LEGUTEC – MECHANISCHE BEIKRAUTREGULIERUNG IM SOJAANBAU IN LUXEMBURG

Deutscher Auszug aus dem offiziellen englischen Abschlussbericht

Dezember 2020

Ein Projekt des **Institut fir Biologësch Landwirtschaft an Agrarkultur Luxemburg a.s.b.l. (IBLA)**, dem **Lycée Technique Agricole Ettelbrück (LTA)**, **Geocoptix GmbH** und **Wolff-Weyland S.A.**. Finanziert durch die **Oeuvre Nationale de Secours Grande-Duchesse Charlotte**, dem **Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural** und mit Unterstützung der **König-Baudouin-Stiftung und der Belgischen Nationalen Lotterie** sowie durch Sponsoring von **Wolff-Weyland S.A.** und **Piet van Luijk Sàrl.**.

> Herausgeber/ IBLA | 27, Op der Schanz, L-6225 Altrier | www.ibla.lu
> Autoren / Laura Leimbrock-Rosch, David Richard, Dr. Stéphanie Zimmer
> in Kooperation mit Geocoptix GmbH / Dr. Gilles Rock, Vanessa Hueffer

Nachhaltige, ressourcenschonende Eiweißproduktion durch mechanische, Herbizid freie Beikrautregulierungstechniken im Körnerleguminosenanbau am Beispiel der Sojabohne

Projektlaufzeit: 2017 –2020

Projekt-koordination

IBLA Institut fir Biologësch Landwirtschaft an Agrarkultur Luxemburg a.s.b.l.

Projektpartner

Lycée Technique Agricole

agri-distribution WOLFF-WEYLAND L-8551 NOERDANGE - 00352 23637-200 www.wowey.eu - info@wowey.eu

GEOCOPTIX

Bio-Betrieb „An Dudel“ Emering, Sprinkange;

Bio-Betrieb Mehlen, Manternach,

Bio-Betrieb François, Hostert

Finanzierung

LE GOUVERNEMENT DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural

ŒUVRE Nationale de Secours Grande-Duchesse Charlotte

mit Unterstützung der König-Baudouin-Stiftung und der Belgischen Nationalen Lotterie

Sponsoren

agri-distribution WOLFF-WEYLAND L-8551 NOERDANGE - 00352 23637-200 www.wowey.eu - info@wowey.eu

PIET VAN LUIJK Produits agricoles - Aliments bétails

Der vorliegende Bericht ist ein in deutscher Sprache angefertigter Auszug aus dem offiziellen englischen Abschlussbericht des Projektes LeguTec nach Leimbrock-Rosch et al. (2020). Dem offiziellen englischen Abschlussbericht sind detaillierte Resultate und weiterführende Informationen zu entnehmen.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis iii

Tabellenverzeichnis iv

Danksagung vi

Zusammenfassung 1

1. Einleitung 3

2. Material und Methoden des Exaktversuches 6

2.1 Generelles Versuchsdesign 6

2.2 Ablauf des Sojaanbaus 8

2.2.1 Bodenanalyse und Bodenvorbereitung vor der Aussaat 8

2.2.2 Aussaat der Sojabohnen 9

2.2.3 Blindstriegeln 9

2.2.4 Mechanische Beikrautregulierung nach dem Auflaufen 10

2.2.5 Ernte 12

2.3 Versuchsdesign 2018 und Standortcharakteristiken 13

2.4 Versuchsdesign 2019 und Standortcharakteristiken 18

2.5 Datenerhebung 24

2.6 Statistische Auswertung 28

2.7 Geodatenanalyse 29

2.7.1 Datenerhebung und Datenvorverarbeitung 29

2.7.2 Vegetationsindices und Klassifikationsverfahren 31

2.7.3 Spatial statistics 32

2.8 On-Farm-Versuch in Bettendorf 34

3. Ergebnisse und Diskussion 37

3.1 Effizienz der Beikrautregulierung 37

3.1.1 Ertrag 37

3.1.2 Beikraut-Charakteristiken 38

3.1.2.1 Effizienz der Beikrautregulierung VOR und NACH 39

3.1.2.2 Effizienz der Beikrautregulierung NACH und BLÜTE 40

3.1.3 Stressfaktoren für die Sojapflanzen 41
3.1.4 Ertragsparameter 43
3.1.4.1 Anzahl der Hülsen pro Pflanze 43
3.1.4.2 Hülsenansatzhöhe 43
3.1.4.3 Proteingehalt 44
3.1.5 Resultierende Anbauempfehlungen 44
3.2 Einfluss auf die Beikrautdiversität 46
3.2.1 Artenvorkommen 46
3.2.2 Einfluss der Beikrautregulierung auf die Artenvielfalt 48
3.2.3 Problematische Beikrautarten und gefährdete Arten 49
3.3 Fernerkundungstechniken und Geodatenanalysen 50
3.4 Wissenstransfer 53
3.4.1 On-Farm-Versuch in Bettendorf 53
3.4.2 Ausblick zum Sojaanbau in Luxemburg 54
3.4.3 Kommunikation nach außen und Veröffentlichungen 55
3.4.4 Erkenntnisse für zukünftige wissenschaftliche Versuche 57
4. Fazit und Ausblick 58
Literatur 61
Anhang 68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der Versuchsflächen in Luxemburg. Neben dem Exaktversuch auf 3 Bio-Standorten ist zudem die Fläche des On-Farm-Versuches in Bettendorf dargestellt. 6

Abbildung 2: Versuchsdesign des Exaktversuches am Standort Manternach 2019. Die Nummern innerhalb der Parzellen kennzeichnen die Varianten gemäß der Legende rechts in der Abbildung. 7

Abbildung 3: Durchführung eines falschen Saatbettes. In Rot sind die Beikräuter und in Grün die Sojabohnen dargestellt. Die Zeitachse lässt die geeigneten Tage zur Saatbettvorbereitung erkennen (Bernet et al., 2016). 8

Abbildung 4: Impfung des Soja-Saatguts (links, Foto: IBLA), Ansicht der Saat in Sprinkange von oben (Mitte, Foto: Serge Heuschling) und Blindstriegeln in Sprinkange (rechts, Foto: IBLA). 9

Abbildung 5: Überblick über die empfohlenen Zeitpunkte (BBCH-Stadien) für den Einsatz verschiedener mechanischer Beikrautregulierungstechniken. Markierungen in roter Farbe zeigen an, dass die Maschine nicht verwendet werden sollte, während die grüne Farbe das optimale Stadium für die Behandlung anzeigt. Punkte symbolisieren den Grad der Geräteeinstellung von schwach bis hart (Bernet et al., 2016). 11

Abbildung 6: Mechanische Beikrautregulierung mit dem Striegel (links), der Hacke mit Gänsefußscharen (Mitte) und der Hacke mit Fingerhacken (rechts) (Fotos: IBLA). 12

Abbildung 7: Ernte der Sojabohnen mit dem Parzellenmähdrescher (links und Mitte, Fotos: IBLA) und dem Mähdrescher des Landwirts Marc Emering in Sprinkange (rechts, Foto von Nikos Zompolas). 12

Abbildung 8: Witterungsbeeinflusste Bodenverhältnisse in Sprinkange: Bodenrisse 07.05.2018 (links) und feuchter Boden 04.06.2018 (rechts). 16

Abbildung 9: Tagesmitteltemperatur (blaue Linie) und Niederschlagssummen (schwarze Balken) der Wetterstation Potaschberg, repräsentativ für den Versuchsstandort Manternach im Jahr 2018 (agrimeteo.lu). 17

Abbildung 10: Standort Hostert 09.10.2019. Die Bilder zeigen die inhomogene Abreifung und die ersten Hülsen, die von Pilzen befallen wurden (rechts). 21

Abbildung 11: Differenz zwischen den Niederschlagssummen des Sommers 2019 (01.06.-31.08.) und der Referenzperiode 1981-2010. Anomalien der Niederschlagssummen (in blau) an den ASTA-Stationen, an denen die Referenzperiode für 1981-2010 bestimmt werden kann (ASTA, 2019). 22

Abbildung 12: Tagesmitteltemperatur (blaue Linie) und Niederschlagssummen (schwarze Balken) der Wetterstation Potaschberg, repräsentativ für den Versuchsstandort Manternach im Jahr 2019 (agrimeteo.lu). 23

Abbildung 13: Beispielhaftes Schema der Unterteilung jeder Parzelle in ihre Teilparzellen (gelb), der laufende Meter für die Zählung der Sojapflanzen (rot) und die Ernteparzelle (blau). 26

Abbildung 14: Boniturrahmen für die reihenabhängigen Varianten $t.4_{Hacke}$, $t.5_{Hacke+}$ und $t.6_{Kombi}$ (links) und die reihenunabhängigen Varianten $t.1_{neg}$, $t.2_{pos}$, $t.3_{Striegel}$ und $t.7_{Mix}$ (rechts). 27

Abbildung 15: UAV-setup: DJI Phantom 4 Pro (links) mit Micasense RedEdge-M camera (mitte) und Spektrale Eigenschaften der Micasense RedEdge-M-Kamera (rechts). 30

Abbildung 16: Versuchsstandorte in Hostert in den Jahren 2018 (links, Datum der Datenerhebung: 08.07.2018) und 2019 (rechts, Datum der Datenerhebung: 16.06.2019). 30

Abbildung 17: Versuchsstandorte in Sprinkange in den Jahren 2018 (links, Datum der Datenerhebung: 21.06.2018) und 2019 (rechts, Datum der Datenerhebung: 26.07.2019). 31
Abbildung 18: Versuchsstandorte in Manternach in den Jahren 2018 (links, Datum der Datenerhebung: 18.05.2018) und 2019 (rechts, Datum der Datenerhebung: 09.07.2019). 31
Abbildung 19: Central subset für die Extraktion von spatial statistics in Hostert 2018. 33
Abbildung 20: Central subset für die Extraktion von spatial statistics in Hostert 2019. 33
Abbildung 21: Versuchsdesign des On-Farm-Versuches in Bettendorf im Jahre 2019. 34
Abbildung 22: Striegel (links), Hacke (Mitte) und Mähdrescher (rechts) im On-Farm-Versuch in Bettendorf (Quelle: LTA). 35
Abbildung 23: Durchschnittliche Mittelwerte der Sojapflanzenverluste mit Bestandeseinfluss [%] und Standardabweichung der verschiedenen Varianten für die Versuchsstandorte Manternach19 und Hostert18. Gemeinsame Buchstaben zeigen keine signifikanten Unterschiede an bei p≤0,05 nach Tukey-Test und nach Fisher-Test als post-hoc für Kruskal-Wallis-Test ** 42
Abbildung 24: Durchschnittswerte der Anzahl von Beikrautarten innerhalb jeder ökologischen Gruppe (ein- und zweijährige Zweikeimblättrige, mehrjährige Zweikeimblättrige, Einkeimblättrige) für jede Variante $t.1_{neg}$ (1), $t.2_{pos}$ (2), $t.3_{Striegel}$ (3), $t.4_{Hacke}$ (4), $t.5_{Hacke+}$ (5), $t.6_{Kombi}$ (6) und $t.7_{Mix}$ (7), für VOR (BWC), NACH (AWC), BLÜTE (FLO) und ERNTE (HAR), für Hostert19. Balken zeigen die Standardabweichung der Gesamtzahl der Beikrautarten für jede Variante an. Unterschiedliche Buchstaben am oberen Rand der Balken zeigen signifikante Abweichungen zwischen den Varianten bei p≤0,05 an. 48
Abbildung 25: Vegetationsklassifizierung des Standortes: Manternach am 03.06.2019. 52
Abbildung 26: Vegetationsbedeckung in Manternach19. Links: bildbasiert, rechts: In-situ-Erhebung. (BWC=VOR, AWC=NACH, FLO=BLÜTE). 53
Abbildung 27: Sojabohnenertrag [dt ha^{-1}] im Jahr 2018 des On-fram Versuches in Bettendorf der sieben Varianten: a) zwei Hackdurchgänge, b) ein Durchgang mit Striegel und Hacke mit Fingerhacken, c) ein Durchgang mit Striegel und Hacke, d) ein Striegeldurchgang, e) ein Hackdurchgang und ein weitere mit Hacke und Fingerhacke, und f) chemische Beikrautbekämpfung im Reihenabstand von 12,5 cm und g) chemische Beikrautbekämpfung im Reihenabstand von 37,5 cm. 54
Abbildung 28: Offizielle Feldbegehung auf dem Versuchsstandort Bio-Betrieb Mehlen in Manternach 2018. 55
Abbildung 29: Offizielle Feldbegehung auf dem Versuchsstandort Bio-Betrieb Francois in Hostert 2019.. 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennzahlen des Exaktversuches im LeguTec-Projekt sowie Daten der im Jahr 2018 durchgeführten Arbeitsschritte. Temperatur und Niederschlag werden als 7-Jahres-Mittel (2011-2017, agrimeteo.lu) und als 3-Jahres-Mittel für Manternach angegeben. CHU vom 01.05.-15.09. Das Entwicklungsstadium der Sojapflanze wird in Klammern mit Hilfe der BBCH-Skala nach Munger et al., 1997 angegeben. 14

Tabelle 2: Überblick über die Methoden im Versuchsjahr 2018 der Varianten $t.1_{neg}$ (1), $t.2_{pos}$ (2), $t.3_{Striegel}$ (3), $t.4_{Hacke}$ (4), $t.5_{Hacke+}$ (5), $t.6_{Kombi}$ (6) und $t.7_{Mix}$ (7) an den Versuchsstandorten im Jahr 2018. Entsprechende Daten sind in Tabelle 1 aufgeführt. 15
Tabelle 3: Kennzahlen des Exaktversuches im LeguTec-Projekt sowie Daten der im Jahr 2019 durchgeführten Arbeitsschritte. Temperatur und Niederschlag werden als 7-Jahres-Mittel (2012-2018, agrimeteo.lu) und als 4-Jahres-Mittel für Manternach angegeben (Station Potaschbierg, agrimeteo.lu. CHU vom 01.05.-15.09. Das Entwicklungsstadium der Sojapflanze wird in Klammern mit Hilfe der BBCH-Skala nach Munger et al., 1997 angegeben. 19
Tabelle 4: Überblick über die Methoden im Versuchsjahr 2019 der Varianten $t.1_{neg}$ (1), $t.2_{pos}$ (2), $t.3_{Striegel}$ (3), $t.4_{Hacke}$ (4), $t.5_{Hacke+}$ (5), $t.6_{Kombi}$ (6) und $t.7_{Mix}$ (7) an den Versuchsstandorten im Jahr 2018. Entsprechende Daten sind in Tabelle 3 aufgeführt. 20
Tabelle 5: Überblick über die Bonituren und Auswertungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Projekt LeguTec entlang den beiden Vegetationsperioden 2018 und 2019. 25
Tabelle 6: Kennzahlen des On-Farm-Versuches im LeguTec-Projekt sowie Daten der im Jahr 2019 durchgeführten Arbeitsschritte. Temperatur und Niederschlag werden als 7-Jahres-Mittel der Station Bettendorf angegeben. (2012-2018, agrimeteo.lu). CHU vom 01.05.-15.09. Das Entwicklungsstadium der Sojapflanze wird in Klammern mit Hilfe der BBCH-Skala nach Munger et al., 1997 angegeben. ... 36
Tabelle 7: Mittlerer Sojabohnenertrag [dt ha^{-1}] bei 86 % TM der verschiedenen Methoden für die drei Versuchsorte und die beiden Versuchsjahre. Die Mittelwerte, gefolgt von einem gemeinsamen Buchstaben innerhalb jeder Spalte, unterscheiden sich bei $p<0,05$ nicht signifikant nach dem Tukey-HSD-Test, oder dem Fisher-LSD-Test und der ANOVA $p\leq0.1$ (*). Die Erträge für Hostert 2019 wurden anhand der Ertragsstruktur geschätzt (2019_{est}). 37
Tabelle 8: Mittlere Beikrautregulierungseffizienz (WCE) [%] basierend auf der Beikrautdeckung der verschiedenen Varianten der Versuchsstandorte in den beiden Versuchsjahren. Mittelwerte, auf die innerhalb jeder Spalte ein gemeinsamer Buchstabe folgt, unterscheiden sich nicht signifikant bei $p\leq0,05$ gemäß Fisher-LSD-Test als post-hoc des Kruskal-Wallis-Test **. 39
Tabelle 9: Beikrautreglierungsindex (WCI) zum Zeitpunkt der Blüte berechnet auf Basis der Beikrautdeckung (WCI_{cov}) und der Beikrautbiomasse (WCI_{bio})für jeweils die Standorte und Jahre. Grüne Markierungen zeigen die höchsten Effekte in der entsprechenden Variante im Vergleich zur Negativkontrolle ($t.1_{neg}$) an. Positive Werte in roter Markierung weisen auf schlechtere Effekte im Vergleich zu $t.1_{neg}$ hin. Es erfolgte nur eine deskriptive Statistik. 40
Tabelle 10: Mittler Beikrautdeckung [%] zur BLÜTE der verschiedenen Methoden für die drei Versuchsorte und die beiden Versuchsjahre. Die Mittelwerte, gefolgt von einem gemeinsamen Buchstaben innerhalb jeder Spalte, unterscheiden sich bei $p<0,05$ nicht signifikant nach Tukey-HSD-Test, oder Fisher-LSD-Test und der ANOVA $p\leq0.1$ (*); und bei $p\leq0,05$ gemäß Fisher-LSD-Test als post-hoc für den Kruskal-Wallis-Test **. 41
Tabelle 11: Liste der Beikrautarten je ökologischer Gruppe und Artengesamtzahl der Standorte und Jahre, die während der Soja-Vegetationsperiode identifiziert wurden. Arten in Fett kommen gemeinsam vor. Arten der Roten Liste der Gefäßpflanzen Luxemburgs (Colling 2005) sind in Klammern dargestellt, NT: nahezu bedroht, R: extrem selten, VU: gefährdet. 47

Danksagung

Das Projekt LeguTec war ein Gemeinschaftsprojekt des Instituts fir Biologësch Landwirtschaft an Agrarkultur Luxemburg a.s.b.l. (IBLA), dem Lycée Technique Agricole Ettelbrück (LTA), Geocoptix GmbH und Wolff-Weyland S.A..

Das Projekt wurde finanziert von der Oeuvre Nationale de Secours Grande-Duchesse Charlotte und dem Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural und wurde zudem dankenswerterweise von der König-Baudouin-Stiftung und der Belgischen Nationalen Lotterie unterstützt.

Besonderer Dank gilt den Sponsoren des Projektes LeguTec Wolff-Weyland S.A. und Piet van Luijk Sàrl, sowie den teilnehmenden Landwirten Marc und Luc Emering, Alex Mehlen und Patrick François.

Ebenfalls sind wir sehr dankbar für die personelle Unterstützung des technischen Personals der LTA Marc Reinig und Georges Schmit, und deren Spontanität und Flexibilität über das ganze Jahr hinweg.

Weiterhin möchten wir uns recht herzlich bei dem Unternehmen MUELLERKALK DE bedanken, ein Natursteinwerk in Üxheim-Ahütte/Vulkaneifel, durch das der auf den Versuchsflächen notwenige Kalk kostenfrei zur Verfügung gestellt wurde. Auch die Ernte mit dem Mähdrescher auf dem Versuchsstandort Manternach wurde in 2018 gebührenfrei von dem Landwirt Georges Hentges durchgeführt. Die eingesetzte Rollhacke in 2019 wurde von dem Biolandwirt Mario Kleer aus Everlange zur Verfügung gestellt. Für diese Unterstützungen bedanken wir uns herzlich.

Nikos Zompolas hat das Projekt fotographisch begleitet und uns die Bilder anschließend zur Verfügung gestellt. Hierfür möchten wir uns ebenfalls sehr herzlich bedanken.

Während des letzten Projektjahres ist eine Masterarbeit mit der Unterstützung von Dr. Christophe Naudin, Dozent der Agronomie an der Ecole Supérieure d'Agricultures d'Angers (ESA), zustande gekommen. Für diese Kooperation sind wir sehr dankbar.

Zusammenfassung

Die Sojabohne ist in Luxemburg noch keine etablierte Kulturpflanze. Wissenslücken bestehen vor allem bei der mechanischen Beikrautregulierung. Die Ziele des LeguTec Projekts sind (i) die Überprüfung der Effizienz verschiedener mechanischer Beikrautregulierungsmethoden zur Maximierung des Sojabohnenertrags, (ii) die Untersuchung der Auswirkungen der Methoden auf die Beikrautgemeinschaften, (iii) die Beurteilung der Eignung von Fernerkundungstechniken und Geodatenanalysen für landwirtschaftliche Forschungsfragen zur Unterstützung oder Ersetzung von In-situ-Bewertungsmethoden und (iv) die Weitergabe von Wissen über den Sojaanbau an die Landwirte. In den Jahren 2018 und 2019 wurden an drei ökologisch bewirtschafteten Standorten in Manternach, Sprinkange und Hostert Feldversuche eingerichtet und fünf verschiedene mechanische Beikrautregulierungsmaßnahmen in einem randomisierten vollständigen Blockdesign mit vier Wiederholungen getestet: eine Negativkontrolle ($t.1_{neg}$), in der keine Beikrautregulierung stattgefunden hat; eine Positivkontrolle ($t.2_{pos}$), in der das Beikraut manuell entfernt wurde; eine Striegelvariante ($t.3_{Striegel}$); eine Hackvariante mit Gänsefußscharen ($t.4_{Hacke}$); eine Hackvariante mit Gänsefußscharen und Fingerhacken ($t.5_{Hacke+}$); ein flexibles System, eine Kombination aus Variante $t.3_{Striegel}$, $t.4_{Hacke}$ und $t.5_{Hacke+}$ ($t.6_{Komb}$) und der Mischfruchtanbau von Sojabohnen und Leindotter in Bearbeitung mit dem Striegel ($t.7_{Mix}$).

Beide Versuchsjahre waren geprägt von längeren Trockenperioden und starkem Wasserstress vor allem während der Blütezeit, was die Hülsenbildung negativ beeinflusste und zu einer Notreife führte; die Wasserverfügbarkeit war somit der wichtigste limitierende Faktor für den Sojabohnenertrag. Dennoch wurden signifikante Unterschiede im Ertrag zwischen den verschiedenen mechanischen Beikrautregulierungsmethoden beobachtet. Bei den Hackvarianten wurden im Allgemeinen höhere Erträge erzielt als bei den Striegelvarianten. Die Erträge waren zudem beim Hacken und manuellem Entfernen vergleichbar. Auch waren die Erträge bei der Striegelvariante im Vergleich zu keiner durchgeführten Maßnahme ähnlich. Blindstriegeln hingegen hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag. Außerdem hatte das Fingerhacken keinen signifikanten Einfluss auf die Wirksamkeit der Hackmethode. Insgesamt wurde beim Hacken eine bessere Selektivität gegenüber Beikraut beobachtet als beim Striegeln. Bei Letzterem führten größere Pflanzenverluste und Schäden an der Sojapflanze zu einer höheren Beikrautbildung und einem höheren Beikrautbefall. Dies führte beim Striegel im Vergleich zur Hackvariante zu einer verstärkten Wasserkonkurrenz zwischen Sojabohnen und Beikraut, was sich wiederum negativ auf den Ertrag auswirkte. Es zeigte sich, dass der Mischfruchtanbau mit Leindotter für Luxemburg nicht geeignet ist, insbesondere nicht während der trockenen Versuchsjahre.

Eine konsequente Feldbewirtschaftung während der gesamten Fruchtfolge zur Verringerung des Beikrautdrucks ist der Schlüsselfaktor zur Maximierung des Sojabohnenertrags. Die Effizienz jeglicher Behandlung war gering, wenn der Beikrautdruck nach dem Auflauf der Sojabohne bereits

hoch war. War der Beikrautdruck zu Beginn der vegetativen Phase der Sojabohne jedoch gering, zeigte jede der Methoden ausreichend Wirkung.

An allen Standorten wurde eine hohe anfängliche Beikrautdiversität beobachtet. Insgesamt wurden 59 Beikrautarten identifiziert, wobei ein- und zweijährige zweikeimblättrige Arten dominierten. Die Vielfalt der Beikräuter, ausgedrückt durch den Shannon-Index, wurde durch mechanische Regulierungsmaßnahmen reduziert; keine der Methoden eliminierte jedoch alle Beikräuter vollständig. Im Allgemeinen wirkte sich das Hacken stärker negativ auf die Vielfalt aus als das Striegeln. *Chenopodium album*, *Elymus repens*, *Persicaria lapathifolia*, *Polygonum convolvulus*, *Tripleurospermum inodorum* und *Vicia spec.* waren die problematischsten Beikräuter im Bestand, sowohl hinsichtlich der Ressourcenkonkurrenz gegenüber Sojabohnen als auch hinsichtlich der Beeinträchtigung bei der Ernte.

Hochauflösende Fernerkundungstechniken stellen eine Vielzahl von wertvollen Werkzeugen zur Überwachung von Versuchsaufbauten dar. Praktische Fernerkundungsmethoden bieten jedoch nur begrenzte Vorteile im Vergleich zu In-situ-Bewertungsmethoden, die weiterhin die erste Wahl für die quantitative Datenerhebung in einem wissenschaftlichen Rahmen sind. Die Entwicklung eines Pflanzenwachstumsmodells für Sojabohnen würde eine bessere Entscheidungsfindung in Bezug auf die mechanische Beikrautregulierung ermöglichen.

Die hohe Besucherzahl bei den Feldbegehungen verdeutlichte das rege Interesse der Landwirte am Sojaanbau. Die Vermittlung der gewonnenen Erfahrungen half dabei, erste Anbaubestrebungen von Sojabohnen in Luxemburg zu starten. Für eine zukünftige erfolgreiche Etablierung des Sojaanbaus in Luxemburg ist jedoch eine kontinuierliche Forschung unerlässlich, um das langfristige Ziel zu erreichen, die Anbaumethoden an das sich verändernde Klima anzupassen, Anbauhürden zu überwinden und eine nachhaltige, ressourceneffiziente Proteinproduktion zu fördern. Die Landwirte müssen mehr Erfahrung im On-Farm-Sojabohnenanbau sammeln, unterstützt von auf den Sojaanbau spezialisierten Beratern. Dass der Sojaanbau in Luxemburg machbar ist, zeigen die bisher erfolgten Versuche. Die fehlenden Weiterverarbeitungsinfrastrukturen, die die Rentabilität mindern, stellen das Hauptproblem dar und hemmen den Sojaanbau in Luxemburg nach wie vor. Um die nationale Sojabohnenproduktion zu fördern und die Eiweißautarkie zu erhöhen, sind Anreize seitens der öffentlichen Behörden von entscheidender Bedeutung.

1. Einleitung

Die Sojabohne (*Glycine max* (L.) Merr) gehört zu der Pflanzenfamilie *Leguminosae* und ist eine der ältesten Kulturpflanzen der Welt (Hahn et al., 2013). Mit einem Proteinanteil von etwa 40 % und einer sehr hohen biologischen Wertigkeit aufgrund einer idealen Aminosäurezusammensetzung ist sie eine der wichtigsten Futtereiweißquellen in der Tierernährung. Besonders für Monogastrier wie Schweine und Geflügel ist der hohe Gehalt an den beiden essentiellen Aminosäuren Lysin und Methionin in der Bohne wesentlich (Bernet et al. 2016). Als Eiweißpflanze bringt die Sojabohne eine Vielzahl an positiven Eigenschaften für den Einsatz in der Landwirtschaft mit sich: Der Anbau von Soja erweitert und lockert die Fruchtfolge, erhöht die Agro-Biodiversität, führt durch die Fähigkeit zur Stickstoff-Fixierung zu einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und trägt somit zu einer Einsparung von Stickstoffdünger bei (Köpke et al., 2010; Nemecek et al., 2008).

Als einer der EU-Staaten, die die Europäischen Soja-Erklärung (European Soya Declaration, 2017) unterzeichnet haben, macht es sich Luxemburg zu dem Ziel, den regionalen Anbau von Sojabohnen und weiteren Eiweißpflanzen zu fördern. Ausschlaggebend dafür ist die derzeitige Abhängigkeit von Importen aus überwiegend Nord- und Südamerika. Die EU importiert rund 96 % ihrer Sojabohnen und ihres Sojaschrots, wovon etwa 90 % GVO-Soja (gentechnisch veränderte Organismen) sind (European Commission, 2016). Die Sojabohnen-Autarkie in Europa beträgt nur 4 % und beläuft sich auf 2,8 Mio. t, während 35 Mio. t jährlich importiert werden (Bernet et al. 2016; Europäische Union 2020a, b). Importe aus Übersee gehen mit diversen ökologischen und sozialen Problemen einher (Beste et al. 2011). Durch den großflächigen Anbau von Soja als Monokultur in den Produktionsländern (z.B. USA, Brasilien, Paraguay) und des damit einhergehenden intensiven Gebrauchs von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln, insbesondere Glyphosat im konventionellen Anbau, kommt es zu einem starken Verlust der Biodiversität sowie zu Bodenerosion und zudem zu gesundheitlichen Gefahren für die Bevölkerung. Die weltweit hohe Nachfrage nach Sojaschrot für die Futtermittelproduktion führt zudem zu einem starken Flächendruck, bei dem Regenwälder abgeholzt werden um Platz für Sojaanbauflächen zu schaffen, was wiederum zu einem Verlust an Biodiversität und zur Landflucht führt. Auch besteht das Risiko der Vermischung mit GVO-Soja und die langen Transportwege wirken sich negativ auf die CO_2-Emissionen aus (Beste et al, 2011). In Zeiten des Klimawandels, der weit verbreiteten Degradation unserer natürlichen Ressourcen und des zunehmenden Auftretens von degenerativen Krankheiten müssen Alternativen zu diesen Praktiken gefunden werden.

Im Jahr 2018 betrug die Autarkie und Produktion von Sojabohnen in Luxemburg 0 % (Service d'Economie Rurale (SER, Landwirtschaftlicher Wirtschaftsdienst), 2019) mit einem berechneten nationalen Verbrauch von 27.453 t Sojaextraktionsschrot (Zimmer, 2019). Laut Zimmer (2019) besteht die Möglichkeit, diese Menge an Sojaschrot in den Futterrationen zu verringern, was zu einer potenziellen Reduzierung des nationalen Sojabohnenverbrauchs auf 15.886 t Sojaschrot pro Jahr führen könnte. Luxemburg ist ein günstiger Grünlandstandort mit einem hohen Potenzial für die

Nutzung von Grünland als Proteinquelle für Milchkühe. Im Hinblick auf die hohe Selbstversorgung mit hofeigenem Futter, dem reduzierten Verbrauch von Sojabohnen in den Futterrationen und die geringere Viehdichte im ökologischen Landbau im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft könnte der ökologische Landbau als Vorbild dienen, um eine höhere Sojabohnen-Autarkie in Luxemburg als Grundlage für eine nationale Proteinstrategie zu erreichen (Zimmer, 2019). Außerdem wäre der nationale Sojaanbau eine weitere Möglichkeit die Proteinautarkie zu erhöhen. Diese Gesamtstrategie würde die Abhängigkeit von importierter Soja und die damit verbundenen negativen ökologischen und sozialen Auswirkungen reduzieren sowie einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Dank der Züchtung neuer Sorten mit sehr früher Reife und an die kühleren Anbaugebiete Mitteleuropas angepassten Impfmitteln, ist der Sojaanbau heute in vielen Teilen Europas möglich (Zimmer et al. 2016a, b). In Luxemburg wurde der Sojaanbau in den letzten Jahren in Feldversuchen und On-Farm Versuchen erfolgreich getestet (Heidt H., 2019; Richard et al., 2020; Zimmer et al., 2016a). Allerdings ist der ökologische Anbau von Sojabohnen anspruchsvoll und eine Weiterverarbeitung ist bisher aufgrund fehlender Infrastrukturen weder in Luxemburg noch in der Großregion gewährleistet (z.B. Toasten als eine Möglichkeit der Wärmebehandlung). Vor allem Wissenslücken in Bezug auf effiziente und nachhaltige mechanische Beikrautregulierungstechniken hemmen momentan noch den Sojaanbau (Zimmer et al., 2016b). Zimmer et al. (2016b) stellten fest, dass sich die luxemburgischen Landwirte schlecht über den Anbau von Körnerleguminosen informiert fühlen, weil es ihnen an Wissen und Beratungsdiensten für diese Kulturen mangelt. Weiterhin stellten sie fest, dass ein großes Interesse der luxemburgischen Landwirte für den Soja- und Körnerleguminosenanbau besteht. Auf der anderen Seite strebt die luxemburgische Regierung, die 2017 die europäische Soja-Erklärung unterzeichnet hat, eine Steigerung des regionalen Sojabohnenanbaus und anderer Hülsenfrüchte an. Um den letztgenannten Forderungen gerecht zu werden, ist wiederum Fachwissen innerhalb der Produktion unerlässlich.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Referenzen zur mechanischen Beikrautregulierung, zu den verschiedenen Methoden, die im ökologischen Landbau angewendet werden, sowie zu den Parametern, die bei der Beikrautregulierung eine wesentliche Rolle spielen. Diese Referenzen liefern vergleichbare Informationen und Kenntnisse über die verschiedenen Techniken und ihre Wirkungsweisen. Dennoch gibt es nur wenige wissenschaftliche Studien, die sich auf die mechanische Beikrautregulierung bei Sojabohnen oder anderen Hülsenfrüchten konzentrieren. Zudem wurden nur geringfügig Studien bezüglich des Vergleichs von verschiedenen Techniken und dessen Kombinationen untereinander gefunden. Die wissenschaftlichen Studien konzentrieren sich hauptsächlich auf die Auswirkungen des Reihenabstands, der Sojabohnensorten oder der Sojabohnendichte auf den Beikrautdruck (bspw. Caliskan et al., 2007; Sobko et al, 2019; Zhou et a., 2011; Zimmer et al., 2016c). Technische Leitfäden für ökologische Erzeuger sind in der Literatur verfügbar und bieten reichhaltige Informationen, insbesondere im europäischen Kontext, an. Hierbei

sind die Länder Frankreich, Deutschland, die Schweiz oder Österreich am stärksten vertreten (bspw. Bernet et al., 2016; Le Gall et al., 2017). Als Nachbarländer Luxemburgs wird hierbei der Anbaukontext zum Teil ähnlich sein, womit diese Leitfäden eine Grundlage für die Wahl der Techniken und den günstigen Zeitpunkt für die Beikrautregulierung darstellen. Es fehlt jedoch an quantitativen Daten, die den Erfolg dieser Methoden belegen. Aufgrund der unterschiedlichen Klimabedingungen und Bodentypen kann sich Luxemburg nicht auf globale Ergebnisse stützen. Der Bedarf an lokalen Erfahrungen und Referenzen ist grundlegend und notwendig, um nicht nur die Landwirte für den Sojaanbau zu überzeugen, sondern insgesamt den Sojaanbau adäquat implementieren zu können.

