°C etwas wärmer. Auch im Juni (+2,7°C) und Juli (+0,2°C) war es wärmer als im langjährigen Mittel. So war auch die Durchschnittstemperatur im Versuchszeitraum um 0,2°C höher als der langjährige Durchschnitt.

### 3.3 Varianten

Das Prüfglied A1, welches in dem Versuch die Standardvariante darstellt, ist die chemische Variante. Es erfolgt der Einsatz eines Totalherbizides mit dem Wirkstoff Glyphosat. Im Versuchsjahr wurde Amega und Taifun Forte eingesetzt mit einer Aufwandmenge von 3,4 l/ha ( $\pm 1.224$  g/ha). Der Tankmischung wurde das All-in-One-Additiv Kantor mit einer Aufwandmenge von 0,15 l/ha zugesetzt. Die Applikation erfolgte am 5.10.2020 mit einer Pflanzenschutzspritze der Firma Amazone.

Bei den Prüfgliedern B1, B2 und B3 handelt es sich um mechanische Alternativen zum Einsatz von Glyphosat. In Prüfglied B1 wurde eine Kurzscheibenegge „Carrier“ der Firma Väderstad eingesetzt, die mit speziellen CrossCutter-Scheiben ausgestattet ist. Diese Scheiben sollen nach Herstellerangaben aufgrund ihrer speziellen Scheibenform bereits bei ultraflacher Bearbeitung (2 – 3 cm) einen ganzflächigen Schnitt haben und weniger Boden bewegen als eine konventionelle Scheibe.

Die CrossCutter Disc ist in der folgenden Abbildung 9 dargestellt:



Abbildung 9: Scheibe der Väderstad CrossCutter Disc

(Quelle: Väderstad)

Die Breite des Profils der CrossCutter Disc wird mit 11,5 cm angegeben. Sie ist somit im Vergleich zu anderen Wellscheiben deutlich größer als der Branchenschnitt. Um das Arbeitsbild zu verbessern, wurde der Anstellwinkel der Scheiben optimiert und beträgt  $14^\circ$ . Der Strichabstand der Scheiben beträgt 12,5 cm. Im Versuchsjahr 2020 wurde die Arbeitstiefe auf 3 – 5 cm eingestellt, die Fahrgeschwindigkeit lag zwischen 12-15 km/h. Es erfolgten zwei Überfahrten am 7.10.2020 und am 10.10.2020.

In der Variante B2 wurde der Sternradgrubber „Corona“ der Firma Kerner eingesetzt. Es handelt es sich um einen dreibalkigen Grubber mit einem Strichabstand von 30 cm (Abbildung 10).



Abbildung 10: Sternradgrubber – Kerner Corona

(Quelle: Kerner Maschinenbau)

Das Gerät ist serienmäßig mit einer hydraulischen Tiefenführung ausgestattet und bietet die Möglichkeit eines Schnellwechselsystems bei den Scharen, sodass der Grubber sowohl für die flache als auch für die tiefe Bodenbearbeitung eingesetzt werden kann. Zudem kann die Walze des Grubbers problemlos abgekoppelt werden oder hinter der Walze noch ein Schwerstriegel montiert werden. Im Versuchsjahr 2020 wurde der Kerner Corona mit nachlaufender Walze und Striegel eingesetzt. Es erfolgten eine Überfahrt am 7.10.2020 bei einer Bearbeitungstiefe von 3 cm auf dem Schlag „Großer Plan“ sowie zwei Überfahrten auf dem Schlag „Franke Weide“ am 7.10.2020 und am 10.10.2020 bei einer Bearbeitungstiefe von jeweils 4 – 5 cm bei einer Fahrgeschwindigkeit von je 10 km/h.

Das Prüfglied B3 stellt die betriebsübliche Variante dar. Hier kam zunächst die bereits erwähnte „CrossCutter Disc“ der Firma Väderstad zum Einsatz.

Im Anschluss daran erfolgte ein weiterer Bodenbearbeitungsgang mit der Großfederzinkenegge „Allrounder“ des Herstellers Köckerling (Abbildung 11).



Abbildung 11: Großfederzinkenegge – Köckerling Allrounder

(Quelle: Köckerling)

Der Köckerling Allrounder ist vierbalkig und hat einen Strichabstand von 15 cm. Auch hierfür stehen unterschiedliche Scharoptionen zur Verfügung, um das Gerät an die vorherrschenden Bedingungen anzupassen. Die Überfahrt mit der Väderstad CrossCutter Disc erfolgte am 7.10.2020 mit einer Arbeitstiefe von ca. 2 cm und einer Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h. Der zweite Arbeitsgang mit dem Köckerling Allrounder wurde am 10.10.2020 mit einer Bearbeitungstiefe von 5 – 7 cm und einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 10 km/h durchgeführt.



Das elektrophysikalische Verfahren wurde in Prüfglied C1 durchgeführt. Hierbei kommt das Elektroherb „XPower“ der Firma Zasso zum Einsatz. Abbildung 12 zeigt das Elektroherb:



Abbildung 12: Elektroherb – Zasso XPower

(Quelle: Zasso)

Das Elektroherb ist derzeit nur in einer Arbeitsbreite von 3 m erhältlich. Es kann für den Einsatz der Unkrautbekämpfung im Voraufbau, zur Krautabtötung bei Kartoffeln und für die Bekämpfung von Zwischenfrüchten eingesetzt werden. Das System besteht aus zwei Komponenten, die in der Front und dem Heck des Traktors montiert sind. Im Heck sitzt die Versorgungseinheit, bestehend aus einem Generator, einer Steuereinheit sowie einen Schaltschrank. Im Frontanbau sitzt die Applikatoreinheit, die aus 24 Hochvolt-Powermodulen mit einer Leistung von 72 kW besteht. Diese flexiblen Elektroden passen sich der Zielpflanze gut an und sorgen somit für optimale Leistung und dementsprechend hohen Energieumsatz. Die Fahrgeschwindigkeit liegt bei maximal 4 km/h. Im Versuchsjahr 2020 erfolgte in dieser Variante am 7.10.2020 eine Überfahrt mit 2 – 3 km/h.

Bei Prüfglied D1 handelt es sich um eine biologische Variante, die ein System aus Untersaaten, Zwischenfrüchten und Begleitpflanzen darstellt. Bei diesen „System Immergrün“ wurde eine Untersaat im Körnermais 2019 etabliert.

Diese JD 19 CV 02 war eine Saatgutmischung aus Luzerne und Hornklee mit Weidelgras. Im Versuchsjahr 2020 wurde die Parzelle ähnlich bearbeitet wie die betriebsübliche Variante B3.

Nach einem Arbeitsgang mit der Kurzscheibenegge „Väderstad CrossCutter Disc“ erfolgte eine Überfahrt mit der Großfederzinkenegge „Köckerling Allrounder“ um den Boden für die Aussaat des folgenden Winterweizens vorzubereiten.

Der Variantenplan ist in Tabelle 4 zusammengefasst dargestellt:

Tabelle 4: Variantenplan des Versuches

Prüf-Glied	Variante	Einsatz	Aufwandmenge/ Arbeitstiefe
<b>A 1</b>	chemisch (Totalherbizid)	Glyphosat (Amega + Taifun Forte)	3,4 l/ha ( $\cong$ 1.224 g Glyphosat /ha)
<b>B 1</b>	mechanisch (Scheibenegge)	Väderstad CrossCutter Disc (2 Überfahrten)	3 – 5 cm
<b>B 2</b>	mechanisch (Grubber)	Kerner Corona (2 Überfahrten)	4 – 5 cm
<b>B 3</b>	mechanisch (betriebsüblich)	Väderstad CrossCutter Disc Köckerling Allrounder	2 cm 5 – 7 cm
<b>C 1</b>	elektrophysikalisch	Zasso X Power	-
<b>D 1</b>	Biologisch (mit Untersaaten, Zwischenfrüchten)	Väderstad CrossCutter Disc Köckerling Allrounder	2 cm 5 – 7 cm

### 3.4 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Zeitraum des Versuches erstreckt sich von Februar 2019 bis zum April 2023. Als Versuchsstandorte sind zwei Schläge ausgewählt. Ein Schlag ist der „Große Plan“ des Landwirtschaftsbetriebes Burkhard Fromme in Scheppau, der andere gehört zum Landwirtschaftsbetrieb Holger Bese in Königslutter und trägt die Bezeichnung „Franke Weide“.

Der Versuch läuft auf beiden Standorten über die gesamte Fruchtfolge. Die Fruchtfolge ist in Tabelle 5 dargestellt:

Tabelle 5: Fruchtfolge im Versuch

Jahr	Angebaute Kultur
Anlagejahr 1	Körnermais (Hauptfrucht)
	Grünroggen (Zwischenfrucht)
Anlagejahr 2	Sommergerste (Hauptfrucht)
	Gemenge (Zwischenfrucht)
Anlagejahr 3	Winterweizen (Hauptfrucht)
Anlagejahr 4	Winterraps (Hauptfrucht)
	Mit Begleitpflanzen

Bei dem Versuch handelt es sich um einen Streifenversuch unter praxisüblichen Bedingungen. Aus diesem ist auch keine statistische Auswertung möglich, da keine Wiederholungen angelegt wurden. Der Versuch ist daher als Basis- bzw. Tastversuch für weitere Versuche anzusehen. Die Parzellen wurden mit der Saatrichtung angelegt und haben eine Länge von 120 m sowie eine Breite von 12 m. So ergibt sich eine Parzellengröße von 1.440 m<sup>2</sup>. Die nachfolgende Abbildung 13 zeigt die Anlage des Versuches auf dem Schlag „Großer Plan“:



Abbildung 13: Schema der Versuchsanlage

(Quelle: GKB e.V., 2020)

Die Bodenbearbeitung erfolgte entsprechend der einzelnen Varianten (siehe Kapitel 3.3). Die Sortenwahl sowie die Aussaatstärken wurden betriebsüblich gewählt und sind über die Versuchsglieder identisch. Bei der Aussaattechnik kamen verschiedene Systeme zum Einsatz, welche auch dazu im Stande sind, sowohl eine Direktsaat auf unbearbeiteten Boden als auch eine Mulchsaat durchzuführen. Die Düngung erfolgt einheitlich über alle Varianten und wird betriebsüblich durchgeführt. Im Bereich Pflanzenschutz erfolgt der Einsatz eines Totalherbizides vor der Saat in Prüfglied A1. Die restliche Unkraut- sowie die Schädlingsbekämpfung erfolgt systemangepasst, währenddessen die Krankheitsbekämpfung über alle Varianten gleich geschieht. Bei der Ernte kommt ein GPS-gesteuerter Praxis-Mähdrescher mit Ertragskartierung zum Einsatz, um eventuelle Ertragsunterschiede zwischen den Varianten feststellen zu können.

Da sich die hier vorliegende Arbeit in erster Linie auf das Anlagejahr 3 mit der Ernte des Winterweizens im Jahr 2021 konzentriert, wird im Folgenden auf die Produktionstechnik dieses Anbaujahres näher eingegangen.

Wie bereits erwähnt, stand als Vorfrucht Sommergerste, welche am 05.08.2020 beerntet wurde. Zeitnah dazu wurde am 07.08.2020 eine Zwischenfruchtmischung „TerraLife N-Fixx“ mit einer Aussaatstärke von ca. 45 kg/ha gesät. Diese Mischung enthält 72% Leguminosen besteht aus den Komponenten Phacelia, Öllein, Sonnenblume, Ramtillkraut, Sorghum, Felderbse, Sommerwicke, Serradella und Alexandrinerklee. In Versuchsglied D1 erfolgte keine Zwischenfruchtaussaat, da hier bereits im Körnermais 2019 eine Untersaatmischung aus Luzerne und Hornklee mit Weidelgras etabliert wurde.

Entsprechend der Variantenbeschreibung aus Kapitel 3.3 erfolgte die Bearbeitung der Versuchsglieder im Zeitraum von 05.10.2020 bis 10.10.2020.

Am 12.10.2020 wurde bei allen Varianten Winterweizen der Sorte Argument gedrillt. Der Betrieb entschied für Aussaatstärke von 366 Körner/m<sup>2</sup>. Die Aussaat erfolgte mit einer Drillmaschine „Boss“ der Firma Sly/Agrisem. Hierbei handelt es sich um eine Direktsaatmaschine mit Scheibenscharen. Die Fahrgeschwindigkeit betrug 8 km/h bei einer Ablagetiefe von etwa 3 cm.

Bei den mechanischen Varianten B1, B2 und B3 sowie bei der elektrophysikalischen Parzelle C1 erfolgte im Voraufbau eine Behandlung mit einem Bodenherbizid. Zum Einsatz kamen hierbei Herold SC (0,4 l/ha), Cadou SC (0,2 l/ha) und Boxer (2 l/ha).

In der biologischen Variante D1 wurde am 13.04.2021 auf beiden Versuchsstandorten Weißklee in den Weizenbestand eingestriegelt.

Die weiteren ackerbaulichen Maßnahmen wurden über alle Varianten gleich durchgeführt und sind für den Schlag „Großer Plan“ in Tabelle 6 zusammengefasst dargestellt:

Tabelle 6: ackerbauliche Maßnahmen – Großer Plan

Datum	Maßnahme	Mittleinsatz, AWM, Bemerkung
12.10.20	Aussaat	WW: Argument – 366 Kö/m <sup>2</sup>
12.10.20	Herbizidbehandlung – Vorauslauf	Herold SC – 0,4 l/ha Cadou SC – 0,2 l/ha Boxer – 2 l/ha (nur bei PG B1, B2, B3, C1)
28.11.20	Kalkdüngung	Granukal – 6,07 dt/ha
05.03.21	CULTAN-Düngung	ASL 8/9 – 1,24 m <sup>3</sup> NP 7/17 – 100 l/ha
30.03.21	Kaliumdüngung	60er Kali – 149 kg/ha
13.04.21	Weißklee einstriegeln	(nur PG D1)
24.04.21	Herbizidbehandlung	Ariane C – 0,473 l/ha Dirigent – 24,871 g/ha Kantor – 0,266 l/ha
08.05.21	Fungizidbehandlung + Mikronährstoffdüngung	Ultraline – 0,42 l/ha Protendo 250 – 0,125 l/ha Bor – 1 l/ha Kupfersulfat – 0,1 kg/ha Mangan Nitrat – 1 l/ha Zinksulfat – 0,1 kg/ha Nutri Phite – 0,35 l/ha Bittersalz – 3,12 kg/ha
17.5.21	N-Düngung	Kalkammonsalpeter – 106 kg/ha

<b>30.05.21</b>	Fungizidbehandlung	Elatus Era – 0,41 l/ha Silwett Gold – 0,008 l/ha Kantor – 0,123 l/ha Bittersalz – 2,05 kg/ha
<b>01.08.21</b>	Ernte – Mähdrusch	Feuchtigkeit: 14,5 %

Quelle: nach Ackerschlagkartei LWB Fromme

Um den Wassergehalt und die Stickstoffmineralisierung im Boden innerhalb der verschiedenen Varianten zu vergleichen, wurde im Verlauf der Vegetation an fünf Terminen Bodenproben entnommen und zur Analyse an ein Labor übergeben. Je Versuchsparzelle wurden acht Einstiche auf einer Tiefe von 0 – 30 cm und 30 – 60 cm durchgeführt. Aus diesen acht Einzelproben wurde für jeden der beiden Horizonte eine Mischprobe erstellt, welche auf Wassergehalt,  $\text{NH}_4\text{--N}$ ,  $\text{NO}_3\text{--N}$  und den daraus resultierenden Nmin-Gehalt untersucht wurde. Die Termine der Bodenprobennahmen sind in der folgenden Tabelle ersichtlich:

Tabelle 7: Termine der Bodenprobennahmen

Termin	Datum	Bemerkung
<b>1</b>	02.10.2020	Vor Versuchsanlage
<b>2</b>	23.10.2020	Nach Aussaat
<b>3</b>	14.11.2020	BBCH 12 – 13 des Winterweizens
<b>4</b>	19.12.2020	Zur Vegetationsruhe
<b>5</b>	27.02.2021	Zu Vegetationsbeginn

Neben der Entnahme der Bodenproben werden im Verlaufe des Projektes zudem in den einzelnen Varianten folgende Feststellungen getroffen und Untersuchungen durchgeführt:

- Daten zum Pflanzenbestand
- Daten zum Wachstumsverlauf
- Feldgefügeansprache
- Bodenbiologie / Mikrobiologie
- Ökotoxikologische Untersuchungen
- Ertragsermittlung
- Ökologische und Ökonomische Bewertung
- Digitale und optische Unkrautbonitur
- Feldaufgang der Hauptfrucht



## 4. Ergebnisse

### 4.1 Wassergehalte

Die Wassergehalte der Bodenproben wurden gravimetrisch bestimmt, d.h. die Werte sind in Gewichtsanteil (%) angegeben.

Beim Vergleich der Mittelwerte aller Varianten bei den einzelnen Terminen ist erkennbar, dass der Schlag „Großer Plan“ sowohl in 0-30 cm als auch in 30-60 cm höhere Wassergehalte aufweist als der Schlag „Franke Weide“, wie Abbildung 14 darstellt:

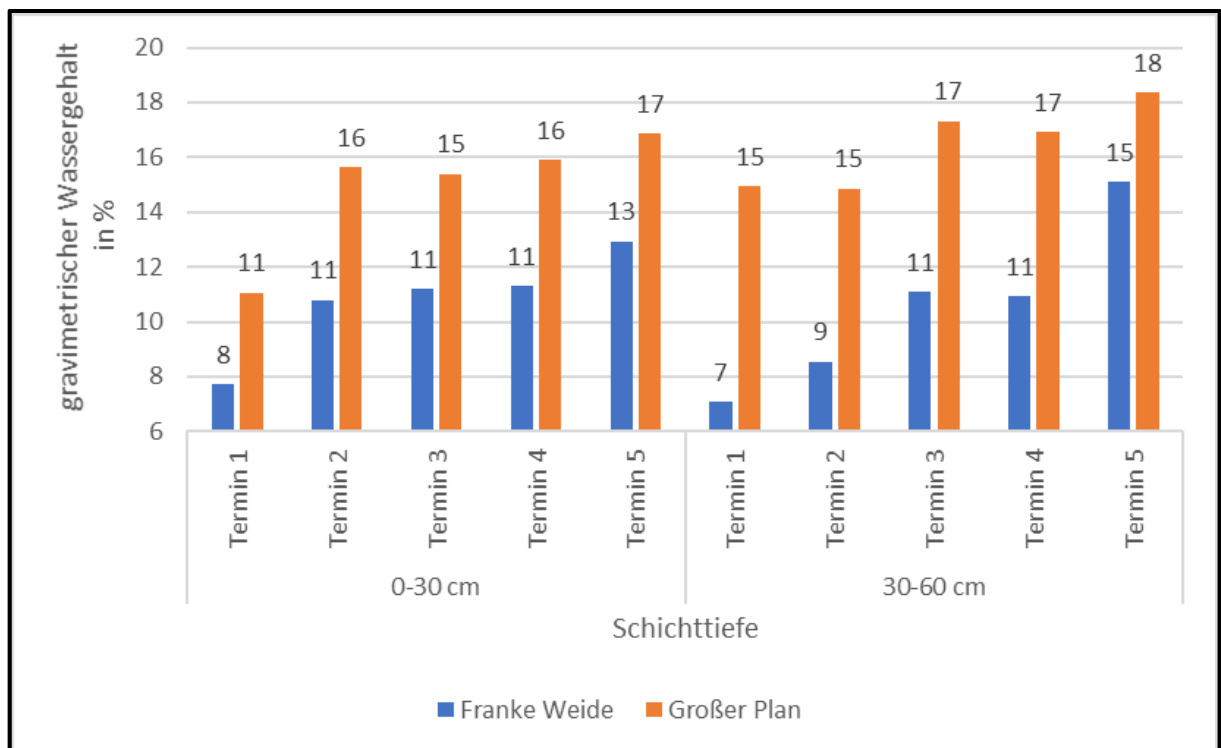


Abbildung 14: Vergleich der gravimetrischen Wassergehalte zwischen den Schlägen – Mittelwerte aller Varianten  
Diese Werte sind mit den unterschiedlichen Standorteigenschaften der Versuchsschläge zu begründen. Erkennbar ist in beiden Schichttiefen eine Zunahme der Wassergehalte während des Beprobungszeitraumes, was auf die Niederschläge zurückzuführen ist. Der Unterschied zwischen der ersten und zweiten Beprobung ist deutlich. Im Zeitraum von 02.10.2020 bis 24.10.2020 fielen insgesamt 44 mm Niederschlag, davon ca. 14 mm am 23.10.2020.

Die Varianten werden im Folgenden anhand der Mittelwerte beider Schläge verglichen.



Tabelle 8: Vergleich Wassergehalte (%) in 0-30 cm in Abhängigkeit der Versuchsvarianten – Mittelwerte in 0 – 30 cm (A1= rel. 100)

Variante	Termin 1	Termin 2	Termin 3	Termin 4	Termin 5
<b>A1</b>	100	100	100	100	100
<b>B1</b>	109	100	106	103	104
<b>B2</b>	103	95	106	100	103
<b>B3</b>	112	102	110	100	100
<b>C1</b>	106	105	104	101	104
<b>D1</b>	100	100	108	100	95

Die Varianten B1, B3 und C1 liegen an Termin 1 mit relativ 109, 112 bzw. 106 über den anderen Varianten. An Termin 2 liegt lediglich Variante C1 mit 105 nennenswert über den Vergleichsvarianten. Zu Beginn der Vegetation (Termin 5) fallen die Varianten B1 und C1 mit jeweils rel. 104 auf.

Bei der Schichttiefe von 30 – 60 cm gestaltet sich dies ähnlich. Unterschiede vor Anlage des Versuches relativieren sich im Verlauf der Beprobungen, wie Tabelle 9 zeigt.

Tabelle 9: Vergleich Wassergehalte (%) in 0-30 cm in Abhängigkeit der Versuchsvarianten – Mittelwerte in 30 - 60 cm (A1= rel. 100)

Variante	Termin 1	Termin 2	Termin 3	Termin 4	Termin 5
<b>A 1</b>	100	100	100	100	100
<b>B 1</b>	124	95	92	83	112
<b>B 2</b>	125	93	92	78	105
<b>B 3</b>	125	104	100	83	96
<b>C 1</b>	131	99	107	84	97
<b>D 1</b>	109	93	95	83	94

An Termin 1 liegen alle Varianten 9 – 31 % über der Standardvariante A1. Zu Termin 2 sind die Varianten B1, B2 und D1 niedrigere Wassergehalte (rel.93 – 95) als die Standardvariante A1 auf, während Prüfglied B3 mit rel. 104 über der Standardvariante liegt. Auch an Termin 3 liegen die Wassergehalte der Varianten B1, B2 und D1 unter denen der Standardvariante,

währenddessen hier die elektrophysikalische Variante C1 mit rel. 107 über der Standardvariante liegt. Zur Vegetationsruhe (Termin 4) liegen indes alle Varianten deutlich unterhalb der Standardvariante A1 (rel. 78 – 84). An Termin 5 liegen die Varianten B1 und B2 mit rel. 112 bzw. 105 über der Standardvariante A1, während Variante B3 und D1 mit rel. 96 bzw. 94 unter dieser liegen.

## 4.2 Stickstoff

Die Stickstoffgehalte in den Bodenproben sind als Gesamt-N<sub>min</sub>-Gehalte in 0 – 60 cm dargestellt zwischen den Varianten in allen fünf Terminen. Die Mittelwerte beider Schläge zeigt Tabelle 10:

Tabelle 10: N<sub>min</sub>-Gehalte in 0 – 60 cm in kg/ha in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Termin (Mittelwerte)

Variante	Termin 1	Termin 2	Termin 3	Termin 4	Termin 5
A1	29	27	30	24	19
B1	24	25	34	35	20
B2	23	31	30	33	20
B3	20	22	35	28	21
C1	28	26	29	32	22
D1	19	22	31	26	19
Mittelwerte	24	26	32	30	20
Minimum	19	22	29	24	19
Maximum	29	31	35	35	22

An Termin 1 weisen die Variante A1 sowie C1 mit 29 kg/ha bzw. 28 kg/ha die höchsten Gehalte an mineralischen Stickstoff auf, während der N<sub>min</sub>-Gehalt bei Variante D1 mit 19 kg/ha am niedrigsten ist. Ein wichtiger Zeitpunkt zur Beurteilung einer möglichen Auswaschungsgefahr ist der Termin 4 zur Vegetationsruhe, da der hier ermittelte N<sub>min</sub>-Gehalt i.d.R. nicht mehr vor

Winter durch die Pflanzen aufgenommen wird. Hier weist die Variante A1 (24 kg/ha) den niedrigsten Wert auf. Die Variante B1 mit 35 kg/ha und Variante B2 mit 33 kg/ha zeigen hier die höchsten Gehalte. An Termin 5 vor der Düngung im Frühjahr liegen die Werte aller Varianten jedoch dicht beisammen zwischen 19 und 22 kg/ha.

Bei der Betrachtung der Bodenprobenergebnisse hinsichtlich der vorliegenden N-Form in der jeweiligen Schichttiefe ergibt sich folgendes Bild, welches in Abbildung 15 - Abbildung 19 dargestellt ist:

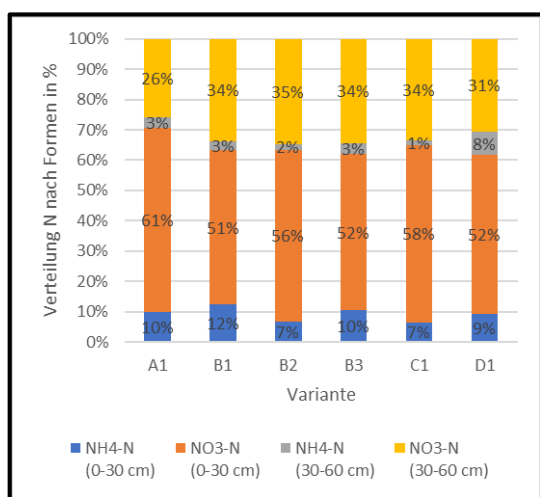


Abbildung 15: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 1 (Mittelwerte)

Bei allen Varianten liegt der Großteil als Nitrat-N in der Schichttiefe 0 – 30 cm vorl. Der Anteil dessen liegt zwischen 52 (D1) und 61 % (A1). Insgesamt liegen 62 (D1) bis 71 % (A1) des Gesamten Nmin in der Schichttiefe 0 – 30 cm. Mit einem Anteil zwischen 26 (A1) bis 35 % (B2) ist der Nitrat-N in 30 – 60 cm ebenfalls einen großen Anteil aus.

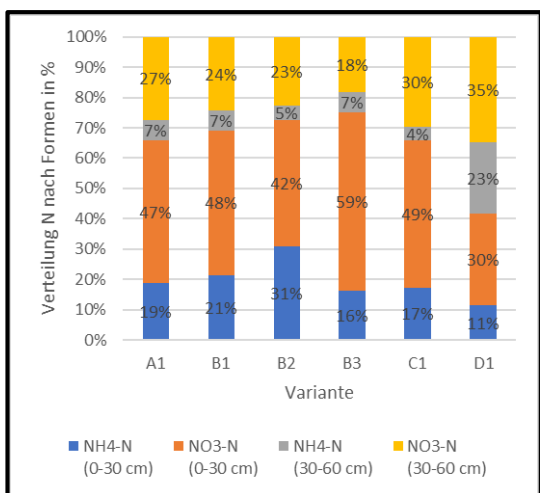


Abbildung 16: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 2 (Mittelwerte)

An Termin 2 ist eine ähnliche Verteilung der N-Formen erkennbar. Der Hauptanteil liegt hier ebenfalls als Ammonium bzw. Nitrat in der Schichttiefe von 0 – 30 cm vor. Lediglich bei Variante D1 ist eine deutliche Verlagerung von Stickstoff von 0 – 30 cm in 30 – 60 cm zu verzeichnen. Des Weiteren sind die Anteile von Ammonium-N in 0 – 30 cm angestiegen, während außer bei Variante B3 der Nitratanteil in dieser Schichttiefe gesunken ist.

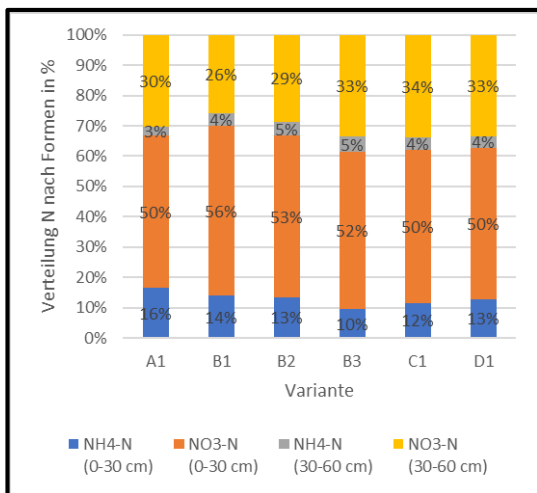


Abbildung 17: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 3 (Mittelwerte)

Die Verteilung des Stickstoffs an Termin 3 weist ein ähnliches Bild auf wie bei den vorherigen zwei Terminen. Der Hauptanteil des Stickstoffes ist auch hier in der Tiefe von 0 – 30 cm zu finden.