Hieraus ergeben sich folgende Ziele für das Projekt LeguTec: (i) die Überprüfung der Effizienz verschiedener mechanischer Beikrautregulierungsmethoden zur Maximierung des Sojabohnenertrags, (ii) die Untersuchung der Auswirkungen der Methoden auf die Beikrautgemeinschaften, (iii) die Beurteilung der Eignung von Fernerkundungstechniken und Geodatenanalysen für landwirtschaftliche Forschungsfragen zur Unterstützung oder Ersetzung von In-situ-Bewertungsmethoden und (iv) die Weitergabe von Wissen über den Sojaanbau an die Landwirte.

Das Projekt soll weiterhin zu den Möglichkeiten beitragen, die Proteinautarkie Luxembourgs durch die Förderung einer nachhaltigen und Ressourcen-effizienten nationalen Sojabohnenproduktion zu erhöhen.

Das Projekt LeguTec umfasste einen Exaktversuch auf drei über Luxemburg verteilten Sandorten auf Bio-Betrieben, wobei jeder Versuchsfläche als randomisierte, vollständige Blockanlage konzipiert wurde. Zusätzlich wurde ein Versuchsfeld des Lycée Technique Agricole (LTA) in Bettendorf als On-Farm-Versuch angelegt.

Der vorliegende Bericht ist ein in deutscher Sprache angefertigter Auszug aus dem offiziellen englischen Abschlussbericht des Projektes LeguTec nach Leimbrock-Rosch et al. (2020). Dem offiziellen englischen Abschlussbericht sind detaillierte Resultate und weiterführende Informationen zu entnehmen.

2. Material und Methoden des Exaktversuches

2.1 Generelles Versuchsdesign

In den zwei aufeinanderfolgenden Anbaujahren 2018 und 2019 bestand der Exaktversuch im Projektes LeguTec aus jeweils drei über Luxemburg verteilte Versuchsflächen auf Biobetrieben, wobei jeder Standort als einfaktorieller Versuchsanlage konzipiert wurde. Es ergaben sich somit sechs unterschiedliche Flächen in den beiden Jahren. Als Versuchsstandorte wurden die folgenden drei Bio-Betriebe ausgewählt: Bio-Betrieb Patrick François in Hostert, Bio-Betrieb Alex Mehlen in Manternach und auf dem Bio-Betrieb An Dudel von Marc Emering in Sprinkange (s. Abbildung 1).

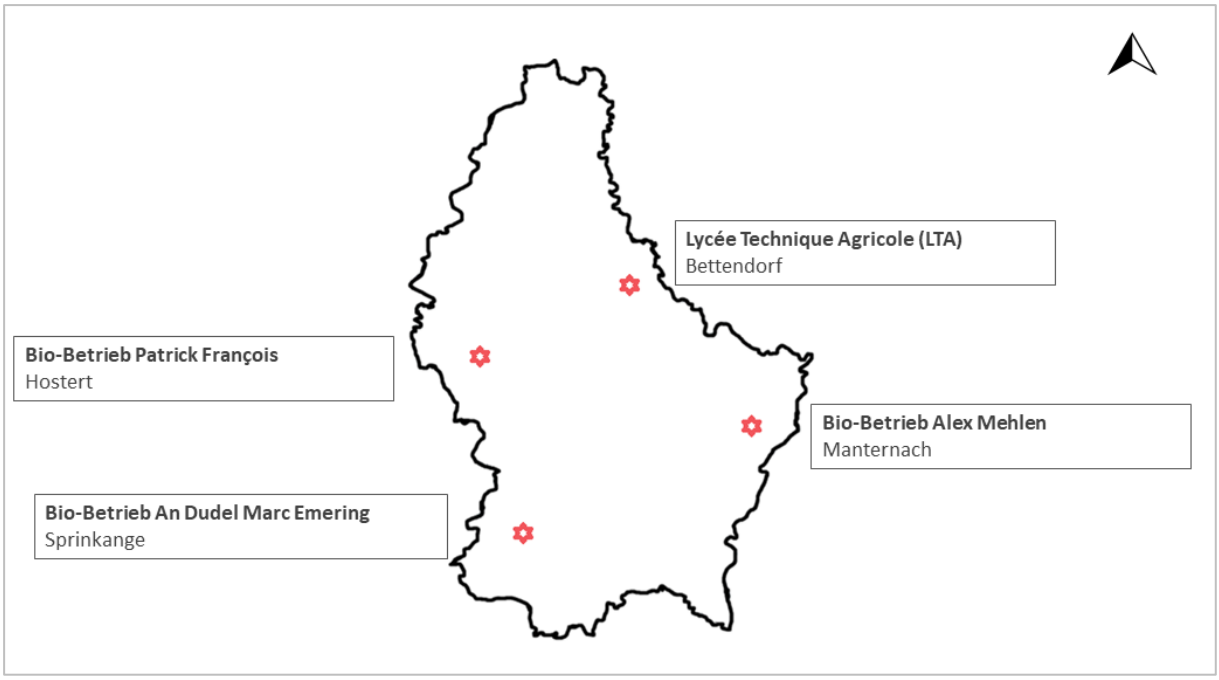


Abbildung 1: Lage der Versuchsflächen in Luxemburg. Neben dem Exaktversuch auf 3 Bio-Standorten ist zudem die Fläche des On-Farm-Versuches in Bettendorf dargestellt.

Die Auswahl der Versuchsstandorte auf den drei luxemburgischen Bio-Betrieben erfolgte bereits im jeweiligen Vorjahr basierend darauf, dass die Sojabohne in die Fruchtfolge passt, die Flächen relativ homogen sind mit möglichst geringem Gefälle und unterschiedliche Bodentypen vertreten sind. Die Feldversuche wurden als randomisierte, vollständige Blockanlagen angelegt. Fünf verschiedenen Systemen der mechanischen Beikrautregulierung sowie zwei Kontrollparzellen wurden in vierfacher Wiederholung getestet und miteinander verglichen (s. Abbildung 2). Eine negative Kontrolle ($t.1_{neg}$), in der keine Beikrautregulierung erfolgte, und eine positive Kontrolle ($t.2_{pos}$), in der das gesamte Beikraut manuell entfernt wurde, wurden als Kontrollparzellen berücksichtig. Die mechanische Beikrautregulierung erfolgte mit einem Striegel ($t.3_{Striegel}$), mit einer Hacke mit Gänsefußscharen ($t.4_{Hacke}$), mit einer Hacke mit Gänsefußscharen sowie der Applikation von Fingerhacken ($t.5_{Hacke+}$), in einem flexiblen System ($t.6_{Kombi}$), einer Kombination aus $t.3_{Striegel}$, $t.4_{Hacke}$ und $t.5_{Hacke+}$, wobei die Entscheidung für oder gegen den jeweiligen Einsatz je nach Standort und Witterungsbedingungen individuell getroffen wurde, sowie in einer Mischkultur von Soja und Leindotter, die mit dem Striegel bearbeite wurde ($t.7_{Mix}$). Letztere Variante beruhte auf der Idee, die Produktion zu diversifizieren

und als Mischkultur besser mit dem Beikraut konkurrieren zu können. In Deutschland fanden bereits Versuche zum Mischanbau von Sojabohnen und Leindotter statt, die zu einem geringeren Beikrautbefall führten (Froschhammer et al., 2015). Die Reihenabstände der Sojapflanzen sowie die Parzellenbreite hingen von den getesteten Varianten und Maschinen ab. Für die Varianten $t.1_{neg}$, $t.2_{pos}$, $t.3_{Striegel}$ und $t.7_{Mix}$ wurde ein Reihenabstand von 12,5 cm und für die Hackvarianten $t.4_{Hacke}$, $t.5_{Hacke+}$ und $t.6_{Kombi}$ ein Reihenabstand von 37,5 cm gewählt. Die Parzellen der Varianten $t.1_{neg}$, $t.2_{pos}$, $t.4_{Hacke}$ und $t.5_{Hacke+}$ hatten eine Breite von jeweils 3 m und die Varianten $t.3_{Striegel}$, $t.6_{Kombi}$ und $t.7_{Mix}$ eine Breite von 6 m, begründet auf der jeweiligen Maschinenbreite, die zum Einsatz kam.

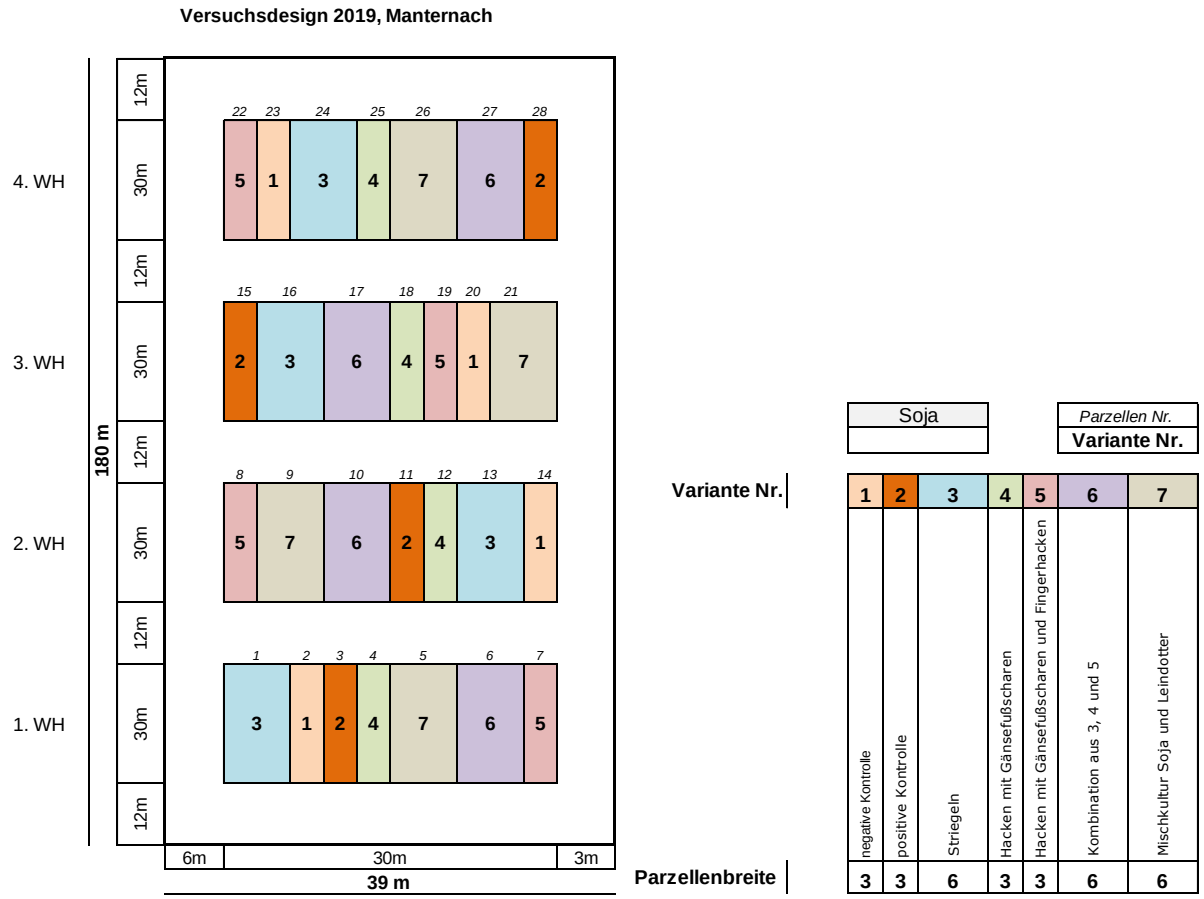


Abbildung 2: Versuchsdesign des Exaktversuches am Standort Manternach 2019. Die Nummern innerhalb der Parzellen kennzeichnen die Varianten gemäß der Legende rechts in der Abbildung.

Die Beikrautregulierung mit dem Striegel wurde mit der Maschine des jeweiligen Landwirtes durchgeführt, wobei die Maschinenbreite einheitlich sechs Meter betrug. Das Hacken erfolgte mit der Technik des Herstellers Hatzenbichler, welche je Reihe drei Gänsefußschare mit dem variablen Anbauelementen der Fingerhacken umfasste. Die drei Meter breite Hackmaschine wurde durch das Landtechnik-Unternehmen Wolff-Weyland S.A., zur Verfügung gestellt, wie auch die 24-reihige mechanische Sämaschine des Herstellers Amazone und der Schlepper des Herstellers New Holland. Die Durchführung der Aussaat, Ernte sowie die Bedienung der Hackmaschine erfolgt in Zusammenarbeit mit dem technischen Personal des LTA. Die Zeitpunkte zur Beikrautregulierung

wurden bestmöglich nach praxisüblichen Kriterien wie Witterung und Bodenzustand sowie Pflanzenentwicklung festgelegt.

2.2 Ablauf des Sojaanbaus

Die im Projekt LeguTec angefallenen Schritte während zur Bodenvorbereitung, Saat, mechanischen Beikrautregulierung und Ernte werden im Folgenenden erläutert.

2.2.1 Bodenanalyse und Bodenvorbereitung vor der Aussaat

Für jeden Standort wurde eine Bodenanalyse durchgeführt, um den Boden auf verschiedene Nährstoffgehalte wie $CaCl_2$ für den pH-Wert, P_2O_5, K2O, Mg, Na, C_{org} und N_{min} zu analysieren. Vor der Bodenbearbeitung wurden die Bodenproben als standortspezifische Mischproben entnommen und im Labor der Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) in Ettelbrück analysiert.

Die Bodenvorbereitung erfolgte nach Absprache mit den IBLA Beratern durch den jeweiligen Landwirt. Die Äcker wurden zunächst entweder im Herbst oder im Frühjahr gepflügt. Eine frühe Bodenbearbeitung im Februar oder sogar im Spätherbst bei schweren Böden verringert die Wasserverdunstung aus dem Boden und trägt zu einer höheren Wasserversorgung des Bodens bei. Der Einsatz des Pfluges trägt generell dazu bei, den Beikrautdruck zu verringern. Er wird daher im Sojaanbau allgemein empfohlen (Bernet et al., 2016). Basierend auf den entnommenen Bodenproben wurde entschieden, einige der Flächen zu Kalken und mit Phosphor zu düngen um ideale Bedingungen für die Sojapflanze zu schaffen, welche ihren optimalen Wuchsbereich bei einem pH-Wert im schwach sauren bis neutralen Wuchsbereich (pH 6,5 – 7) aufweist (Recknagel, et al., 2018). Als Phosphorgehalt im Boden ist eine Zielgröße von 10-12 mg/100 g trockener Boden anzustreben um dem Phosphorentzug von etwa 1,5 kg/dt Sojabohnen entgegenzuwirken (Hahn et al., 2013). Der Kalk (Kohlensaurer Kalk 95, trocken) wurde von der Firma MUELLERKALK DE zur Verfügung gestellt. Einige Wochen vor der Aussaat wurde eine Bodenbearbeitung mit dem Grubber oder einer Kreiselegge durchgeführt um ein falsches Saatbett vorzubereiten und die Keimung von Beikräutern anzuregen und anschließend die Beikrautdichte mit einer erneuten Bearbeitung zu vermindern (Cartter et al., 1962; Gunsolus, 1990). Je nach Witterungs- und Bodenbedingungen wurde dieser Arbeitsgang zweimal im Abstand von zwei Wochen durchgeführt (s. Abbildung 3).

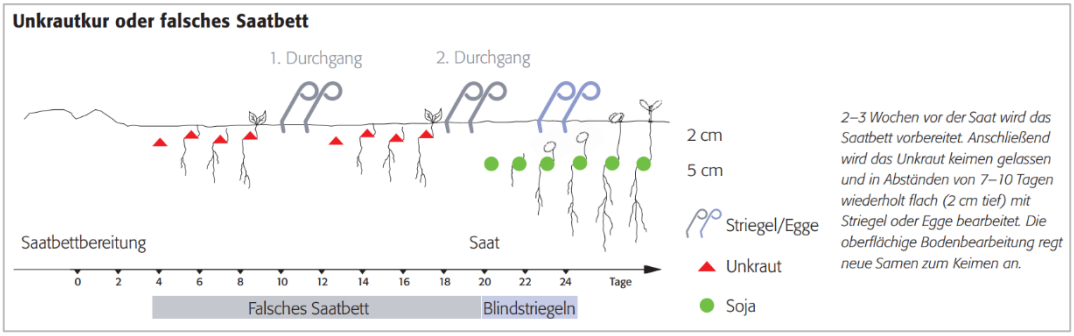


Abbildung 3: Durchführung eines falschen Saatbettes. In Rot sind die Beikräuter und in Grün die Sojabohnen dargestellt. Die Zeitachse lässt die geeigneten Tage zur Saatbettvorbereitung erkennen (Bernet et al., 2016).

2.2.2 Aussaat der Sojabohnen

Der Zeitpunkt der Aussaat wurde durch die empfohlene Mindesttemperatur des Bodens von 10 °C bestimmt. Die Bodentemperatur der obersten 30 cm wurde mit einem Tensiometer (von der Firma ©Weenat) erfasst, welches an jedem Standort aufgestellt wurde. Wurde die Mindesttemperatur erreicht und hat es die Bodenfeuchte erlaubt, konnte die Aussaat in der Regel von Mitte April bis Mitte Mai, je nach der Wettervariabilität des jeweiligen Projektjahres, erfolgen. Die Soja wurde mit einer drei Meter breiten und 24-reihigen mechanischen Sämaschine gesät (s. Abbildung 4). Die Varianten $t.1_{neg}$, $t.2_{pos}$, $t.3_{Striegel}$ und $t.7_{Mix}$ wurden mit einem geringen Reihenabstand (24 Reihen, 12,5 cm Abstand) eingesät, da in diesen Parzellen nur gestriegelt oder keine Beikrautregulierung durchgeführt wurde. Die Hackvarianten $t.4_{Hacke}$, $t.5_{Hacke+}$ und $t.6_{Kombi}$ wurden a.G. der Anordnung der Gänsefußschare mit einem breiten Reihenabstand gesät, indem nur jedes dritte Saatrohr der Sämaschine geöffnet wurde (8 Reihen, 37,5 cm Abstand). Als Sojabohnensorte wurde Merlin aus der Reifegruppe "000" angebaut. Merlin hatte sich bereits in früheren Versuchen in Luxemburg als beständige Sorte bewährt (Stoll et al., 2015; Zimmer, 2016a). Die Saatstärke wurde hinsichtlich des Tausendkorngewichts (TKW) der Bohnen und der Keimfähigkeit angepasst. Die Berechnungen basierten auf dem Ziel, eine Dichte von 65 Pflanzen m^{-2} zu erreichen. Trotz, dass das Saatgut „Fix-Fertig“ vorgeimpft war, wird in der Literatur empfohlen, das Saatgut kurz vor der Saat noch einmal zu impfen (Bernet et al., 2016). Die vorab notwendige Impfung mit dem Impfmittel BIODOZ Soja im Jahr 2018 und mit Rizoliq Top S im Jahr 2019 vom Hersteller DeSangosse wurde kurz vor der Saat und abgeschirmt von UV-Strahlung durchgeführt (s. Abbildung 4). Das Impfmittel wurde gewechselt, da BIODOZ im Jahr 2019 nicht mehr auf dem Markt verfügbar war. Die Sojabohnen wurden in einer Tiefe von 4 cm abgelegt, um den mechanischen Vorgang des Blindstriegelns zu ermöglichen, ohne die Keimung der Bohnen zu stören (Dordevik et al., 2019; Terres Inovia, 2019).

Abbildung 4: Impfung des Soja-Saatguts (links, Foto: IBLA), Ansicht der Saat in Sprinkange von oben (Mitte, Foto: Serge Heuschling) und Blindstriegeln in Sprinkange (rechts, Foto: IBLA).

2.2.3 Blindstriegeln

Die direkte Beikrautregulierung muss bei Sojabohnen so früh wie möglich beginnen, um die Vorteile der Beikräuter zu nutzen und ein Intervall von Wachstumsstadien zwischen der Pflanze und den Beikräutern zu schaffen (Sicard et al., 2012). Es ist unerlässlich, gute Wachstumsbedingungen für die

Sojabohne zu gewährleisten und die Bearbeitung mit Maschinen später zu ermöglichen, wenn die Sojabohne besser verwurzelt ist und die Beikräuter klein sind (Chauvel et al., 2018). Beikräuter haben oft eine schnellere Wachstumsgeschwindigkeit als die Kulturpflanze und nutzen den Vorteil der Raumbeanspruchung, indem sie die Sämlinge bedecken, die Pflanzen beschatten oder die Rhizosphäre einnehmen. Auch der Ressourcenverbrauch von Beikräutern (Wasser, Nährstoffe, Licht) schwächt die Kulturpflanze. Die Sojabohnenpflanze reagiert in den ersten 4 bis 6 Wochen ihres Wachstums sehr empfindlich auf das Vorhandensein von Beikraut (Pousset, 2016). Die langsame Entwicklung von jungen Sojapflanzen macht diese besonders anfällig und eine hohe Konkurrenz mit Beikraut kann bereits dann zu Ertragseinbußen führen, wenn diese den Wachstumsvorteil gegenüber der Soja nutzen. Das späte Auftauchen von Beikraut stellt ein weiteres Problem dar, das die Durchführbarkeit der Ernte und die Verunreinigung der Samen stärker beeinträchtigt (Burnside, 1979; Pousset, 2016). Daher ist eine mechanische Beikrautregulierung für das adäquate Wachstum der Sojapflanzen essentiell.

Das Blindstriegeln wurde mit dem 6 m breiten Striegel des jeweiligen Landwirtes in den Varianten $t.3_{Striegel}$, $t.6_{Kombi}$ und $t.7_{Mix}$ mit einer Arbeitstiefe von 2 cm durchgeführt (s. Tabelle 2 und Tabelle 4). Blindstriegeln wurde, wo immer möglich, je nach Boden- und Wetterbedingungen und dem Entwicklungsstadium des Keimlings bis BBCH 07 (s. Anhang 1, Anhang 2, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) in 3 bis 7 Tagen nach der Aussaat durchgeführt (s. Abbildung 3, Abbildung 4). Da die Sojapflanzen langsam auflaufen und eine langsame Jugendentwicklung aufweisen, können schon gekeimte Samenbeikräuter auf diese Weise freigelegt oder verschüttet werden (Bernert, 2016). Die Entscheidung für die Durchführung wurde basierend auf der Beobachtung des Keimungsstadiums der Sojabohnen auf dem Feld getroffen. Wenn sich das Hypokotyl kurz vor der Bodenoberfläche aufzurichten beginnt, darf nicht mehr Blindgestriegelt werden. Auch die Feuchte des Bodens schränkt die Möglichkeit des Blindstriegelns ein.

2.2.4 Mechanische Beikrautregulierung nach dem Auflaufen

Die Beikrautregulierungsmaßnahmen wurden nach den gängigen Praxiskriterien wie Wetter, Bodenbedingungen und Pflanzenentwicklung durchgeführt. Verschiedene Anbauratgeber dienten als Entscheidungsgrundlage (s. Abbildung 5). Ziel war es, mindestens zwei Durchgänge durchzuführen, unter Berücksichtigung, dass die mechanische Beikrautregulierung nur bis zum Stadium der Blüte und somit bis zum Reihenschluss möglich ist. Sobald das erste Laubblattpaar voll entwickelt war, konnte die Kultur erstmals mit leichtem Zinkendruck gestriegelt bzw. mit langsamer Fahrgeschwindigkeit gehackt werden.

Welches Gerät wann einsetzen?

	Saat	Keimung (BBCH 05)	Aufgang	1. Blattpaar (BBCH 10)	1. Blattpaar (BBCH 12)	Wachstum (BBCH 32)	Wachstum (BBCH 39)	Blüte (40–60 cm)	
Ganzflächige Unkrautregulierung									
Striegel	8–12 km/h ●●●● UK < 1–2 cm	3–8 km/h ●●● UK < 1 cm		2–3 km/h ●● UK < 1 cm	3–5 km/h ●● UK < 1 cm	5–8 km/h ●●● UK 1–3 cm	6–12 km/h ●●●●● UK < 3 cm		Bei jungen Pflanzen langsam fahren, damit diese nicht zugedeckt werden!
Rollhacke	10–20 km/h	10–20 km/h UK < 1 cm		6–10 km/h UK < 1 cm	10–15 km/h UK < 1 cm	10–20 km/h UK < 1 cm	10–20 km/h UK < 1 cm		Bei jungen Pflanzen langsam fahren, damit diese nicht zugedeckt werden!
Rollstriegel	8–12 km/h ●●●● UK < 1–2 cm	3–4 km/h ●● UK < 1 cm		2–6 km/h ● UK < 1 cm	4–6 km/h ●● UK < 1 cm	8–10 km/h ●●● UK < 1–2 cm			Gut auf steinigen Böden, verstopft kaum.
Unkrautregulierung *zwischen den Reihen*									
Scharhacke		3 km/h *	3 km/h *	3 km/h *	3 km/h UK < 5 cm	5 km/h UK < 10 cm	5–10 km/h UK < 10 cm	5–10 km/h UK < 10 cm	Bei jungen Pflanzen Schutzscheiben anbringen, in älteren Beständen anhäufeln.
Sternhacke						3–6 km/h UK < 10 cm	3–6 km/h UK < 10 cm		Maximale Bearbeitungstiefe 5 cm. In älteren Beständen anhäufeln.
Zusatzhackelemente zur Unkrautregulierung *in den Reihen*									
Torsionshacke				3 km/h UK < 1–2 cm	3–6 km/h UK < 2–3 cm	3–6 km/h UK < 2–3 cm			Ideal in Kombination mit Striegel oder Hackgerät.
Flachhäufler		3 km/h ● *	3–4 km/h ● *	3–5 km/h ●● *	3–6 km/h ●● UK < 2–3 cm	5–7 km/h ●●● UK < 2–3 cm	5–10 km/h ●●● UK < 5 cm	5–10 km/h ●●● UK < 5 cm	Deckt Unkräuter in der Reihe zu. Nicht ideal auf steinigen Böden.
Fingerhacke		3 km/h ● *	3–4 km/h ● *	3–5 km/h ● *	3 km/h ●● UK < 2–3 cm	5 km/h ●●● UK < 2–3 cm	5–10 km/h ●●●● UK < 5 cm	5–10 km/h ●●●● UK < 5 cm	Bis BBCH 10 kein Eingreifen der Finger in die Reihe möglich.

UK = Unkraut (Länge bzw. Größe in cm)
* leichtes , einmaliges Anhäufeln im Stadium Saat bis 1. Laubblattpaar in der Reihe möglich, Saatreihe muss erkennbar sein

Quellen: CETIOM, Agridea, Expertenbefragung

Geräteeinsatz: Einfach, optimal — Relativ einfach — Mit Vorsicht — Nicht empfohlen!
Geräteeinstellung: ● schwach — ●●●●● stark

Abbildung 5: Überblick über die empfohlenen Zeitpunkte (BBCH-Stadien) für den Einsatz verschiedener mechanischer Beikrautregulierungstechniken. Markierungen in roter Farbe zeigen an, dass die Maschine nicht verwendet werden sollte, während die grüne Farbe das optimale Stadium für die Behandlung anzeigt. Punkte symbolisieren den Grad der Geräteeinstellung von schwach bis hart (Bernet et al., 2016).

Hacken mit Gänsefußscharen wurde in der Variante $t.4_{Hacke}$ und Hacken mit Gänsefußscharen und der Applikation von Fingerhacken für die Variante $t.5_{Hacke+}$ und, falls als beste Option eingeschätzt, auch in $t.6_{Kombi}$ durchgeführt (siehe Abbildung 6, Tabelle 2 und Tabelle 4). Es ist zu erwähnen, dass die Fingerhacken nur dann eingesetzt wurden, wenn die Entwicklung der Sojabohnen und die Bodenbedingungen dies erlaubten. Nach einem Hackdurchgang sollte frühstens nach 8-10 Tagen das erneute Auflaufen der Beikräuter kontrolliert werden, um den richtigen Zeitpunkt für ein erneutes Hacken bestimmen zu können (Le Gall et al., 2017). Die Effizienz der Hacke ist auch bei größeren Beikräutern und mehrjährigen Arten besser (Pousset, 2016).

Gestriegelt wurde wiederholt in den Varianten $t.3_{Striegel}$ und $t.7_{Mix}$ mit dem jeweiligen 6 m breitem Striegel der Landwirte (s. Abbildung 6, Tabelle 2 und Tabelle 4). In $t.7_{Mix}$ wurden vor dem ersten maschinellen Striegeldurchgang die Leindottersamen der Sorte Celena in einer Saatstärke von 3,6 kg ha^{-1} von Hand auf der Fläche ausgebracht und eingestriegelt. Der Vorteil in der Verwendung eines Striegels besteht darin, dass es sich um eine nicht selektive Maschine handelt, die die Arbeit auf der gesamten Bodenoberfläche einschließlich der Reihen der Kulturen verrichtet und so die Beikrautregulierung innerhalb der Reihe erleichtert. Der Einsatz des Striegels wird zwischen BBCH10 und BBCH39 empfohlen (s. Abbildung 5), wobei die Zinken mit fortgeschrittenem Entwicklungsstadium der Soja mit stärkerem Druck eingestellt werden sollten und die

Fahrgeschwindigkeit erhöht werden sollte (Bernet et al., 2016; Chauvel et al., 2018; Sicard et al., 2012).

Abbildung 6: Mechanische Beikrautregulierung mit dem Striegel (links), der Hacke mit Gänsefußscharen (Mitte) und der Hacke mit Fingerhacken (rechts) (Fotos: IBLA).

2.2.5 Ernte

Der Erntezeitpunkt wurde anhand des Feuchtegehaltes der Sojabohne (optimal bei 12-14 %) sowie den Witterungsbedingungen bestimmt. Eine Wiederbefeuchtung des Bestandes nach einem Niederschlagsereignis musste vermeiden werden, da hierbei die Qualität der Bohnen reduziert wird (Bernet et al., 2016). Mit Hilfe des Parzellenmähdreschers des LTA wurden die vorher definierten Ernteparzellen einer jeden Parzelle herausgedroschen und das restliche Erntegut wurde von dem Mähdrescher des jeweiligen Landwirts oder im Lohn geerntet (s. Abbildung 7). Exakt angepasste und wiederholt kontrollierte Mähdreschereinstellungen sind notwendig um den Verlust von Sojabohnen zu minimieren. Hierbei spielen ein weiter Dreschkorb und eine tiefe Trommeldrehzahl (ca. 400-500 Umdrehungen min^{-1}), sowie eine hohe Ventilator-Drehzahl eine wesentliche Rolle. Außerdem sollte man ohne Ährenheber die Ernte durchführen (Bernet et al., 2016).

Neben dem Ertrag, Feuchte, Tausendkorngewicht (TKG) und Hektolitergewicht (HLG), bestimmt am Erntegut des Parzellenmähdreschers, wurde die Ertragsstruktur erhoben. Der Proteingehalt aus einer gemahlenen Teilprobe wurde im Labor der ASTA bestimmt.

Abbildung 7: Ernte der Sojabohnen mit dem Parzellenmähdrescher (links und Mitte, Fotos: IBLA) und dem Mähdrescher des Landwirts Marc Emering in Sprinkange (rechts, Foto von Nikos Zompolas).