In Der Tiefe von 30 – 60 cm ist allerdings ein Anstieg des Nitratanteils zu verzeichnen. Lediglich bei Variante D1 ist hier ein Rückgang erkennbar.

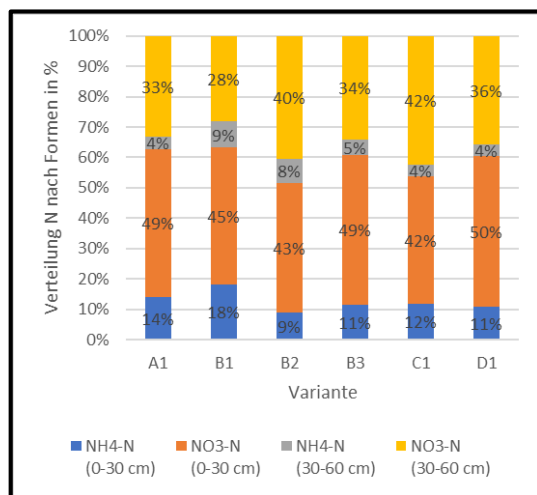


Abbildung 18: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 4 (Mittelwerte)

Termin 4 zur Vegetationsruhe ist von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung der Auswaschungsgefahr. Hier zeigt sich eine weitere Steigerung des Nitratanteils in der Schichttiefe von 30 – 60 cm bei allen Varianten. Die Werte dessen liegen zwischen 28 (B1) bis 42 % (C1).

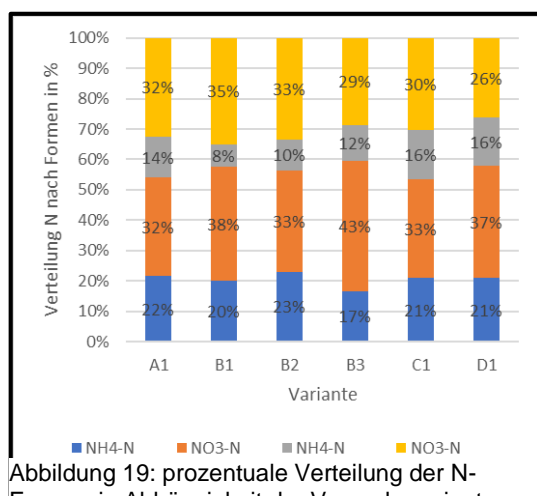


Abbildung 19: prozentuale Verteilung der N-Formen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: Termin 5 (Mittelwerte)

An Termin 5 zu Vegetationsbeginn ist in beiden Schichttiefen eine Zunahme des Ammonium-N-Anteils zu erkennen. Des Weiteren ist der Anteil an Gesamt-Nmin in der Tiefe 30 – 60 cm auf 40 (B3) bis 46 % (C1) angewachsen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der  $N_{\min}$ -Analysen der einzelnen Schläge genauer analysiert und zusammenfassend dargestellt. Die ausführlichen Daten dieser Proben sind in Anhang 1 und 2 zu finden. Abbildung 20 bis Abbildung 24 zeigen die  $N_{\min}$ -Gehalte nach Schichttiefe zu den 5 Terminen auf dem Schlag „Großer Plan“:

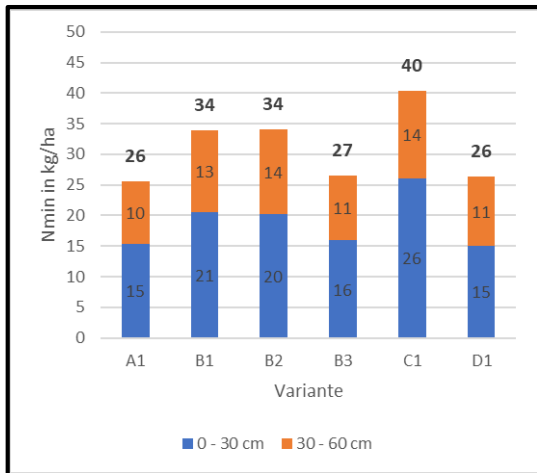


Abbildung 20:  $N_{\min}$ -Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 1 (Schlag: „Großer Plan“)

Zu Termin 1 weist Variante C1 mit 40 kg  $N_{\min}$ /ha den höchsten Gehalt an mineralischen Stickstoff auf, wobei 26 kg  $N_{\min}$  in der Schichttiefe von 0 – 30 cm und 14 kg  $N_{\min}$  von 30 – 60 cm zu finden sind. Die geringsten  $N_{\min}$ -Gehalte haben Variante A1 und D1 mit jeweils 26 kg  $N_{\min}$ /ha.

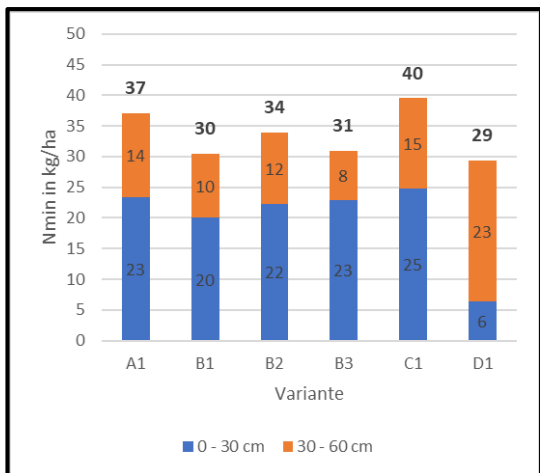


Abbildung 21:  $N_{\min}$ -Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 2 (Schlag: „Großer Plan“)

Auch bei Termin 2 sind die höchsten  $N_{\min}$ -Gehalte bei Variante C1 zu verzeichnen (40 kg  $N_{\min}$ /ha). Auch bei den anderen Varianten ist ein Anstieg des mineralischen Stickstoff, vor allem in der Schicht 0 – 30 cm, erkennbar. Lediglich bei Variante D1 ist der Anteil in der Schichttiefe mit 23 kg  $N_{\min}$ /ha in der Schicht 30 – 60 cm höher als in der Schichttiefe 0 – 30 cm (6 kg  $N_{\min}$ /ha).

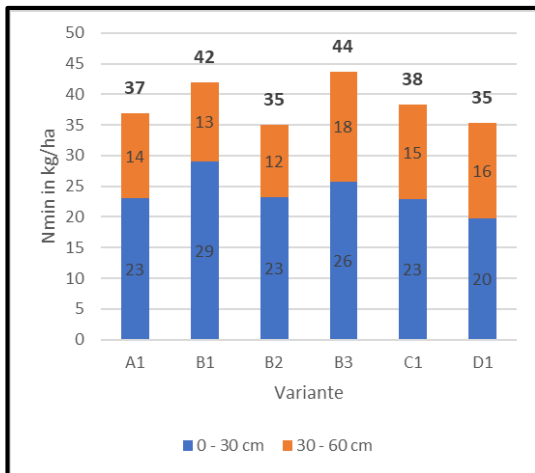


Abbildung 22: N<sub>min</sub>-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 3 (Schlag: „Großer Plan“)

An Termin 3 liegen die N<sub>min</sub>-Gehalte aller Varianten zwischen 35 und 44 kg/ha. Die höchsten Werte haben hier Variante B3 (44 kg N<sub>min</sub>/ha) und B1 (42 kg N<sub>min</sub>/ha). Es wird zudem ersichtlich, dass bei allen Varianten der größere Anteil in der Schichttiefe von 0 – 30 cm zu finden ist.

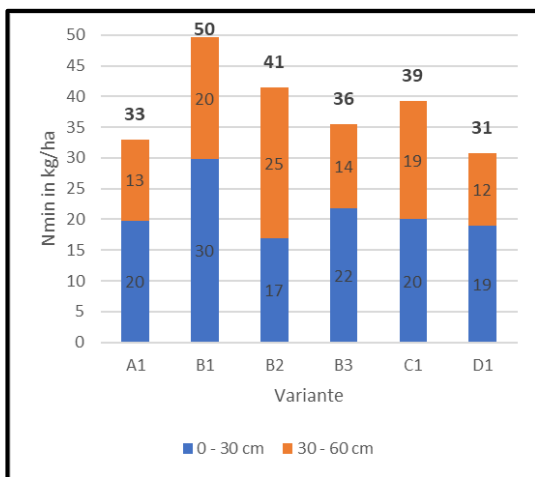


Abbildung 23: N<sub>min</sub>-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 4 (Schlag: „Großer Plan“)

Bei dem Termin zur Vegetationsruhe liegen die Gehalte an mineralischen Stickstoff im Boden zwischen 33 kg/ha (A1) bis 50 kg/ha (B1) in einer Tiefe von 0 – 60 cm. Allerdings fällt der höhere Anteil an N<sub>min</sub> in der Tiefe von 30 – 60 cm auf. Dieser liegt bei bis zu 25 kg N<sub>min</sub>/ha bei Variante B2.

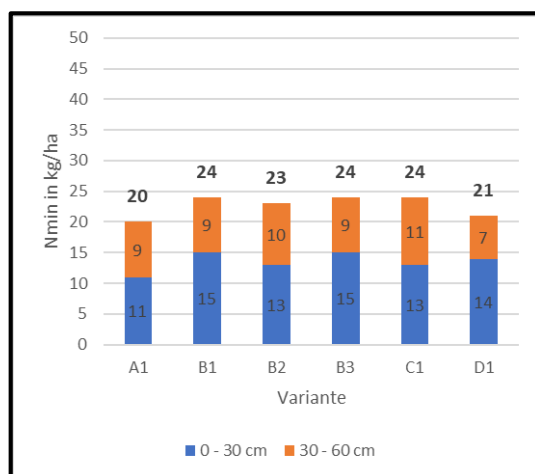


Abbildung 24: N<sub>min</sub>-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 5 (Schlag: „Großer Plan“)

An Termin 5, dem zu Vegetationsbeginn, zeigen sich bei allem Variante geringere N<sub>min</sub>-Gehalte als zu Termin 4. Die Werte liegen hier zwischen 20 kg/ha (Variante A1) und 24 kg/ha (Variante B1, B3, C1). Den größeren Anteil macht hierbei der Stickstoff in 0 – 30 cm aus.

Auf dem Schlag „Franke Weide“, zeigen sich zum Teil ähnliche Ergebnisse. Mitunter fallen diese allerdings auch anders aus, wie Abbildung 25 bis Abbildung 29 verdeutlicht:

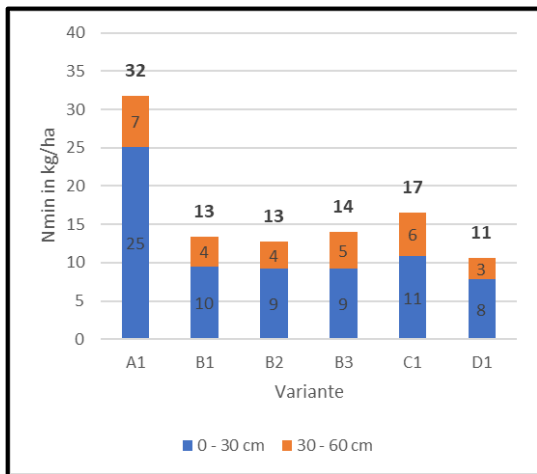


Abbildung 25: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 1 (Schlag: „Franke Weide“)

Zu Termin 1 wurden auf diesem Schlag bei Variante A1 die höchsten  $N_{\min}$ -Gehalte ermittelt (32 kg/ha). Der mit 25 kg  $N_{\min}$ /ha größte Anteil entfällt hierbei auf die Schichttiefe 0 – 30 cm. Den niedrigsten Wert weist zu diesen Termin Variante D1 mit 11 kg  $N_{\min}$ /ha auf.

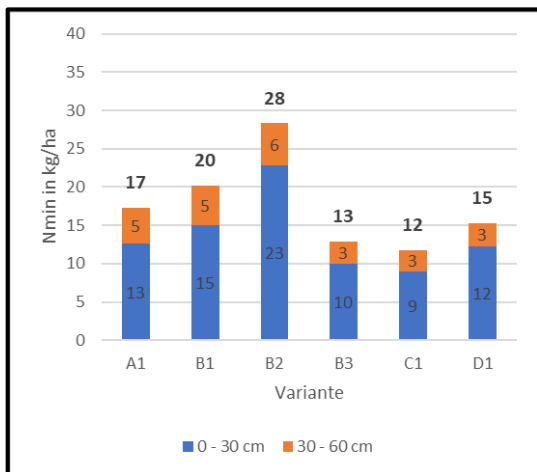


Abbildung 26: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 2 (Schlag: „Franke Weide“)

An Termin 2 zeigen sich die höchsten  $N_{\min}$ -Gehalte bei Variante B2 mit 28 kg/ha, wobei 23 kg/ha in der Schichttiefe von 0 – 30 cm zu finden sind. Die Varianten B3 und C1 mit 13 bzw. 12 kg  $N_{\min}$ /ha sind an diesen Termin die mit den geringsten Werten. Insgesamt ist zu sagen, dass der Hauptanteil des Stickstoff in allen Varianten in 0 – 30 cm zu finden ist.

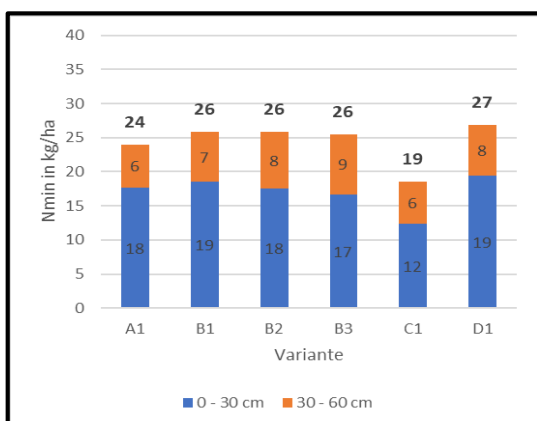


Abbildung 27: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 3 (Schlag: „Franke Weide“)

An Termin 3 liegen die Werte mit Ausnahme von Variante C1 zwischen 24 und 27 kg  $N_{\min}$ /ha. Variante C1 liegt mit 19 kg  $N_{\min}$ /ha etwas unter den anderen Varianten. Auch hier ist der größte Anteil in einer Schichttiefe von 0 – 30 cm zu finden.

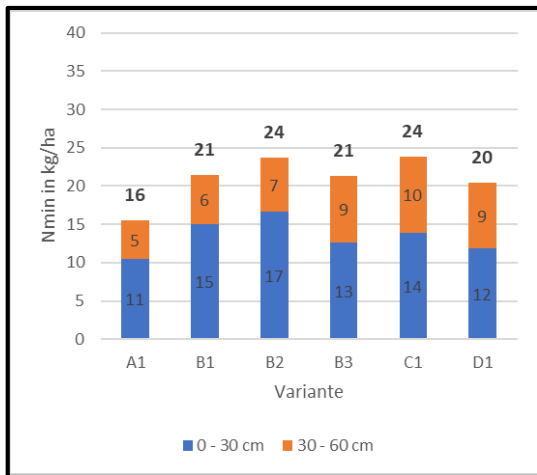


Abbildung 28: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 4 (Schlag: „Franke Weide“)

Die niedrigsten Werte zu diesem Termin weist die Variante A1 mit gesamt 16 kg  $N_{\min}$ /ha. Die anderen Varianten liegen im Bereich von 20 bis 24 kg  $N_{\min}$ /ha und sind somit allesamt deutlich niedriger als auf dem Schlag „Großer Plan“. Zudem sind die Anteile in der Schichttiefe von 30 – 60 cm auf diesem Schlag geringer.

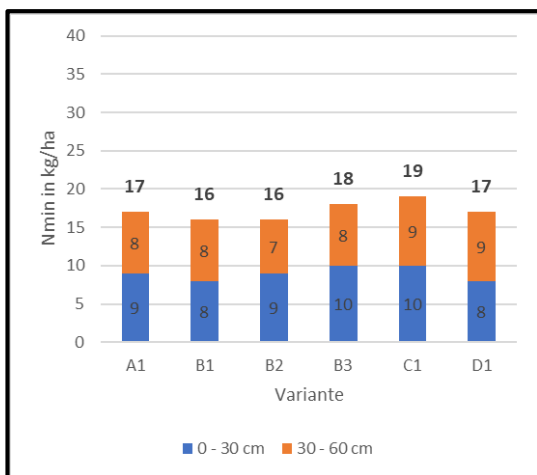


Abbildung 29: Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Versuchsvariante und Schichttiefe: Termin 5 (Schlag: „Franke Weide“)

An Termin 5 zu Vegetationsbeginn liegen ähnlich wie beim Schlag „Großer Plan“ die Werte im Bereich zwischen 16 und 19 kg  $N_{\min}$ /ha. Der Stickstoff verteilt sich hierbei gleichmäßig auf beide Schichttiefen.



### 4.3 N-Aufnahme und Pflanzendeckungsgrad

Bonituren zu N-Aufnahme des Winterweizens wurden an zwei Terminen durchgeführt. Die erste Bonitur erfolgte am 24.03.2021 und die zweite am 10.05.2021. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 11 ersichtlich:

Tabelle 11: N-Aufnahmen in Abhängigkeit der Versuchsvarianten und Schläge am 24.03.2021 und 10.05.2021

Variante	Großer Plan		Franke Weide		Durchschnitt	
	24.03.2021	10.05.2021	24.03.2021	10.05.2021	24.03.2021	10.05.2021
	Angaben in kg N/ha					
<b>A1</b>	22	91	17	84	19	88
<b>B1</b>	20	90	16	82	18	86
<b>B2</b>	21	91	17	82	19	87
<b>B3</b>	21	86	17	77	19	81
<b>C1</b>	23	91	17	74	20	82
<b>D1</b>	21	87	16	75	19	81
<b>Mittelwert</b>	21	89	17	79	19	84
<b>Minimum</b>	20	86	16	74	18	81
<b>Maximum</b>	23	91	17	84	20	88

Während sich die Varianten beim ersten Termin am 24.03.2021 auf beiden Schlägen nur geringfügig unterscheiden, sind die Unterschiede am 10.05.2021 größer. Auf dem Schlag „Großer Plan“ konnten die Varianten A1, B2 und C1 jeweils 91 kg N/ha aufnehmen, während die Pflanzen der Variante B3 etwa 5 kg N/ha weniger aufnahmen (86 kg N/ha). Auf dem Schlag „Franke Weide“ nahm die chemische Variante A1 84 kg N/ha auf, während die elektrophysikalische Variante C1 lediglich 74 kg N/ha aufnahm.

Bei der Bonitur am 24.03.2021 wurde der Pflanzendeckungsgrad inkl. Unkraut bestimmt. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigt Abbildung 30:

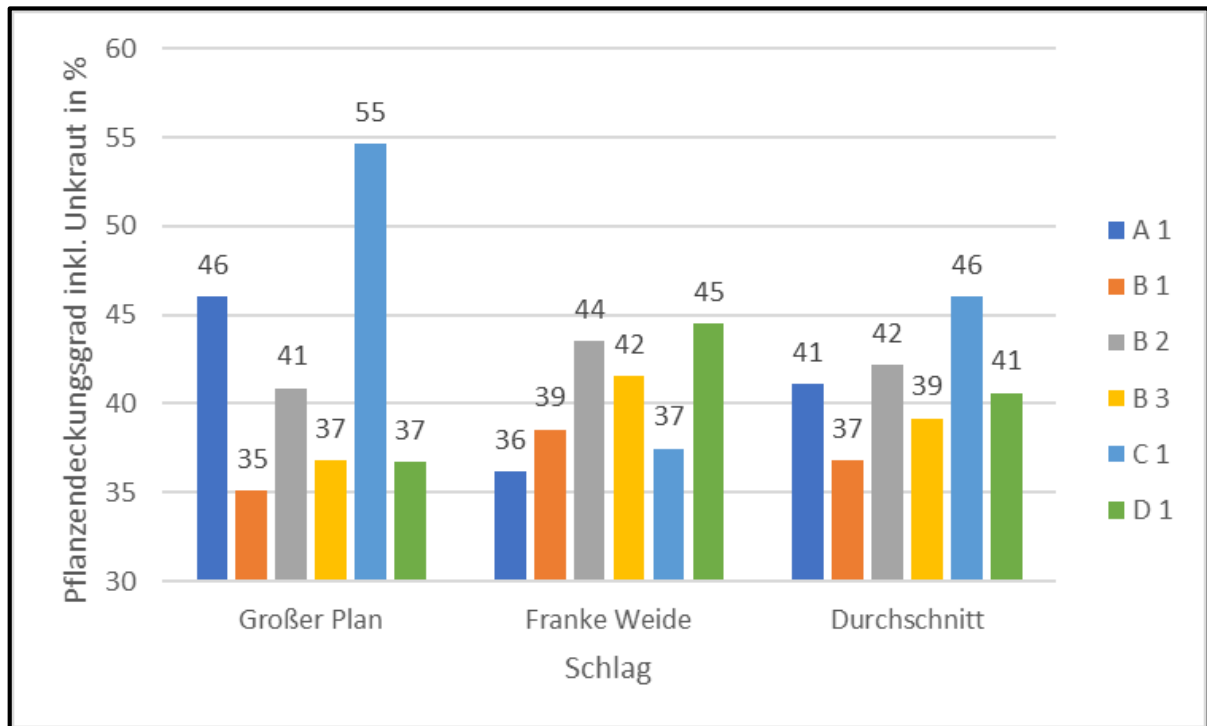


Abbildung 30: Pflanzendeckungsgrad inkl. Unkraut in % in Abhängigkeit der Versuchsvariante und Schläge

Variante C1 erreicht auf dem Schlag „Großer Plan“ den höchsten Pflanzendeckungsgrad. Auch wenn diese auf dem Schlag „Franke Weide“ nur einen Deckungsgrad von 37% erreicht, ist diese Variante im Durchschnitt beider Schläge die Variante mit den höchsten Pflanzendeckungsgrad. Den im Durchschnitt beider Schläge niedrigsten Bedeckungsgrad weist mit 3% die Variante B1 auf.

#### 4.4 Bestandesdichten

Am 02.11.2020 wurden auf beiden Schlägen Bonituren zur Bestandesdichte durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Bonituren zeigt die Abbildung 31:

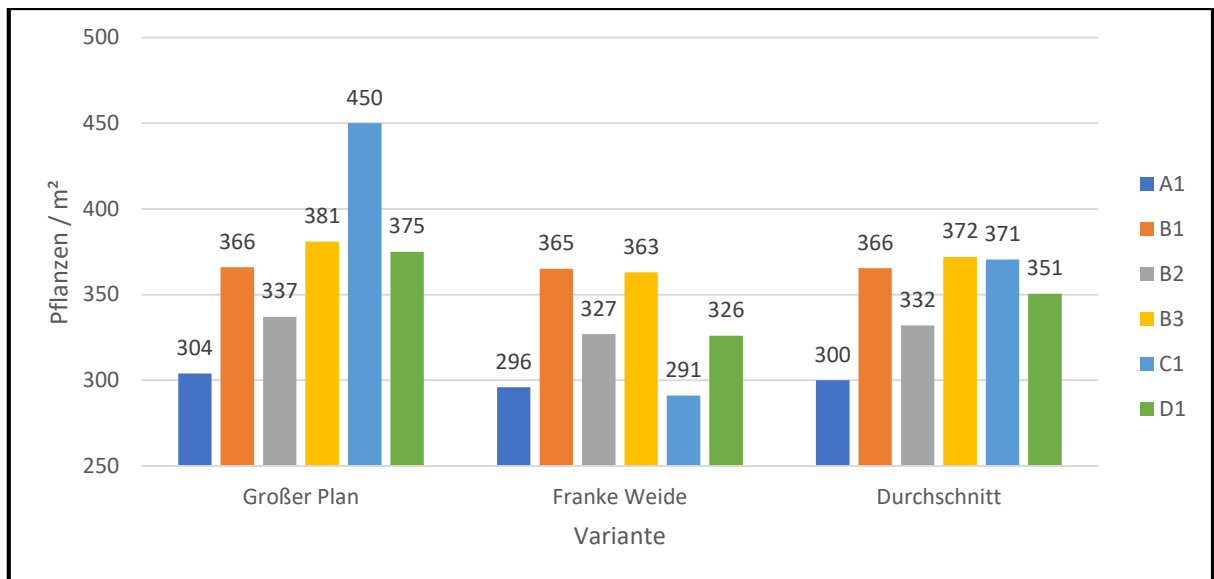


Abbildung 31: Bestandesdichten in Abhängigkeit von Versuchsvarianten und Schlägen

Die Bestandesdichten der Varianten unterscheiden sich zwischen den Schlägen teils immens. Auf dem Schlag „Großer Plan“ weist die Variante C1 mit 450 Pflanzen/m² die höchste Bestandesdichte auf. Auf dem Schlag „Franke Weide“ ist diese Variante die mit der geringsten Bestandesdichte. Im Durchschnitt beider Schläge weist die chemische Variante A1 mit 300 Pfl. / m² die geringste Bestandesdichten auf. Die Varianten B1 (366 Pfl. / m²), B3 (372 Pfl. / m²) und C1 (371 Pfl. / m²) haben im Durchschnitt beider Schläge die höchsten Bestandesdichten.

## 4.5 Erträge

Bei dem Vergleich der Ertragsergebnisse wird zunächst der Winterweizen im Erntejahr 2021 betrachtet. Abbildung 32 zeigt die Erträge der Varianten auf beiden Schlägen sowie den Mittelwert dieser:

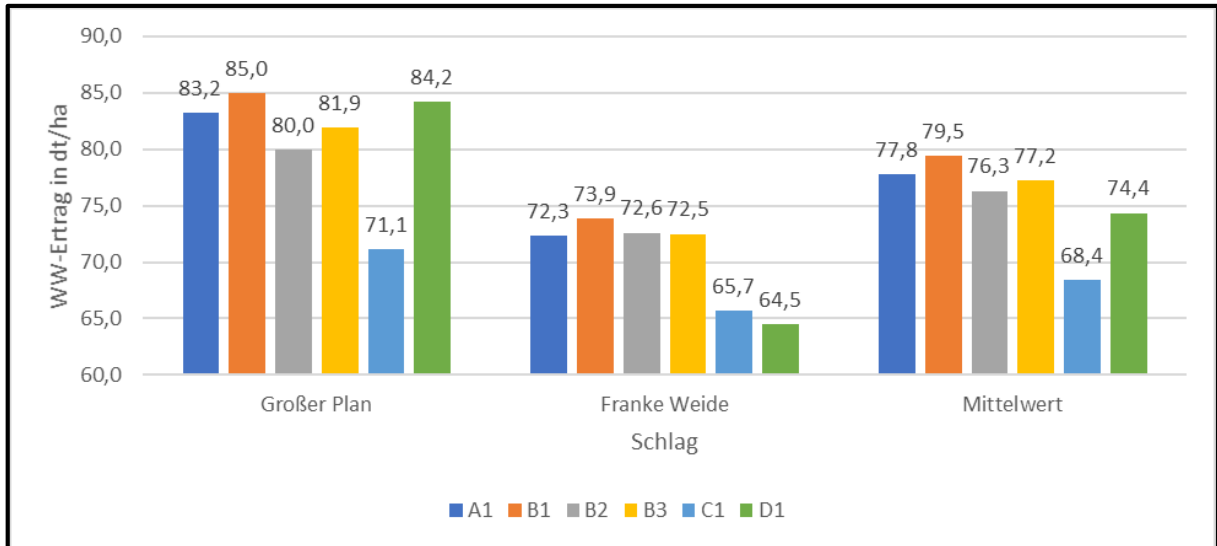


Abbildung 32: Winterweizenertrag 2021 in Abhängigkeit von Versuchsvarianten und Schlägen

Den höchsten Ertrag erzielt auf beiden Schlägen die Variante B1 mit 85 dt/ha bzw. 73.9 dt/ha. Auf den Schlag „Großer Plan“ kann die biologische Variante D1 mit 84,2 dt/ha den zweithöchsten Ertrag erzielen, während diese auf dem Schlag „Franke Weide“ allerdings den niedrigsten Ertrag (64,5 dt/ha) aufweist. Die Varianten A1, B2 und B3 liegen jeweils dicht beieinander im oberen Bereich. Lediglich die elektrophysikalische Variante C1 fällt ertraglich auf beiden Schlägen unterdurchschnittlich aus. So liegt Prüfglied C1 im Mittelwert 7,2 dt/ha und dementsprechend etwa 9 % unter dem Durchschnitt aller Varianten.