2.3 Versuchsdesign 2018 und Standortcharakteristiken

Entsprechend den zuvor erwähnten Schritten des Sojaanbaus in LeguTec gibt Tabelle 1 einen Überblick über die drei Versuchsstandorte im Jahr 2018, einschließlich u.a. der Standortmerkmale und Daten zu den durchgeführten Varianten sowie der Boniturdaten für jedes BBCH-Stadium in der Sojabohnenentwicklung nach Munger et al. (1997).

Dank des warmen und konstanten Wetters von März bis April konnte die Aussaat bereits Mitte April und damit für diese Breitengrade relativ früh, erfolgen. In Sprinkange musste die Aussaat jedoch einen Monat später wiederholt werden, da sich nach dem Auflaufen der Sojapflanzen herausstellte, dass die Aussaat aufgrund eines Problems mit der Sämaschine nicht homogen war. Es ist zu erwähnen, dass die Sojabohnen nicht erneut geimpft wurden. Bei dem verwendeten Saatgut handelte es sich nur um vorgeimpftes Saatgut ("Fix-Fertig"), so dass die Wirkung der Doppelimpfung nicht mehr garantiert werden konnte.

Die mechanische Beikrautregulierung begann an allen Standorten mit einer Striegel-Durchfahrt, dem so genannten Blindstriegeln, das in einem Zeitfenster von bis zu 4 Tagen nach der Aussaat in allen Striegelvarianten ($t.3_{Striegel}$, $t.6_{Kombi}$ und $t.7_{Mix}$) durchgeführt wurde. Erste aufkommende Beikräuter wurden entfernt, ohne den Sojasprössling zu beschädigen. Sobald das erste Blattpaar voll entwickelt war (BBCH 11), konnte die Kultur zum ersten Mal mit leichtem Zinkdruck gestriegelt oder mit niedriger Geschwindigkeit gehackt werden. Aufgrund des geringen Beikrautdrucks in Manternach wurde die Hacke bei allen Hackbehandlungen ohne die Fingerhacken eingesetzt, da das Risiko einer Beschädigung der Pflanzen höher war als der zu erwartende Nutzen. Auf dem Versuchsstandort Hostert wurde die Fingerhacke jedoch direkt in Kombination mit den Gänsefußscharen eingesetzt, da hier von Anfang an ein überdurchschnittlich hoher Beikrautdruck vorzufinden war (s. Tabelle 2). Aufgrund eines Regenereignisses war das Versuchsfeld in Sprinkange in dem Entwicklungsstadium BBCH 11 der Sojabohnenpflanze nicht befahrbar und der Zeitpunkt für die Beikrautregulierung musste nach hinten verschoben werden. Zum nächst möglichen Termin, an dem das Feld befahrbar war, befand sich die Pflanze bereits im Stadium BBCH 13 und man entschied sich a. G. der schon erreichten Größe der Pflanzen gegen einen Striegel-Durchgang in der Variante $t.3_{Striegel}$. Lediglich in der Variante $t.7_{Mix}$ wurde der Striegel eingesetzt, um den vorher gesäten Leindottersamen zum Keimen zu verhelfen und die Bodenstruktur (verkrustetet Bodenoberfläche) zu lockern.

Tabelle 1: Kennzahlen des Exaktversuches im LeguTec-Projekt sowie Daten der im Jahr 2018 durchgeführten Arbeitsschritte. Temperatur und Niederschlag werden als 7-Jahres-Mittel (2011-2017, agrimeteo.lu) und als 3-Jahres-Mittel für Manternach angegeben. CHU vom 01.05.-15.09. Das Entwicklungsstadium der Sojapflanze wird in Klammern mit Hilfe der BBCH-Skala nach Munger et al., 1997 angegeben.

LeguTec		Manternach (Mehlen)		Hostert (François)		Sprinkange (Emering)	
Versuchs-standort	**Versuchsjahr**	**2018**					
	FLIK Number	P0158691		P0761342, Schlag 2		P0915621	
	Grösse Versuchsfeld (ha)	0.69		0.74		0.69	
	m ü NN	281		464		336	
	Ø-Temp (°C)	10		9.1		9.8	
	Ø-Niederschlag ∑ (mm)	671.2		920.9		681.2	
	CHU (01.05.-30.09.)	2972		2708.8		2647.6	
	Bodentyp	Sandig-tonige Braunerde aus Dolomit		Steinig-lehmige und steinig-tonige Braunerden und Parabraunerden mit quarzitischen Geröllen		Tonige Braunerde aus Macigno	
	Bodenparameter						
	Aufnahmedatum	Sep.16	Aug.18	Feb.18	Sep.18	Nov.17	Sep.18
	pH (CaCl2)	6.1	6.5	5.3	5.5	6.3	6.2
	K_2O (mg/100 g tr. Boden)	14	11	23	23	14	11
	P_2O_5 (mg/100 g tr. Boden)	8	7	11	9	6	4
	Mg (mg/100 g tr. Boden)	20	21	13	15	10	10
	Na (mg/100 g tr. Boden)	NA	1	1	1	1	1
	Nmin (kg Nitrat-N/ha)	NA	44	NA	44	38	16
	Vorfrucht	Triticale		Winterweizen		Dinkel	
	Zwischenfrucht			Sonnenblume		Sommerhafer	
Grundboden-bearbeitung	**Pflug**	21.02.		26.03.		24.02.	
Düngung und Falsches Saatbett	**Kalkung Datum**	12.04. (Federzahn)		06.04. (Kreiselegge)		23.04. (Federzahn)	
	Kalk Menge (kg)	800		1500		800	
	Phosphor Datum	12.04. (Federzahn)		13.04. (Striegel)		23.04. (Federzahn)	
	Phosphor Menge (kg)	120		80		160	
Aussaat	**Falsches Saatbett**	12.04.		13.04.		(23.04.) 15.05. (Federzahn)	
	Impfung + Saat	23.04.		24.04.		(26.04.) 17.05.	
	Impfmittel	Biodoz Soja					
	Saatstärke (K/m²)	65					
	Saat Leindotter	18.05. (BBCH 11)		27.05. (BBCH 11)		27.06. (BBCH 13)	
	Leindotter Saatmenge (kg/ha)	5.8		4.9		3.6	
Mechanische Beikraut-regulierung	**Blindstriegeln**	27.04. (BBCH 05)		28.04. (BBCH 05)		21.05. (BBCH 05)	
	Striegeln 1	18.05. (BBCH 11)		25.05. (Wdh 1u.2), 27.05. (Wdh 3u.4) (BBCH 11)		25.06. (nur Var. 7) (BBCH 13)	
	Hacken 1					22.06. (BBCH 13)	
	Striegeln 2	-		-		-	
	Hacken 2						
Chemisch	**Pulsar 40**	-		-		-	
	Harmony SX						
Bonituren, Drohne	**Bonitur, Überflug VOR**	18.05. (BBCH 11), 2 Überflüge		25.05. (BBCH 11)		20.06. (BBCH 13), 21.06.	
	Biomasse VOR	18.05. (BBCH 11)		26.05. (BBCH 11)		22.06. (BBCH 13)	
	Bonitur, Überflug NACH	19.05. (BBCH 11)		28.05. (BBCH 11-12), 27.05. (2 Überflüge)		25.06., 27.06. (Var.7) (BBCH 13), 23.06. (Überflug)	
	Bonitur BLÜTE	14.06., 15.06. (BBCH 65)		03.07., 04.07., 05.07. (BBCH 69)		12.07., 13.07. (BBCH 65)	
	Biomasse BLÜTE	15.06. (BBCH 65)		09.07., 10.07., 11.07. (BBCH 70, 71)		16.07. (BBCH 65)	
	SPAD Messung, Überflug BLÜTE	15.06. (BBCH 65)		09.07. (BBCH 70)		13.07. (BBCH 65)	
	Bestandeshöhe BLÜTE	14.06. (BBCH 65)		06.07. (BBCH 69)		13.07. (BBCH 65)	
	Biomasse ERNTE	23.08. (BBCH 65)		31.08. (BBCH 97)		13.09. (BBCH 97)	
	Bonitur ERNTE	22.08. (BBCH 97)		29.08. (BBCH 97)		12.09. (BBCH 97)	
	Überflug ERNTE	24.08. (BBCH 97)		28.08. (BBCH 97)		12.09. (BBCH 97)	
Ernte	**Erntedatum**	24.08. (BBCH 97)		04.09. (BBCH 97)		17.09. (BBCH 97)	

Tabelle 2: Überblick über die Methoden im Versuchsjahr 2018 der Varianten t.1$_{neg}$ (1), t.2$_{pos}$ (2), t.3$_{Striegel}$ (3), t.4$_{Hacke}$ (4), t.5$_{Hacke+}$ (5), t.6$_{Kombi}$ (6) und t.7$_{Mix}$ (7) an den Versuchsstandorten im Jahr 2018. Entsprechende Daten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

2018		Manternach							Hostert							Sprinkange						
Zeitpunkt	**Variante / Methode**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1. Termin	**Blindstriegeln**			x			x	x			x			x	x			x			x	x
2. Termin	**Striegeln**			x				x			x				x							x
	Gänsefußschare				x	x	x					x	x	x					x	x	x	
	Fingerhacken												x	x						x	x	

In allen Versuchsanlagen wurde sich in der Kombinationsvariante (t.6$_{Kombi}$) gegen den Einsatz des Striegels zum zweiten Termin, aber für den Einsatz der Hacke entschieden, da dies visuell die effektivere Behandlung zu sein schien (s. Tabelle 2).

Am Standort Manternach blieb der Beikrautdruck auch nach dem Striegeln und Hacken gering und die Pflanzen schlossen die Reihen relativ schnell, so dass kein weiterer mechanischer Einsatz erforderlich war. Da die Beikrautregulierung in Sprinkange bereits verspätet erfolgte, war auch hier aufgrund des sich schnell schließenden Sojabohnenbestandes kein weiterer Durchlauf möglich. In Hostert schlossen die Reihen ebenfalls relativ schnell und zudem erlaubte das Wetter vor der Blüte keinen weiteren Einsatz der Maschinen. Allerdings wäre gerade an diesem Standort mit seinem starken Beikrautdruck ein weiterer maschineller Einsatz von Vorteil gewesen.

Aufgrund der Trockenheit ab dem Zeitpunkt der Blüte musste die Sojabohne relativ früh geerntet werden. In Manternach kam es zu einer Notreifung der Pflanzen und 10 % der Hülsen platzen auf. Deshalb musste dort die Soja bereits am 24. August gedroschen werden. Der Standort Hostert folgte am 4. September und die Ernte wurde am 17. September mit dem Standort Sprinkange abgeschlossen.

Witterungsverlauf 2018

Die Saison 2018 bot zunächst ideale Bedingungen für den Sojaanbau. Ein warmer Frühling ermöglichte bereits Ende April eine relativ frühe Aussaat. Der Frühling war in Luxemburg wärmer und die Niederschläge höher als im 10-jährigem Mittel (LIST, 2018a). Ausbleibender Regen in den ersten Maiwochen machte es möglich, alle Standorte blind zu striegeln (s. exemplarisch für den Standort Manternach Abbildung 9 und für die übrigen Standorte Anhang 3 und Anhang 4). Am Standort Sprinkange waren zu diesem Zeitpunkt bereits Risse in den oberen Bodenschichten als erste Anzeichen einer Dürreperiode direkt nach dem Auflaufen der Pflanzen sichtbar. Ab Ende Mai bis Mitte Juni verzeichnete sich allerdings wieder wüchsige Witterung, so dass sich die Pflanzen gut entwickeln konnten. Aufgrund der Regenereignisse in diesem Zeitraum war mechanisches Entkrauten nur einmal pro Standort möglich. Insbesondere der lehmige Boden in Sprinkange hatte

nach den Regenereignissen eine lange Trocknungszeit und machte das Befahren mit den Maschinen unmöglich (s. Abbildung 8).

Abbildung 8: Witterungsbeeinflusste Bodenverhältnisse in Sprinkange: Bodenrisse 07.05.2018 (links) und feuchter Boden 04.06.2018 (rechts).

Von Mitte Juni bis Mitte August gab es zum Zeitpunkt der Blüte in Sprinkange nur ein kleines Regenereignis mit 10 mm Niederschlag. Niederschlagsmangel während der Blüte und der anschließenden Hülsenbildung führte zu ungünstigen Wachstumsbedingungen der Sojabohne. Der Sommer in Luxemburg war im Vergleich zum 10-Jahres-Durchschnitt viel wärmer und viel zu trocken (LIST, 2018b). Nur während der Hülsenfüllungsphase gab es Ende August geringe Regenereignisse in Sprinkange (s. Anhang 3).

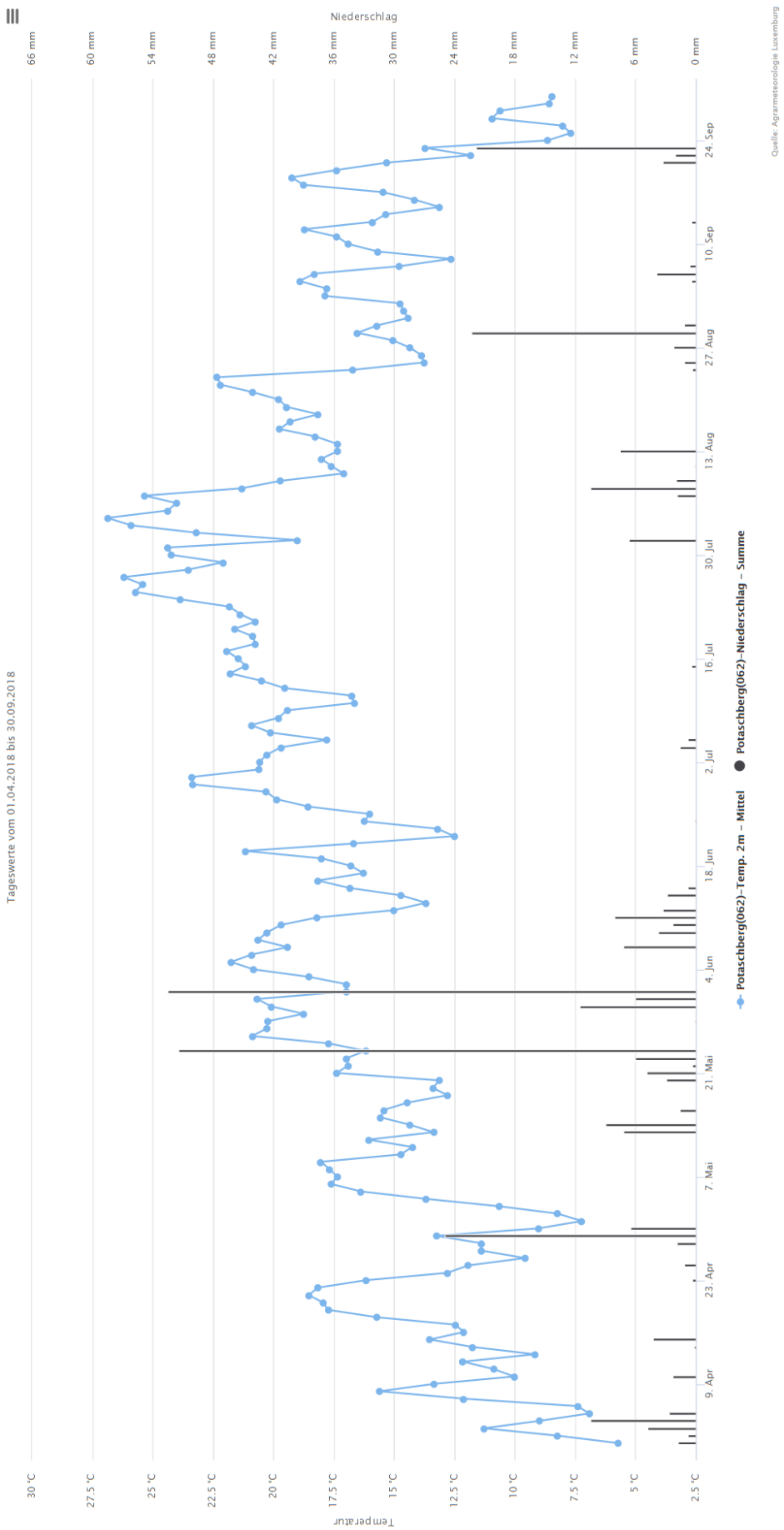


Abbildung 9: Tagesmitteltemperatur (blaue Linie) und Niederschlagssummen (schwarze Balken) der Wetterstation Potaschberg, repräsentativ für den Versuchsstandort Manternach im Jahr 2018 (agrimeteo.lu).

Am Standort Manternach war die Sojabohnen bereits Mitte Juni in voller Blüte und damit früher als auf den anderen Standorten, so dass die frühen Niederschläge dem Wachstum der Sojabohnen förderlich waren. Von der Blüte an folgten ungünstige Bedingungen mit heißen Temperaturen und viel zu wenig Regen bis hin zur Ernte (s. Abbildung 9). Leider die Sojabohne während der Blüte unter Wasserstress, kann es vorkommen, dass sie Blüten vorzeitig abwirft, was in einer Ertragsminderung resultiert (Bernet et al., 2016). Von Mitte Juni bis Mitte Juli, dem Zeitraum der Entwicklung der Sojabohnenhülsen, gab es kein einziges Regenereignis. Nur wenige Niederschlagsereignisse traten im August während der Hülsenfüllung und -reifung auf. Wie bereits erwähnt, mussten die Sojabohnen in die Notreife gehen, die Hülsen platzen auf und zwangen das LeguTec-Team zu einer vergleichsweise frühen Ernte.

Hostert zeichnete sich durch etwas mehr Niederschläge aus. In den ersten Entwicklungsstadien der Sojabohne profitierten nicht nur die Soja von den Niederschlägen, sondern auch die hohe Zahl der Beikräuter. Es wäre hilfreich gewesen, die Beikräuter noch einige Male mechanisch zu behandeln, aber die feuchten Bodenbedingungen ließen dies nicht zu. Das Blätterdach schloss sich schnell, und Anfang Juli, kurz bevor die Sojabohne in der vollen Blüte stand, kam es erneut zu Regenfällen. Wie an den anderen Untersuchungsstandorten litt die Hülsenentwicklung unter mangelnden Niederschlägen und hohen Temperaturen. Während der Hülsenentwicklung traten wenige Regenereignisse auf, was dazu beitrug, dass die Sojabohnen nicht, wie in Manternach beobachtet, in die Notreifung gingen.

2.4 Versuchsdesign 2019 und Standortcharakteristiken

Mit Blick auf das zweite Versuchsjahr 2019 in LeguTec, gibt Tabelle 3 einen Überblick über die Versuchsstandorte, Standortmerkmale und Daten zu den durchgeführten Behandlungen sowie die Boniturdaten. Der hohe Beikrautdruck in Hostert während der Saison 2018 veranlasste die Projektleiter, das Boden- und Fruchtfolgemanagement zu verbessern. Unter kontinuierlicher Betreuung der IBLA-Berater begann die Bodenvorbereitung im Herbst 2018 mit dem Pflügen und mit dem Zwischenfruchtanbau von Sandhafer-Buchweizen. Phosphor und Kalk wurden auf Grundlage von den Bodenanalysen appliziert, und es wurden zwei falsche Saatbeete angelegt, bevor die Aussaat am 06.05.2019 in Manternach, am 07.05.2019 in Sprinkange und am 16. 05.2019 in Hostert möglich war (s. Tabelle 3). In Hostert war eine frühere Aussaat aufgrund der kalten und nassen Witterungsbedingungen nicht möglich. In Manternach und Sprinkange war die Aussaat aufgrund der besseren klimatischen Bedingungen zwei Wochen früher ausführbar. Blindstriegeln war nur in Hostert möglich und wurde 5 Tage nach der Aussaat in den Varianten $t.3_{Striegel}$, $t.6_{Kombi}$ und $t.7_{Mix}$ durchgeführt (s. Tabelle 4). In Manternach war der Boden zu nass, aufgrund einer Regenperiode, die zwischen dem 8. und 11.05.2019 stattfand, um blind zu striegeln (s. Abbildung 12). Dasselbe gilt für Sprinkange, wo in diesem Zeitraum 30 l Regen fielen. Der schwere Boden in Sprinkange machte es für eine längere Zeit unmöglich, das Feld zu befahren, was sich auch auf die erste Beikrautregulierung auswirkte.

Tabelle 3: Kennzahlen des Exaktversuches im LeguTec-Projekt sowie Daten der im Jahr 2019 durchgeführten Arbeitsschritte. Temperatur und Niederschlag werden als 7-Jahres-Mittel (2012-2018, agrimeteo.lu) und als 4-Jahres-Mittel für Manternach angegeben (Station Potaschbierg, agrimeteo.lu. CHU vom 01.05.-15.09. Das Entwicklungsstadium der Sojapflanze wird in Klammern mit Hilfe der BBCH-Skala nach Munger et al., 1997 angegeben.

LeguTec		Manternach (Mehlen)			Hostert (François)		Sprinkange (Emering)	
Versuchs-standort	**Versuchsjahr**	**2019**						
	FLIK Number	P0502744			P0135925		P0915621 (2)	
	Grösse Versuchsfeld (ha)	0.7			0.87		0.95	
	m ü NN	279			457		330	
	Ø-Temp (°C)	10.2			9.8		9.0	
	Ø-Niederschlag ∑ (mm)	695.7			708.1		941.5	
	CHU (01.05.-30.09.)	3247.6			2708.8		2647.6	
	Bodentyp	Steinig-tonige Braunerde aus Dolomit			Steinig-lehmige Braunerden aus Schiefer und Phylladen		Tonige Braunerde aus Macigno	
	Bodenparameter							
	Aufnahmedatum	Okt.18	Mai.19	Okt.19	Okt.18	Okt.19	Mai.19	Okt.19
	pH (CaCl2)	6.7	6.8	6.4	5.7	5.8	6.4	6.3
	K_2O (mg/100 g tr. Boden)	16	18	19	50	14	14	16
	P_2O_5 (mg/100 g tr. Boden)	16	13	13	12	4	3	4
	Mg (mg/100 g tr. Boden)	32	32	26	17	17	10	12
	Na (mg/100 g tr. Boden)	1	1	1	1	1	2	1
	Nmin (kg Nitrat-N/ha)	NA	78	20	NA	6	25	13
	Vorfrucht	Getreide			Triticale		Dinkel	
	Zwischenfrucht	Phacelia			Sandhafer-Buchweizen		Hafer	
Grundboden-bearbeitung	**Pflug**	06.08.2018			06.03.2019		23.04.2019	
Düngung und Falsches Saatbett	**Kalkung Datum**	-			18.04.		-	
	Kalk Menge (kg)	-			1000		-	
	Phosphor Datum	-			17.04.		24.04.	
	Phosphor Menge (kg)	-			100		200	
Aussaat	**Falsches Saatbett**	01.04., 20.04. (Kreiselegge)			19.04., 01.05. (Kreiselegge)		01.05. (Kreiselegge)	
	Impfung + Saat	06.05.			16.05.		07.05.	
	Impfmittel	Rizoliq Top S						
	Saatstärke (K/m²)	65						
	Saat Leindotter	04.06. (BBCH 12)			13.06. (BBCH 11)		18.06. (BBCH 23)	
	Leindotter Saatmenge (kg/ha)	3.6						
Mechanische Beikraut-regulierung	**Blindstriegeln**	08.05. 15l Regen, kein Blindstriegeln möglich			21.05. (BBCH 05)		11.05. 30 l Regen, kein Blindstriegeln möglich	
	Striegeln 1	04.06. (BBCH 12)			13.06.(BBCH 11)		18.06. (Rollstriegel, Hacken) + 21.06. (Striegel) (BBCH 23)	
	Hacken 1							
	Striegeln 2	21.06. (BBCH 23)			02.07. (BBCH 66)		02.07. (BBCH 33)	
	Hacken 2							
Chemisch	**Pulsar 40**	-			-		-	
	Harmony SX							
Bonituren, Drohne	**Bonitur, Überflug VOR**	03.06. (BBCH 12)			11.06. (BBCH 11)		05.06. (BBCH 11)	
	Biomasse VOR	04.06. (BBCH 12)			13.06. (BBCH 11)		-	
	Bonitur, Überflug NACH	07.06., 11.06. (BBCH 12), 14.06. (Überflug)			18.06. (BBCH 12)		-	
	Bonitur BLÜTE	09.07. (BBCH 65)			16.07. (BBCH 68)		24.07.+25.07., 30.07. (BBCH 69)	
	Biomasse BLÜTE	09.07. (BBCH 65)			23.07. (BBCH 69)		30.07. (BBCH 69)	
	SPAD Messung, Überflug BLÜTE	09.07. (BBCH 65)			23.07. (BBCH 69), 22.07.		24.07. (BBCH 69), 26.07.	
	Bestandeshöhe BLÜTE	09.07. (BBCH 65)			23.07. (BBCH 69)		24.07. BBCH 69)	
	Biomasse ERNTE	30.08. (BBCH 89)			14.10. (BBCH 93)		10.09. (BBCH 97)	
	Bonitur ERNTE	30.08. (BBCH 89)			14. + 17.10. (Ertragsstruktur)		10.09. (BBCH 97)	
	Überflug ERNTE	-			21.10.		10.09. (BBCH 97)	
Ernte	**Erntedatum**	02.09. (BBCH 96)			NA		11.09. (BBCH 97)	

Tabelle 4: Überblick über die Methoden im Versuchsjahr 2019 der Varianten t.1$_{neg}$ (1), t.2$_{pos}$ (2), t.3$_{Striegel}$ (3), t.4$_{Hacke}$ (4), t.5$_{Hacke+}$ (5), t.6$_{Kombi}$ (6) und t.7$_{Mix}$ (7) an den Versuchsstandorten im Jahr 2018. Entsprechende Daten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

2019		Manternach							Hostert							Sprinkange						
Zeitpunkt	**Variante / Methode**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1. Termin	**Blindstriegeln**										x			x	x							
2. Termin	**Striegel**			x				x			x				x			x				x
	Rollstriegel																	x				x
	Gänsefussschare				x	x	x					x	x	x					x	x	x	
	Fingerhacke																					
3. Termin	**Striegel**			x							x							x				
	Gänsefussschare											x	x	x					x	x	x	
	Fingerhacke												x	x						x	x	

Nachdem das erste Blattpaar entwickelt war (BBCH 11), konnte die erste Beikrautregulierung durchgeführt werden. Sowohl in Hostert als auch in Manternach wurden die Varianten t.3$_{Striegel}$ und t.7$_{Mix}$ gestriegelt und die Varianten t.4$_{Hacke}$, t.5$_{Hacke+}$ und t.6$_{Kombi}$ mit den Gänsefußscharen gehackt, da die Sojabohnenpflanzen zu klein waren, um die Fingerhacken-Applikation einzusetzen. In Sprinkange waren erste Durchgänge erst ab BBCH 23 möglich. Die Kombination von hohem Beikrautdruck von Beginn der Vegetationsperiode an, vor allem durch falsches Bodenmanagement (spätes Pflügen, sofortige Saatbettbereitung, gefolgt von der unmittelbaren Aussaat, alles bedingt durch überdurchschnittliche Niederschläge im Frühjahr) und mit ungünstigen Witterungsbedingungen machte eine wirksame Beikrautregulierung unmöglich. Auch war die manuelle Beikrautregulierung in t.2$_{pos}$ nicht möglich. Als das Betreten des Feldes ab BBCH 23 erst möglich war, war t.2$_{pos}$ bereits mit Beikraut überwuchert. Es wurde dann beschlossen, diese Variante aufzugeben, da der hohe Beikrautdruck bereits negative Auswirkungen auf das Wachstum der Sojabohne hatte und das Beikraut manuell nicht mehr bewältigt werden konnte. Die erste mechanische Beikrautregulierung in t.3$_{Striegel}$ und t.7$_{Mix}$ wurde mit einem Rollstriegel des Bio-Landwirtes Mario Kleer, Everlange, LU, durchgeführt. Diese Maschine schien die bessere Alternative zu dem einfachen Striegel zu sein, der nicht in der Lage war, die Bodenkruste des schweren Bodens sauber aufzubrechen und die bereits größer gewordenen Beikräuter zu entwurzeln.

Eine zweite Beikrautregulierung hat in Manternach 17 Tage nach dem ersten Durchgang stattgefunden, allerdings nur in der Variante t.3$_{Striegel}$. Ein früherer Zeitpunkt war a.G. eines Regenereignisses Mitte Juni nicht möglich. In den Hackvarianten (t.4$_{Hacke}$ und t.5$_{Hacke+}$) war die Sojabohne bereits zu groß, um einen Hackdurchgang ohne Schäden zu gewährleisten und zudem war der Beikrautdruck sehr gering. In Hostert wurde in t.3$_{Striegel}$ ein zweites Mal gestriegelt und t.4$_{Hacke}$ wurde erneut gehackt, während die Fingerhacken in den Varianten t.5$_{Hacke+}$ und t.6$_{Kombi}$ zum Einsatz kamen. Diese Varianten wurden 21 Tage nach den ersten Durchgängen bearbeitet. In t.7$_{Mix}$ erfolgte kein zweiter Striegeldurchgang, da die Leindottersamen bereits zum ersten Zeitpunkt mit

eingestriegelt wurden und ein erneuter Striegeleinsatz die Keimlinge herausgerissen hätte. In Sprinkange erlaubte das trockene Wetter ebenfalls einen zweiten Durchgang zwei Wochen später mit dem Striegel in $t.3_{Striegel}$ und der Hacke, auch mit Fingerhacken, in den jeweiligen Parzellen ($t.4_{Hacke}$, $t.5_{Hacke+}$ und $t.6_{Kombi}$).

Die Ernte begann am Standort Manternach Anfang September (02.09.2019), gefolgt von Sprinkange am 11.09.2019. Die Sojabohne ging an beiden Versuchsstandorten aufgrund der hohen Temperaturen und der Trockenheit während der Reifezeit in die Notreife. Es wurde beschlossen, in Sprinkange bei 14,2 % Feuchtigkeitsgehalt und in Manternach bei 16,3 % Feuchtigkeitsgehalt zu ernten, um eine Hülsenöffnung, wie im ersten Projektjahr geschehen, zu vermeiden. Die Ernte in Hostert war letztendlich nicht möglich. Die meisten Parzellen konnten wegen der sinkenden Temperatur und der zunehmenden Niederschläge in den Monaten September und Oktober nicht vollständige Ausreifen. Die Reife war über alle Varianten hinweg sehr inhomogen. Zu dem Zeitpunkt, als die ersten Varianten erntereif waren, war der Drusch wegen der hohen Niederschläge nicht möglich, und sehr schnell begannen die ersten Sojabohnen von Pilzen befallen zu werden (s. Abbildung 10).

Am 17.10.2019 wurde beschlossen, die Ertragsstruktur in Hostert zu erheben, um den potenziellen Ertrag der Varianten zu berechnen, da die komplette Ernte mit dem Parzellenmähdrescher nicht mehr möglich war.

Abbildung 10: Standort Hostert 09.10.2019. Die Bilder zeigen die inhomogene Abreifung und die ersten Hülsen, die von Pilzen befallen wurden (rechts).

Witterungsverlauf 2019

Die Vegetationsperiode der Sojabohne 2019 war durch extreme Wetterbedingungen, vor allem im Sommer, gekennzeichnet. Im Frühjahr wurde ein landesweit überdurchschnittlich kühler April, ein kühlerer Mai, aber auch ein leichter Regenüberschuss im Süden Luxemburgs, beobachtet (ASTA, 2019). Der Extremsommer 2019 in Luxemburg wies drei Hitzewellen auf, Temperaturrekorde, Temperaturen über dem 10-Jahres-Durchschnitt und unterdurchschnittliche Niederschlagsdefizite (ASTA, 2019), wobei das höchste Defizit am Standort Manternach beobachtet werden konnten (s. Abbildung 11).

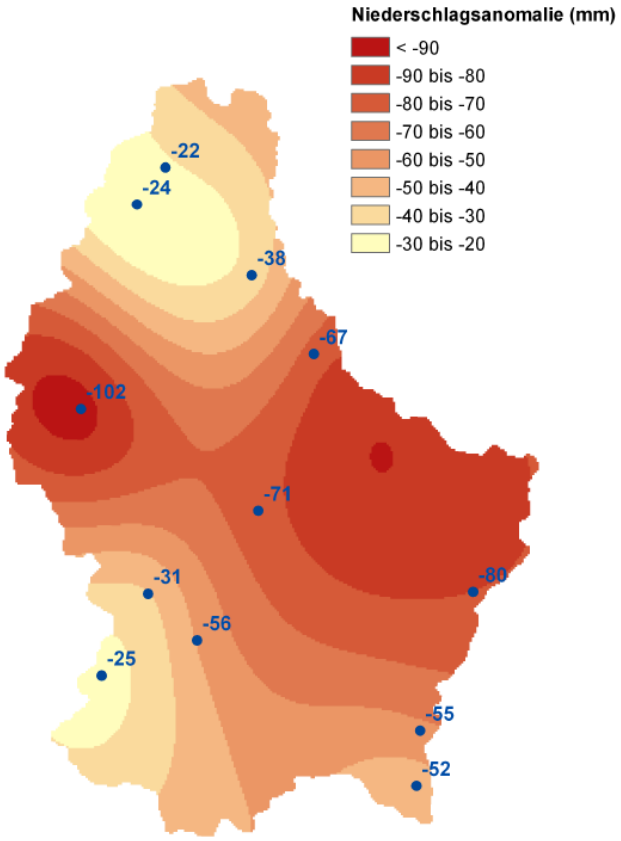


Abbildung 11: Differenz zwischen den Niederschlagssummen des Sommers 2019 (01.06.-31.08.) und der Referenzperiode 1981-2010. Anomalien der Niederschlagssummen (in blau) an den ASTA-Stationen, an denen die Referenzperiode für 1981-2010 bestimmt werden kann (ASTA, 2019).

Wie bereits erwähnt, führten die kühlen Temperaturen Ende April und Anfang Mai sowie die Regenereignisse Ende April zu einer im Vergleich zum Vorjahr verzögerten Aussaat. Für die Aussaat der Sojabohnen wurde eine kurze Periode ohne Niederschlag abgefangen, aber Blindstriegeln war wegen der starken Regenereignisse in Sprinkange und Manternach nicht möglich. In Hostert erlaubte die spätere Aussaat einen Blindstriegel-Einsatz während einer kurzen niederschlagsfreien Periode Ende Mai. Bis zum Beginn der ersten Blütenentwicklung wurden an allen Standorten gute Wachstumsbedingungen mit anhaltenden Regenereignissen in der ersten Junihälfte beobachtet. Die mittleren Temperatur- und Niederschlagsverläufe sind in Abbildung 12, Anhang 5 und Anhang 6 abgebildet. Am Versuchsstandort Hostert wurde das Wachstum der Sojabohnen kurzzeitig durch ein Hagelereignis unterbrochen, das am 19.07.2019 stattfand und die Sojabohnen leicht verletzte. Dennoch schienen die Pflanzen dies kompensieren zu können. Dennoch resultierte aus diesem Ereignis ein Wachstumsverzug, welcher wiederum zur Folge hatte, dass die Soja im späteren Vegetationsverlauf nicht rechtzeitig reif wurde. Bernet et al. (2016) beschreiben die Fähigkeit von Sojapflanzen, solche Schäden während der vegetativen Entwicklung problemlos, allerdings mit einer Wachstumsverzögerung, ausgleichen zu können.

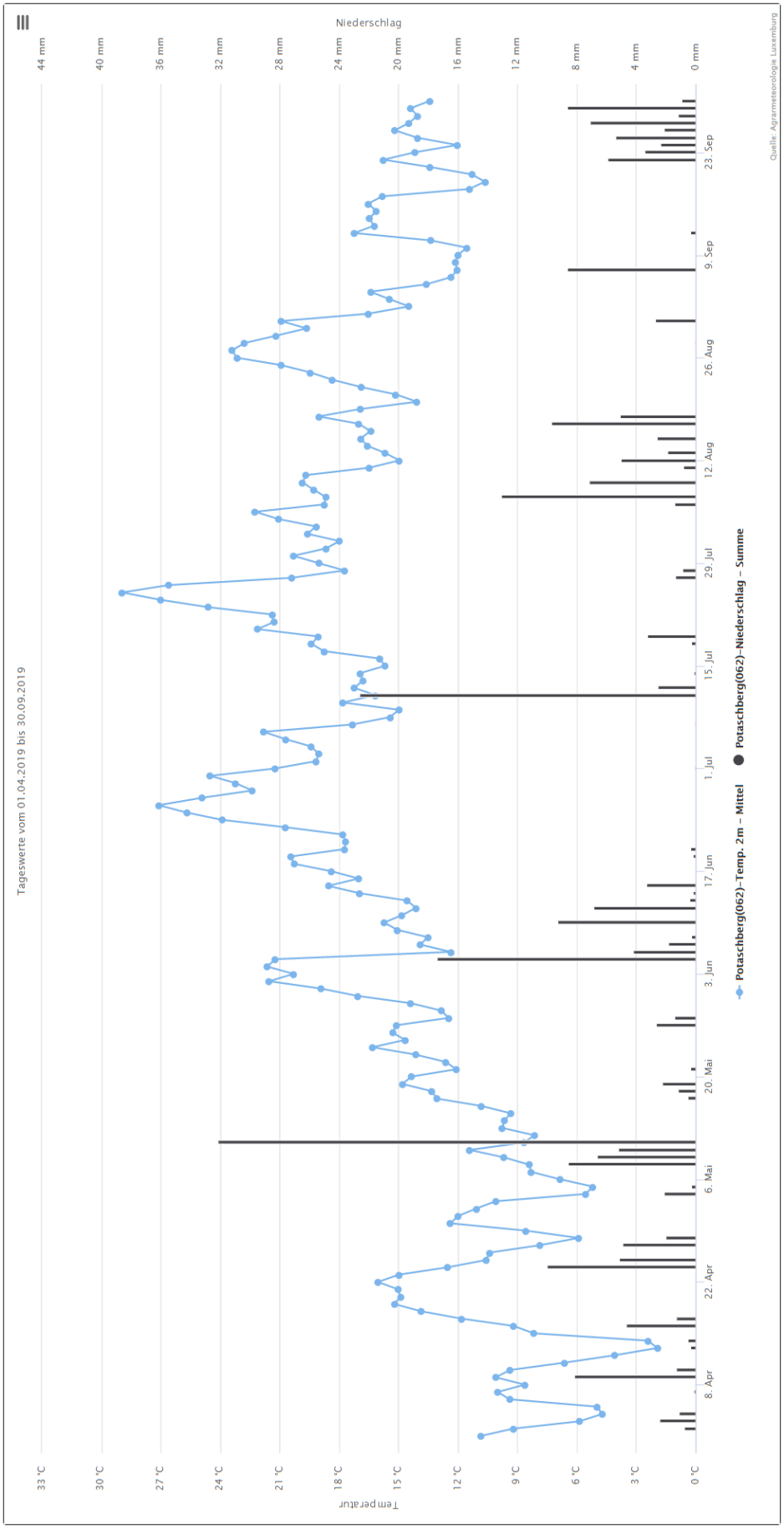


Abbildung 12: Tagesmitteltemperatur (blaue Linie) und Niederschlagssummen (schwarze Balken) der Wetterstation Potaschberg, repräsentativ für den Versuchsstandort Manternach im Jahr 2019 (agrimeteo.lu).

Die Blütezeit in Manternach wurde auf Anfang Juli und in Hostert und Sprinkange auf Ende Juli datiert. Zwei der drei Hitzewellen in Luxemburg mit Temperaturen über 30 °C wurden innerhalb dieser Zeiträume beobachtet (s. Abbildung 12). Die Temperaturen erreichten bis zu 35 °C am 26.06.2019, bis zu 39,2 °C am 25.07.2019 und zudem bis zu 33 °C am 07.08.2019 (Temperaturen wurden exemplarisch angegeben für den Standort Manternach). Von Mitte Juni bis Mitte Juli, dem Zeitpunkt der Blüte in Manternach, wurden keine Niederschläge beobachtet. In den folgenden Wochen der Hülsenentwicklung traten nur geringe Regenereignisse auf, so dass Niederschlagsmangel das Wachstum der Sojabohnen in diesen Entwicklungsstadien negativ beeinflusste. In der ersten Augusthälfte traten nur wenige geringe Regenereignisse auf, aber wiederum gefolgt von ausbleibenden Niederschlägen bis zur Ernte Anfang September, so dass die Sojabohnen erneut in Notreife gingen (s. Abbildung 12).

In Sprinkange traten die August-Niederschläge unmittelbar nach der Blüte ein, da die Sojabohnen hier später blühten, und waren für die Hülsenentwicklung von Vorteil. Aber auch hier konnten in der zweiten Augusthälfte keine Niederschläge beobachtet werden, die während der Zeit der Hülsenfüllung vorteilhaft gewesen wären und somit die Sojabohne auch hier in die Notreife gehen musste.

Die Sojabohnen am Versuchsstandort Hostert profitierten, wie auch in Sprinkange, von unmittelbaren Niederschlägen nach der Blüte. Sinkende Temperaturen ab Ende August und fehlender Regen führten zu einer Verzögerung der Reife, die auch schon zu Beginn durch das Hagelereignis initiiert wurde. Ende September waren die Sojabohnen noch nicht reif. Anhaltende Niederschläge ab der zweiten Septemberhälfte und niedrige Temperaturen machten es den Sojabohnen unmöglich, homogen ab zu reifen. Da die Regenfälle im Oktober anhielten, konnte der Sojabohnenbestand nicht abtrocknen und die Ernte war letztendlich nicht möglich.

2.5 Datenerhebung

Während der Vegetationsperiode fanden mehrere manuellen Bonituren in Bezug auf die Effizienz der Beikrautregulierungsmaßnahmen, der Beikrautzusammensetzung, der Sojapflanzenmerkmale und der Ertragsmerkmale statt (s. Tabelle 5) und wurden von Luftbildaufnahmen des Projektpartners Geocoptix GmbH ergänzt. Die Bonituren wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt: Vor der ersten Beikrautregulierung (VOR), nach der ersten Beikrautregulierung (NACH), zur Blüte (BLÜTE), sowie kurz vor der Ernte (ERNTE).

Tabelle 5: Überblick über die Bonituren und Auswertungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Projekt LeguTec entlang den beiden Vegetationsperioden 2018 und 2019.

Zeitpunkt	**Bonitur Parameter**
vor der Aussaat	Bodenanalyse (Grundanalyse und N_{min})
vor (VOR) und nach (NACH) der ersten Beikraut-regulierung	• Sojapflanzen pro laufenden Meter (lfm) • Deckung Soja, Beikraut und Boden [%] gesamt, in- und zwischen Reihen • Anzahl Beikräuter m^{-2} und Beikrautarten • Biomasse Soja und Beikraut [g m^{-2}] • Pflanzenschäden (NACH) (nach Vanhala et al., 2004)
zur Blüte (BLÜTE)	• Sojapflanzen pro lfm • Deckung Soja, Beikraut, Boden und Leindotter [%] gesamt, in- und zwischen Reihen • Anzahl Beikräuter m^{-2} und Beikrautarten • Anzahl Leindotterpflanzen m^{-2} • Biomasse von Soja und Beikraut [g m^{-2}] • Pflanzenschäden (nach Vanhala et al., 2004) • Chlorophyll Gehalt [µmol m^{-2}] gemessen mit SPAD-Meter • Höhe des Soja-Bestandes [cm]
zur Ernte (ERNTE)	• Sojapflanzen pro lfm • Deckung Soja, Beikraut, Boden und Leindotter [%] gesamt, in- und zwischen Reihen • Anzahl Beikräuter m^{-2} und Beikrautarten • Anzahl Leindotterpflanzen m^{-2} • Biomasse Soja und Beikraut [g m^{-2}] • Höhe des Soja-Bestandes [cm] • Ertragsstruktur (ES): Ertrag bei 86 % TM [dt ha^{-1}], Sojapflanzen m^{-2}, Hülsenansatzhöhe [cm], Hülsen $Pflanze^{-1}$, Bohnen $Hülse^{-1}$, TKG [g] • Ertrag bei 86 % TM [dt ha^{-1}] • Feuchtigkeitsgehalt [%], TKG [g], HLG [kg hl^{-1}] • Proteingehalt der Sojabohnen [%] • Bodenanalyse (Grundanalyse und N_{min})

Detaillierte Beschreibung der einzelnen Bonituren und der Vorgehensweise der Erhebungen sind dem offiziellen englischen Abschlussbericht (Leimbrock-Rosch et al., 2010) auf den Seiten 52-56 zu entnehmen. Lediglich auf das Versuchsdesign der Subplots soll an dieser Stelle hingewiesen werden.

Die einzelnen Datenerhebungen fanden in vordefinierten Bereichen innerhalb jeder Parzelle statt. Für jede Parzelle wurden 9 feste Unterparzellen mit einer Fläche von 1 m^2 und eine Ernteparzelle von 12 m^2 markiert, um die Bonituren entlang der Vegetationsperiode an der gleichen Stelle zu gewährleisten. Abbildung 13 zeigt beispielhaft die Unterteilung jeder Parzelle für die Varianten $t.4_{Hacke}$ und $t.5_{Hacke+}$.

Variante 4,5

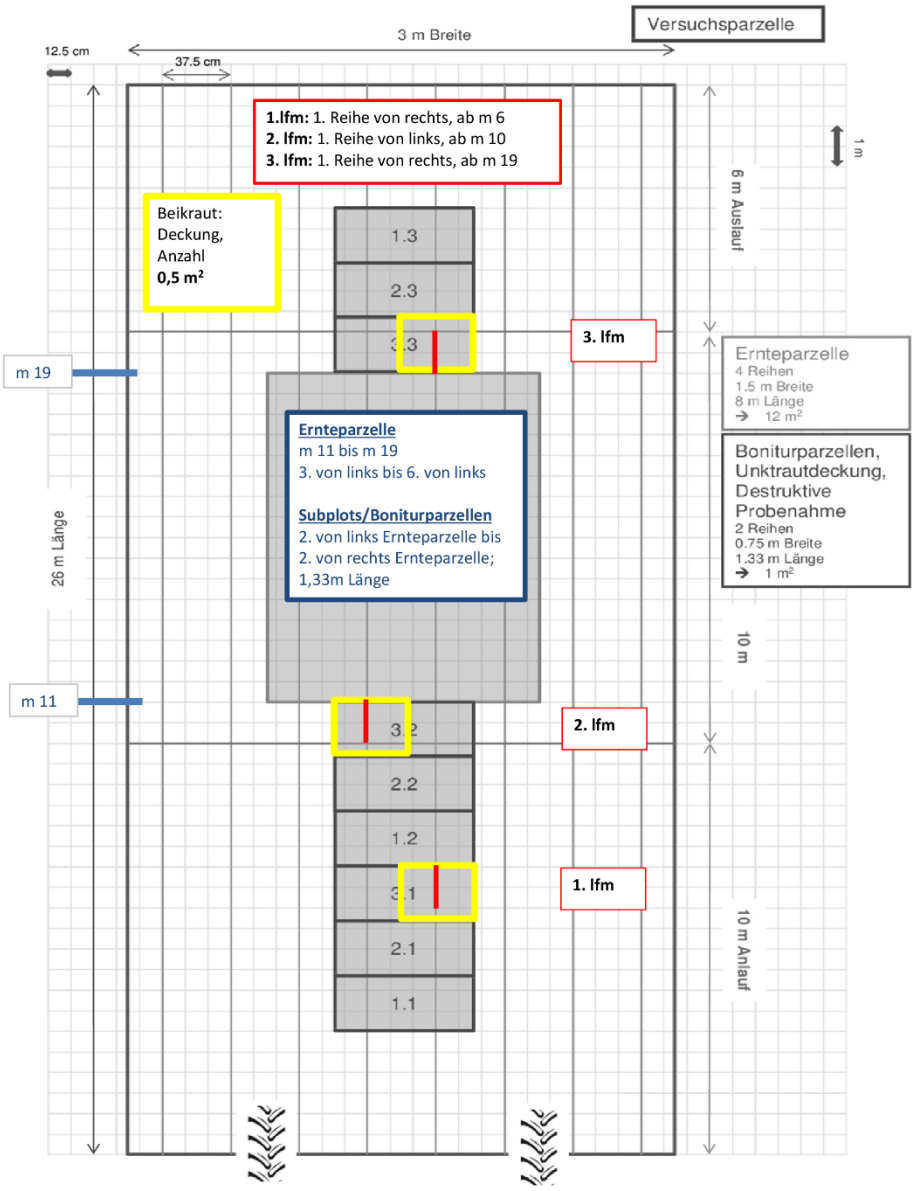


Abbildung 13: Beispielhaftes Schema der Unterteilung jeder Parzelle in ihre Teilparzellen (gelb), der laufende Meter für die Zählung der Sojapflanzen (rot) und die Ernteparzelle (blau).

Innerhalb der Teilparzellen 3.1, 3.2 und 3.3 wurden die Deckung [%], die Beikrautarten und -anzahl zu den Zeitpunkten VOR, NACH und BLÜTE bestimmt (s. die gelben Quadrate in Abbildung 13). Die Anzahl der Sojabohnenpflanzen wurde in diesen Unterparzellen pro lfm gezählt (s. die roten Linien in Abbildung 13). Die destruktiven Probenahmen der Biomasse wurden in den Unterparzellen 1.1, 1.2 und 1.3 VOR und in den Unterparzellen 2.1, 2.2 und 2.3 zur BLÜTE genommen. Die Subplots 3.1, 3.2 und 3.3 waren für die Erhebungen der Biomasse zur ERNTE reserviert. Alle Bonituren, die sowohl VOR, NACH und zur BLÜTE durchgeführt wurden, erfolgten mit Hilfe eines 0,5 m² großen Boniturrahmens (Eigenfertigung), der für jede Reihensituation angepasst wurde: 133 cm * 37,5 cm für den Reihenabstand 37,5 cm (Varianten $t.4_{Hacke}$, $t.5_{Hacke+}$ und $t.6_{Kombi}$) und 100 cm * 50 cm für die 12,5 cm breiten Reihen (Varianten $t.1_{neg}$, $t.2_{pos}$, $t.3_{Striegel}$ und $t.7_{Mix}$) (s. Abbildung 14).

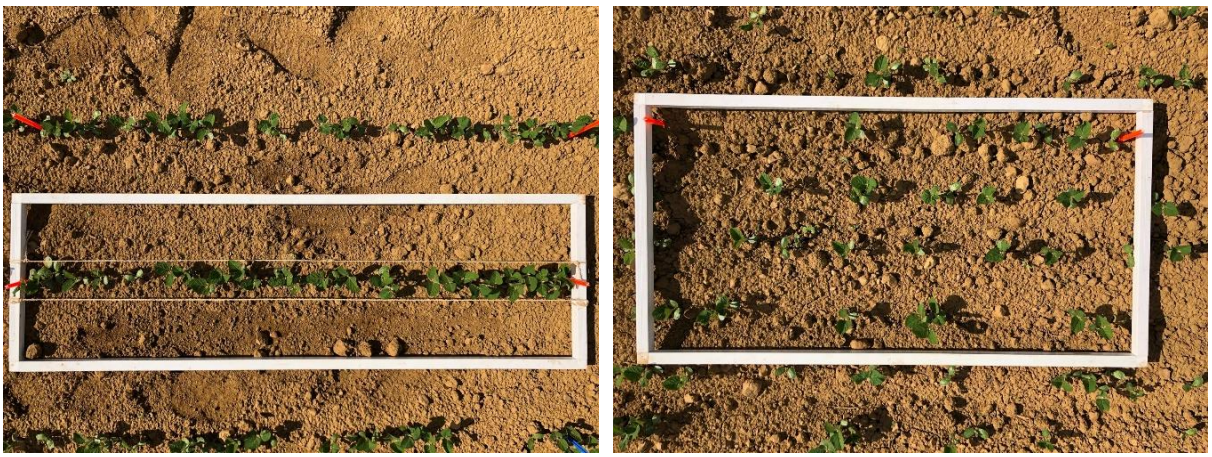


Abbildung 14: Boniturrahmen für die reihenabhängigen Varianten t.4$_{Hacke}$, t.5$_{Hacke+}$ und t.6$_{Kombi}$ (links) und die reihenunabhängigen Varianten t.1$_{neg}$, t.2$_{pos}$, t.3$_{Striegel}$ und t.7$_{Mix}$ (rechts).

Die erhobenen Parameter dienten als Grundlage für u.a. folgende Berechnungen, die zur Datenauswertung herangezogen wurden (Gesamtdarstellung im offiziellen englischen Abschlussbericht):

- Soja **Pflanzendichte [Pflanzen m^{-2}]** berechnet aus Sojapflanzen lfm^{-1}.
- **Pflanzenverluste [%]** zwischen den Zeitpunkten VOR und NACH, VOR und BLÜTE, und VOR und ERNTE.
- **Effizienz der Beikrautregulierung [%]** (weed control efficiency (WCE)) entspricht der prozentualen Reduzierung der Beikrautdeckung (**WCE$_{cover}$**) VOR und NACH der Maßnahme nach Lindner et al. (2006).
- **Beikrautregulierungs Index (WCI)** beschreibt den Erfolg der jeweiligen Variante in Relation zu der negativen Kontrolle t.1$_{neg}$ zwischen den Zeitpunkten NACH und BLÜTE; ein Ergebnis von -1 zeigt eine vollständige Beikrautregulierung von 100 % an, wobei 0 keine Effekte anzeigt. Positive Werte deuten auf einen schlechteren Effekt als t.1$_{neg}$ hin und negative Werte zeigen eine Reduktion im Vergleich zu t.1$_{neg}$ an.
- **Chlorophyllgehalt chl** [**µmol m^{-2}**] wurde aus den gemessenen SPAD-Werten nach Markwell et al. (1995) berechnet.
- **Klassifizierung der Beikräuter** nach 1) einjährig und zweijährig Zweikeimblättrigen, 2) mehrjährig Zweikeimblättrigen und 3) Einkeimblättrigen Pflanzen.
- **Abundanz der Arten [%]**, die Häufigkeit des Vorkommens einer Art, wurde berechnet auf Basis der Individuenzahl einer Art m^{-2} pro Gesamt-Individuenzahl m^{-2}.
- Diversitäts-Indices (berechnet für die Zeitpunkte VOR, NACH, BLÜTE, ERNTE):
    - **Shannon index (H')**, spiegelt die Individuen-Verteilung innerhalb der Arten wider. Diese Berechnung ergibt ein Ergebnis, das von 0 bis zu einem theoretischen **Shannon-Maximum-Index (H$_{max}$)** variiert (spezifische Behandlung je nach Anzahl der Individuen und der Arten). Ein Wert, der gleich Null ist, bedeutet keine Diversität

und der Maximalwert ist die ideale Situation, in der alle angetroffenen Arten gleichmäßig verteilt sind.

- **Proteinertrag [kg ha^{-1}]**, berechnet aus dem Ertrag und Proteingehalt des Erntegutes.

Detailliertere Beschreibungen und Berechnungswege sind auch hier dem offiziellen englischen Abschlussbericht zu entnehmen (Leimbrock-Rosch et al., 2020). Der Ertrag für den Standort Hostert 2019 wurde auf der Grundlage des aus der Ertragsstruktur berechneten Ertrags geschätzt. Studien haben einen durch die Erntemaschine verursachten durchschnittlichen Ertragsverlust von 10 % ergeben (Asam et al., 2014). Der Ertrag wird als $H2019_{est}$ bezeichnet, um die Ertragsschätzungen zu verdeutlichen.

2.6 Statistische Auswertung

Die Daten wurden aufgrund der Verfügbarkeit von nur zwei aufeinanderfolgenden Versuchsjahren und der unterschiedlichen Standortmerkmale (z.B. Bewirtschaftung und pedoklimatische Bedingungen), standort- und jahresspezifisch behandelt. Bei den Merkmalen, die in den drei Teilflächen pro Parzelle gemessen wurden, wurde der Durchschnitt für jede Parzelle berechnet, da die Teilflächen als Pseudoreplikationen oder Teilproben betrachtet werden können. Daher wurde ein genauer Parzellenmittelwert für weitere Berechnungen abgeleitet. Die von den Varianten abhängigen Variablen wurden nach dem linearen Modell für ein randomisiertes vollständiges Blockdesign gemäß der Definition von Piepho (1997) statistisch analysiert:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + e_{ij} \qquad (1)$$

wobei y_{ij} die Zielvariable der *i*-ten Variante in dem *j*-ten Block ist, μ der Gesamtmittelwert, τ_i der Effekt der *i*-ten Variante, β_j der Effekt des *j*-ten Blocks and e_{ij} der Residualfehler bezogen auf die Zielvariable y_{ij}.

Die Datenanalyse wurde mit R Studio Version 1.3.1073 (RStudio Team, 2020) durchgeführt. Mittelwert und Standardabweichungen wurden berechnet. Die Modellresiduen wurden visuell überprüft und zusätzlich mit dem Shapiro-Wilk-Test und dem Levene-Test auf Normalverteilung und Homogenität der Varianzen getestet. Die Varianzanalyse (ANOVA) wurde berechnet, wenn die Annahmen der Normalverteilung und Varianzhomogenität erfüllt waren. Das R-Paket "agricolae" wurde für den post-hoc-Mehrfachvergleich und die Gruppierung verwendet (de Mendiburu, 2020). Der Tukey's honest significant difference test (Tukey-HSD-Test) wurde angewandt, um signifikante Unterschiede auf einem Signifikanzniveau von α = 5 % zu testen ($p \leq 0.05$). Der Fisher's least significant difference test (LSD-Test) wurde nur dann angewandt, wenn der Tukey-HSD-Test nicht signifikant war, die ANOVA jedoch vorher signifikante Unterschiede zeigte (Ergebnisse markiert mit "*"). Im Falle von Heteroskedastizität oder Nicht-Normalverteilung der Residuen, wurde der nichtparametrische Kruskal-Wallis-Test herangezogen, gefolgt vom LSD-Post-hoc-Test, wie er im "Agricolae"-Paket vordefiniert ist. Zur besseren Unterscheidung der Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests wurden die *p*-Werte orange markiert und die Signifikanzen mit "**" gekennzeichnet. Wenn "*"

von Klammern eingeschlossen ist, sind ANOVA und Kruskal-Wallis nur auf α = 10 % signifikant ($p \leq 0.1$).

Die Korrelationen der Variablen wurden nach Piepho (2018) auf der Grundlage der Variantenmittel zur Eliminierung des Blockeffekts berechnet. Der Pearson-Korrelationskoeffizient wurde daher im Falle einer Normalverteilung und der Spearman-Korrelationskoeffizient im Falle einer Nicht-Normalverteilung verwendet, wobei Unterschiede bei $p \leq 0.05$ als signifikant angesehen wurden.

Die lineare Regression wurde herangezogen, um die funktionelle Beziehung zwischen einer Zielvariablen und einer Einflussgröße zu analysieren. Die Anforderungen normalverteilter und homogener Residuen wurden getestet, und der Grad der Beziehung wurde als Bestimmtheitsmaß R^2 ausgedrückt.

Bei der Ergebnisdarstellung unterscheiden sich die Mittelwerte, die mit demselben Buchstaben gekennzeichnet sind, nicht signifikant bei einem Wahrscheinlichkeitsniveau von α = 5 %. Signifikanzniveaus für die ANOVA werden mit '***' 0,001, '**' 0,01, '*' 0,05, '.' 0,1 angegeben.

2.7 Geodatenanalyse

VOR, NACH, zur BLÜTE und ERNTE wurden die manuellen Bonituren von Drohnen-gestützten Luftbildaufnahmen ergänzt. Der Projektpartner Geocoptix GmbH überflog die jeweiligen Versuchsfelder mit unbemannten Flugsystemen (UAVs).

2.7.1 Datenerhebung und Datenvorverarbeitung

Um multispektrale Datensätze zu erfassen, wurde eine UAV-Plattform mit einer Multispektralkamera ausgestattet. Ein DJI Phantom 4 Pro ist ein vielseitiges UAV, das die Kapazität zum Heben zusätzlicher Nutzlast bietet, obwohl dies vom Hersteller nicht vorgesehen ist. Es hat ein Gewicht von 1,3 kg und ein MTOW (Maximum TakeOff Weight) von 1,5 kg. Die an der UAV angebrachte Multispektralkamera ist eine Micasense RedEdge-M-Kamera (s. Abbildung 15). Der Multispektralsensor liefert fünf Spektralbänder, die das sichtbare Licht und den nahen Infrarotbereich abdecken. Abbildung 15 (rechts) fasst die zentralen Wellenlängen mit der jeweiligen Bandbreite jedes Bandes, wie vom Hersteller veröffentlicht, zusammen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass das vierte Band einen sehr charakteristischen Übergangsbereich zwischen dem sichtbaren Bereich und dem nahen Infrarot darstellt. Diese ist allgemein als „Red Edge“ bekannt, das sich durch seine Grenze zwischen dem Chlorophyllabsorptionsmerkmal im sichtbaren Rot und dem Reflexionsverhalten aufgrund interner Blattstrukturen im nahen Infrarot auszeichnet. Diese spektralen Merkmale sind sehr geeignet, um mehrere Vegetationsindizes zu berechnen und darüber hinaus Zugang zur Dynamik einer Vegetationsperiode zu erhalten (Jorge et al., 2019).

Band Nr.	Band Name	Central Wave-length (nm)	Band-width (nm)
1	Blue	475	20
2	Green	560	20
3	Red	668	10
4	Red Edge	717	10
5	NIR	840	40

Abbildung 15: UAV-setup: DJI Phantom 4 Pro (links) mit Micasense RedEdge-M camera (mitte) und Spektrale Eigenschaften der Micasense RedEdge-M-Kamera (rechts).

Die Standardparameter des Kartierungsfluges sind so eingestellt, dass eine Überlappung von 75 % in Flugrichtung und eine seitliche Überlappung von 70 % der aufgenommenen Bilder gewährleistet ist. Weiterhin wird die Flughöhe auf 30 - 35 m eingestellt, um den qualitativen Anforderungen unter Berücksichtigung des Detaillierungsgrades gerecht zu werden, was zu einer Auflösung von 2 - 2,5 cm pro Pixel führt. Zusätzliche radiometrische Parameter wurden während des Fluges aufgezeichnet, wie z.B. das einfallende Licht mit Hilfe des Downwelling Light Sensor (DLS). Der Sensor ist oben auf der Drohne montiert, wodurch die gewonnenen Daten eine Korrektur der unterschiedlichen Lichtverhältnisse während des Fluges ermöglichen. Tabelle 1 und Tabelle 3 enthalten die genauen Überflugdaten in den Versuchsjahren 2018 und 2019. Die folgenden Abbildungen zeigen die Versuchsflächen für jeden Standort und jedes Jahr (s. Abbildung 16 bis Abbildung 18).

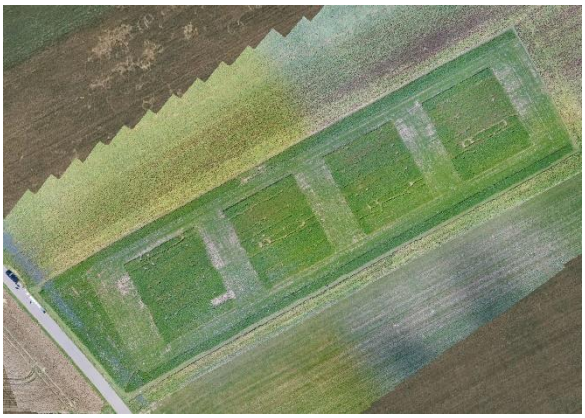


Abbildung 16: Versuchsstandorte in Hostert in den Jahren 2018 (links, Datum der Datenerhebung: 08.07.2018) und 2019 (rechts, Datum der Datenerhebung: 16.06.2019).

Abbildung 17: Versuchsstandorte in Sprinkange in den Jahren 2018 (links, Datum der Datenerhebung: 21.06.2018) und 2019 (rechts, Datum der Datenerhebung: 26.07.2019).

Abbildung 18: Versuchsstandorte in Manternach in den Jahren 2018 (links, Datum der Datenerhebung: 18.05.2018) und 2019 (rechts, Datum der Datenerhebung: 09.07.2019).

Die Vorverarbeitung der Daten lässt sich in drei Schritte unterteilen, die zur Ableitung der gewünschten multispektralen Reflexionskarte notwendig waren:

1. Radiometrische Korrektur der Flugbilder,
2. Photogrammetrische Auswertung und
3. Empirische Linienkorrektur.

Eine detaillierte Beschreiung der einzelnen Schritte ist dem offiziellen englischen Abschlussbericht zu entnehmen.

2.7.2 Vegetationsindices und Klassifikationsverfahren

Die Micasense Datensätze erlauben, aufgrund der zusätzlichen spektralen Informationen im Red Edge und NIR Bereich, die Berechnung einer Vielzahl von Indizes. Diese Indizes können beispielsweise zu Klassifikation von Vegetation und Nicht-Vegetation herangezogen werden oder ermöglichen Aussagen über die Vitalität der Vegetation zu treffen. Der wohl bekannteste Index ist der **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)**, welcher seit Rouse et al. (1974) als Referenz genutzt wird, um auf Basis des roten und NIR Bands, photosynthetisch aktive Vegetation zu identifizieren. Weitere Indices, welche im Rahmen des Projektes berechnet wurden, waren der **Soil**

Adjusted Vegetation Index (SAVI), der **Normalized Difference Red Edge Index (NDRE)**, sowie der **Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)**. Die Berechnungsgrundlagen sind ebenfalls dem offiziellen englischen Abschlussbericht zu entnehmen.

Mit dem Ziel zunächst Vegetation von nicht-Vegetation zu trennen wurde der NDVI verwendet. Anhand unterschiedlicher Schwellenwerte je Zeitpunkt und Standort kann so eine Aufteilung in diese zwei Basisklassen erfolgen. Da die Beleuchtungsverhältnisse und der Entwicklungszustand der Pflanzen zu jedem Zeitpunkt der Datenerhebung unterschiedlich waren, resultieren daraus unterschiedliche Reflexion Eigenschaften der Oberflächenobjekte. Daher wurde eine Schwellenwert Ermittlung für jeden Standort und Zeitpunkt separat bestimmt. Der NDVI kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei Werte nahe 1 auf photosynthetisch aktive Vegetation deuten. Somit ist diese Methode eine sehr effektive Möglichkeit Vegetation von anderen Landbedeckungsarten zu unterscheiden.