Da der Versuch bereits im dritten Jahr läuft, wurden auch die Ertragsergebnisse vorheriger Jahre zu Hilfe genommen, um die Varianten dahingehend miteinander zu vergleichen. Tabelle 12 zeigt die Erträge der Jahre 2019 – 2021:

Tabelle 12: Erträge 2019 – 2021 in Abhängigkeit von Versuchsvarianten und Schlägen (Mittelwerte)

Variante	Ertrag in dt/ha		
	Körnermais 2019	Sommergerste 2020	Winterweizen 2021
<b>A 1</b>	76,6	41,4	77,8
<b>B 1</b>	73,5	44,2	79,5
<b>B 2</b>	69,0	45,7	76,3
<b>B 3</b>	67,0	46,5	77,2
<b>C 1</b>	60,5	39,5	68,4
<b>D 1</b>	56,0	45,4	74,4
<b>Ø</b>	67,1	43,8	75,6

Auch bei den Körnermais- und Sommergerstenerträgen liegt die Variante C1 unter dem Durchschnitt aller Varianten. Beim Körnermais im Jahr 2019 erzielen die chemische Variante A1 (76,6 dt/ha) sowie die mechanische Variante B1 (73,5 dt/ha) die höchsten Erträge. Im Jahr 2020 bei der Sommergerste wurden die höchsten Erträge mit 46,5 dt/ha bei Variante B erzielt, gefolgt von B2 (45,7 dt/ha) und D1 (45,4 dt/ha).

Um die 3-jährigen Erträge zu veranschaulichen, wurden diese mit Hilfe des Getreideeinheitenschlüssels des BLE in Getreideeinheiten umgerechnet. Abbildung 33 zeigt diesen dreijährigen GE-Ertrag der Varianten, gestaffelt nach den geernteten Kulturen:

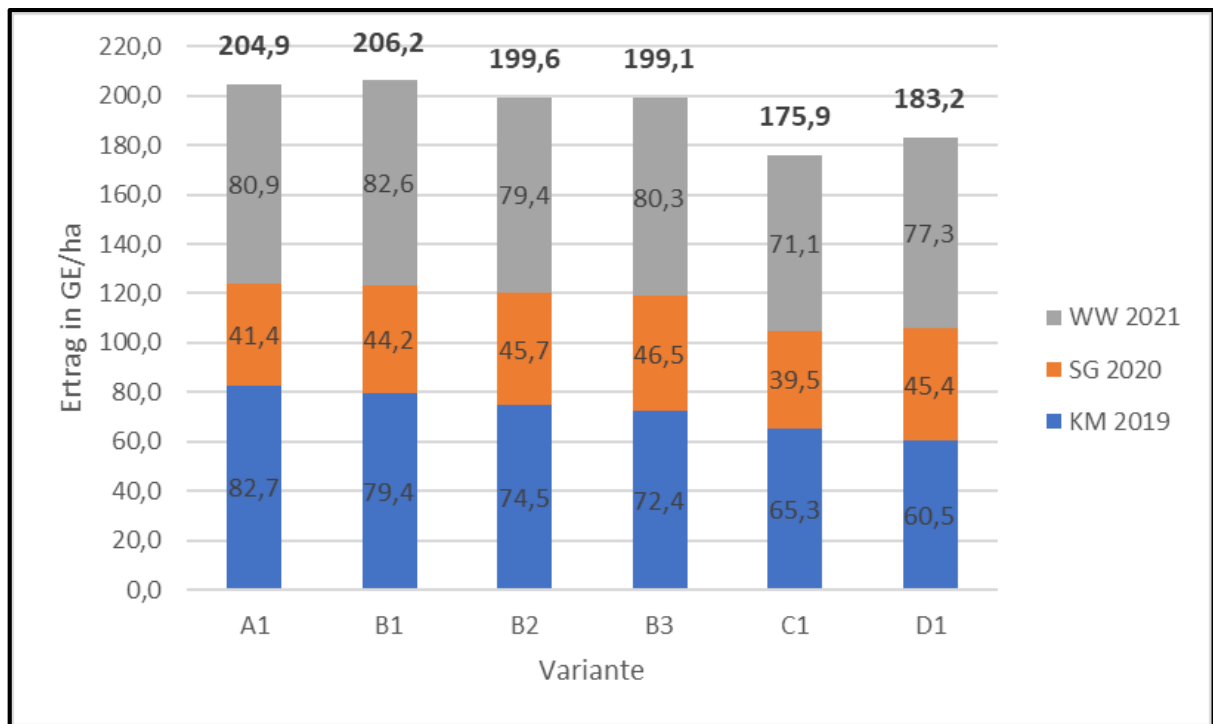


Abbildung 33: dreijähriger Ertrag in GE/ha in Abhängigkeit der Versuchsvarianten (Mittelwerte)

Die Varianten B1 (rel. 101), B2 (rel. 97) und B3 (rel. 97) erzielen im dreijährigen Durchschnitt ähnliche GE-Erträge wie die Standardvariante A1. Variante C1 erzielt 29 GE weniger als Prüfglied A1 und kommt so auf einen um 14 % niedrigeren GE-Ertrag in den 3 Jahren. Variante D1 erzielt mit 183,2 GE ebenfalls nur 89 % des Ertrages von der Standardvariante A1.

#### 4.6 Deckungsbeiträge

Für den Vergleich hinsichtlich der Ökonomie werden im Folgenden die Deckungsbeiträge verglichen. Hierfür wurden die unter Kapitel 4.5 genannten Erträge der einzelnen Varianten angenommen. Als Preis für den Winterweizen wurden 19,50 €/dt angesetzt. Anschließend wurden die laut Ackerschlagkartei durchgeführten Arbeiten sowie Betriebsmitteleinsätze erfasst und mit den tatsächlichen Kosten berechnet. Die ausführliche Berechnung dieser Deckungsbeiträge ist in Anhang 3 zu sehen.

Die zusammenfassende Berechnung dieser zeigt Tabelle 13:

Tabelle 13: Zusammenfassung Deckungsbeiträge in Abhängigkeit der Versuchsvarianten (Mittelwerte)

Variante	A 1	B 1	B 2	B 3	C 1	D 1
	Angaben in €/ha					
Marktleistung	1.516,13	1.549,28	1.487,85	1.505,40	1.333,80	1.449,83
Saatgutkosten	23,23	23,23	23,23	23,23	23,23	88,48
Düngungskosten	180,09	179,53	179,64	179,64	179,64	179,64
Pflanzenschutzkosten	99,00	137,02	137,02	137,02	137,02	48,94
Maschinenkosten	280,50	336,50	330,00	330,50	457,00	332,00
Summe Kosten	582,83	676,29	669,90	670,40	796,90	649,07
Deckungsbeitrag	933,29	872,99	817,95	835,00	536,90	800,76

Mit 933,29 €/ha erzielt die chemische Variante A1 den höchsten Deckungsbeitrag. Dies ist zu begründen durch die niedrigen Pflanzenschutzkosten, da auf ein Voraufbauherbizid verzichtet werden konnte, sowie die geringen Maschinenkosten aufgrund weniger Überfahrten durch Bodenbearbeitung. Der niedrigste Deckungsbeitrag wird bei der elektrophysikalischen Variante C1 aufgrund der geringen Marktleistung sowie hoher Maschinenkosten, bedingt durch den preisintensiven Arbeitsgang des Elektroherbs, erzielt. Mit einem Deckungsbeitrag von 872,99 €/ha liegt die mechanische Variante B1 etwa 60 €/ha unter dem der Variante A1. Die höheren Pflanzenschutz- und Maschinenkosten können durch die höhere Marktleistung teilweise ausgeglichen werden. Die erhöhten Saatgutkosten bei Variante D1 sind durch die Kosten für die eingestriegelte Untersaat zu begründen.

Dieses Bild spiegelt sich auch beim Vergleich der Versuchsvarianten in Abhängigkeit der Schläge wider, wie Abbildung 34 ersichtlich macht:

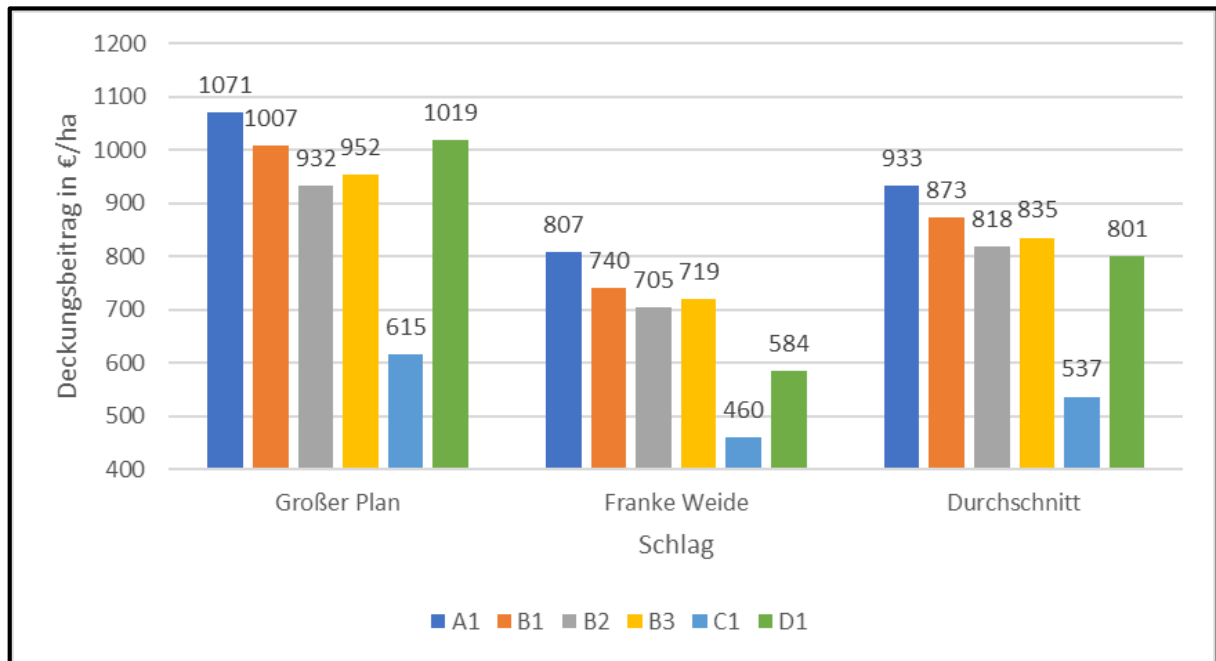


Abbildung 34: Vergleich Deckungsbeiträge in Abhängigkeit von Versuchsvarianten und Schlägen

Sowohl auf dem Schlag „Großer Plan“ als auch auf den Schlag „Franke Weide“ kann bei Variante A1 der höchste Deckungsbeitrag erzielt werden. Auf dem „Großen Plan“ ist die Variante D1 mit 1019 €/ha an zweiter Stelle, jedoch auf „Franke Weide“ mit lediglich 584 €/ha stark abgeschlagen. Neben der chemischen Variante sind die mechanischen Varianten B1, B2 und B3 in Abhängigkeit des Standortes am konstantesten anzusehen.

#### 4.7 Arbeitswirtschaft

Der arbeitswirtschaftliche Aspekt wird hinsichtlich der notwendigen Arbeitskraftstunden je Hektar, die für die Erledigung aller Maßnahmen notwendig ist, verglichen. Für die Berechnung wurden sowohl eigens berechnete als auch durch das KTBL bereitgestellte Werte zu Hilfe gezogen. Die vollständige Berechnung ist im Anhang 4 zu finden.



Die Zusammenfassung dieser Berechnung zeigt Abbildung 35:

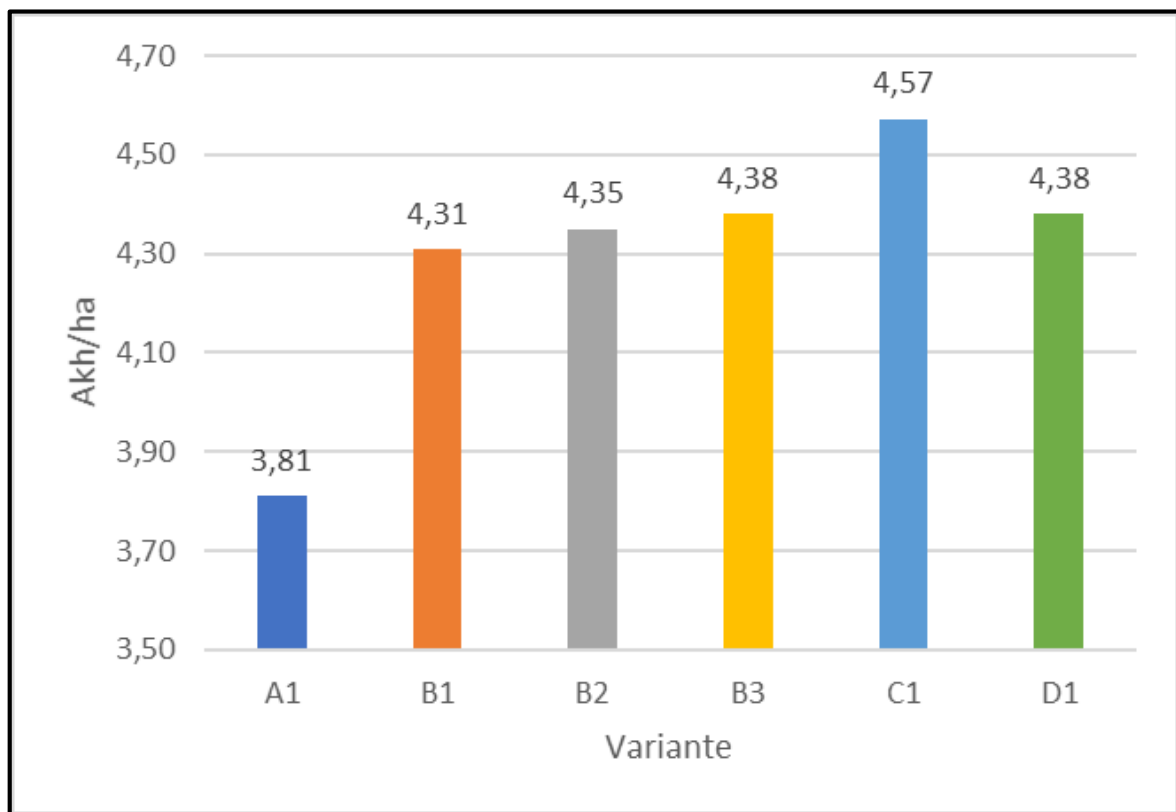


Abbildung 35: Vergleich der Arbeitskraftstunden je ha in Abhängigkeit der Versuchsvarianten (Mittelwerte)

Erkennbar ist, dass die chemische Variante A1 mit 3,81 Akh/ha den niedrigsten Arbeitszeitbedarf für die Erledigung der Maßnahmen hat. Mit 4,57 Akh/ha liegt Variante C1 etwa 20 % über dem Arbeitszeitbedarf der chemischen Variante, was auf die geringe Flächenleistung des Zasso XPower zurückzuführen ist.