Aufgrund der spektralen Unterschiede von Objekten (z.B. Vegetation, Boden, Wasser) kann mittels verschiedener Klassifikationsverfahren versucht werden diese Objekte automatisiert zu erkennen und Klassen voneinander zu trennen. Es lässt sich zwischen den unüberwachten und überwachten Klassifikationsverfahren unterscheiden. Während im ersten Fall nur Informationen, die im Bildmaterial enthalten sind, verwendet werden, wird bei den überwachten Verfahren noch zusätzliche Informationen wie Feld- oder Trainingsdaten berücksichtigt. Letztere Verfahren bieten den Vorteil, dass der Nutzer aufgrund der Identifikation eindeutiger Trainingsgebiete je Objektklasse die Kriterien zur Bestimmung der Klassenzugehörigkeit selbst festlegen kann, während bei den unüberwachten Verfahren die spektral trennbaren Klassen nicht zwangsläufig mit realen Objektklassen übereinstimmen müssen. Bei den überwachten Verfahren lernt der Algorithmus also aus den spektralen Mustern die typischen Eigenschaften einer Klasse und kann dieses „Wissen“ auf neue Gebiete anwenden.

Innerhalb des Projektes wurden die zwei überwachten Klassifikationsverfahren Random Forest und Support Vector Machine (SVM) verwendet mit dem Ziel die Trennbarkeit von Sojapflanze, Beikraut und Boden auf Basis der multispektralen Daten zu unterscheiden. Die Trainingsdaten wurden hierfür visuell in den Orthomosaiken generiert.

2.7.3 Spatial statistics

Die Berechnung von Zonenstatistiken erlaubt es statistische Maße mehrerer Zellen eines Rasters innerhalb von festgelegten Zonen zu bestimmen. Dadurch können Inhomogenitäten und Unterschiede sichtbar werden und eine Vielzahl von Rasterzellen können durch einen oder mehrere repräsentative Statistiken dargestellt werden, was zu einer Reduktion der Datenmenge führt.

Hier wurde zunächst ein Netz von Hexagonen mit einem Durchmesser von 50 cm über die Untersuchungsgebiete gelegt und als Zonen für die Berechnung der Statistiken verwendet. Als Input Raster diente das Ergebnis aus der Vegetation/Nicht-Vegetations Klassifizierung, wobei lediglich alle

Pixel, welche unter die Kategorie „Vegetation“ gefallen sind, berücksichtigt wurden. Dies diente dazu zunächst einen Überblick über die Verteilung photosynthetisch aktiver Vegetation zu bekommen und beispielsweise Inhomogenitäten innerhalb der Untersuchungsgebiete festzustellen.

Da bei der hexagonalen Analyse sichtbar wurde, dass die Verteilung photosynthetisch aktiver Vegetation innerhalb der einzelnen Felder inhomogen war, wurde in einem zweiten Ansatz jeweils einzelne Polygone über die Mitten der Feldreihen gelegt und für diese Plots die Statistiken ermittelt (s. exemplarisch Abbildung 19, Abbildung 20).

Aus dem breiten Spektrum der verfügbaren zonalen Statistiken wurden nur die folgenden Parameter abgeleitet: Median (liefert einen repräsentativen Wert für jede Zone, weniger empfindlich für Ausreißerwerte), SD (gibt einen Hinweis auf die Homogenität jeder Zone).

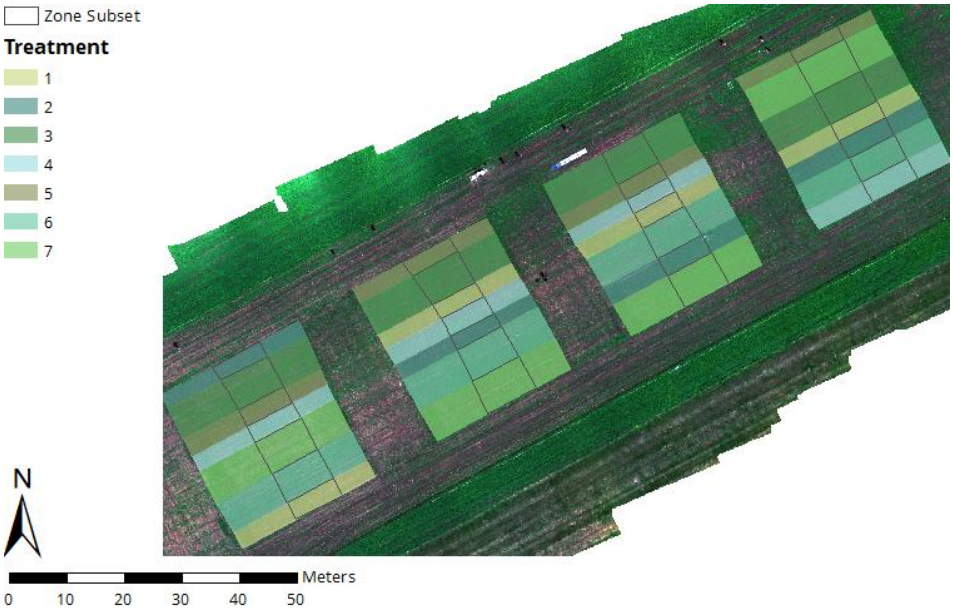


Abbildung 19: Central subset für die Extraktion von spatial statistics in Hostert 2018.

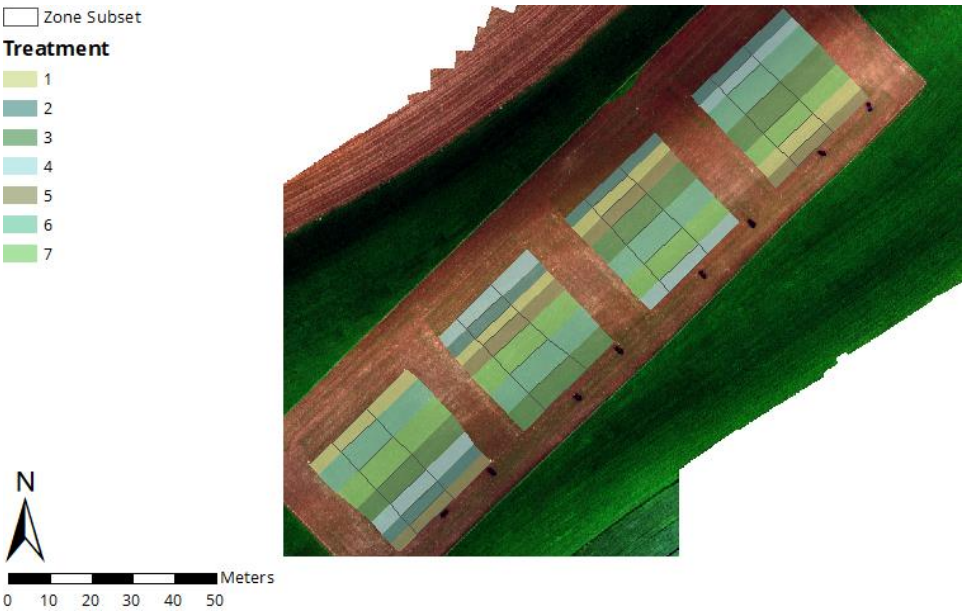


Abbildung 20: Central subset für die Extraktion von spatial statistics in Hostert 2019.

2.8 On-Farm-Versuch in Bettendorf

Begleitend zu den Exaktversuch an den drei Versuchsstandorten wurde in den Jahren 2018 und 2019 ein On-Farm-Feldversuch an dem landwirtschaftlichen Versuchsstandort des LTA in Bettendorf durchgeführt. Dieser Standort wurde von den Schülerinnen und Schülern des LTA in Absprache mit dem Lehrpersonal und den Soja-Experten des IBLA selbständig bewirtschaftet und somit zu Lehr- und Demonstrationszwecken genutzt. Ziel dieses Teilprojektes innerhalb LeguTec war die unmittelbare Weitergabe der gewonnenen Kenntnisse über den Sojaanbau an die Schülerinnen und Schüler der Landwirtschaftsschule in Luxemburg.

Innerhalb dieses Versuches fand regelmäßig praktischer Unterricht statt. Während des Sommersemesters bestimmten die Studierenden den Auflauf der Pflanzen, bestimmten die vorkommenden Beikräuter, die Entwicklungsstadien der Sojapflanzen und verglichen die verschiedenen Maßnahmen zur Beikrautregulierung. Unmittelbar nach den Sommerferien im Herbst ernteten die Schülerinnen und Schüler der 12. Klasse die reifen Sojabohnen mit einem Mähdrescher, um Ertragsparameter der einzelnen Varianten zu bestimmen. Die Ergebnisse wurden anschließend in Unterrichtseinheiten diskutiert.

In jedem Versuchsjahr wurde eine Testfläche für die Hacke installiert, um die Maschine vor den einzelnen Läufen innerhalb des gesamten LeguTec Versuches einzustellen (A). Darüber hinaus wurde das Feld in 12,5 cm Reihenabstand (B) und 37,5 cm Reihenabstand (C) eingeteilt (s. Abbildung 21).

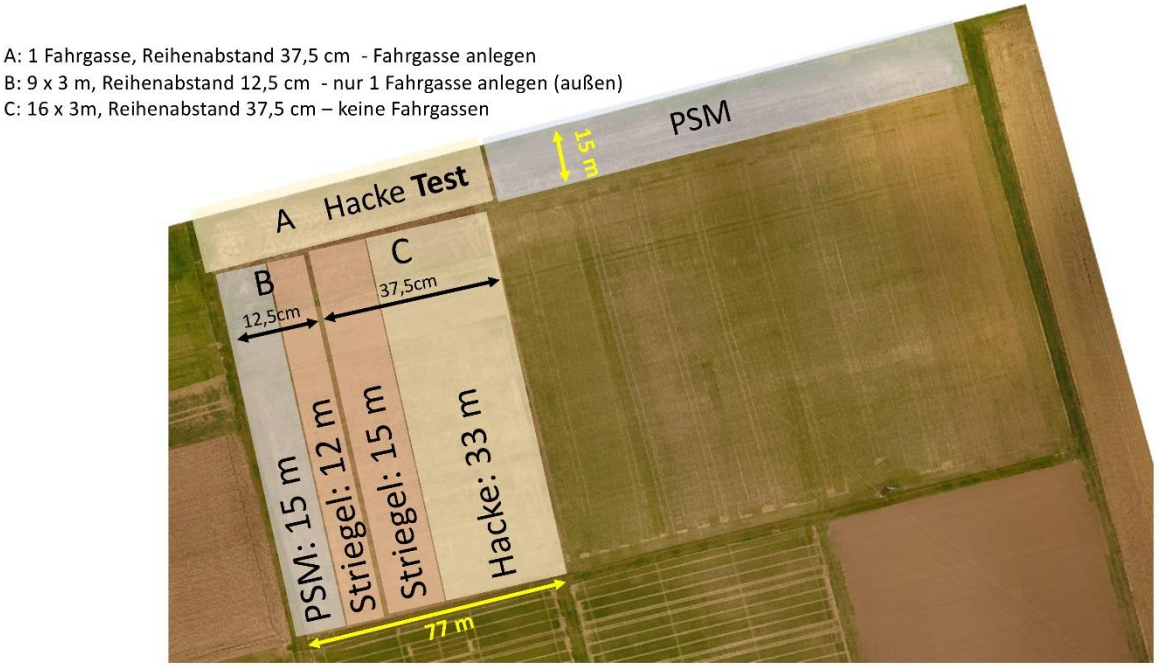


Abbildung 21: Versuchsdesign des On-Farm-Versuches in Bettendorf im Jahre 2019.

Der On-Farm-Versuch bestand aus folgenden Varianten, die miteinander verglichen wurden: a) zwei Hackdurchgänge, b) ein Durchgang mit Striegel gefolgt von Hacke mit Fingerhacken, c) ein

Durchgang mit Striegel und Hacke, d) ein Striegeldurchgang, e) ein Hackdurchgang und ein weiterer mit Hacke und Fingerhacke, und f) chemische Beikrautbekämpfung im Reihenabstand von 12,5 cm und g) chemische Beikrautbekämpfung im Reihenabstand von 37,5 cm.

Die in Bettendorf zur mechanischen Beikrautregulierung verwendete Hacke mit der Applikation von Fingerhacken war die selber Maschine, die auch in dem Exaktversuch verwendet wurde. Zum Striegeln wurde ein Treffler-Präzisionszinkenstriegel eingesetzt. Beide Maschinen wurden von Wolff-Weyland S.A. zur Verfügung gestellt (s. Abbildung 22).

Abbildung 22: Striegel (links), Hacke (Mitte) und Mähdrescher (rechts) im On-Farm-Versuch in Bettendorf (Quelle: LTA).

Die Aussaat fand am 20.04.2018 und am 02.05.2019 statt. Während der Vegetationsperiode wurden die in den Parzellen vorhandenen Beikräuter sowie die BBCH-Entwicklungsstadien der Kultur bestimmt. Die Ernte fand im Jahr 2018 am 12.09. und in 2019 am 20.09. im Rahmen einer Unterrichtseinheit durch die Schülerinnern und Schüler des LTA statt. Bei der Ernte 2018 wurden verschiedene Parameter wie Sojabohnenertrag, Feuchtigkeitsgehalt, TKG und HLW erfasst. Im Rahmen des Unterrichts wurden die Ergebnisse von den Studenten diskutiert und ausgewertet.

Im Jahr 2019 konnte aufgrund des unregelmäßigen Auflaufens der Sojapflanzen und des erhöhten Beikrautdrucks auf allen Parzellen nur eine Gesamtertragsberechnung durchgeführt werden.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Versuchsstandorte Bettendorf in den Jahren 2018 und 2019, die Merkmale und Daten zu den durchgeführten Varianten und weitere wichtige Kennzahlen.

Tabelle 6: Kennzahlen des On-Farm-Versuches im LeguTec-Projekt sowie Daten der im Jahr 2019 durchgeführten Arbeitsschritte. Temperatur und Niederschlag werden als 7-Jahres-Mittel der Station Bettendorf angegeben. (2012-2018, agrimeteo.lu). CHU vom 01.05.-15.09. Das Entwicklungsstadium der Sojapflanze wird in Klammern mit Hilfe der BBCH-Skala nach Munger et al., 1997 angegeben.

LeguTec		**Bettendorf (LTA)**	**Bettendorf (LTA)**
Versuchs-standort	**Versuchsjahr**	**2018**	**2019**
	FLIK Number	P0893423	P0893423 (2)
	Grösse Versuchsfeld (ha)	1.05	1.47
	m ü NN	188	188
	Ø-Temp (°C)	9.7	9.7
	Ø-Niederschlag ∑ (mm)	849	849
	CHU (01.05.-30.09.)	2740.3	2740.3
	Bodentyp	Talboden	Talboden
	Bodenparameter		
	Aufnahmedatum	Jan.18	Jan.19
	pH (CaCl2)	7.4	7.3
	K_2O (mg/100 g tr. Boden)	12.5	15
	P_2O_5 (mg/100 g tr. Boden)	15.5	14
	Mg (mg/100 g tr. Boden)	24	26
	Na (mg/100 g tr. Boden)	1	2
	Nmin (kg Nitrat-N/ha)		NA
	Vorfrucht	Wintergetreide	Sommergerste/Winterweizen
	Zwischenfrucht	-	-
Grundboden-bearbeitung	**Pflug**	20.03.	März/April 2019
Düngung und Falsches Saatbett	**Kalkung Datum**	-	-
	Kalk Menge (kg)	-	-
	Phosphor Datum	11.04.	-
	Phosphor Menge (kg)	100	-
Aussaat	**Falsches Saatbett**	13.04.	-
	Impfung + Saat	20.04.	02.05.
	Impfmittel	Biodoz Soja	Rizoliq Top S
	Saatstärke (K/m²)	65	65
	Saat Leindotter	-	-
	Leindotter Saatmenge (kg/ha)	-	-
Mechanische Beikraut-regulierung	**Blindstriegeln**	-	kein Blindstriegeln möglich
	Striegeln 1	09.05. (BBCH 11)	03.06. (BBCH 13)
	Hacken 1		03.06. (BBCH 13)
	Striegeln 2	-	-
	Hacken 2	30.05. (BBCH 13)	
Chemisch	**Pulsar 40**	0,5 l/ha am 28.05.	0,5 l/ha am 13.06
	Harmony SX	7,5 g/ha am 28.05.	7,5 g/ha am 13.06.
Ernte	**Erntedatum**	12.09. (BBCH 99)	20.09.

3. Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die wichtigsten Resultate aus dem Projekt LeguTec dargestellt und diskutiert. Detailliertere Resultate gemäß den gesamten Erhebungen sind dem offiziellen englischen Abschlussbericht zu entnehmen (Leimbrock-Rosch et al., 2020). Es werden zunächst anbautechnische Resultate bezogen auf die Beikrautregulierungseffizienz dargestellt, gefolgt von dem Einfluss der Varianten auf die Beikrautdiversität, der Eignung von Fernerkundungstechniken und Geodatenanalysen zur Unterstützung von In-situ-Bewertungsmethoden und abschließend dem erfolgten Wissenstransfer.

3.1 Effizienz der Beikrautregulierung

3.1.1 Ertrag

Der Sojabohnenertrag ist ein wichtiger Parameter um die Wirksamkeit der Methoden zur Beikrautregulierung zu bewerten. Die Sojabohnenerträge waren an allen drei Versuchsstandorten in den Jahren 2018 (18) und 2019 (19) in den Hackvarianten (t.4$_{Hacke}$, t.5$_{Hacke+}$ und t.6$_{Kombi}$) durchgehend höher als in den Striegelvarianten (t.3$_{Striegel}$ und t.7$_{Mix}$). Signifikante Ertragsunterschiede (p<0,05) wurden für alle Standorte mit Ausnahme von Manternach beobachtet (s. Tabelle 7). Manternach18 wies zudem auch bei p≤0,1 signifikante Unterschiede auf.

Tabelle 7: Mittlerer Sojabohnenertrag [dt ha^{-1}] bei 86 % TM der verschiedenen Methoden für die drei Versuchsorte und die beiden Versuchsjahre. Die Mittelwerte, gefolgt von einem gemeinsamen Buchstaben innerhalb jeder Spalte, unterscheiden sich bei p<0,05 nicht signifikant nach dem Tukey-HSD-Test, oder dem Fisher-LSD-Test und der ANOVA p≤0.1 (*). Die Erträge für Hostert 2019 wurden anhand der Ertragsstruktur geschätzt (2019$_{est}$).

	Ertrag [dt ha^{-1}] 86 % TM					
	Manternach		Sprinkange		Hostert	
Variante	**2018**	**2019(*)**	**2018**	**2019**	**2018**	**2019$_{est}$**
t.1 neg	11,8 n.s.	8,1 bc	12,7 ab	5,4 c	6,7 b	7,8 b
t.2 pos	13,6	9,5 abc	16,2 a	-	15,1 a	14,6 ab
t.3 Striegel	13,8	7,2 c	10,3 b	7,5 bc	8,2 b	8,5 ab
t.4 Hacke	14,0	13,1 ab	13,9 ab	12,5 ab	10,1 ab	19,9 a
t.5 Hacke+	14,8	14,4 a	13,9 ab	12,5 ab	10,0 ab	17,8 ab
t.6 Kombi	13,9	12,6 abc	14,1 ab	14,5 a	10,4 ab	13,8 ab
t.7 Mix	12,8	7,8 bc	11,2 b	7,1 bc	7,5 b	7,2 b

Die Erträge waren beim Hacken und manuellem Entfernen (t.2$_{pos}$) vergleichbar. Auch bei den Varianten des Striegels und bei keinerlei Regulierung (t.1$_{neg}$) zeigten die Erträge ähnliche Ergebnisse. In Bezug auf Letzteres wurde von Kunz et al. (2015) gleiche Beobachtungen beschrieben. Innerhalb der Hackvarianten wurden gleiche Erträge erzielt, unabhängig davon, ob mit oder ohne Fingerhacken Applikationen gearbeitet wurde. Dies steht im Einklang mit Pannacci et al. (2018), die keine Ertragsunterschiede innerhalb verschiedener Hackvorrichtungen beobachteten. Auf Standorten mit niedrigem Beikrautdruck (Manternach18) waren die Erträge aller Varianten ähnlich und daher

durch die Art der Regulierung nicht beeinträchtigt; der Striegel wurde hier als gleichwertige alternative Methode aufgezeigt.

Die Leindottervarianten ($t.7_{Mix}$) wurden durch fehlende Niederschläge im Anschluss an die Saat negativ beeinflusst. Leindotter keimte nur in Manternach18, Manternach19 und Hostert19, etablierte sich jedoch auch nicht zufriedenstellen. Der Mischanbau mit Leindotter zeigte sich somit als nicht geeignet für die luxemburgischen Standorte.

Die Sojabohnenerträge waren in beiden Projektjahren eher niedrig und lagen unter dem Ertragspotenzial der luxemburgischen Anbaugebiete. Die höchsten Erträge wurden mit 16,2 dt ha^{-1} im Jahr 2018 und 19,9 dt ha^{-1} im Jahr 2019 erzielt. Setzt man diese Erträge ins Verhältnis, so zeigten die Ergebnisse der nationalen Sortenversuche in beiden Jahren deutlich höhere Erträge. Der durchschnittliche Ertrag der Sorte Merlin in Luxemburg betrug 23,9 dt ha^{-1} im Jahr 2018 und 27,8 dt ha^{-1} im Jahr 2019 (Keßler, 2018; Heidt, 2019). Im Vergleich zu den benachbarten Anbaugebieten lag der durchschnittliche Ertrag der Sorte Merlin in Rheinland-Pfalz, Deutschland, in 2017 bei 26,1 dt ha^{-1} (Anderl et al., 2018) und in Nord Pas de Calais, Frankreich, in 2016 bei 19,6 dt ha^{-1} (Chambres d'agriculture des Hauts de France, 2016). Geringe Sojaerträge können durch unterschiedliche Boden- und Witterungsbedingungen erklärt werden. So befanden sich die Sortenversuche in Luxemburg auf sehr günstigen Standorten für den Sojaanbau. Hostert18 und Sprinkange19 litten seit Beginn der Vegetationsperiode unter hohem Beikrautdruck. Beide Standorte in Manternach zeichneten sich durch die geringsten Jahresniederschläge und die trockensten Standortbedingungen aus. Der Bestand in Hostert19 litt unter hohen Niederschlägen während der Ernteperiode, die eine optimale Abreife der Sojabohnen und eine rechtzeitige Ernte unmöglich machten. Schwere Böden waren typisch für die Standorte in Sprinkange, die zu einem verzögerten Abtrocknen nach Regenereignissen oder zu Verkrustungen neigen, was eine Herausforderung für die mechanische Beikrautregulierung darstellte (Bernet et al., 2016). Nur wenige landwirtschaftliche Standorte sind für den Sojaanbau in Luxemburg bestens geeignet. Daher mussten die Erträge auf den Versuchsstandorten maximiert werden. Die vorliegende Studie zeigte, dass auch für Luxemburg die größte Herausforderung im ökologischen Sojaanbau die Konkurrenz mit Beikräutern ist, die optimal reguliert werden müssen, um ausreichende Erträge zu erzielen (FIBL, 2016; Hamilton et al., 2014).

3.1.2 Beikraut-Charakteristiken

Die im Projekt untersuchten Parameter zum Vorkommen von Beikräutern zeigten hohe negative Korrelationen mit dem Sojabohnenertrag, was darauf hindeutet, dass der Ertrag die Wirksamkeit der Beikrautregulierung widerspiegelt. So wurden bspw. signifikante Korrelationen zwischen Ertrag und Beikrautdeckung zur BLÜTE aufgezeigt, mit r = -0,94 (p = 0,002) für Sprinkange18, r = -0,97 (p = 0,000) für Hostert18, r = -0,86 (p = 0,012) für Manternach18, r = -0,94 (p = 0,005) für Sprinkange19 und, vorsichtig zu berücksichtigen, mit r = -0,74 (p =0,059) für Hosert19. Nach Vollmann et al. (2010)

führt in der Regel ein hoher Beikrautbesatz zu Ertragseinbußen, verminderter Ernteeffizienz, erhöhter Feuchtigkeit im Erntegut und beschädigtem oder krankem Erntegut, was in der Folge zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten führt.

3.1.2.1 Effizienz der Beikrautregulierung VOR und NACH

Die berechnete Effizienz der Beikrautregulierung (WCE) spiegelt den Beikrautbesatz VOR und NACH dem ersten Regulierungsdurchgang wider. Die höchste Reduzierung der Beikrautdeckung mit bis zu 82 % wurde mit der Hacke erreicht. Eine unzureichende Beikrautregulierung wurde mit dem Striegel erreicht mit bspw. weniger als 20 % Effizienz in Sprinkange18 und Hostert19 (s. Tabelle 8). Dies steht im Einklang mit Pannacci et al. (2018), die ebenfalls herausstellten, dass einfaches Hacken bei Beikraut am wirksamsten war, obwohl das Hacken keine effektive Beikrautregulierung in der Reihe ermöglichte. Sie beschrieben auch eine deutlich geringere Effizienz beim Striegeln, was auf die geringe Wirksamkeit gegen Gräser und größeres Beikraut zurückzuführen sei. Umgekehrt stellten Weber et al. (2016) keine signifikanten Unterschiede zwischen Hacken und Striegeln fest, beobachteten jedoch eine Tendenz zu unzureichender Beikrautregulierung mit dem Striegel, die sich unter anderem durch ein hohes Beikrautvorkommen erklären lässt. Der Erfolg bei der Beikrautregulierung hängt wiederum vom Beikrautdruck dem Standort ab (Weber et al., 2016).

*Tabelle 8: Mittlere Beikrautregulierungseffizienz (WCE) [%] basierend auf der Beikrautdeckung der verschiedenen Varianten der Versuchsstandorte in den beiden Versuchsjahren. Mittelwerte, auf die innerhalb jeder Spalte ein gemeinsamer Buchstabe folgt, unterscheiden sich nicht signifikant bei p≤0,05 gemäß Fisher-LSD-Test als post-hoc des Kruskal-Wallis-Test **.*

	WCE [%] der Deckung					
	Manternach		Sprinkange		Hostert	
Variante	**2018****	**2019****	**2018****	**2019****	**2018****	**2019****
t.1 neg	0,0 c	0,0 e	0,0 c	NA	0,0 c	0,0 d
t.2 pos	100,0 a	100,0 a	100,0 a		100,0 a	100,0 a
t.3 Striegel	83,3 ab	32,5 de	-		25,4 bc	15,0 d
t.4 Hacke	45,0 bc	70,8 b	70,6 b		43,4 b	77,0 ab
t.5 Hacke+	45,8 bc	69,3 bc	80,3 b		58,5 b	54,9 c
t.6 Kombi	71,2 ab	54,0 cd	80,7 b		55,3 b	57,4 bc
t.7 Mix	89,4 ab	28,7 de	17,9 c		23,9 bc	11,3 d

Standorte mit niedrigem Beikrautdruck, in dieser Studie Matnernach18, schienen mit ähnlicher Effizienz durch Hacke und Striegel bekämpft zu werden. Hier ist jede gewählte mechanische Option besser, als keine Beikrautregulierung durchzuführen. Auf Standorten, auf denen der Beikrautdruck bereits nach dem Auflaufen hoch war, war die Effizienz der Verfahren nicht zufriedenstellend. Dies wurde z. B. in Hostert18 beobachtet, wo der Striegel die Beikrautdeckung um nur 25 % reduzierte ($t.3_{Striegel}$), was statistisch gesehen mit keinerlei erfolgter Regulierung ($t.1_{neg}$) vergleichbar ist. Auch die Hacke reduzierte das Beikraut hier nur um 52 %. Das manuelle Beikrautjäten, das die höchste Effizienz bei der Beikrautregulierung zeigte, konnte aufgrund seiner geringen Rentabilität und Handhabbarkeit nicht als eine in der Praxis übliche Option angesehen werden. Der Einsatz von

Fingerhacken ergab generell keine Unterschiede hinsichtlich des Beikrautbekämpfungserfolges im Vergleich zum einfachen Einsatz der Hacke mit Gänsefußscharen nach dem ersten Regulierungsdurchgang. Dies war jedoch an einem Standort anders: Die Effizienz der Beikrautregulierung der Fingerhacke war in Sprinkange18 höher als mit dem einfachen Einsatz von Gänsefußscharen. Die Stärken der Gummifinger müssen entsprechend der Bodenverhältnisse gewählt werden (Hatzenbichler, 2015). Für das Projekt LeguTec wurden gelbe Fingerhacken für mittlere und harte Böden ausgewählt, während für weiche und sandige Böden auch orangefarbene Gummifinger zur Verfügung standen. Der fehlende Erfolg an den übrigen Standorten könnte durch die falsche Wahl der Aufsätze für diese Standorte oder, insbesondere bei Hostert18, durch hohen Beikrautdruck erklärt werden. Eine individuelle Anpassung durch jeden Landwirt auf jedem Feld unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse und der Pflanzenentwicklung ist unerlässlich, um die Fingerhacken erfolgreich einzusetzen und die Pflanzenschäden zu minimieren (Dierauer, 2017), erfordert aber wiederum viel Erfahrung.

3.1.2.2 Effizienz der Beikrautregulierung NACH und BLÜTE

Kurz vor der Blüte wurde die Beikrautregulierung beendet. Das Auftreten von Beikräutern in jeder Variante wurde mit den negativen Kontrollparzellen ($t.1_{neg}$) NACH und zur BLÜTE (WCI_{cover}) verglichen und ein Trend hinsichtlich der Regulierungseffizienz in Bezug auf die Anzahl der mechanischen Durchgänge hat sich aufgezeigt (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Beikrautreglierungsindex (WCI) zum Zeitpunkt der Blüte berechnet auf Basis der Beikrautdeckung (WCI_{cov}) und der Beikrautbiomasse (WCI_{bio})für jeweils die Standorte und Jahre. Grüne Markierungen zeigen die höchsten Effekte in der entsprechenden Variante im Vergleich zur Negativkontrolle ($t.1_{neg}$) an. Positive Werte in roter Markierung weisen auf schlechtere Effekte im Vergleich zu $t.1_{neg}$ hin. Es erfolgte nur eine deskriptive Statistik.

	Manternach				**Sprinkange**				**Hostert**			
	2018		**2019**		**2018**		**2019**		**2018**		**2019**	
	WCI_{cov} NACH	**WCI_{cov} BLÜTE**	**WCI_{cov} NACH**	**WCI_{cov} BLÜTE**	**WCI_{cov} NACH**	**WCI_{cov} BLÜTE**	**WCI_{bio} NACH**	**WCI_{cov} BLÜTE**	**WCI_{cov} NACH**	**WCI_{cov} BLÜTE**	**WCI_{cov} NACH**	**WCI_{cov} BLÜTE**
$t.1_{neg}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NA	0,00	0,00	0,00	0,00
$t.2_{pos}$	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00		-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
$t.3_{Striegel}$	-0,94	-0,77	-0,22	-0,53	0,54	0,44	-0,16		-0,05	-0,22	-0,22	-0,31
$t.4_{Hacke}$	-0,78	-0,94	-0,72	-0,42	-0,77	-0,55	-0,40		-0,54	-0,42	-0,74	-0,76
$t.5_{Hacke+}$	-0,81	-0,90	-0,66	-0,60	-0,81	-0,64	-0,15		-0,41	-0,42	-0,54	-0,81
$t.6_{Komb}$	-0,86	-0,80	-0,63	-0,78	-0,78	-0,64	-0,35		-0,69	-0,66	-0,70	-0,87
$t.7_{Mix}$	-0,94	-0,65	-0,10	0,30	0,62	0,76	-0,29		-0,02	-0,09	-0,33	-0,50

Erfolgte nur ein mechanischer Durchgang, nahm die Wirkung der Beikrautregulierung bis zur Blüte ab, was darauf hindeutet, dass sich neues Beikraut etabliert hatte. Die Pflanzen waren beim ersten Durchgang noch sehr klein und das Beikraut nutzte den Vorteil, dass zwischen den Reihen offene Flächen vorhanden waren, die ideale Bedingungen für die Entwicklung von neuem Beikraut boten, wie auch von Pousset (2016) beschrieben. Zweimaliges Striegeln steigerte den Erfolg der Beikrautregulierung im Vergleich zu $t.1_{neg}$ leicht, blieb aber im Vergleich zum einmaligen Hacken

immer noch geringer. Zweimaliges Hacken erhöhte den Erfolg tendenziell ebenfalls leicht. Aussagen zur Erfolgskontrolle durch Fingerhacken im zweiten Durchgang (mit vorherigem einmaligem Hacken) sind wiederum schwierig zu treffen, da die Standortbedingungen unterschiedliche Einflüsse auf den Erfolg zu haben schienen. Das Fingerhacken könnte nur einen geringen Einfluss haben, da keine Unterschiede im Beikrautvorkommen (Deckung, Biomasse und Dichte) in Kombination mit den Hackenbehandlungen zur Blütezeit ($t.4_{Hacke}$ und $t.5_{Hacke+}$) beobachtet wurden (s. Tabelle 10). Das Beikrautvorkommen zum Zeitpunkt der Blüte war nach dem Striegeln im Vergleich zum Hacken wieder höher. Diese Beobachtung steht im Einklang mit Kunz et al. (2015). Bei hohem Beikrautbefall wurden sogar keine Unterschiede des Striegels zu den unbehandelten Parzellen gefunden, was auf das Misslingen des Striegels bei hohem Beikrautdruck hinweist.

*Tabelle 10: Mittler Beikrautdeckung [%] zur BLÜTE der verschiedenen Methoden für die drei Versuchsorte und die beiden Versuchsjahre. Die Mittelwerte, gefolgt von einem gemeinsamen Buchstaben innerhalb jeder Spalte, unterscheiden sich bei p<0,05 nicht signifikant nach Tukey-HSD-Test, oder Fisher-LSD-Test und der ANOVA p≤0.1 (*); und bei p≤0,05 gemäß Fisher-LSD-Test als post-hoc für den Kruskal-Wallis-Test **.*

	Beikrautdeckung [%] BLÜTE					
	Manternach		**Sprinkange**		**Hostert**	
Variante	**2018***	**2019**	**2018**	**2019**	**2018****	**2019**
t.1 neg	21,7 d	16,7 ab	17,1 bc	50,8 c	74,6 d	30,0 c
t.2 pos	0,0 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a
t.3 Striegel	5,0 c	7,8 ab	24,6 cd	33,8 bc	58,3 cd	20,8 bc
t.4 Hacke	1,3 b	9,7 ab	7,7 ab	26,3 b	43,3 bc	7,3 ab
t.5 Hacke+	2,2 b	6,7 ab	6,2 ab	23,3 b	43,3 bc	5,7 ab
t.6 Kombi	4,4 c	3,8 ab	6,1 a	22,1 b	25,4 b	3,9 ab
t.7 Mix	7,6 c	21,6 b	30,0 d	42,5 bc	67,9 d	15,0 abc

3.1.3 Stressfaktoren für die Sojapflanzen

Bernet et al. (2016) beschreiben die Fähigkeit von Sojabohnen, die Beanspruchung durch Stress (Trockenheit, mechanischen und Umweltstress) während der vegetativen Wachstumsphase kompensieren zu können. Trockenstress erzeugt Veränderungen in der Wachstumsdynamik, wie bspw. in der Pflanzenhöhe (Board et al., 2016). Die Höhe des Sojabohnenbestands zum Zeitpunkt der Blüte wurde in dieser Studie gemessen und es wurden geringere Höhen in den Striegelvarianten im Vergleich zu den Hackvarianten beobachtet. Beispielhaft ist an dieser Stelle Manternach18 zu nennen, wo sich $t.5_{Hacke+}$ mit einer Bestandeshöhe von 51,0 cm signifikant von $t.3_{Striegel}$ mit 38,8 cm und $t.7_{Mix}$ mit 43,3 cm unterscheidet (Leimbrock-Rosch et al., 2020). Laut Board et al. (2017) hat Trockenstress während der vegetativen Phase negative Auswirkungen auf die Pflanzenhöhe, da die Pflanzenhöhe die Wurzeltiefe und damit das zukünftige Potenzial der Pflanze zur Wasserversorgung widerspiegelt. Da das Beikrautvorkommen in den Striegelvarianten höher war, war die Konkurrenz um Wasser ebenfalls höher. Wenn Pflanzen durch Umwelteinflüsse oder durch mechanische Behandlungen geschädigt wurden, müssen sie die Schäden zunächst kompensieren, indem sie Energie in die Bildung neuer Biomasse stecken, bevor sie mit dem vegetativen Wachstum fortfahren

(Bernet et al., 2016). Sojabohnen, die Stress durch mechanische Bearbeitungen ausgesetzt waren, wurden untersucht, wobei der Fokus auf den Pflanzenschäden lag. In dieser Studie zeigte sich, dass die Behandlungen mit dem Striegel mehr geschädigte Pflanzen enthielten als die mit der Hacke. Die Pflanzen wurden entweder leicht geschädigt und erholten sich mit Verzögerung oder wurden vollständig zerstört. Letzteres wurde hauptsächlich bei der Hacke beobachtet. Die Sojapflanzenverluste waren beim Striegeln mit mehr als 20 % Pflanzenverlusten und sogar 35 % Verlusten in Hostert18 am höchsten (s. Abbildung 23).

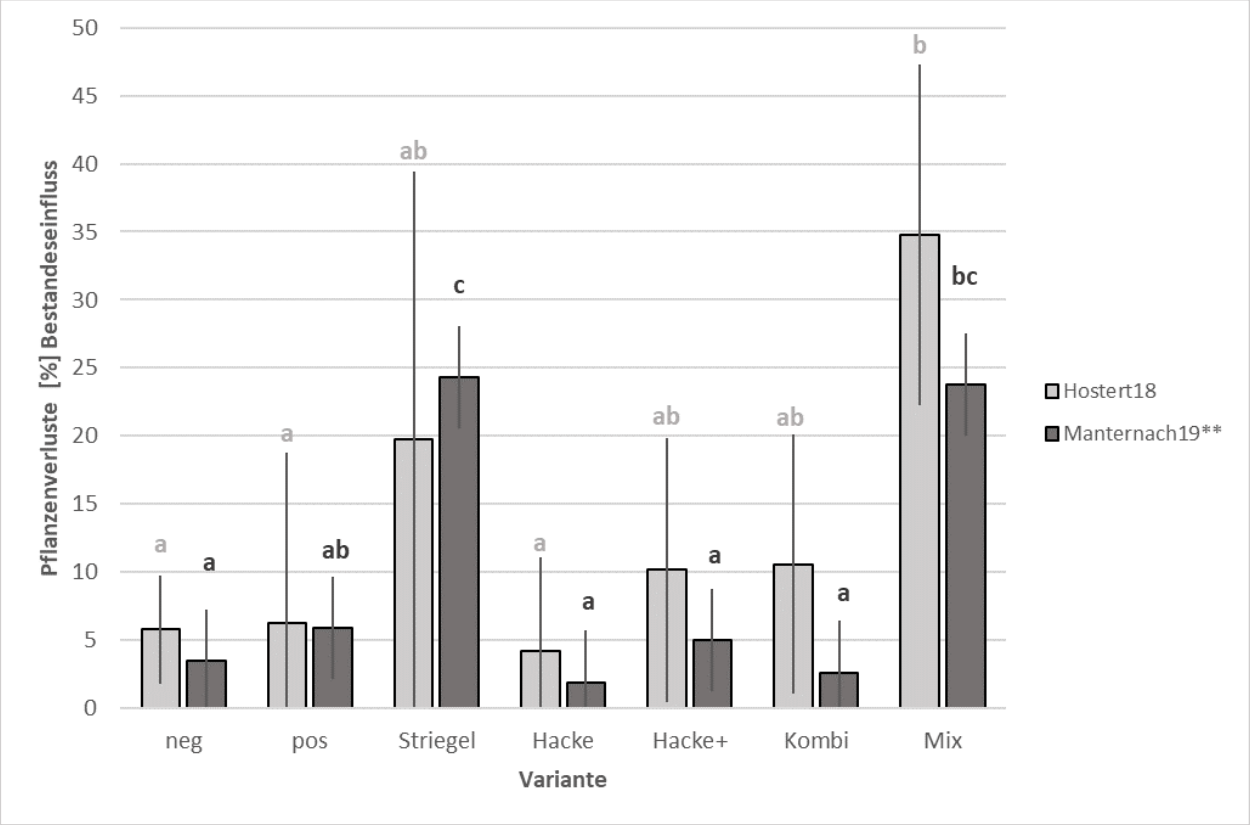


*Abbildung 23: Durchschnittliche Mittelwerte der Sojapflanzenverluste mit Bestandeseinfluss [%] und Standardabweichung der verschiedenen Varianten für die Versuchsstandorte Manternach19 und Hostert18. Gemeinsame Buchstaben zeigen keine signifikanten Unterschiede an bei p≤0,05 nach Tukey-Test und nach Fisher-Test als post-hoc für Kruskal-Wallis-Test **.*

Eine Studie von Jobst et al. (2012) zeigte Pflanzenverluste von durchschnittlich bis zu 20 % beim Striegeln, was sich gut mit den Beobachtungen in dieser Studie deckt. Pflanzenverluste fördern wiederum neuen Beikrautbefall innerhalb der neu entstandenen Kahlflächen, was auf das höhere Beikrautaufkommen zur Blütezeit innerhalb der Striegelvarianten und damit erhöhten Wasserstress hinweist. Das Hacken reduzierte die Anzahl der Sojapflanzen im Vergleich zum Handjäten ($t.2_{pos}$) nicht signifikant. Kunz et al. (2015) bestätigen die Schlussfolgerung, dass die Beikrautregulierung mit der Hacke eine bessere Selektivität aufweist als mit dem Striegel.

In Hostert19 wurde der Umweltstress durch ein Hagelereignis verursacht, das das Wachstum der Sojabohnen in BBCH 12 unterbrach. Die Beobachtungen in LeguTec stimmen mit Bernet et al. (2016) überein, die die Fähigkeit der Sojapflanzen beschrieben, Hagelschäden während der vegetativen Entwicklung ohne Ertragsnachteile, aber mit leicht verzögertem Wachstum beim Aufbau neuer

Biomasse zu kompensieren. Aufgrund der inhomogenen und letztlich verzögerten Abreife war eine Ernte in Hostert19 jedoch nicht möglich.

Mit dem Auftreten der ersten Blüten wird der Beginn des generativen Wachstums und der Zeitraum bestimmt, in dem die Pflanze am meisten Wasser benötigt (Bachteler, 2017). Board et al. (2017) beschrieben eine reduzierte Photosynthese aufgrund von Trockenstress zur Blütezeit. Die gemessenen Chlorophyllgehalte bestätigen, dass die Sojapflanzen in allen Varianten Trockenstress zur Blüte ausgesetzt waren. Niederschlagsmangel und Hitzewellen im Jahr 2019 wurden an allen Standorten beobachtet. Wasserstress zur Blütezeit führte zu einer Konkurrenz um Wasser zwischen Beikraut und der Sojabohne. In den Varianten mit hohem Beikrautbefall, hauptsächlich den Striegelparzellen in dieser Studie, war die Konkurrenz um Wasser höher, was zu erhöhtem Wasserstress für Sojabohnen führte. Zusätzlich ist die Konkurrenz um Nährstoffe auf Standorten mit höherem Beikrautvorkommen nach Pousset (2016) höher und somit auch in den Striegelparzellen in der vorliegenden Studie. In Verbindung mit der Tatsache, dass die Bestandshöhe in den gestriegelten Varianten niedriger war als in den gehackten, damit auch ein geringeres Wurzelwerk einhergeht, verschärft sich die Situation des Trockenstresses für die gestriegelten Varianten.

3.1.4 Ertragsparameter

3.1.4.1 Anzahl der Hülsen pro Pflanze

Die untersuchte Ertragsstruktur zeigte eine hohe positive Korrelation zwischen Hülsen pro Pflanze und Sojabohnenertrag der Ertragsstruktur ($Ertrag_{ES}$) mit Korrelationen von r = 0,90 (p = 0,014), r = 0,91 (p = 0,005) und r = 0,97 (p = 0,000) in Sprinkange19, Hostert18 und Hostert19. Während die Anzahl der Hülsen pro Pflanze innerhalb der Hülsenbildungsphase bestimmt wird, hatte das Wasserdefizit während dieser Phase, das an allen Standorten beobachtet wurde, hohe negative Einflüsse auf den Ertrag. Nach Board et al. (2017) ist der Ertragsverlust innerhalb dieser Periode doppelt so hoch wie in der folgenden Samenfüllungsperiode. Weitere Studien zeigten, dass die Hülsenbildungsphase die trockenheitsanfälligste Periode ist (Board et al., 2016). Unterschiede hinsichtlich einer höhere Hülsenanzahl bei Hackvarianten im Vergleich zu Striegelvarianten konnten aufgezeigt werden.

3.1.4.2 Hülsenansatzhöhe

Die Höhe der ersten Hülse ist entscheidend für die Ernte, um Schnittverluste bei der mechanischen Ernte zu vermeiden. Es ist notwendig, dass die erste Hülse einen großen Abstand zur Bodenoberfläche hat, um Sojabohnenertragsverluste zu minimieren, da die untersten Hülsen auf dem Feld verbleiben können, wenn das Schneidwerk diese nicht erreichen kann. Nach Tkachuk (2019) wird eine Mindest-Hülsenansatzhöhe von 12 cm, gemessen als Abstand vom Boden zum untersten hülsenführenden Knoten, empfohlen, um Stoppelverluste am Mähbalken zu vermeiden. Die Hülsenansatzhöhe ist abhängig von der genetischen Struktur der Sojabohnensorte, der Niederschlagsmenge und der Anbautechnologie (Sobko, 2019). Die Hülsenansatzhöhen waren 2019

niedriger als 2018, während 2019 bei allen mechanischen Varianten die Hülsenhöhe weniger als 11 cm betrug. Höhere Temperaturen und geringere Niederschläge während des vegetativen Wachstums in 2019 könnten für die limitierte Hülsenansatzhöhe verantwortlich gewesen sein. Im Jahr 2018 zeigten alle Hackenvarianten Höhen über 12 cm. Die Hülsenansatzhöhe hatte demnach auch einen Einfluss auf den höheren Ertrag in 2018 im Vergleich zu 2019.

Ein weiterer Faktor, der die Ansatzhöhe unter Striegeln beeinflusste, waren direkte mechanische Einwirkungen auf die Pflanzen. Die Nicht-Selektivität der einzelnen Zinken beim Einsatz eines Striegels führte zu einer S-Form der Pflanzen, die unmittelbar nach dem Striegeln beobachtet wurde. Daher wurde die Größe der Pflanze mechanisch reduziert, da die gesamte Pflanze gestaucht wurde. Im Allgemeinen neigte das Hacken dazu, die Hülsenansatzhöhe zu erhöhen, während der Striegel die Höhe der ersten Hülse zu verringern schien. Es konnte also gezeigt werden, dass die Anbautechnik in Form von mechanischen Beikrautregulierungen für die unterschiedlichen Hülsenansatzhöhen in dieser Studie verantwortlich war (mechanischer Einfluss). Dies wurde auch durch die gemessenen Bestandesshöhen bestätigt, die in den Striegelvarianten niedrigere Höhen als in den Hackvarianten aufwiesen.

3.1.4.3 Proteingehalt

Neben dem Ertrag ist vor allem der Proteingehalt entscheidend für die Wertigkeit der Sojabohne. Die Proteingehalte lagen in allen Varianten über dem Durchschnitt von 36 % für Sojabohnen, die in unserer geographischen Region angebaut werden (Bellof, 2014) und bewegten sich um die 40 %. Auch in Luxemburg wurden in den letzten Jahren in Sojabohnen-Feldversuchen ähnliche Proteingehalte beobachtet, die auf überdurchschnittliche Proteingehalte und qualitativ hochwertige Sojabohnen hinweisen (Zimmer et al., 2016a; Heidt, 2020, Keßler et al., 2019). Eine Ausnahme bildete in diesem Versuch der Standort Sprinkange18, der sich durch Proteingehalte von nur etwa 30 % auszeichnete. Dies lässt sich leicht durch die fehlende Inokulation bei der Nachsaat der Sojabohnen erklären. Die Stickstofffixierung spielt eine wichtige Rolle bei der Proteinbildung in Sojabohnen. Die Sojabohnen wurden vom Hersteller „Fix-Fertig“ vorgeimpft geliefert. Dennoch zeigen diese geringen Proteingehalte deutlich die unzureichende Wirkung der „Fix-Fertigen“ Vorimpfung. Gleiches fanden Zimmer et al. (2016c), die beobachteten, dass eine direkte Inokulation einen signifikanten Einfluss auf den Proteingehalt und den Proteinertrag hat. Recknagel et al. (2015) berichteten, dass das „Fix-Fertig“ vorgeimpfte Saatgut in den letzten Jahren in der Praxis immer wieder erhebliche Schwächen zeigte, vor allem unter ungünstigen Bedingungen wie langanhaltender Trockenheit, Nässe oder Kälte.

3.1.5 Resultierende Anbauempfehlungen

Unterschiede im Beikrautvorkommen, die aus unterschiedlichen mechanischen Bearbeitungen resultierten, beeinflussten den Trockenstress der Sojapflanzen. Wasserdefizit war schließlich der wichtigste ertragsbegrenzende Faktor in der vorliegenden Studie. Das ist auch der Grund, warum der

Zwischenfruchtanbau mit Leindotter in dieser Studie nicht erfolgreich getestet wurde. Mangelnder Regen nach der Aussaat von Leindotter führte zu schlechtem oder gar keinem Auflaufen.

Die in dieser Studie aufgezeigten Vorteile der mechanischen Beikrautregulierung mit der Hacke anstelle des Striegels gelten nur unter Berücksichtigung eines sachgerechten Feldmanagements. Wenn dieses Management nicht konsequent durchgeführt wird und der Beikrautbefall bereits nach dem Auflaufen hoch ist, kann auch die beste mechanische Beikrautregulierung nicht erfolgreich arbeiten und Ertragseinbußen sind garantiert. Ein den Standortbedingungen angepasstes Bodenmanagement und eine weite Fruchtfolge zur indirekten Beikrautregulierung im Vorfeld sind unerlässlich. Die aus dem Bodenmanagement resultierenden Unterschiede wurden v.a. in Hostert beobachtet, wo ein adäquates Management und eine kontinuierliche Betreuung durch IBLA-Berater zu einem verbesserten Sojaanbau in 2019 führten als in 2018 wo das Bodenmanagement nicht ideal war. Ein angemessenes Boden- und Fruchtfolgemanagement muss bereits im Herbst mit der Wahl des Standortes beginnen. Aus dem LeguTec-Projekt und früheren Versuchen (Heidt, 2018, 2019; Stoll et al., 2015; Wilbois, 2015; Zimmer et al., 2015; Zimmer et al., 2016a, c) wurden für Luxemburg folgende Vorschläge für den Sojabohnenanbau abgeleitet: Das Bodenmanagement sollte ein Pflügen im Herbst (oder im zeitigen Frühjahr), gefolgt von einer abfrierenden Zwischenfrucht zur Wasserspeicherung, Nährstofffixierung und Beikrautunterdrückung, eine rechtzeitige Bodenbearbeitung vor der Aussaat und das Anlegen eines falschen Saatbettes beinhalten. Eine Inokulation der Sojabohne unmittelbar vor der Aussaat ist unumgänglich, auch bei „Fix-Fertig“ vorgeimpftem Saatgut. Das Blindstriegeln wird in der Literatur (Bernet et al., 2016) als Vorlauf-Verfahren empfohlen, muss aber sorgfältig ausgewählt werden. In der vorliegenden Studie unterschieden sich die Behandlungen mit Blindstriegeln nicht in der Beikrautdeckung nach dem Auflaufen der Sojabohnen, so dass kein positiver Effekt des Blindstriegels abgeleitet werden konnte. Wenn der Standort jedoch nach dem Auflaufen unter Trockenheit leidet, kann das Blindstriegeln auch negative Auswirkungen haben, wie in Sprinkange18 beobachtet wurde, wo die Beikrautdeckung nach dem Auflaufen der Sojabohnen in den blindgestriegelten Parzellen höher war. Diese Effekte lassen sich dadurch erklären, dass die Stickstoffmobilisierung angeregt wird und Beikräuter aufgrund des schnelleren Wachstums im Vergleich zu Sojabohnen von der Stickstoffversorgung profitieren (Bernet et al., 2016). Mechanische Bearbeitungen müssen sorgfältig ausgewählt werden, wie auch in dieser Studie beim Einsatz der Fingerhacken festgestellt wurde. Es schien, dass weder Blindstriegeln noch Fingerhacken zu vorteilhaften Bedingungen und Sojaerträgen führten. Nicht nur bei der Wahl der Fingerhacke, sondern auch bei der Wahl der Einzelhacke mit Gänsefußscharen ist eine genaue Einstellung der Maschine sowie die richtige Wahl der Stärke der Fingerhacken notwendig. Eine erfahrene Person sollte die Maschinen fahren, um Pflanzenverluste zu vermeiden. Beim Einsatz eines Kamerasteuerungsgerätes an der Hacke ist besondere Vorsicht geboten. Besonders bei hohem Beikrautdruck kann es vorkommen, dass keine Unterscheidung zwischen Sojabohne und Beikraut möglich ist, wie auch in dieser Studie beobachtet wurde. Wenn der

Beikrautbefall gering ist und die Sojabohnen von der Kamera erkannt werden, kann dieses Gerät zum exakten Arbeiten hilfreich sein.

3.2 Einfluss auf die Beikrautdiversität

Eine Vielzahl an Parametern zur Beikrautdiversität wurden während der beiden Anbaujahre erhoben und berechnet (s. Kapitel 2.5), die ursprünglich nicht Teil des Projektrahmens waren. Diese wurden im Rahmen einer Masterarbeit und einer Veröffentlichung publiziert (Richard et al., 2020). Im Folgenden wird zur Veranschaulichung nur ein kleiner Auszug aus den Ergebnissen dargestellt.

3.2.1 Artenvorkommen

Insgesamt wurden während des Erhebungszeitraums, von VOR bis ERNTE, 59 Beikrautarten an allen Versuchsstandorten gezählt. Diese Gesamtzahl unterteilt sich in 40 ein- und zweijährige zweikeimblättrige (ABD) Beikrautarten, 13 mehrjährige zweikeimblättrige (PD) Beikrautarten und 6 einkeimblättrige (M) Beikrautarten. In Hostert18 wurden 33 Arten identifiziert, 37 in Hostert19, 26 in Manternach18, 34 in Manternach19, 32 in Sprinkange18 und 26 in Sprinkange19. Außerdem kamen 18 Arten an allen Standorten vor (s. Tabelle 11). An jedem Versuchsstandort waren diese Beikrautarten zu den Boniturzeitpunkten nicht alle gleichzeitig vorhanden. Einige wurden durch die mechanische Beikrautregulierung eliminiert, andere wuchsen nach oder in der Zeit zwischen den Regulierungsdurchgängen. Wie beispielhaft für Hostert19 in Abbildung 24 zu sehen ist, überwiegt die Anzahl der ein- und zweijährige Zweikeimblättrigen bei jeder Bewertung, jeweils für jeden Standort. Dennoch war die Anzahl der mehrjährige Zweikeimblättrige und Einkeimblättrigen in Manternach18, Manternach19, Sprinkange18 und Sprinkange19 höher als in Hostert18 und Hostert19.

Dies zeigt, dass die Vielfalt der Beikräuter standortspezifisch ist und dass die Vielfalt hauptsächlich durch die große Anzahl an wenig abundanten Arten erklärt wird, die nicht an jedem Standort vorkommen. Die Klassifizierung der Arten in ökologische Gruppen hat gängige Erkenntnisse dahingehend erbracht, dass ein- und zweijährige Zweikeimblättrigen Arten im Allgemeinen am häufigsten vorkommen, sowohl was die Arten als auch die Individuenzahl betrifft, im Vergleich zu mehrjährigen Zweikeimblättrigen und Einkeimblättrigen Beikrautarten (de la Fuente et al., 1999, Gabriel et al., 2006, Tyšer et al., 2008).

Tabelle 11: Liste der Beikrautarten je ökologischer Gruppe und Artengesamtzahl der Standorte und Jahre, die während der Soja-Vegetationsperiode identifiziert wurden. Arten in Fett kommen gemeinsam vor. Arten der Roten Liste der Gefäßpflanzen Luxemburgs (Colling, 2005) sind in Klammern dargestellt, NT: nahezu bedroht, R: extrem selten, VU: gefährdet.

Beikrautarten botanische Name	Hostert		Manternach		Sprinkange	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
ein- und zweijährige Zweikeimblättrige	**23**	**27**	**17**	**26**	**21**	**19**
Amaranthus blitum						✓
Amaranthus retroflexus				✓		
Anagallis arvensis	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anchusa officinalis		✓				
Atriplex L.						✓
Brassicaceae					✓	
Camelina sativa	✓		✓	✓		
Campanula rapunculus		✓				
Capsella bursa-pastoris	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Centaurea cyanus (VU)	✓	✓				
Chenopodium album	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Euphorbia cyparissias	✓	✓		✓		
Fagopyrum esculentum	✓					
Fumaria officinalis	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Galeopsis tetrahit	✓	✓				
Galium aparine					✓	✓
Geranium dissectum		✓				
Geranium rotundifolium (R)		✓		✓		
Glycine max	✓	✓	✓	✓		
Lactuca serriola					✓	✓
Lamium amplexicaule	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lapana communis		✓				
Myosotis arvensis	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Papaver rhoeas (NT)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Persicaria lapathifolia	✓			✓	✓	✓
Phacilia tanacetefolia				✓		
Polygonum aviculare	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Raphanus raphanistrum				✓		
Senecio Vulgaris				✓		
Sinapis arvensis	✓	✓		✓	✓	✓
Solanum nigrum				✓		
Stellaria media	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Thlaspi arvense	✓	✓	✓		✓	
Trifolium Spec.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tripleurospermum inodorum	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Unidentified	✓	✓	✓	✓	✓	
Valerianella locusta		✓				
Veronica agrestis	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vicia Spec.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Viola arvensis		✓		✓	✓	
mehrjärige Zweikeimblättrige	**7**	**8**	**5**	**6**	**9**	**6**
Allium spec.	✓					
Calystegia sepium					✓	
Cirsium arvense	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cirsum oleraceum					✓	
Equisetum arvense	✓					
Galium verum					✓	
Plantago major	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Polygonum convolvulus	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ranunculus repens		✓	✓	✓	✓	✓
Rumex obtusifolius	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sonchus arvensis		✓		✓		✓
Taraxacum sect. Ruderalia	✓	✓			✓	
Urtica dioica		✓				
Einkeimblättrige	**3**	**2**	**4**	**2**	**2**	**1**
Avena sativa					✓	
Elymus repens	✓	✓	✓			
Lolium perenne				✓		
Phleum pratense	✓		✓			
Poa annua			✓			
Poaceae	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Summe	**33**	**37**	**26**	**34**	**32**	**26**

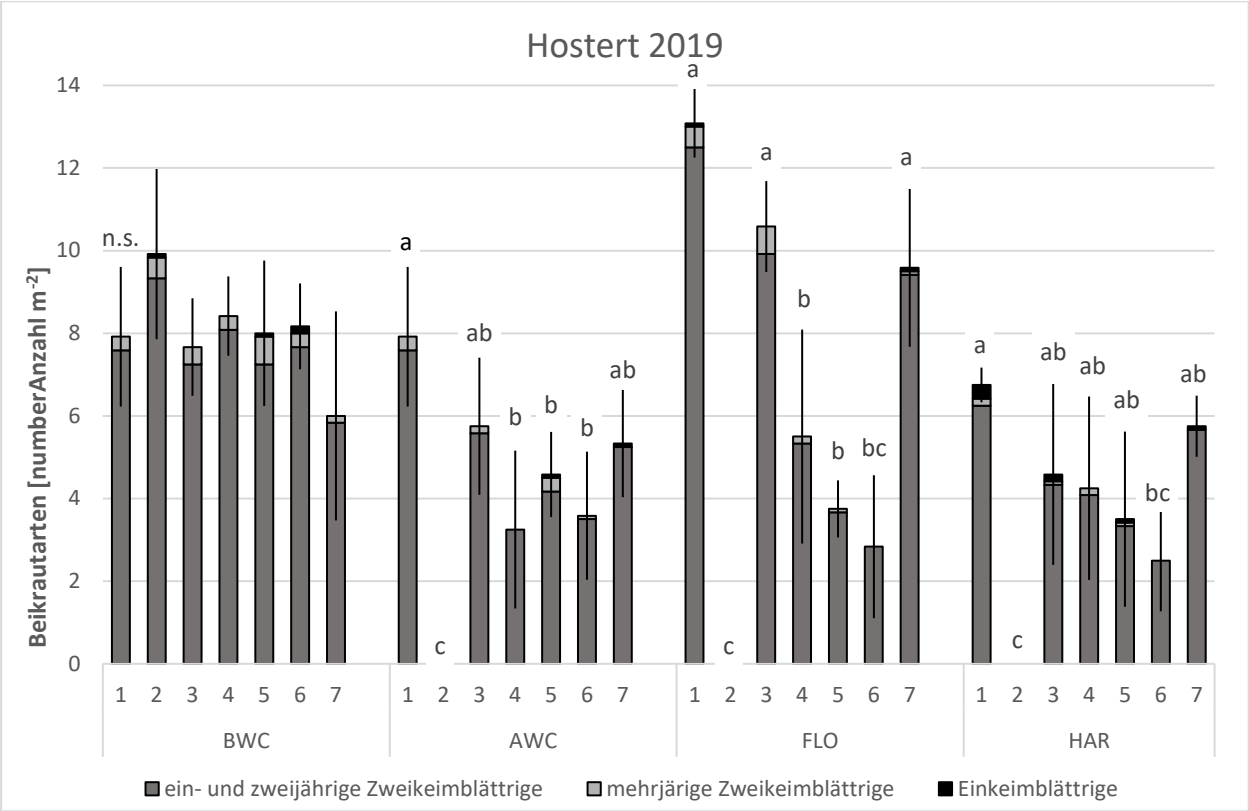


Abbildung 24: Durchschnittswerte der Anzahl von Beikrautarten innerhalb jeder ökologischen Gruppe (ein- und zweijährige Zweikeimblättrige, mehrjährige Zweikeimblättrige, Einkeimblättrige) für jede Variante t.1$_{neg}$ (1), t.2$_{pos}$ (2), t.3$_{Striegel}$ (3), t.4$_{Hacke}$ (4), t.5$_{Hacke+}$ (5), t.6$_{Kombi}$ (6) und t.7$_{Mix}$ (7), für VOR (BWC), NACH (AWC), BLÜTE (FLO) und ERNTE (HAR), für Hostert19. Balken zeigen die Standardabweichung der Gesamtzahl der Beikrautarten für jede Variante an. Unterschiedliche Buchstaben am oberen Rand der Balken zeigen signifikante Abweichungen zwischen den Varianten bei p≤0,05 an.

3.2.2 Einfluss der Beikrautregulierung auf die Artenvielfalt

Die Abundanz von Beikräutern und Arten wurden unterschiedlich reduziert, je nach verwendeter mechanischen Beikrautregulierungsmethode und dessen Effizienz. Das Hacken allein oder in Kombination mit dem Blindstriegeln und/oder der Fingerhacke reduzierte die Beikrautvielfalt im Allgemeinen am stärksten im Vergleich zur Leistung des Striegels VOR und NACH der ersten Regulierung. Im Versuch lag die durch den Shannon-Index angezeigte Beikrautdiversität bei gehackten Varianten oft nahe der positiven Kontrolle (t.2$_{pos}$), während sie bei gestriegelten Varianten näher an der negativen Kontrolle (t.1$_{neg}$) lag. Variationen in der Zusammensetzung der Beikrautgemeinschaften zwischen gehackten und gestriegelten Varianten waren zu beobachten, insbesondere nach der Durchführung von zwei Durchgängen der jeweiligen mechanischen Beikrautregulierung. Während die ein- und zweijährige Zweikeimblättrigen Arten tendenziell stärker von der mechanischen Beikrautregulierung betroffen waren, zumindest für den Zeitpunkt NACH, wurden die Anteile von ein- und zweijährigen Zweikeimblättrigen stärker reduziert als die von mehrjährig Zweikeimblättrigen und Einkeimblättrigen. Einerseits kann sich die Abundanz der ökologischen Gruppen unterscheiden: am Beispiel von Sprinkange18 waren einkeimblättrige Beikräuter in den Hackenvarianten häufiger, während in den Varianten mit dem Striegel mehrjährige Zweikeimblättrige Beikräuter dominierten. Nach Bond et al. (2001) spiegeln die Variationen der dominierenden ökologischen Gruppen oder Arten das unterschiedliche Wirkungsspektrum von

Hacke und Striegel gut wider. Andererseits wechselten die häufigsten Arten zwischen Hacken und Striegeln, so dass z.B. in Hostert19 *Fumaria officinalis*, *Lamium amplexicaule* und *Vicia spec.* zur Blütezeit in den gehackten Parzellen dominierten, während *Capsella bursa-pastoris* und *Tripleurospermum inodorum* in den gestriegelten Parzellen häufiger vorkamen. Bestimmte Lebensgemeinschaften werden daher durch unterschiedliche mechanische Beikrautregulierungsmethoden erhalten (Marshall et al., 2003) und können auf verschiedene Faktoren wie das Wachstumsstadium der Sojabohne und der Beikräuter, den ursprünglichen Beikrautdruck (niedrig oder hoch), den Bodentyp und die Bodenstruktur, die Maschineneinstellungen, die Vorgeschichte der Feldbewirtschaftung und das Wetter zurückgeführt werden (Bond etal., 2001, de la Fuente, 1999, Gunsolus et al., 1990, Henckel et al., 2015, Weber, 2016).