#### 4.8 Dieselbedarf und CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Der Dieselbedarf wurde anhand von Werten aus der Literatur für die einzelnen Arbeitsgänge erfasst. Die ausführliche Berechnung des Dieselbedarfs ist in Anhang 4 zu finden. Abbildung 36 zeigt eine Zusammenfassung dieser Daten:

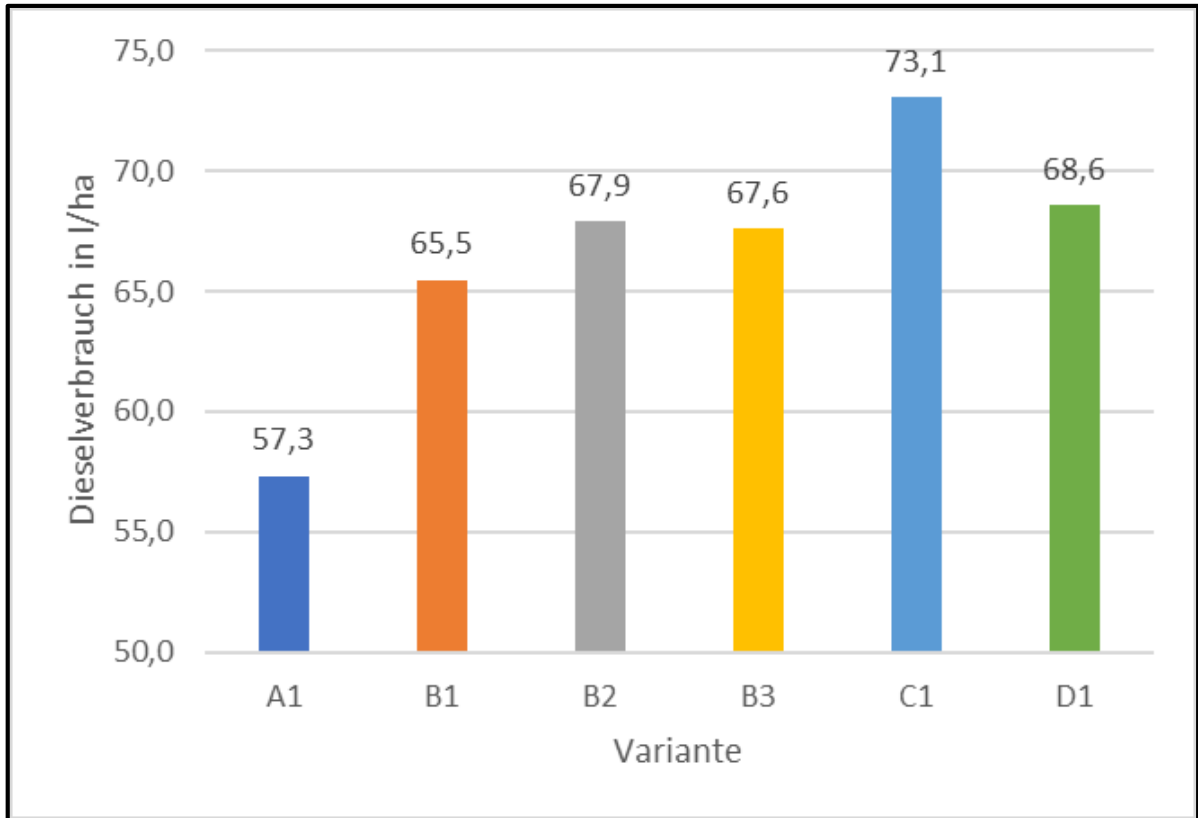


Abbildung 36: Vergleich des Dieserverbrauchs in Abhängigkeit der Varianten (Mittelwerte)

Auch hier zeigt sich, dass die Variante A1 mit 57,3 l/ha den geringsten Dieserverbrauch aufweist. Zu begründen ist das mit der geringen Anzahl an Überfahrten bei dieser Variante. Den höchsten Dieserverbrauch hat die elektrophysikalische Variante C1 mit 73,1 l/ha, was somit über 27 % höher ist als bei Variante A1. Der Grund hierfür ist die geringe Flächenleistung bei dem Verfahren und den Verbrauch pro Stunde bei dem Elektroherbizid, welcher mit 15-18 l/h Stunde angegeben ist [von Kobylinski, 2019]. Die mechanischen Varianten B1, B2 und B3 sowie die biologische Variante D1 liegen jeweils zwischen 65,5 (B1) und 68,6 l/ha (D1) und dementsprechend 14 – 20 % höher als die Standardvariante A1.

Um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu berechnen, liegt der Faktor bei 2,6 kg je Liter Dieseldieselkraftstoff (August, 2020). Nicht berücksichtigt hierbei die eventuelle Freisetzung von CO<sub>2</sub> durch den Abbau von Humus in Folge Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz.

Um diesen Wert objektiv zu beurteilen, wird in Tabelle 14 der CO<sub>2</sub>-Ausstoß je Hektar mit den Ertrag ins Verhältnis gesetzt:

Tabelle 14: CO<sub>2</sub>-Ausstoß und Erträge in Abhängigkeit der Versuchsvarianten (Mittelwerte)

Variante	A 1	B 1	B 2	B 3	C 1	D 1
<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß in kg/ha</b>	149,1	170,2	176,5	175,8	190,0	178,3
<b>Ertrag Winterweizen in dt/ha</b>	77,8	79,5	76,3	77,2	68,4	74,4
<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß in kg/dt Ertrag</b>	1,92	2,14	2,31	2,28	2,78	2,40

Hierbei zeigt sich, dass bei der Variante A1 mit 1,92 kg/dt Ertrag ebenfalls am wenigstens CO<sub>2</sub> ausgestoßen wird. Den höchsten CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Verhältnis zum Ertrag weist hier die elektrophysikalische Variante C1 auf. Abbildung 37 verdeutlicht dieses Bild, indem die Standardvariante A1= relativ 100 gesetzt wird:

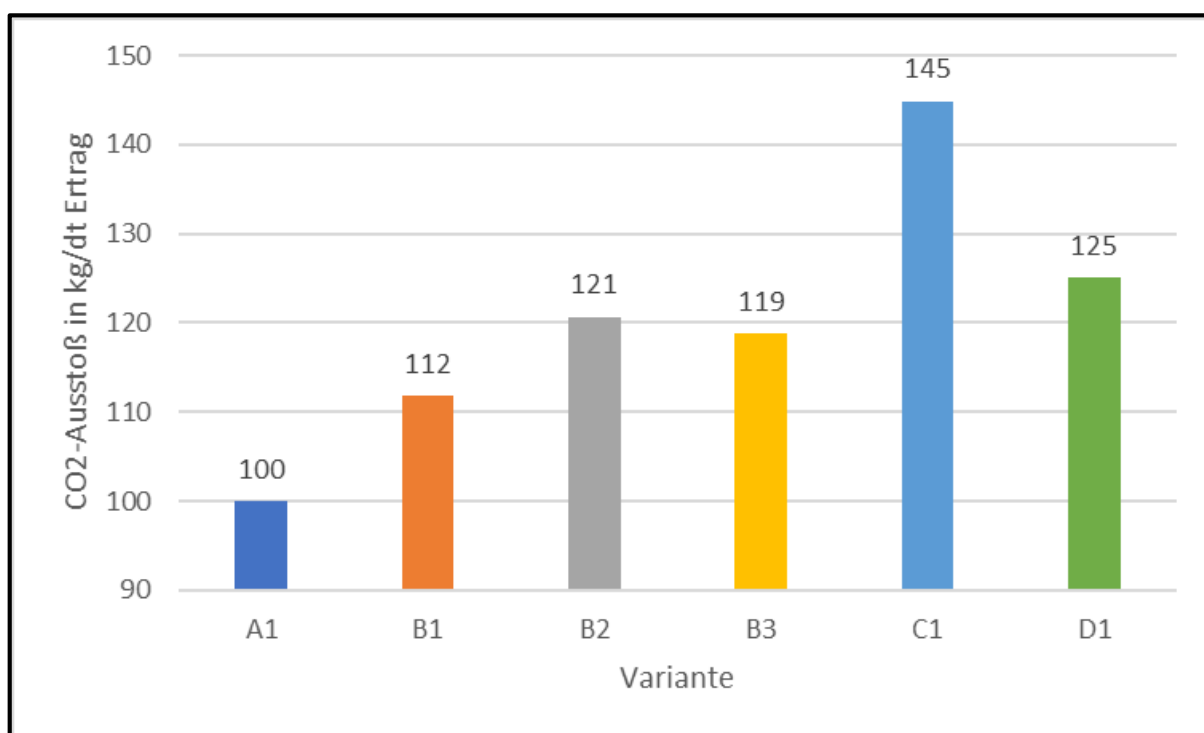


Abbildung 37: Vergleich CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Verhältnis zum Ertrag in Abhängigkeit der Versuchsvarianten: relativ A1=100 (Mittelwerte)

Es zeigt sich, dass die Variante C1 etwa 45% mehr CO<sub>2</sub> je erzeugte dt Ertrag ausstößt als die Standardvariante A1. Nach der Standardvariante A1 weist Prüfglied B1 mit relativ 112 den nächstkleineren CO<sub>2</sub>-Ausstoß je dt Ertrag auf. Die Varianten B2, B3 und D1 liegen hier zwischen 19 und 25 % höher als die Standardvariante A1.

## 5. Diskussion

In Kapitel 4.2 wurden die Ergebnisse der Varianten hinsichtlich des Stickstoffgehaltes im Boden zu den verschiedenen Terminen verglichen. Als wichtigste Termine sind hier Termin vier zur Vegetationsruhe (19.12.2020) sowie Termin fünf zu Vegetationsbeginn (27.02.2021) anzusehen. An Termin vier ist ein möglichst niedriger N<sub>min</sub>-Gehalt anzustreben, da der zu diesem Zeitpunkt im Boden befindliche Stickstoff der Gefahr unterliegt, durch die Winterniederschläge ausgewaschen zu werden und somit den Pflanzen im Frühjahr nicht mehr zur Verfügung steht. Hier weisen die intensiver bearbeiteten mechanischen Varianten B1 (35 kg N/ha) und B2 (33 kg N/ha) die höchsten Werte auf, wobei hier der größte Teil des Stickstoff in Form von Nitrat-N in der Bodenschicht von 0-30 cm zu finden ist. Der niedrigste N<sub>min</sub>-Gehalt ist bei diesem Termin bei der chemischen Variante A1 zu verzeichnen. Dieser liegt in Summe von 0-60 cm bei 24 kg/ha N<sub>min</sub>. Die Verteilung der N-Formen in den Bodenschichten ist hierbei ähnlich wie bei den oben genannten Varianten. Der Vergleich dieser Ergebnisse mit der Literatur und ähnlichen Versuchen bekräftigt den aktuellen Stand des Wissens, wodurch eine intensivere Bearbeitung des Bodens zu einer höheren Mineralisierungsrate und damit einhergehend zu höheren N<sub>min</sub>-Gehalten im Herbst und Winter führt.

Die Stickstoffgehalte in den Varianten zu Vegetationsbeginn liegen alle sehr dicht beieinander (19 – 22 kg N/ha), sodass von einer Auswaschung in tiefere Bodenschichten ausgegangen werden muss. Der Anteil an Nitrat-N in 0-30 cm ist hierbei geringer als zu Termin vier (zur Vegetationsruhe), während der Anteil Ammonium-N in 30 – 60 cm von 4 – 9 % auf 8 – 16 % ansteigt. Der steigende Ammoniumanteil ist hierbei auf die einsetzende Mineralisation zurückzuführen, bei der Stickstoff aus der organischen Substanz im Boden freigesetzt wird.

Ein weiterer Aspekt zur Beurteilung der Alternativen im Vergleich zur chemischen Variante mit Glyphosat ist der Vergleich der Erträge. Wie Abbildung 28 verdeutlicht, ist die chemische Variante (A1) auf beiden Versuchsschlägen bei dem Winterweizen im Jahr 2021 im oberen Bereich zu finden. Die drei mechanischen Varianten (B1, B2, B3) können ebenfalls konstant hohe Erträge erzielen. Auf beiden Schlägen fällt die elektrophysikalische Variante (C1) ertraglich im Vergleich zu den anderen Prüfgliedern ab.

Die biologische Variante D1 erzielt auf dem Schlag „Großer Plan“ den zweitbesten Ertrag, auf dem Schlag „Franke Weide“ jedoch den niedrigsten. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch beim dreijährigen Vergleich Erträge umgerechnet in Getreideeinheiten. Hier sind ebenfalls die Standardvariante A1 sowie die mechanischen Varianten B1, B2 und B3 die ertragsstärksten. Der dreijährige Ertragsschnitt der elektrophysikalischen Variante C1 ist indes 14 % niedriger als der der chemischen Variante. Auch hinsichtlich der Erträge war mit derartigen Ergebnissen aufgrund der Literatur und Versuchen mit einer ähnlichen Fragestellung zu rechnen.

Für die Bewertung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit wurden die Deckungsbeiträge der Varianten verglichen (s. Kapitel 4.6). Im hier vorliegenden Versuch konnte die chemische Variante mit Glyphosat im Mittel beider Schläge den höchsten Deckungsbeitrag erzielen. Auch wenn diese Variante nicht die höchste Marktleistung erzielt, sind die Kosten hier aufgrund eines fehlenden Bodenherbizides sowie geringeren Maschinenkosten niedriger als bei den Alternativvarianten. Auch die mechanischen Varianten B1, B2 und B3 schneiden mit höheren Deckungsbeiträgen ab, während die Variante C1 mit dem Elektroherbizid aufgrund deutlich höherer Maschinenkosten und der geringsten Marktleistung am schlechtesten abschneidet.

Diese Ergebnisse spiegeln einen wichtigen Aspekt für den Einsatz des Wirkstoffes Glyphosat wider. Die Wirtschaftlichkeit landwirtschaftlicher Betriebe kann u.U. durch das Verbot des Wirkstoffes und einen damit einhergehenden steigenden Maschineneinsatz sinken. Diese Mehrkosten für den Betrieb können bis zu 45 €/ha betragen. [M. Schulte et. al, 2016]

Durch den erhöhten Maschineneinsatz ist dementsprechend auch der Arbeitskraftbedarf höher, wie auf Abbildung 35 dargestellt ist. So liegt der der mechanischen Varianten ca. 13 – 15 % höher als bei der chemischen Variante und bei der elektrophysikalischen Variante sogar um 20 %. „Die zusätzliche Arbeitsbelastung würde besonders in der Zeit von Juli bis September anfallen und somit die ohnehin vorhandene Arbeitsspitze zusätzlich verstärken“ (vgl. Schulte et al., 2016). Dieser Fakt ist vor allem vor dem Hintergrund eines Fachkräftemangels von entscheidender Bedeutung für viele Landwirtschaftsbetriebe.

## 6. Fazit und Zusammenfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wurde ein Praxisversuch zum Thema „Einfluss mechanischer, biologischer oder elektrophysikalischer Verfahren der Unkrautregulierung auf die N-Mineralisierung des Bodens im Vergleich zur chemischen Alternative“ durchgeführt. In einem Streifenversuch wurden auf zwei Standorten altbewährte und innovative Verfahren zur Bearbeitung von Zwischenfruchtbeständen mit dem chemischen Verfahren mittels Glyphosateinsatz hinsichtlich ihres Einflusses auf die Stickstoffmineralisierung im Boden miteinander verglichen. Des Weiteren wurden die Varianten hinsichtlich der Wassergehalte in den Bodenproben, diverse Boniturergebnisse, Deckungsbeiträge, Arbeitskraftbedarf sowie Dieselbedarf und CO<sub>2</sub>-Ausstoß verglichen. Für die Analyse der N-Mineralisierungsraten sowie des Wassergehaltes wurden an fünf Terminen Bodenproben entnommen und zur Untersuchung an ein Labor weitergeleitet. Die Bonituren fanden an zwei Terminen statt. Für die übrigen Ergebnisse wurden Berechnungen mit Hilfe von Betriebs- und Literaturwerten durchgeführt.

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit und des EIP-Agri Projektes „Smarte UNkraut Kontrolle – Entwicklung innovativer Anbaustrategien zum Glyphosatverzicht im pfluglosen Ackerbau – SUNK“ war es, mechanische, elektrophysikalische und biologische Alternativen zum Wirkstoff Glyphosat hinsichtlich ihrer praktischen Eignung im pfluglosen Ackerbau zu untersuchen und zu vergleichen. Hauptaugenmerk lag hierbei auf den Einfluss der Stickstoffmineralisierung im Boden. Hierbei stellte sich heraus, dass an Termin 4 (19.12.2020 – zur Vegetationsruhe) der Bodenprobenahme, welcher zur Vegetationsruhe stattfand, die chemische Glyphosatvariante den niedrigsten N<sub>min</sub>-Wert aufweist, während die mechanischen Varianten die höchsten Werte haben. Dies deckt sich auch mit dem bisherigen Stand der Literatur, da durch Bodenbearbeitung die Bedingungen im Boden für eine stärkere Mineralisation geschaffen werden. Somit kann durch einen gezielten Einsatz von Glyphosat die Stickstoffmineralisation reduziert werden und somit die Gefahr von Nitratauswaschung ins Grundwasser gemindert werden.

Neben der Stickstoffmineralisation wurden die Varianten jedoch auch unter weiteren Gesichtspunkten evaluiert. So sind ökonomische Aspekte ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Auch hierbei ist die chemische Variante mit dem Glyphosat hinsichtlich des Deckungsbeitrages die Variante, welche aus Sicht des Landwirtes am besten abschneidet. Vergleichsweise hohe Erträge mit den geringsten Kosten aller Versuchsvarianten ergeben am Ende den höchsten Deckungsbeitrag aller Prüfglieder.

Da bei der Deckungsbeitragsrechnung mit Preisen für Betriebsmittel aus dem Jahr 2021 gerechnet wurde, ist damit zu rechnen, dass die Kosten bei den anderen Varianten noch höher sind, da der Preis für Diesel seitdem stark angestiegen ist. Zwar ist auch der Preis für glyphosathaltige Herbizide angestiegen, jedoch ist davon auszugehen, dass dies die Kosten weniger beeinflusst als der Dieselpreis. Beim Vergleich der Alternativen zur chemischen Variante fällt auf, dass die mechanischen Varianten etwa 8 – 10 Liter mehr Diesel je Hektar verbrauchen, die elektrophysikalische Variante mit dem Einsatz des Elektroherbizids sogar 16 Liter / ha mehr. Setzt man diese Zahlen mit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Diesels ins Verhältnis und legt diese den Erträgen gegenüber, so zeigt sich, dass bei der elektrophysikalische Variante 45 % mehr CO<sub>2</sub> / dt Ertrag ausgestoßen wird wie bei der chemischen Variante. Bei den anderen Varianten beträgt der Mehrausstoß zwischen 12 und 25 %. Durch den Abbau von Humus aufgrund der Stickstoffmineralisation könnte dieser Wert jedoch noch höher ausfallen, da dies in der Rechnung nicht berücksichtigt wurde.

Auch der Aspekt der Arbeitswirtschaft ist essenziell für Evaluierung der Varianten. Im hier durchgeführten Versuch waren die Arbeitskraftstunden je Hektar in der chemischen Variante deutlich geringer als bei den übrigen Varianten.

Dieser Fakt ist für kleinere als auch für Großbetriebe gleichermaßen von entscheidender Bedeutung da derzeit über einen immer stärker zunehmenden Fachkräftemangel geklagt wird. Da durch den Wegfall von Glyphosat die Anzahl der Arbeitsgänge zunehmen wird, und diese zudem noch in die Zeiten fallen, wo durch die Getreideernte etc. schon große Arbeitsspitzen auftreten, ist dies ein großer Ansatz für die Betrachtung von Glyphosat.

Zusammenfassend gilt also zu sagen, dass der Wirkstoff Glyphosat in vielerlei Hinsicht Vorteile aufweist und dadurch seine Daseinsberechtigung hat. Neben den im Versuch analysierten bzw. berechneten Faktoren Stickstoffmineralisierung, Ökonomie, Arbeitswirtschaft und CO<sub>2</sub>-Ausstoß gilt hier ebenfalls der Erosionsschutz zu nennen. Da durch den Verzicht auf Glyphosat mit einer intensiveren Bodenbearbeitung gerechnet werden muss, wo durchaus auch der Pflug eine Renaissance erleben könnte, erhöht sich die Erosionsgefahr aufgrund fehlender Mulchauflage auf einigen Standorten stark. Auch im Resistenzmanagement stellt Glyphosat derzeit noch einen wichtigen Baustein dar. Gerade bei Problemgräsern wie Ackerfuchsschwanz oder Windhalm ist der Einsatz des Totalherbizides von großer Bedeutung, da oftmals die meisten anderen Wirkstoffe keinen ausreichenden Bekämpfungserfolg garantieren. Auch für Betriebe, welche ihre Flächen in Direktsaat bewirtschaften und somit auf jeglichen Eingriff in den Boden verzichten, könnte es zukünftig ohne den Herbizidwirkstoff schwierig werden.

Da diese Betriebe keine Möglichkeit zur mechanischen Unkrautbekämpfung im Zuge der Bodenbearbeitung haben, benötigen sie das Glyphosat um Zwischenfrüchte, welche in diesem Anbausystem die Bodenlockerung übernehmen, sowie Unkräuter und Ungräser zu bekämpfen. Somit ist dieses nachhaltige und bodenschonende Anbausystem durch den Wegfall des Wirkstoffs in Gefahr.

Für Betriebe, welche das System der Mulchsaat praktizieren und derzeit Glyphosat einsetzen gilt es indes Lösungsansätze und Alternativen zu finden, diesen Wegfall zu kompensieren. Dies war das Ziel der hier vorliegenden Arbeit. Nach Meinung des Autors haben alle untersuchten Alternativen das Potenzial, die chemische Variante zu ersetzen. Am besten jedoch schneiden in diesen Versuch die mechanischen Varianten B1, B2 und B3 ab. Diese haben zwar die größten Stickstoffmineralisierungsraten, sind jedoch aufgrund der vergleichsweise geringen Kosten und der Ertragsstabilität für den Landwirt die beste Alternative zum Glyphosat.

Die elektrophysikalische Variante mit dem Elektroherbizid ist nach Meinung des Autors zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig praktikabel. Da für diese Art Gerät derzeit nur Arbeitsbreiten von 3 m angeboten werden ist die Flächenleistung aufgrund der zudem niedrigen Fahrgeschwindigkeit zu gering. Des Weiteren liegt der Dieserverbrauch je Hektar im Vergleich zu den anderen Varianten sehr hoch und die Anschaffungskosten für das Elektroherbizid-Gerät sind enorm, was diese Alternative sehr preisintensiv macht.

Die biologische Variante D1, in welcher hauptsächlich mit Zwischenfrüchten, Untersaaten und Begleitsaaten gearbeitet wird, hatte auf einen Versuchsschlag den zweithöchsten Ertrag, während es auf dem zweiten Versuchsschlag den niedrigsten Ertrag erzielte. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass bei dieser Alternative mit großen Ertragsschwankungen zu rechnen ist und nicht für alle Standorte geeignet ist. Für eine gute Unkrautunterdrückung ist eine sichere Etablierung der Zwischenfrüchte und Untersaaten essenziell, wofür eine ausreichende Wasserversorgung gewährleistet sein muss. Ist nicht ausreichend Wasser vorhanden, haben es Zwischenfrüchte und Untersaaten schwer und geben Unkräutern und Ungräsern Platz sich zu etablieren.

Abschließend gilt zu sagen, dass es sich bei dem hier durchgeführten Versuch um einen Basis- bzw. Tastversuch handelt und zum Großteil nur das Erntejahr 2021 betrachtet wurde. Aus diesem Grund sind hierfür noch weitere Versuche und Studien notwendig, welche sich mit demselben Thema beschäftigen, um entsprechend nachhaltige Empfehlungen und Ansätze diesbezüglich zu geben.



Das EIP-Agri Projektes „Smarte UNkraut Kontrolle – Entwicklung innovativer Anbaustrategien zum Glyphosatverzicht im pfluglosen Ackerbau – SUNK“ endet im Februar 2023 und die Ergebnisse dieses Langzeitversuchs geben einen konkreteren Ausblick darauf, wie sich der pfluglose Ackerbau zukünftig ohne Glyphosat entwickeln könnte.

## Literaturverzeichnis

**aid Infodienst (2015):**

„Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“, 2. Auflage

**Amlinger, F., Peyr, S., Dreher, P. (2003):**

„Kenntnisstand zur Frage des Stickstoffaustrags in Kompostdüngungssystemen“.

**August, K. (2020, online):** „Wie viel CO<sub>2</sub> steckt in einem Liter Benzin“ – Helmholtz;

URL: <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/wie-viel-co2-steckt-in-einem-liter-benzin/>

(Abruf: 22.03.2022)

**Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)**

online: „Einsatzumfang von Glyphosat“.

URL: <https://www.lfl.bayern.de/ips/unkraut/192703/index.php> (Abruf: 25.01.2022)

**Buchner, W.; Köller, K. (1990):** „Integrierte Bodenbearbeitung“,

Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart

**Epperlein, J. (2002):** „Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin.“

-Dissertation – Universität Berlin

**Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e.V. – GkB e.V. (2020) online:**

„Smarte Unkrautkontrolle – Teil 5 – Aussaat Winterweizen“.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=iTWHnoSMMBA> (Abruf: 05.02.2022)

**Kerner Maschinenbau** online: „Corona 450, 500“.

URL: <https://www.kerner-maschinenbau.de/produkte/corona-450-500/> (Abruf: 05.02.2022)

**Köckerling** online: „Allrounder -classic-„.

URL: <https://www.koeckerling.de/produkte/bodenbearbeitung/grubber/allrounder-classic>

(Abruf: 05.02.2022)

**Kolbe, H. et al. (2004):** „Zwischenfrüchte im ökologischen Landbau“ –

sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft

**Köller, K; Linke, C. (2001):** „Erfolgreicher Ackerbau ohne Pflug“, 2. Auflage, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt

**Krawutschke, M (2007):** „Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf Gehalt und Dynamik der organischen Bodensubstanz in Ackerböden sowie deren Bedeutung für die Humusbilanzierung“ -Masterarbeit – Justus-Liebig-Universität Gießen

**Krebs, R.; Egli, M.; Schulin, R.; Tobias, S. (2017):** „Bodenschutz in der Praxis“, 1. Auflage, Haupt Verlag

**Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (1998):**

„Bodenbearbeitung und Bodenschutz“

KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH

**Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) online:**

„Feldarbeitsrechner“. URL: <https://daten.ktbl.de/feldarbeit/home.html>

**Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie online:** „NIBIS Kartenserver“.

URL: <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?TH=510#> (Abruf: 01.02.2022)

**Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfULG) online:**

„Die Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union“.