3.2.3 Problematische Beikrautarten und gefährdete Arten

Tatsächlich haben die Ergebnisse in LeguTec gezeigt, dass zwei bis vier Arten, z. B. *Lamium amplexicaule*, *Veronica agrestis* und später *Polygonum convolvulus* in Manternach19 zu jedem Boniturzeitpunkt dominant waren und dass oft die zu Beginn des Versuchs dominanteste Art bis zum Ende dominant blieb, mit Ausnahme von Sonderfällen, in denen spät aufkommende oder mehrjährige Arten wuchsen (*Chenopodium album*, *Polygonum convolvulus*). Es wurde festgestellt, dass die am häufigsten vorkommenden Arten in den meisten Fällen an den einzelnen Standorten unterschiedlich waren. Guay (2012) erwähnte, dass, wenn eine Gemeinschaft vielfältig ist, es wahrscheinlicher ist, dass Arten mit geringer Abundanz eliminiert werden, während Arten mit einer hohen Anzahl von Individuen eine geringere Chance haben, vollständig entfernt zu werden. Dies erklärt, warum die Anzahl der ein- und zweijährigen Arten insgesamt stärker reduziert wurde als bei anderen ökologischen Gruppen. Allerdings blieben ein- und zweijährige Zweikeimblättrige Arten die meiste Zeit über die häufigsten Beikräuter in Bezug auf die Individuenzahl. Mehrjährige zweikeimblättrige und einkeimblättrige Beikräuter waren nicht oft die am häufigsten vorkommenden Arten, was aber nicht bedeutet, dass sie keinen Einfluss auf die Kultur haben. Die auf den Standorten vorgefundenen Arten wie *Cirsium arvense*, *Elymus repens*, *Polygonom convolvulus* oder *Rumex obtisifolius* sind Pflanzen, die in geringer Dichte vorhanden sind, aber viel Biomasse entwickeln oder den Boden stark bedecken können und gegenüber der Kulturpflanze konkurrenzfähig sind.

Sechs der zur BLÜTE und zur ERNTE der Sojabohne am häufigsten vorkommenden Arten, die nach der Beikrautregulierung verbleiben, wurden als am schädlichsten für die Kultur (direkte Konkurrenz) oder als problematisch bei der Ernte (indirekte Schädlichkeit) eingestuft: *Chenopodium album*, *Elymus repens*, *Persicaria lapathifolia*, *Polygonum convolvulus*, *Tripleurospermum inodorum* und *Vicia spec.*. Im Allgemeinen scheinen falsches Saatbett und der Hackeinsatz diese problematischen Beikrautarten besser zu kontrollieren als der Striegel.

Die mechanische Beikrautregulierung wirkt sich negativ auf die Beikrautdiversität aus, indem sie die Individuenzahl und die Artenzahl bis zum letzten durchgeführten Durchgang senkt. Dennoch werden nie alle Beikräuter vollständig eliminiert, was einigen Arten erlaubt, sich weiter zu entwickeln und ihren Lebenszyklus zu verfolgen. Die Effizienz der Beikrautregulierung ist einer der Parameter, der erklärt, warum Beikräuter im ökologischen Landbau insgesamt stärker vorhanden und vielfältiger sind als in der konventionellen Landwirtschaft (Lutman et al., 2009). Obwohl Rydberg et al. (2000) und Marshall et al. (2003) betonten, dass es im ökologischen Landbau generell weniger nitrophile Beikrautarten gibt als im konventionellen Landbau und dass sie möglicherweise weniger konkurrenzfähig gegenüber der Kulturpflanze sind, sollten Beikräuter in einem kontrollierten Maß erhalten werden, das einen Kompromiss zwischen den ökologischen Leistungen darstellt, die sie erbringen, und der Konkurrenz, die sie für die Kulturpflanze verursachen (Chauvel et al., 2018. Henckel et al., 2015). Eine geringere Intensität der Beikrautregulierung führt oft zu einer Zunahme der problematischsten Beikräuter (Marshall et al., 2003). Umgekehrt stellten Marshall et al. (2003) fest, dass Beikräuter eine Vielfalt und Ökosystemfunktionen bieten und viele Arten unterstützen, so dass die Beseitigung von Beikräutern verschiedene natürliche Prozesse negativ beeinflusst, z. B. Nährstoffkreisläufe, Bodenprozesse und trophische Interaktionen.

Das Vorkommen von drei Beikrautarten in LeguTec, die auf der Roten Liste der Gefäßpflanzen in Luxemburg registriert sind (Colling, 2005), stärkt die Rolle der Erhaltung der Vielfalt im ökologischen Landbau. *Centaurea cyanus* (gefährdet) wurde in Hostert18 und in Hostert19 nachgewiesen, *Geranium rotundifolium* (extrem selten) wurde in Hostert19 und in Manternach19 gefunden und *Papaver rhoeas* (nahezu gefährdet) wuchs auf allen Versuchsstandorten. Seltene Beikrautarten sind in der Regel auf ökologischen Flächen häufiger anzutreffen als auf konventionell bewirtschafteten Flächen (Gabriel et al., 2006, Romero et al., 2007, Rydberg et al., 2000). Rotches-Ribalta et al. (2015) gaben an, dass das Vorkommen seltener Arten auf Feldern, die lange Zeit ökologisch bewirtschaftet werden, und in Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil an Wintergetreide oft höher ist und hauptsächlich auf die geringe Düngung und die große Vielfalt an Samen zurückzuführen ist, die in dem Boden verbleiben. Dennoch treten seltene Beikrautarten oft mit geringer Häufigkeit auf (Hyrvönen et al., 2002) und sind anfälliger für den Klimawandel, der unspezifische Beikräuter und invasive Arten begünstigt (Schumacher et al., 2018).

3.3 Fernerkundungstechniken und Geodatenanalysen

In Bezug auf Fernerkundungstechniken und Geodatenanalysen ist eine qualitativ hochwertige Datenerfassung grundlegend für die Vegetationsanalyse. Die Wahl des Erfassungszeitpunktes ist immer ein Kompromiss zwischen dem optimalen Zeitpunkt in Bezug auf die Phänologie und die meteorologischen Bedingungen. In dieser Studie wurde eine qualitativ hochwertige Datenerfassung zur höchsten Priorität erklärt. Nicht optimale Beleuchtungsbedingungen durch Dunst, Bewölkung oder auch Niederschlag haben einen erheblichen Einfluss auf die Bildradiometrie, der nicht durch eine atmosphärische Korrektur behoben werden kann. Inhomogenitäten in der Radiometrie würden

den Versuchsaufbau mit weiteren Unsicherheiten belasten. Daraus folgt, dass, falls zutreffend, perfekte meteorologische Bedingungen für den Zeitpunkt der Datenerfassung vorrangig waren.

Die Unsicherheiten im Versuchsaufbau haben erhebliche Auswirkungen auf das Ergebnis der Datenanalyse. Insbesondere bei der Kombination von Datensätzen aus unterschiedlichen Quellen schränken Unsicherheiten oft das Potenzial der Ergebnisse ein. In dieser Studie wurden drei Hauptquellen für Unsicherheiten identifiziert: Die erste Unsicherheitsquelle war eine nicht-synchrone Datenerfassung in einem dynamischen Experiment. Während die UAV-Datenerfassung als zeitliche Momentaufnahme verstanden werden kann, ist die In-situ-Datenerfassung, die Bonituren vor Ort, eine sehr zeitintensive Aufgabe. Einerseits ist die In-situ-Datenerfassung zeitlich durch die Phänologie der Pflanzen bestimmt, zeitaufwändig und nicht sehr empfindlich gegenüber meteorologischen Bedingungen. Da andererseits die UAV-Datenerfassung zeitlich auf die meteorologischen Bedingungen abgestimmt ist, besteht die Möglichkeit, dass die beiden Datensätze zeitlich bis zu 10 Tage voneinander entfernt sind. Als zweite Unsicherheitsquelle wurde die Tatsache identifiziert, dass die subjektive In-situ-Datenerfassung den Daten weitere Unschärfen hinzufügt und die mögliche Analyse auf qualitative Erkenntnisse reduziert. Und schließlich fügen Inhomogenitäten im Versuchsaufbau, die bei der Datenanalyse nicht berücksichtigt werden, den Daten Unsicherheiten und Unschärfen hinzu. In dieser Studie beziehen sich die wichtigsten Inhomogenitäten auf das Gelände (Neigung, Streckung und Krümmung), Bodeninhomogenitäten (Ton, Gestein) und die Aussaat (Verstopfung, Beschleunigung und Geschwindigkeit). Die Unterschiede im Gelände und in der Neigung können unterschiedliche meteorologische Bedingungen wie Windexposition, Oberflächenabfluss und Sonneneinstrahlung verursachen. Inhomogenitäten im Boden können mit der Bodenverdichtung, Unterschieden im Bodenskelett und der Korngrößenverteilung zusammenhängen. Diese Parameter haben einen direkten Einfluss auf die Entwicklung der Wurzeln und die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen und somit auch einen direkten Einfluss auf die zeitliche und absolute Entwicklung der Pflanzen. Während bei der Erhebung von In-situ-Daten offensichtliche Inhomogenitäten kompensiert werden können, ist dies bei Fernerkundungsdaten, die bis auf Parzellenebene aggregieren, nicht der Fall. Daher bleibt in dieser Studie die In-situ-Datenerhebung die zuverlässigere Methode.

Die Verwendung von Vegetationsindizes ist ein gängiger Ansatz zur Phänotypisierung, insbesondere für Parameter wie Biomasse und photosynthetische Aktivität. Dabei ist die Wahl eines gut geeigneten Vegetationsindexes je nach dem zu überwachenden Parameter zwingend erforderlich. In dieser Studie wurde eine Vielzahl von Breitband-Indizes getestet, die mit kommerziellen Sensoren erfasst werden können. Kritischer Punkt ist die Sättigung der Indizes bei hoher Vegetationsdichte oder hohen Biomassewerten. Dies führt dazu, dass sich die Eignung von Vegetationsindizes zwischen frühen und späteren phänologischen Entwicklungsstadien ändert.

Die Bildklassifizierung ist ein sehr wichtiger Schritt in der Datenverarbeitung. Die Unterscheidung zwischen Kulturpflanze und Beikraut ist für die weitere Analyse zwingend erforderlich. Im Rahmen des LeguTec-Projekts wurden drei verschiedene Klassifikatoren eingesetzt und getestet. Kurzfristig zeigte sich, dass eine Unterscheidung zwischen Beikraut und Kulturpflanzen nur dann mit zufriedenstellenden Ergebnissen möglich ist, wenn Beikraut phänologische Merkmale wie Blüten aufweist. Zur Unterscheidung von Boden und Vegetation liefern einfache Ansätze wie das Vegetationsindex-Schwellenwertverfahren hervorragende Ergebnisse. Für die Klassifizierung von Pflanzen und Beikraut wurden Support Vector Machines und Random Forest Modelle eingesetzt. Während die Boden-Vegetations-Diskriminierung exzellente Ergebnisse liefert (s. Abbildung 25), ist die Beikrautklassifizierung nicht konsistent und schneidet nur bei der Blüte bestimmter Beikrautarten ausreichend ab. Hier würde eine Erhöhung der geometrischen Auflösung sowie eine Erhöhung der spektralen Auflösung die Ergebnisse der Bildklassifikation verbessern, aber auch die praktische Anwendbarkeit zurückdrängen, da die Datenerfassung sehr zeitintensiv werden würde und sehr anspruchsvolle Sensoren erfordern würde. Einmal mehr wurde bestätigt, dass die In-situ-Erkennung, die Erhebung vor Ort, nach wie vor die bewährte Methode für landwirtschaftliche Feldversuche ist.

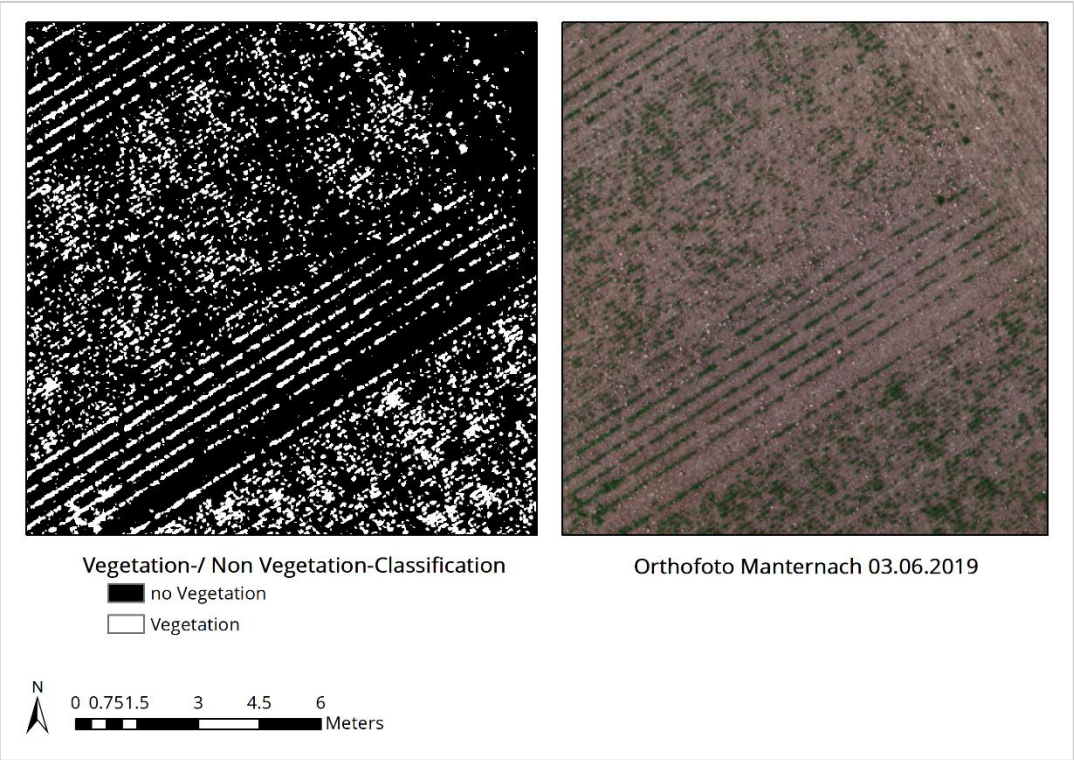


Abbildung 25: Vegetationsklassifizierung des Standortes: Manternach am 03.06.2019.

Die Zeitreihenanalyse ist die häufigste Art der Anwendung von Fernerkundungsdaten bei der Überwachung der Vegetation. Die zeitliche Dimension der Phänologie setzt bedeutende Mengen an Informationen frei, die nicht aus einem einzigen Datensatz abgeleitet werden können. Im großen Maßstab liefern Satelliten wie Sentinel 2 oder Modis Daten mit hoher zeitlicher Auflösung, sind aber

für die Phänotypisierung nur bedingt geeignet. Hier, bei einem kleinräumigen Versuchsaufbau, haben UAVs viele Vorteile, aber auch den Nachteil, dass die Datenerfassung im Vergleich zu Satellitendaten arbeitsintensiv und teuer ist. Es wurde gezeigt, dass Phänologie-Parameter wie photosynthetische Aktivität, Kronendachbedeckung im Allgemeinen aus UAV-Daten abgeleitet werden können und dass Zeitreihen dieser Parameter dem erwarteten Verlauf folgen (s. Abbildung 26).

Allerdings waren die Unterschiede zu gering, um die verschiedenen Varianten anhand von Bildzeitreihen unterscheiden zu können.

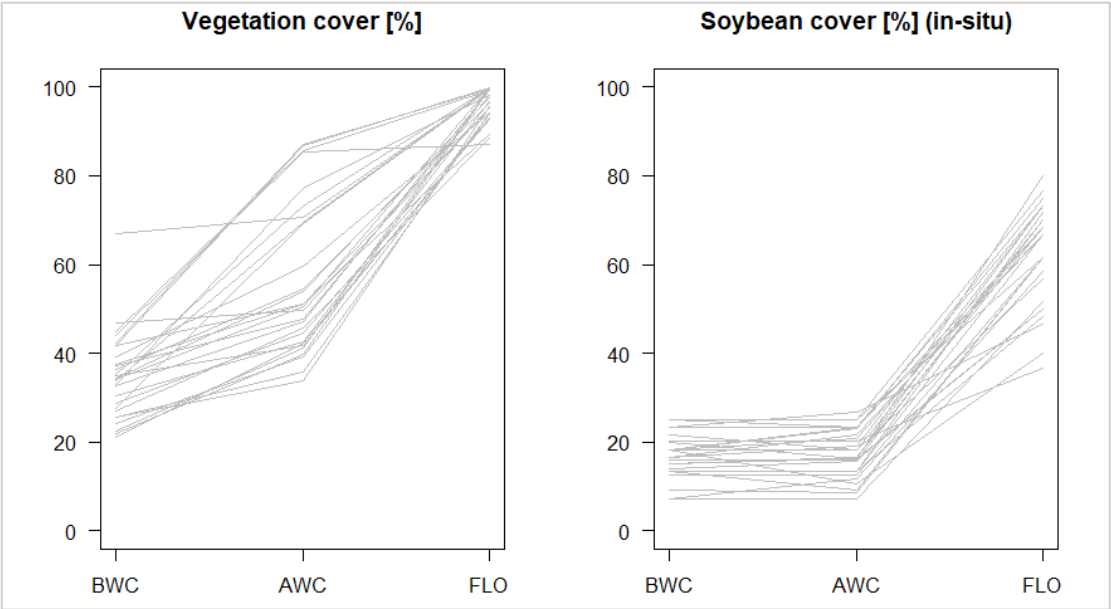


Abbildung 26: Vegetationsbedeckung in Manternach19. Links: bildbasiert, rechts: In-situ-Erhebung. (BWC=VOR, AWC=NACH, FLO=BLÜTE).

3.4 Wissenstransfer

Ein essentieller Bestandteil des Projektes LeguTec lag in der Vermittlung und dem Transfer der Ergebnisse in die Praxis zu den Landwirten und der interessierten Öffentlichkeit in Luxemburg und der Großregion einerseits, und in die Wissenschaft andererseits. Der Austausch mit Experten auf dem Gebiet des Sojaanbaus und die Vernetzung spielen eine wichtige Rolle, um das Ziel der Optimierung und Steigerung der Proteinproduktion in Luxemburg zu erreichen. Der folgende Überblick über die in den Projektjahren durchgeführten Aktivitäten verdeutlicht das große Interesse der Öffentlichkeit am regionalen Sojaanbau. Detaillierte Informationen zu Berichterstattungen in öffentlichen Medien und Aktivitäten sind auch dem offiziellen englischen Abschlussbericht zu entnehmen.

3.4.1 On-Farm-Versuch in Bettendorf

Die agronomischen Ergebnisse des Exaktversuches wurden in den On-Farm-Feldversuchen in Bettendorf bestätigt. Die höchsten Erträge wurden in den mechanisch bearbeiteten Parzellen mit der Kombination von Striegel und Hacken mit Fingerhackenapplikation in Höhe von 27,4 dt ha^{-1} sowie in

der chemisch behandelten Parzelle mit 37,5 cm Reihenabstand in Höhe von 29,1 dt h^{-1} erreicht. Der geringste Ertrag wurde auf der chemisch behandelten Parzelle mit einem Reihenabstand von 12,5 cm in Höhe von 24,1 dt ha^{-1} und auf der mechanisch behandelten Parzelle mit zwei Einzelhackgängen in Höhe von 21,5 dt ha^{-1} ermittelt. Im Jahr 2019 wurde ein Gesamtertrag von 25,0 dt ha^{-1} erzielt (s. Abbildung 27). Sehr gute Boden- und Standortbedingungen, die ideale Voraussetzungen für den Sojaanbau bieten, ermöglichen die höheren Erträge des On-Farm-Versuches im Vergleich zum Exaktversuch.

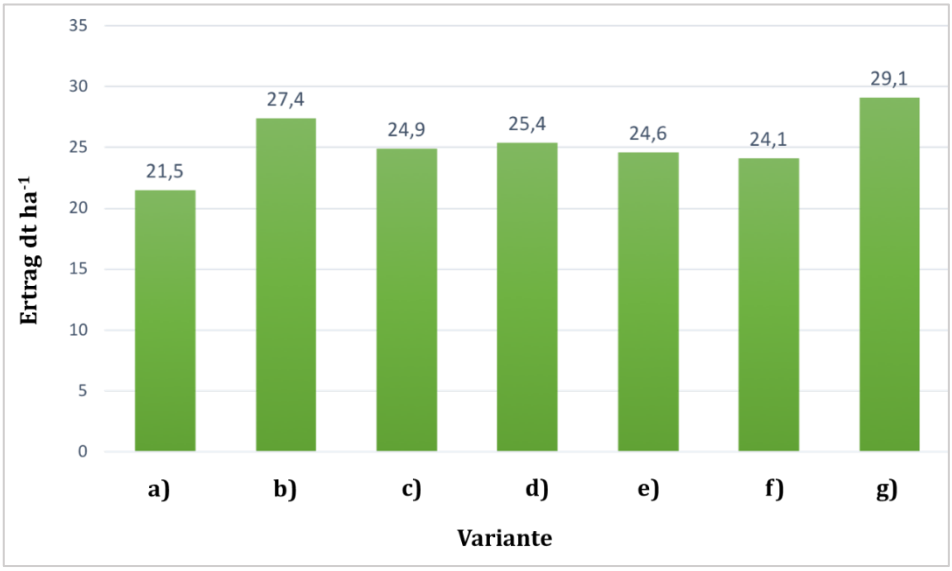


Abbildung 27: Sojabohnenertrag [dt ha^{-1}] im Jahr 2018 des On-fram Versuches in Bettendorf der sieben Varianten: a) zwei Hackdurchgänge, b) ein Durchgang mit Striegel und Hacke mit Fingerhacken, c) ein Durchgang mit Striegel und Hacke, d) ein Striegeldurchgang, e) ein Hackdurchgang und ein weitere mit Hacke und Fingerhacke, und f) chemische Beikrautbekämpfung im Reihenabstand von 12,5 cm und g) chemische Beikrautbekämpfung im Reihenabstand von 37,5 cm.

Während der Vegetationsperiode wurde das Vorkommen der folgenden Beikrautarten von den Schülerinnen und Schülern bestimmt: *Galium aparine*, *Polygonum aviculare*, *Lamium amplexicaule*, *Veronica agrestis*, *Viola arvensis*, *Polygonum convolvulus*, *Rumex obtusifolius* und verschiedene Grasarten. *Chenopodium album* kam hauptsächlich in sehr hoher Dichte innerhalb der chemisch behandelten Parzellen vor.

Das praktische Einbinden der Schüler in den Sojaanbau und die eigens gewonnen Erfahrungen in den beiden Anbaujahren, machten einen direkten Wissenstransfer zu den Schülern möglich. Durch das Einbinden der Schüler in die Präsentation des Projektes bei Veranstaltungen, wurde eine aktive Teilnahme und eine intensive Auseinandersetzung mit dem Sojaanbau gefördert.

3.4.2 Ausblick zum Sojaanbau in Luxemburg

Die Erträge der On-Farm-Feldversuche, die bis zu 27 dt ha^{-1} erreichten, waren höher als in dem Exaktversuch. Die Möglichkeit, hohe Erträge zu erzielen und die Informationen, die bei den Feldbesuchen und Veranstaltungen während der Projektjahre vermittelt wurden, führten zu einem gesteigerten Interesse der Landwirte am Sojaanbau. Einige Bio-Landwirte begannen 2019 in Zusammenarbeit mit Bio Ovo S.A. und dem Beratungsdienst von IBLA erfolgreich mit dem Anbau von

Sojabohnen. Dieses Projekt wurde dann auch 2020 im Rahmen des Aktionsplanes biologische Landwirtschaft zum Teil vom Landwirtschaftsministerium mitunterstützt. Es hat sich bestätigt, dass ein kontinuierliches Beratungsangebot für Landwirte notwendig ist, um Sojabohnen erfolgreich anzubauen. Der Sojaanbau in Luxemburg steht noch vor der Herausforderung, dass weitere Verarbeitungsschritte wie Trocknen, Reinigen und Toasten fehlen, die umgesetzt werden müssen, um größere Mengen verarbeiten zu können und um Preisanpassungen an die höheren Produktionskosten anzuzeigen. Der durchschnittliche Marktpreis für Bio-Sojabohnen lag zwischen 2015 und 2019 bei 82,52 € dt^{-1} (inkl. 10 % TVA), während der durchschnittliche Marktpreis für konventionelle Sojabohnen bei 38,42 € dt^{-1} (inkl. 10 % TVA) lag (Lfl, 2020). Die Marktpreise allein reichen nicht aus, um die wirtschaftliche Rentabilität des lokalen Sojaanbaus zu bewerten. Eine detaillierte wirtschaftliche Bewertung steht noch aus und war nicht Teil des LeguTec-Projekts, wird aber für den luxemburgischen On-Farm-Sojaanbau in einer aktuellen Masterarbeit an der Universität Hohenheim in Zusammenarbeit mit dem IBLA durchgeführt.

3.4.3 Kommunikation nach außen und Veröffentlichungen

Die in beiden Versuchsjahren organisierten Offiziellen Feldbegehungen auf dem Standort Manternach in 2018 und Hostert in 2019 riefen ein großes öffentliches Interesse hervor. Mehr als 200 Besuchern, darunter auch Ihre Königliche Hoheit die Erbgroßherzogin, sowie der Minister für Landwirtschaft Herr Fernand Etgen, der Präsident der Oeuvre Nationale de Secours Grande-Duchesse Charlotte Herr Pierre Bley, sowie eine Vielzahl an Landwirten und weiteren Interessierten nahmen im Jahre 2018 teil (s. Abbildung 28). Mehr als 100 Landwirte und Interessierte informierten sich in 2019 über die Fortschritte des Projektes, wobei die im Versuch eingesetzten Maschinen demonstriert wurden und eine Vorführung mit der Drohne stattgefunden hat (Abbildung 29). Das rege Interesse wurde durch eine Vielzahl an Artikeln in regionalen Zeitschriften (Allianz, Alcovit), Radiobeiträgen (u.a. RTL und radio100,7) und ein TV- Beitrag auf RTL bestätigen (Leimbrock-Rosch et al., 2020).

Abbildung 28: Offizielle Feldbegehung auf dem Versuchsstandort Bio-Betrieb Mehlen in Manternach 2018.

Abbildung 29: Offizielle Feldbegehung auf dem Versuchsstandort Bio-Betrieb Francois in Hostert 2019.

Weiterhin stand das Projekt auf dem IBLA-Stand der *Foire Agricole Ettelbrück 2018* im Mittelpunkt und wurde auf der « Semaine de la machine agricole », veranstaltet durch den Projektpartner Wolff-Weyland S.A. (18.10.-22.10.2018), mit einem Infostand der Öffentlichkeit präsentiert sowie erste Resultate gezeigt.

Expertenaustausch mit Spezialisten u.a. auf der Sojatagung in Rastatt (Dezember 2017), aus Belgien (forfarmes, SCAR, BioWallonie, Wallonie recherche CRA-W und Province de Liège Agriculture), des Forschungsinstituts für Biologischen Landbau Schweiz (FIBL), des Deutschen Sojaförderring e.V. und des Fachbereiches für Ökologische Agrarwissenschaften der Universität Kassel wurden im Rahmen des Projektes wahrgenommen.

Der Fotograf Nikos Zompolas hatte sich das Projekt LeguTec für einen Wettbewerb des Vereins E*tika* ausgesucht und während der Vegetationsperiode 2018 das IBLA Team bei den Bonituren und Arbeiten auf den drei Versuchsflächen begleitet. Eine Postkarte von E*tika* mit einer Kurzinformation über das Projekt sowie ein Bild während der Bonitur in Hostert ist das Ergebnis dieses Wettbewerbs.

Weitere Kommunikationsaktivitäten im Rahmen des Projektes waren der IBLA Leguminosentag am 08.02.2019 in Ettelbrück, die offizielle Feldbegehung der Demofelder in Bettendorf am 14.06.2019, auf der mit Hilfe der Schüler der Soja On-Farm Versuchsstandort erläutert wurde, sowie Konferenzbeiträge auf zwei internationalen wissenschaftlichen Konferenzen, der *15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau* in Kassel, Deutschland und der *EGU General Assembly 2020* in Wien, Österreich. Zwei weitere Beiträge waren für den *Organic World Congress 2020* im Mai 2020 geplant. Die eingereichten abstracts wurden für die Vorstellung vom Komitee akzeptiert. Allerdings mussten die Konferenz auf Grund von COVID-19 auf das Jahr 2021 verschoben werden. Ein weiterer Konferenzbeitrag für die *World Soybean Research Conference 11* in Novi Sad, Serbia wurde aus demselben Grund auf 2021 verschoben. Es ist geplant, an diesen Konferenzen die finalen Ergebnisse vorzustellen.

Folgende **Publikationen** resultierten in 2018, 2019 und 2020 aus den erfolgten Konferenzbeiträgen:

> *Leimbrock, L.; Rock, G.; Diederich, R.; Krier, R.; Reiland, G; Stoll, E.; Zimmer, S. (2018): LeguTec – Mechanical weed control in soybean cultivation in Luxembourg. ICOAS, 7.-8. November 2018, Eisenstadt, Austria. Book of Abstracts, p. 80.*

Leimbrock, L.; Altmann, G.; Rock, G.; Diederich, R.; Krier, R.; Reiland, G; Stoll, E.; Zimmer, S. (2018): Désherbage mécanique dans la culture du soja bio au Luxembourg. RFL2, 17.-18. Oktober 2018, Toulouse, France. Livre des Résumés, p. 215.

Leimbrock, L., Rock, G., Diederich, R., Krier, R., Reiland, G., Stoll, E., Zimmer, S. (2019): LeguTec – mechanische Beikrautregulierung im Sojaanbau in Luxemburg. 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel, Germany. 06.-08. March 2019, p. 84.

Richard, D., Leimbrock, L., Rock, G., Diederich, R., Reiland, G., and Zimmer, S. (2020) Effects of mechanical weed control in organic soybean cultivation on weed biomass and diversity in Luxembourg, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7564, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7564, 2020

Richard, D., Zimmer, S., Naudin, C., Leimbrock, L. (2020) Impact of different mechanical weed control methods on weed communities, in organic soybean cultivation, in Luxembourg. Organic World Congress 2020, Rennes, France. Accepted for poster presentation, postponed to 2021.

Leimbrock, L., Rock, G., Reiland, G., Richard, D., Zimmer, S. (2020) Effects of mechanical weed control in orhanic soybean cultivation on yield and weed biomass in Luxembourg. Organic World Congress 2020, Rennes, France. Accepted for oral presentation, postponed to 2021.

In Zusammenarbeit von IBLA und *ESA - École Supérieure d'Agriculture d'Angers, France* wurde eine Masterarbeit über ein Teilthema zur Beikrautzusammensetzung erfolgreich verfasst unter dem folgenden Titel

Richard, D. (2019) Evaluation of the success of different weed control methods and their consequences on weed communities, in organic soybean cultivation in Luxembourg. Master Thesis. ESA - École Supérieure d'Agriculture d'Angers, France.

bzw. auch verfasst in französischer Sprache als folgende Arbeit

Richard, D. (2019) Evaluer le succès de différentes méthodes de désherbage mécanique et leurs effets sur les communautés adventices, pour la culture du soja en agriculture biologique au Luxembourg. Master Thesis. ESA - École Supérieure d'Agriculture d'Angers, France.

Im Projektjahr 2020, das sich der Datenauswertung und Veröffentlichung widmet, wurde weiterhin ein Artikel in der internationalen Fachzeitschrift *Organic Agriculture* des Springer Verlags wie folgt publiziert:

Richard, D.; Leimbrock-Rosch, L.; Keßler, S.; Zimmer, S.; Stoll, E. (2020) Impact of different mechanical weed control methods on weed communities in organic soybean cultivation in Luxembourg. Org. Agr. doi.org: 10.1007/s13165-020-00296-1.

Es ist geplant, den kommenden Monaten mindestens einen weiteren wissenschaftlichen Artikel mit den Ergebnissen dieses Abschlussberichts einzureichen.

3.4.4 Erkenntnisse für zukünftige wissenschaftliche Versuche

Das in LeguTec zugrunde gelegte Versuchsdesign hat sich bewährt. Es wurde die richtige Wahl hinsichtlich der Anzahl der Untersuchungsstandorte und Replikationen getroffen. Der einzige Faktor,

der in zukünftigen Studien geändert werden muss, ist die Anzahl der Beobachtungsjahre. Um eine statistische Gesamtanalyse durchführen zu können, die Jahre und Standorte kombiniert, sind mindestens drei Untersuchungsjahre erforderlich. Es wird an dieser Stelle empfohlen, die Anzahl der Beobachtungsjahre in zukünftigen Studien zu erhöhen.