URL: [https://www.smul.sachsen.de/lfulg/download/LfULG-Rollup\\_WRRL\\_web-neu.pdf](https://www.smul.sachsen.de/lfulg/download/LfULG-Rollup_WRRL_web-neu.pdf)  
(Abruf: 29.01.2022)

**Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH, 2020):** „Zwischenfrucht-Leitfaden“

**Möller, K. (2018, online):** „Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf Ertrag und Qualität von Feldfrüchten und auf bodenökologische und bodenchemische Parameter“ – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) – URL: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/bodennutzung-bearbeitungsverfahren.html> (Abruf: 27.01.2023)

**Peter, M. (2020) online:** „Woher kommt der Reststickstoff am Ende der Vegetation?“

in RBZ – Nr. 24; URL: [https://www.schnittstelle-](https://www.schnittstelle-boden.de/download/2020_rbz_24_2020_peter_nachernntemanagement_und_zwischenfruechte.pdf)

[boden.de/download/2020\\_rbz\\_24\\_2020\\_peter\\_nachernntemanagement\\_und\\_zwischenfruechte.pdf](https://www.schnittstelle-boden.de/download/2020_rbz_24_2020_peter_nachernntemanagement_und_zwischenfruechte.pdf) (Abruf: 27.01.2022)

**Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (2018):** „Lehrbuch der Bodenkunde“, 17. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland

**Schulte, M. et al. (2016):**

„Ökonomische Bewertung eines Glyphosatverzichts auf einzelbetrieblicher Ebene“

**Tschuy, F. et al (2014):** „Unkrautunterdrückung durch Zwischenfrüchte:

Analyse verschiedener Faktoren“ –

Institut für Pflanzenbauwissenschaften IPB Nyon, Schweiz

**Umweltbundesamt (UBA, 2022)** online: „FAQs zu Nitrat im Grund- und Trinkwasser“.

URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/nutzung-belastungen/faqs-zu-nitrat-im-grund-trinkwasser#> (Abruf: 21.01.2023)

**Väderstad** online: “CrossCutter Disc”.

URL: <https://www.vaderstad.com/de/produkte/crosscutter-disc/> (Abruf: 05.02.2022)

**Verband der Landwirtschaftskammern (2007)** online: „Fachinformation –

Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) und Landwirtschaft“

URL: <http://www.landwirtschaftskammern.de/pdf/wrrl-position.pdf> (Abruf: 27.01.2022)

**von Kobylinski, H. (2019, online):** „Unkraut mit Starkstrom bekämpfen“ – badische Bauern Zeitung –

URL: <https://www.badische-bauern-zeitung.de/unkraut-mit-starkstrom-bekaempfen> (Abruf: 17.03.2022)

**Wetterkontor** online: „Monats- und Jahreswerte für Helmstedt-Emmerstedt“.

URL: <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/monatswerte-station.asp> (Abruf: 03.02.2022)

**Zasso** online: „Flächenapplikation – XP300“.

URL: <https://zasso.com/de/portfolio/flaechenapplikation/> (Abruf: 05.02.2022)

# Anhang

## Anhang 1: Auswertung Bodenprobenergebnisse – Schlag: Großer Plan

Variante	Schichttiefe (cm)	Termin	Datum	NH4-N (kg/ha)	NO3-N (kg/ha)	N-min (kg/ha)	Wasser (%)
A1	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	2,5	12,9	15,4	10,6
A1	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	0,6	9,5	10,1	13,7
B1	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	2,5	18,0	20,5	11,6
B1	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	0,4	13,0	13,4	16,2
B2	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	1,0	19,4	20,3	11,6
B2	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	0,0	13,7	13,7	16,5
B3	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	1,0	14,9	15,9	11,9
B3	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	0,4	10,1	10,6	15,1
C1	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	1,1	24,9	26,1	10,1
C1	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	0,0	14,3	14,3	16,2
D1	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	1,2	13,9	15,0	10,6
D1	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	2,3	9,1	11,4	12,0
A1	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	5,6	17,7	23,3	15,4
A1	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	2,0	11,8	13,8	14,7
B1	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	3,7	16,2	20,0	16,0
B1	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	1,3	9,1	10,4	14,0
B2	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	3,3	19,0	22,3	15,5
B2	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	0,9	10,7	11,6	16,2
B3	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	1,9	21,1	22,9	16,2
B3	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	1,1	7,0	8,1	14,7
C1	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	5,6	19,2	24,8	16,2
C1	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	1,1	13,6	14,7	15,1
D1	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	1,2	5,1	6,3	14,6
D1	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	8,9	14,2	23,1	14,5
A1	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	2,8	20,2	23,0	13,9
A1	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	0,5	13,4	13,9	17,5
B1	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	3,9	25,2	29,1	15,5
B1	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,1	11,8	12,9	16,1
B2	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	4,3	18,8	23,2	15,7
B2	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,3	10,5	11,8	14,8
B3	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,7	24,1	25,8	16,5
B3	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	0,9	17,0	17,9	19,0
C1	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	2,7	20,2	22,9	15,3
C1	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,0	14,5	15,4	20,4
D1	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	2,9	16,9	19,8	15,5
D1	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	0,9	14,7	15,6	16,1
A1	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	4,3	15,5	19,8	15,5
A1	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,4	11,7	13,2	20,9
B1	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	8,8	21,0	29,8	16,6
B1	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	4,5	15,3	19,8	16,8
B2	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,9	15,1	16,9	16,4
B2	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	4,0	20,5	24,5	15,9
B3	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	4,0	17,9	21,8	16,0
B3	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,8	11,9	13,7	16,3
C1	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	2,9	17,1	20,0	15,5
C1	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,1	18,2	19,3	15,7
D1	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	3,3	15,7	19,0	15,4
D1	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	0,7	11,1	11,8	16,0
A1	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	5,0	6,0	11,0	17,3
A1	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	3,0	6,0	9,0	18,7
B1	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	4,0	11,0	15,0	17,8
B1	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	2,0	7,0	9,0	19,8
B2	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	4,0	9,0	13,0	17,4
B2	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	2,0	8,0	10,0	17,8
B3	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	2,0	13,0	15,0	16,2
B3	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	2,0	7,0	9,0	18,7
C1	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	3,0	10,0	13,0	16,9
C1	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	2,0	9,0	11,0	17,8
D1	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	4,0	10,0	14,0	15,5
D1	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	2,0	5,0	7,0	17,5

## Anhang 2: Auswertung Bodenprobenergebnisse – Schlag: Franke Weide

Variante	Schichttiefe (cm)	Termin	Datum	NH4-N (kg/ha)	NO3-N (kg/ha)	N-min (kg/ha)	Wasser (%)
A1	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	3,1	22,0	25,1	7,3
A1	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	1,3	5,4	6,7	4,8
B1	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	3,3	6,1	9,5	7,9
B1	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	1,0	2,9	3,9	6,7
B2	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	2,2	7,0	9,2	6,8
B2	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	1,0	2,5	3,5	6,6
B3	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	3,2	6,0	9,2	8,2
B3	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	1,0	3,8	4,8	8,1
C1	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	2,6	8,3	10,9	8,8
C1	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	0,8	4,8	5,6	8,1
D1	0 - 30	vor Anlage	02.10.2020	2,2	5,5	7,8	7,3
D1	30 - 60	vor Anlage	02.10.2020	0,6	2,2	2,8	8,1
A1	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	4,6	7,9	12,6	10,9
A1	30 - 60	nach Aussaat	24.10.2020	1,6	3,1	4,7	9,4
B1	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	7,1	7,9	15,0	10,4
B1	30 - 60	nach Aussaat	24.10.2020	2,0	3,2	5,2	8,8
B2	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	15,8	7,0	22,8	9,6
B2	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	2,1	3,3	5,5	6,2
B3	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	5,2	4,8	10,0	10,7
B3	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	1,9	1,0	2,9	10,4
C1	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	3,3	5,7	9,0	11,5
C1	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	1,2	1,6	2,8	8,7
D1	0 - 30	nach Aussaat	24.10.2020	3,9	8,4	12,3	11,7
D1	30 - 60	nach Aussaat	23.10.2020	1,6	1,4	3,0	7,8
A1	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	7,2	10,5	17,7	11,3
A1	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,3	5,0	6,3	11,6
B1	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	5,6	12,8	18,5	11,2
B1	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,7	5,8	7,4	10,6
B2	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	3,9	13,6	17,5	11,1
B2	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,5	6,9	8,4	11,9
B3	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	4,9	11,8	16,7	11,1
B3	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	2,7	6,2	8,8	10,2
C1	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	3,9	8,5	12,4	10,8
C1	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,4	4,8	6,2	10,7
D1	0 - 30	BBCH 12 - 13	14.11.2020	5,1	14,3	19,4	11,6
D1	30 - 60	BBCH 12 - 13	14.11.2020	1,5	6,1	7,5	11,5
A1	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	2,5	8,0	10,5	11,5
A1	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	0,6	4,4	5,0	11,8
B1	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	4,1	10,9	15,0	11,3
B1	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,6	4,7	6,4	10,4
B2	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	3,9	12,7	16,6	10,5
B2	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,2	5,9	7,1	9,6
B3	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	2,5	10,1	12,6	11,0
B3	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,2	7,5	8,7	10,9
C1	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	4,5	9,4	13,9	11,9
C1	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,3	8,6	9,9	11,7
D1	0 - 30	Vegetationsruhe	19.12.2020	2,2	9,8	11,9	11,7
D1	30 - 60	Vegetationsruhe	19.12.2020	1,3	7,3	8,5	11,2
A1	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	3,0	6,0	9,0	12,2
A1	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	2,0	6,0	8,0	14,6
B1	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	4,0	4,0	8,0	13,0
B1	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	1,0	7,0	8,0	17,6
B2	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	5,0	4,0	9,0	13,0
B2	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	2,0	5,0	7,0	17,0
B3	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	5,0	5,0	10,0	13,3
B3	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	3,0	5,0	8,0	13,2
C1	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	6,0	4,0	10,0	13,7
C1	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	5,0	4,0	9,0	14,5
D1	0 - 30	vor Düngung	27.02.2021	4,0	4,0	8,0	12,4
D1	30 - 60	vor Düngung	27.02.2021	4,0	5,0	9,0	13,7

Anhang 3: Deckungsbeitragsrechnungen ausführlich – nach Varianten

Variante	A1 - chemisch: Glyphosat				B1 - mechanisch: Väderstad CrossCutter Disc				B2 - mechanisch: Kerner Corona			
	Schlag	Großer Plan	Franken Weide	Mittelwert	Großer Plan	Franken Weide	Mittelwert	Großer Plan	Franken Weide	Mittelwert	Großer Plan	Mittelwert
		Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM	Umfang / AWM
		€/ ha	€/ ha	€/ ha	€/ ha	€/ ha	€/ ha	€/ ha	€/ ha	€/ ha	€/ ha	€/ ha
Marktleistung	Ertrag (Hauptleistung)	83,2	72,3	77,8	85,0	73,9	79,5	80,0	72,6	76,3	80,0	76,3
	Preis (je dt)	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50
	Marktleistung gesamt	1622,40	1409,85	1516,13	1657,50	1441,05	1549,28	1560,00	1415,70	1487,85	1560,00	1487,85
Saatgut	Saatgut Klee											
	Saatgut Zwischenfrucht	35,14	0,00	0,00	35,14	0,00	0,00	35,14	0,00	0,00	35,14	0,00
	Saatgut Winterweizen	179,00	23,23	23,23	179,00	23,23	23,23	179,00	23,23	23,23	179,00	23,23
Saateignung gesamt												
Düngung	SSA	2,50	0,68	1,7	0,45	2,1	0,56	6,07	22,88	5,8	22,88	6,07
	Gesamt	6,07	22,88	5,8	21,94	5,9	22,41	1,20	68,04	1,3	68,04	1,20
	ASL 18/9	1,20	68,04	1,3	72,58	1,2	70,31	1,50	149,2	1,50	149,2	1,50
	60er Kalium	1,50	0,42	149,2	41,79	75,4	21,10	100,80	18,14	103,4	18,14	100,80
	NP 7/17	100,80	18,14	103,4	18,61	102,1	18,38	0,97	2,48	1,0	2,48	0,97
	Bor	0,97	2,48	1,0	2,48	1,0	2,48	0,10	0,26	0,1	0,26	0,10
	Kupfersulfat	0,10	0,26	0,1	0,26	0,1	0,26	0,10	0,26	0,1	0,26	0,10
	Mangannitrat	0,97	3,47	1,0	3,47	1,0	3,47	0,97	3,47	1,0	3,47	0,97
	Zinksalz	0,10	0,21	0,1	0,21	0,1	0,21	0,10	0,21	0,1	0,21	0,10
	Nutri Phite	0,34	9,97	0,3	9,97	0,3	9,97	0,34	9,97	0,3	9,97	0,34
	Bittersalz	3,48	1,11	3,5	1,11	3,5	1,11	3,48	1,11	3,5	3,48	1,11
	KAS	1,1	29,17	1,1	29,17	1,1	29,17	1,1	29,17	1,1	29,17	1,1
	Bittersalz	2,1	0,66	2,1	0,66	2,1	0,66	2,1	0,66	2,1	2,1	0,66
Düngung gesamt												
Pflanzenschutz	Kantor	26,44 €/l	5,82	0,22	5,82	0,22	5,82	2,02	18,61	2,00	18,61	2,02
	Taifun Forte	2,17 €/l	1,85	4,01	1,85	4,01	1,85	0,41	27,77	0,40	27,77	0,41
	Amega	3,04 €/l	4,86	1,60	4,86	1,60	4,86	0,41	27,77	0,40	27,77	0,41
	Boxer	9,22 €/l	6,00	0,00	6,00	0,00	6,00	0,41	27,77	0,40	27,77	0,41
	Cadoux SC	67,72 €/l	23,15 €/l	0,47	10,88	0,47	10,88	0,47	10,88	0,47	10,88	0,47
	Herold SC	23,15 €/l	25,60	12,29	25,60	12,29	25,60	25,60	12,29	25,60	12,29	25,60
	Ariane C	0,47	10,88	0,47	10,88	0,47	10,88	0,47	10,88	0,47	10,88	0,47
	Drigent	0,48 €/g	26,18 €/l	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27
	Kantor	26,18 €/l	6,96	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27
	Kantor	26,18 €/l	6,96	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27	6,96	0,27
	Protendo	40,29 €/l	5,24	0,25	6,55	0,25	6,55	0,13	5,24	0,25	5,24	0,13
	Ultraline	40,29 €/l	14,91	0,49	19,62	0,49	19,62	0,37	14,91	0,49	14,91	0,37
	Elatus Era	52,64 €/l	21,58	0,41	21,58	0,41	21,58	0,41	21,58	0,41	21,58	0,41
	Kantor	26,18 €/l	3,22	0,12	3,22	0,12	3,22	0,12	3,22	0,12	3,22	0,12
Pflanzenschutz gesamt												
Maschinenkosten	Spritzen	13,50 €/ha	54,00	4,0	54,00	4,0	54,00	4,0	54,00	4,0	54,00	4,0
	Bodenbearbeitung Crosscutter	28,00 €/ha		0,0		0,0		4,0	54,00	4,0	54,00	4,0
	Bodenbearbeitung Corona	33,00 €/ha		0,0		0,0		2,0	56,00	2,0	56,00	2,0
	Bodenbearbeitung Allrounder	22,00 €/ha		0,0		0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Elektroherb	190,00 €/ha		0,0		0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Säen	56,00 €/ha	56,00	1,0	56,00	1,0	56,00	1,0	56,00	1,0	56,00	1,0
	Düngen	8,50 €/ha	25,50	3,0	25,50	3,0	25,50	3,0	25,50	3,0	25,50	3,0
	ASL Düngen	50,00 €/ha	50,00	1,0	50,00	1,0	50,00	1,0	50,00	1,0	50,00	1,0
	Striege in Untersaat	15,00 €/ha		0,0		0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ernte	95,00 €/ha	95,00	1,0	95,00	1,0	95,00	1,0	95,00	1,0	95,00	1,0
Maschinenkosten gesamt												
Kosten gesamt												
Deckungsbeitrag												

XIII



## Anhang 4: Berechnung Dieselbedarf, Arbeitszeitbedarf, CO2-Ausstoß ausführlich

[illegible]