Für zukünftige Untersuchungen, bei denen Informationen zur Verunkrautung benötigt werden, könnte die Reduzierung der erfassten Beikrautparameter in Betracht gezogen werden, um Zeit und Kosten zu reduzieren. Die LeguTec-Studie zeigte eine hohe Korrelation zwischen Beikrautdichte, Beikrautdeckung und Beikrautbiomasse. So wurde bspw. für fast alle Standorte signifikant hohe Korrelationen zwischen den Beikrautparametern Beikrautdeckung [%] und Biomasse des Beikrauts zur BLÜTE ermittelt (z. B. r = 0,98 mit p = 0,000 für Manternach18). Die Beikrautdeckung ist die kosten- und zeiteffizienteste Erfassungsmethode und zeigte ähnliche Ergebnisse wie die zeitaufwändige Beikrautbiomasse- oder Beikrautdichteerfassung. Eine Kombination aus der Erkennung der wichtigsten auf den Flächen vorkommenden Beikrautarten und der Schätzung der Beikrautbedeckung liefert immer noch qualitativ hochwertige Ergebnisse. Hierbei ist besonders zu beachten, dass die Bonituren in einer Wiederholung immer von ein und derselben Person durchgeführt werden, um Fehlerquellen durch subjektive Beurteilungen zu minimieren. Für Studien zur Biodiversität und zum Artenreichtum ist es allerdings immer noch empfehlenswert, jede Anzahl und jede Art zu erfassen, um aussagekräftige Schlussfolgerungen ziehen zu können.

4. Fazit und Ausblick

Die mechanische Beikrautregulierung im Sojaanbau zeigte eine hohe Effizienz. In den Versuchsjahren, in denen Wasserstress der wichtigste limitierende Faktor war, resultierten höhere Erträge im Allgemeinen aus den Hackvarianten im Vergleich zu den Striegelvarianten. Die Erträge waren zudem beim Hacken und manuellem Entfernen vergleichbar. Auch waren die Erträge bei der Striegelvariante im Vergleich zu keiner durchgeführten Maßnahme ähnlich. Der Sojaertrag wurde durch das Blindstriegeln nicht signifikant beeinflusst. Bei den Hackvarianten ($t.4_{Hacke}$, $t.5_{Hacke+}$ und $t.6_{Kombi}$) wurden keine signifikanten Unterschiede in den Sojabohnenerträgen ermittelt, so dass die Fingerhacken-Applikation keinen Einfluss auf den Erfolg der Hackmethode hatte. Beim Hacken wurde eine bessere Selektivität gegenüber Beikraut beobachtet als beim Striegeln. Höherer Wasserstress, bedingt durch höhere Pflanzenverluste und -schäden, führte zu höherem Beikrautbefall und damit zu einer höheren Wasserkonkurrenz von Sojabohnen und Beikräutern beim Striegeleinsatz im Vergleich zum Hacken. Der Gemengeanbau mit Leindotter erwies sich für Luxemburg als ungeeignet, insbesondere während der trockenen Versuchsjahre. Es wurde beobachtet, dass ein rigoroses Feldmanagement in Bezug auf die Beikrautunterdrückung während der gesamten Fruchtfolge der Schlüsselfaktor zur Maximierung des Sojabohnenertrags ist. Die Effizienz jeglicher Behandlung war gering, wenn der Beikrautdruck nach dem Auflaufen der

Sojabohne bereits hoch war. Wo ein geringer Beikrautbefall vorzufinden war, war jede der mechanischen Methoden anwendbar.

Über alle Standorte hinweg wurden 59 Beikrautarten mit einem überwiegenden Anteil an ein- und zweijähriger Zweikeimblättrigen Pflanzen identifiziert. Die Vielfalt der Beikräuter, die der Shannon-Index zeigt, wurde tendenziell durch mechanische Beikrautregulierung reduziert, aber Beikräuter wurden nie vollständig eliminiert. Im Allgemeinen wirkte sich das Hacken negativer auf die Vielfalt aus als das Striegeln. *Chenopodium album*, *Elymus repens*, *Persicaria lapathifolia*, *Polygonum convolvulus*, *Tripleurospermum inodorum* und *Vicia spec.* wurden als die problematischsten Beikräuter identifiziert, die gegenüber Sojabohnen konkurrenzfähig sind oder bei der Ernte Einschränkungen verursachen.

Hochauflösende Fernerkundungstechniken stellen eine Vielzahl von wertvollen Werkzeugen zum Monitoring von Versuchsaufbauten dar. Praktische Fernerkundungsmethoden bieten jedoch nur begrenzte Vorteile im Vergleich zu In-situ-Boniturmethoden, da diese die erste Wahl für die quantitative Datenerhebung in einem wissenschaftlichen Kontext sind. Aus der Sicht der Fernerkundung und aus der Sicht der Präzisionslandwirtschaft könnte im Anschluss an das LeguTec-Projekt die Entwicklung eines Pflanzenwachstumsmodells für Sojabohnen angestrebt werden. Dies würde es ermöglichen, die Entwicklung der Kulturpflanze auch im Hinblick auf die Konkurrenz mit Beikräutern vorherzusagen. Dieses Instrument könnte den Landwirten als Entscheidungshilfe dienen, da es die Entwicklung der Sojabohne für einen Zeitraum von bis zu zwei Wochen vorhersagen und somit eine bessere Entscheidungsfindung in Bezug auf die mechanische Beikrautregulierung ermöglichen würde.

Die hohe Besucherzahl bei den Feldbesuchen zeigte das große Interesse der Landwirte am Sojaanbau. Die Weitergabe der gewonnenen Erkenntnisse trug dazu bei, mit dem erfolgreichen Anbau von Sojabohnen zu beginnen. Es wurde bestätigt, dass eine kontinuierliche Beratung zur Unterstützung der Landwirte in der neuartigen Sojakultur von entscheidender Bedeutung ist.

Für einen erfolgreichen Sojaanbau in Luxemburg sind trotz der bereits gewonnenen Erkenntnisse weitere Forschung und kontinuierliche praktische Erfahrungen erforderlich. Präzisionslandwirtschaftliche Technologien zur mechanischen Beikrautregulierung, wie neue automatische Reihenführungssysteme für das Hacken zwischen den Reihen, werden ständig weiterentwickelt und müssen in der Praxis erprobt werden. Die Hacke kann, wie im Projekt LeguTec vorgesehen, per Kamera gesteuert werden. Da dieses Gerät in den Testversuchen der vorliegenden Studie nicht richtig zu funktionieren schien und deshalb nicht eingesetzt wurde, sind weitere Versuche erforderlich, um den Nutzen dieser Technologie umfassend zu testen. Die sich ändernden Klimabedingungen, die bereits in den letzten Jahren beobachtet wurden, erfordern eine Anpassung des Anbaus und alternative Anbaukonzepte. Neu entwickelte und bestehende Sojasorten müssen auf nationaler Ebene kontinuierlich getestet werden, um die Eignung der sich ändernden

Klimabedingungen zu verfolgen. Die traditionelle Sorte Merlin könnte nicht mehr zeitgemäß sein, da andere früh reifende Sorten in den letzten zwei Jahren höhere Erträge erzielten. Alternative Anbaumethoden wie der Mischfruchtanbau oder die Direktsaat von Sojabohnen wurden nur wenig erforscht und ergaben keine eindeutigen Resultate. Der Anbau von Sojabohnen für den menschlichen Verzehr könnte für luxemburgische Standorte interessant sein, da die Anforderungen eines hohen Proteingehaltes bereits erfüllt ist. Der sich ändernde Vegetationszyklus zwingt zum Umdenken über den richtigen Zeitpunkt für Aussaat und Hacken; ein adäquates Boden- und Fruchtfolgemanagement wurde als wichtigste Voraussetzung für die Beikrautregulierung herausgearbeitet. Hier sind ergänzende Studien mit weiterem Praxisbezug notwendig. Das komplexe Thema der Methoden der Beikrautregulierung muss auch im Hinblick auf das Ziel der Herbizidreduktion im konventionellen Landbau weiterhin im Fokus stehen. Hier spielt das Boden- und Fruchtfolgemanagement ebenfalls eine bedeutende Rolle, da eine alleinige Reduzierung des Herbizideinsatzes nicht ausreichend ist. Darüber hinaus sind kontinuierliche On-Farm-Feldversuche direkt auf den landwirtschaftlichen Betrieben und die Unterstützung von Beratern, die auf den Sojaanbau spezialisiert sind, erforderlich, um weitere Fachkenntnisse zu gewinnen und eine erfolgreiche Etablierung des nationalen Sojaanbaus zu ermöglichen.

Anreize seitens der Politik sind unerlässlich, um die nationale Sojabohnenproduktion und damit die Proteinautarkie zu fördern. Obwohl sich die luxemburgische Regierung mit der Unterzeichnung der europäischen Soja-Erklärung im Jahr 2017 verpflichtet hat, die nationale Proteinautarkie zu erhöhen, sind weitere politische Anreize wie z.B. die Einbeziehung von Sojabohnen in die Leguminosenprämie oder die Implementierung von Verarbeitungsinfrastrukturen, zu diskutieren. Solche Anreize und Maßnahmen sollten allesamt Teil einer zukünftigen ganzheitlichen Proteinstrategie für Luxemburg sein.

Literatur

Anderl A., Goetz M. (2018). Versuchsbericht Sojabohnen Rheinland-Pfalz 2017. Landwirtschaftliches Versuchswesen Rheinland-Pfalz. DLR Rheinhessen - Nahe – Hunsrück.

Asam L., Bourgeois M., Rechnagel J., Unsleber J. (2014). Optimierung der Mähdreschereinstellungen für den Sojaanbau. URL: https://orgprints.org/19821/62/Sojainfo_Maehdreschereinstellungen.pdf.

ASTA (2019). Meteorologisches Bulletin ASTA. Sommer 2019. Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA). URL : https://gouvernement.lu/dam-assets/documents/actualites/2019/09-septembre/ASTA-Bulletin-Summer-2019.pdf.

Bachteler K. (2017). Entwicklungsstadien und Bedürfnisse der Sojabohne. Taifun-Tofu GmbH. URL: https://www.sojafoerderring.de/wp-content/uploads/2017/09/Sojainfo_51-Kopie.pdf.

Barbieri P., Pellerin S. & Nesme T. (2017). Comparing crop rotations between organic and conventional farming. Sci Rep 7, 13761 (2017). https://doi.org/10.1038/s41598-017-14271-6.

Bellof G. (2014). Heimische Sojaprodukte in der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere. URL: https://orgprints.org/24970/1/soja_fuetterungsfibel.pdf [accessed October 2020]. FIBL Deutschland e.V..

Bernet B., Recknagel J., Asam L., Messmer M. (2016). Biosoja aus Europa. FIBL Dossier 5.

Beste A., Boeddinghaus R. (2011). Artenvielfalt statt Sojawahn. Martin Häusling MDEP 33.

Board J.E., Kahlon E.S. (2011). Soybean Yield Formation: What controls it and how it can be improved. In: Soybean physiology and biochemistry. doi: 10.5772/17596.

Bond W., Grundy A.C., (2001). Non-chemical weed management in organic farming systems. Weed Res. 41, 383–405. https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00246.x.

Burnside O.C. (1979). Soybean (Glycine max) Growth as Affected by Weed Removal, Cultivar, and Row Spacing. Weed Sci. 27, 562–565. https://doi.org/10.1017/S0043174500044611.

Caliskan S., Arslan M., Uremis I., Çalışkan M. (2007). The Effects of Row Spacing on Yield and Yield Components of Full Season and Double-Cropped Soybean. 147. URL: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.495.7593&rep=rep1&type=pdf.

Cartter J.L., Hartwig E.E. (1962). The Management Of Soybeans, in: Norman, A.G. (Ed.), Advances in Agronomy. Academic Press, pp. 359–412. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60442-3.

Chambres d'agriculture des Hauts de France (2016). Compte rendu des essais réalisés en 2016 2ème partie – protéagineux et associations. URL : https://nord-pas-de-calais.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Hauts-de-France/028_Inst-Nord-Pas-de-Calais/Telechargements/Actualites/act17942-essais-bio-partie2.pdf.

Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. (2018). Gestion durable de la flore adventice des cultures, Editions QUAE. ed. Versailles. 354. EAN 9782759228188.

Colling G. (2005). Red List of the Vascular Plants of Luxembourg. Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle Luxembourg. Ferrantia 42. ISSN 1682-5519. URL https://ps.mnhn.lu/ferrantia/publications/Ferrantia42.pdf.

de la Fuente E.B., Suárez S., Ghersa C. M., León R. (1999). Soybean Weed Communities: Relationships with Cultural History and Crop Yield. Agronomy Journal, Vol 91. doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100020010x.

de Mendiburu, F. (2020). Package 'agricolae'. R Package, version 1.3-3. URL: https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/agricolae.pdf [accessed September 2020].

Dessaint F., Chadoeuf R., Barralis G. (2001). Diversité des communautés de mauvaises herbes des cultures annuelles de Côte-d'Or (France). Biotechnol Agron Soc Env. 9. URL https://www.researchgate.net/publication/26392487_Diversite_des_communautes_de_mauvaises_herbes_des_cultures_annuelles_de_Cote-d'Or_France

Dierauer H., Siegrist F., Weidmann G. (2017). Weed control in soy with a finger weeder. FIBL. URL: https://orgprints.org/31017.

Dordevik V., Malidza G., Vidic M., Milovac Z., Seremesic S. (2019). Best Practise Manual for soya bean cultivation in the Danube region. Donau Soja Vienna. http://www.donausoja.org/fileadmin/user_upload/Activity/Projects/Best_Practice_Manuals/DS_BPM_2016_Main.pdf.

Eurpean Commission (2016). Commission staff working document. Genetically modified commodities in the EU. Brussels, SWD (2016) 61. URL: https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/10102/2016/EN/10102-2016-61-EN-F1-1.PDF.

European Union (2020a). EU oilseeds and protein crops production, area and yield. In: Agri-Food Data Portal. https://agridata.ec.europa.eu/extensions/DashboardCereals/ OilseedProduction.html. [accessed May 2020].

European Union (2020b). Oilseeds and protein crops exports and imports. In: Agri-Food Data Portal. https://agridata.ec.europa.eu/extensions/DashboardCereals/OilseedTrade.html. [accessed May 2020].

European Soya Declaration (2017). Common Declaration of Austria, Croatia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Italy, Luxemburg, the Netherlands, Poland, Romania, Slovakia and Slovenia. European Soya Declaration: Enhancing soya and other legumes cultivation. Available at: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Pflanze/SojaErklaerung.pdf?__blob=publicationFile [accessed 10 June 2018].

FIBL (2016). De la semence à l'assiette - Le soja biologique Suisse. URL https://www.fibl.org/fileadmin/documents/fr/actualites/2016/MM-fibl-soja-biologique-ch-20160407.pdf.

Froschhammer P., Schulz H., Heß J. (2015). Mischfruchtanbau von Soja und Leindotter. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. URL: https://orgprints.org/view/projects/int-conf-wita-2015.html [accesses December 2020].

Gabriel D, Roschewitz I, Tscharntke T, Thies C. (2006). Beta diversity at different spatial scales: plant communities in organic and conventional agriculture. Ecol Appl. 2006 Oct;16(5):2011-21. doi: 10.1890/1051-0761(2006)016[2011:bdadss]2.0.co;2. PMID: 17069391.

Guay E. (2012). Étude de l'impact sur la flore adventice de plusieurs systèmes de culture à bas niveau d'intrants. Agrocampus Rennes. URL : https://pdfs.semanticscholar.org /9deb/ a6667fb6fa9dfa66807f07be0f6501d3b136.pdf.

Gunsolus J. (1990). Mechanical and cultural weed control in corn and soybean. American Journal of Alternative Agriculture, 5(3), 114-119. https://doi.org/10.1017/S0889189300003416.

Hahn V. and Miedaner T. (2013). Sojaanbau in der EU: Lohnender Anbau ohne GVO. Agrarpraxis kompakt. DLG-Verlag. ISBN 978-3-7690-2019-9.

Hamilton M., Baldwin K., Bullen G. (2014). North Carolina State University North Carolina Organic Grain Project College of Agriculture and Life Sciences 48. URL https://www.kingsagriseeds.com/wp-content/uploads/2014/12/North-Carolina-Organic-Grain-Production-Guide-organicgrainfinal.pdf.

Hatzenbichler (2015). Preisliste Nr. 41. Anbauteile für Fingerhacken.

Heidt H. (2019). Sojasortenprüfung im biologischen Landbau in Luxemburg 2019. IBLA. URL: https://ibla.lu/_res/uploads/2020/03/Endbericht_SortenversucheSoja_2019_IBLA.pdf.

Heidt H. (2020). Proteingehalte aus den Sojasortenprüfung im biologischen Landbau in Luxemburg 2018 und 2019. IBLA. Internal written information.

Henckel L, Börger L, Meiss H, Gaba S, Bretagnolle V. (2015). Organic fields sustain weed metacommunity dynamics in farmland landscapes. Proc. R. Soc. B 282:20150002. http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2015.0002.

Hyvönen T., Salonen J. (2002). Weed species diversity and community composition in cropping practices at two intensity levels – a six-year experiment. Plant Ecology 159, 73–81. https://doi.org/10.1023/A:1015580722191.

Jobst F., Demmel M., Heiles E., Salzeder G., Urbatzka P. (2012). Optimierung der Beikrautregulierung im ökologischen Sojaanbau. Bayerische Landesanstalt für Landwritschaft. URL: https://orgprints.org/20965/1/Jobst__et-al_2012_Sojaanbau.pdf.

Jorge J., Vallbé M., Soler J. A. (2019). Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images, European Journal of Remote Sensing, 52:1, 169-177, DOI: 10.1080/22797254.2019.1572459.

Keßler S. (2018). Sojasortenprüfung im biologischen Landbau in Luxemburg 2018. IBLA. URL: https://ibla.lu/_res/uploads/2019/04/Endbericht_SortenversucheSoJA-2018.pdf.

Keßler, S., Stoll, E., Heidt, H., Schulz, H., Heβ, J., Bohn, T., Zimmer, S. (2019): Nutritive und antinutritive Inhaltsstoffe in Körnerleguminosen: Einfluss von Jahr und Standort auf den Futterwert. 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel, Germany. 06.-08. March 2019, p. 90.

Köpke U., Nemecek T. (2010). Ecological services of faba bean. Field Crops Res 115:217–233. doi:10.1016/j.fcr.2009.10.012

Kunz C., Weber J. F., Gerhards R. (2015). Benefits of Precision Farming Technologies for Mechanical Weed Control in Soybean and Sugar Beet—Comparison of Precision Hoeing with Conventional Mechanical Weed Control. Agronomy 2015, 5, 130-142; doi:10.3390/agronomy5020130.

Le Gall C., Raimbault J., Augereau L. (2017). Guide de culture -Soja Bio. Terres Innovia, ITAB. URL http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques_culture/guide_soja_bio2017_terres-inovia.pdf

Leimbrock-Rosch L., Richard D., Zimmer S., Rock, G., Hueffer V. (2020). LeguTec – Mechanical weed control in soybean cultivation in Luxembourg. Official final report. IBLA Luxembourg.

Lindner U., Billmann B. (2006). Planung, Anlage und Auswertung von Versuchen im ökologischen Gemüsebau. Handbuch für die Versuchsanstellung. FiBL.

LIST (2018a). Meteorologisches Bulletin LIST. Frühjahr 2018. Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST). URL: https://www.meteolux.lu/fr/filedownload/168/meteo-bulletin_list_fruhjahr_2018_final.pdf/type/pdf.

LIST (2018b). Meteorologisches Bulletin LIST in Zusammenarebti mit ASTA und MeteoLux. Sommer 2018. Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST). URL: https://www.meteolux.lu/fr/filedownload/168/meteo-bulletin_list_sommer_2018_final.pdf/type/pdf.

Lfl Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2020). LfL Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten für konventionelle und ökologische Verfahren. URL: https://www.stmelf.bayern.de/idb/sojabohne.html [accessed October 2020].

Lutman P., Storkey J., Helen M., Holland J. (2009). Abundance of weeds in arable fields in southern England in 2007/08. Aspects of Applied Biology 91.

Markwell J., Osterman J. O., Mitchell J. L. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. Photoynth Res. 46:467-472.

Marshall E., Brown V., Boatman N., Lutman P., Squire G., Ward L. (2003). The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields*. Weed Research. 43. 77 - 89. DOI: 10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x.

Munger, P., Bleiholder, H., Hack, H., Hess, M., Strauss, R., Van den Boom, T. and Weber, E. (1997). Phenological Growth Stages of the Soybean Plant (Glycine max (L.) MERR.) – Codification and Description according to the General BBCH Scale – with Figures. Journal of Agronomy and Crop Science179, 209 - 217.

Nemecek T., von Richthofen J.-S., Dubois G., Casta P., Chalres R., Pahl, H. (2008). Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. Eur J Agron 28:380–393. doi: 10.1016/j.eja.2007.11.004.

Pannacci E., Tei F., Guiducci M. (2018). Evaluation of mechanical weed control in legume crops. Crop Protection 104 (2018) 52-59. doi: 10.1016/j.cropro.2017.10.014.

Piepho, H.-P. (1997). Analysis of a Randomized Block Design with Unequal Subclass Numbers. Agron. J., 89: 718-723. doi:10.2134/agronj1997.00021962008900050002x.

Piepho H-P (2018). Allowing for the structure of a designed experiment when estimating and testing trait correlations. The Journal of Agricultural Science 156, 59–70. URL: https://doi.org/10.1017/S0021859618000059.

Pousset, J. (2016). Agriculture sans herbicides, 2nd ed, Agriproduction. Editions France Agricole. 433. ISBN 978-2-85557-459-2.

Recknagel J., Messmer M. (2015). Kraftwerk im Boden. Sojaanbau. In dlz agrarmagazin Februar 2015. URL: https://www.sojafoerderring.de/wp-content/uploads/2014/05/Artikel-Impfung-DLZ-Agrarmgazin.pdf.

Recknagel, J., Imgraben, H. (2018). Anbauanleitung für Sojabohnen 2018. Regierungspräsidium Freiburg und Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg. URL: http://www.ltz-bw.de/pb/,Lde/Startseite/Kulturpflanzen/Sojabohne [accessed August 2018].

Richard D., Leimbrock-Rosch L., Keßler S., Zimmer S. (2020). Impact of different mechanical weed control methods on weed communities in organic soybean cultivation in Luxembourg. Org Agric. https://doi.org/10.1007/s13165-020-00296-1.

Romero A., Chamorro L., Sans F. X. (2008). Weed diversity in crop edges and inner fields of organic and conventional dryland winter cereal crops in NE Spain, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 124, Issues 1–2, Pages 97-104. doi.org/10.1016/j.agee.2007.08.002.

Rotchés-Ribalta R., Blanco-Moreno J.M., Armengot L., José-María L., Sans F.X. (2015). Which conditions determine the presence of rare weeds in arable fields? Agriculture, Ecosystems &

Environment, Volume 203, Pages 55-61, ISSN 0167-8809, https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.022.

Rouse J. W., Haas R. H., Deering D. W., Sehell, J. A. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.

RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL http://www.rstudio.com/.

Rydberg N. T., Milberg P. (2000) A Survey of Weeds in Organic Farming in Sweden, Biological Agriculture & Horticulture: An International Journal for Sustainable Production Systems, 18:2, 175-185, DOI:10.1080/01448765.2000.9754878.

Schumacher M. Ohnmacht S., Rosenstein R., Gerhards R. (2018). How Management Factors Influence Weed Communities of Cereals, Their Diversity and Endangered Weed Species in Central Europe. Agriculture. 8. 172. doi: 10.3390/agriculture8110172.

SER Service d'Economie Rurale (2019). Rapport d'activité 2018. Luxemburg.

Sicard H., Fontaine L., Arino J., Aubert C., Bonin L., Gall J., Glachant C., Johan G., Leclech N., Le Moine R., Lieven J., Ménétrier P., Pottier M., Rolland C., Zaganiacz V. (2012). Désherber mécaniquement les grandes cultures. ITAB. 82. URL: http://www.itab.asso.fr/downloads/desherb-meca/dm-brochure_culture-web.pdf.

Sobko O., Hartung J., Zikerli S., Claupein W., Gruber S. (2019). Effects of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (Glycine max L. Merrill). Plant Soil Environ., 65: 594–601. doi: 10.17221/346/2019-PSE.

Stoll E., Heidt H., Bohn T., Heß J., Zimmer S. (2015). Suitability of different grain legume cropping systems as protein rich animal fodder in an ON-FARM field trial under organic growing conditions in Luxembourg. COBRA (Coordinating Organic plant Breeding Activities – for diversity) Final Conference, Vingsted, Denmark. 24.-25. November 2015.

Terres Inovia (2019). Soja - Terres Inovia [WWW Document]. URL https://www.terresinovia.fr/soja?p_r_p_categoryId=130447 [accessed October 2019].

Thompson J. A., SCheitzer L. E., Nelson R. L. (1996): Association of specific leag weight, an estimate of chlorophyll, and chlorophyll concentration with apparent photosynthesis in soybean. Photos. res. 49: 1-10.

Tkachuk, C. (2019). Soybean Pod height. Influence of Genetics, Environment and Management. URL: https://www.manitobapulse.ca/wp-content/uploads/2019/06/The-Bean-Report_June-2019.pdf [accessed October 2020].

Tyšer L., Nováková K., Hamouz P., Nečasová M. (2008). Species diversity of weed communities in conventional and organic farming systems in the Czech Republic. J. Plant Dis. Proctection Suppl. 291–295. https://doi.org/10.11118/actaun201563030741

Vollmann J.m Wagentristl H., Hartl W. (2010). The effects of sumulated weed pressure on early maturity soybeans. Europ. J. Agronomy 32 (2010) 243-248. doi:10.1016/j.eja.2010.01.001.

Weber J., Kunz C., Gerhards R. (2016). Chemical and mechanical weed control in soybean (Glycine max). Julius-Kühn-Archiv. DOI: 10.5073/jka.2016.452.022.

Wilbois K.-P., Spiegel A.-K., Asam, L., Balko, C., Becker, H., Berset, E., Butz, A., Haase T., Habekuß A,. Hahn, V., Heß, J., Horneburg, B., Hüsing B., Kohlbrecher, M., Littmann C., Messmer M., Miersch M., Mindermann, A., Nußbaumer H., Ordon, F., Rechnagel J., Schulz H., Spory K., Trautz D., Unsleber J., Vergara, M., Vogel, R., Vogt-Kaute W., Wedemeier-Kremer B., Zimmer, S., Zurheide T. (2014): Ausweitung des Sojaanbaus in Deutschland durch züchterische Anpassung sowie pflanzenbauliche und verarbeitungstechnische Optimierung. [Expansion of soybean cultivation in Germany through adaptation by breeding as well as optimization of crop production and processing technology.] Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), D-Frankfurt (Gesamtkoordination).

Wortman S. E., Lindquist J. L., Haar M. J., Francis C. (2010). Increased weed diversity, density and above-ground biomass in long-term organic crop rotations. Agronomy & Horticulture -- Faculty Publications. 612. URL: https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/612 [accessed Ocotber 2020].

Zhou X.B., Chen Y.H., Ouyang Z. (2011). Row spacing effect on leaf area development, light interception, crop growth and grain yield of summer soybean crops in Northern China 8. African Journal of Agricultural Research Vol. 6(6), pp. 1430-1437. doi: 10.5897/AJAR10.371.

Zimmer S., Haase T., Piepho H.-P., et al. (2016a). Evaluation of grain legume cropping systems for animal fodder potential and impacts on subsequent wheat yield under less favourable soil conditions in organicagriculture in Luxembourg. https://doi.org/10.5073/JFK.2016.06.02.

Zimmer S., Liebe U., Didier J.-P., Heß J. (2016b). Luxembourgish farmers' lack of information about grain legume cultivation. Agron Sustain Dev 36:. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0339-5.

Zimmer S., Messmer M., Haase T., Piepho H.-P., Mindermann A., Schulz H., Habekuß A., Ordon F., Wilbois K.-P., Heß J. (2016c). Effects of soybean variety and Bradyrhizobium strains on yield, protein content and biological nitrogen fixation under cool growing conditions in Germany. Eur. J. Agron. 72, 38–46. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.008

Zimmer, S. (2019). Studie zur Soajabedarfsberechnung für Luxemburg. Endbericht. IBLA. URL: https://ibla.lu/_res/uploads/2019/06/Endbericht_SojaStudie_2018_FINAL.pdf.

Anhang

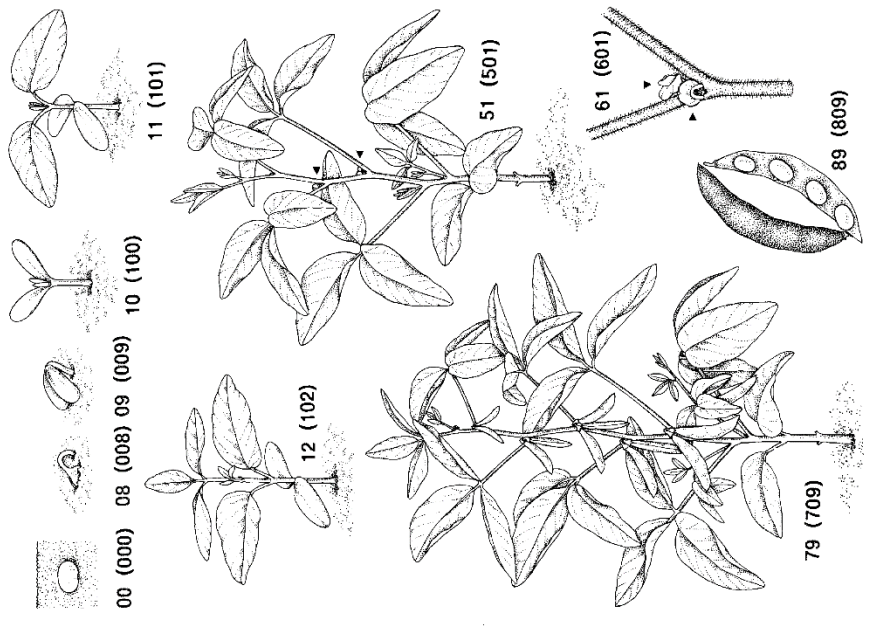
Anhang 1: BBCH Stadien der Sojabohne (Glycine max. Merr. L), Teil 1 (Munger et al., 1997).

Sojabohne Munger et al., 1997

BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien der Sojabohne
(*Glycine max* L. Merr.)

Code		Beschreibung
2- und 3stellig		
Makrostadium 0: Keimung		
00	000	Trockener Samen
01	001	Beginn der Samenquellung
03	003	Ende der Samenquellung
05	005	Keimwurzel aus Samen ausgetreten
06	006	Streckung der Keimwurzel
07	007	Hypokotyl mit Keimblättern hat Samenschale durchbrochen
08	008	Hypokotyl erreicht die Bodenoberfläche. Keimblätter noch im Boden
09	009	Auflaufen: Hypokotyl mit Keimblättern durchbricht Bodenoberfläche («cracking stage»)
2- und 3stellig		
Makrostadium 1: Blattentwicklung (Hauptspross)		
10	100	Keimblätter voll entfaltet
11	101	Erstes Laubblattpaar am ersten Nodium entfaltet
12	102	Laubblatt am 2. Nodium entfaltet
13	103	Laubblatt am 3. Nodium entfaltet
1.	10.	Stadien fortlaufend bis ...
19	109	Laubblatt am 9. Nodium entfaltet[1]
	110	Laubblatt am 10. Nodium entfaltet[1]
	111	Laubblatt am 11. Nodium entfaltet[1]
	112	Laubblatt am 12. Nodium entfaltet[1]
	113	Laubblatt am 13. Nodium entfaltet[1]
	11.	Stadien fortlaufend bis ...
	119	Laubblatt am 19. Nodium entfaltet[1]

[1] Die Seitentriebentwicklung kann früher beginnen; in diesem Fall auf Makrostadium 2 übergehen



Sojabohne Munger et al., 1997

BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien der Sojabohne

Code		Beschreibung
2- und 3stellig		
Makrostadium 8: Frucht- und Samenreife		
80	800	Erste Hülsen reif, Samen haben endgültige Farbe und sind hart und trocken
81	801	Beginn der Reife: 10% der Hülsen reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart.[3] Beginn der Hülsen- und Samenreife[4]
82	802	20% der Hülsen reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart[3]
83	803	30% der Hülsen reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart[3]
84	804	40% der Hülsen reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart[3]
85	805	Fortschreitende Reife: 50% der Hülsen reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart.[3] Hauptphase der Hülsen- und Samenreife[4]
86	806	60% der Hülsen reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart[3]
87	807	70% der Hülsen reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart[3]
88	808	80% der Hülsen reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart[3]
89	809	Vollreife: alle Hülsen sind reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart (Erntereife)[3] Mehrzahl der Hülsen sind reif; Samen haben endgültige Farbe und sind trocken und hart[4]
2- und 3stellig		
Makrostadium 9: Absterben		
91	901	10% der Blätter sind verfärbt oder abgefallen
92	902	20% der Blätter sind verfärbt oder abgefallen
93	903	30% der Blätter sind verfärbt oder abgefallen
94	904	40% der Blätter sind verfärbt oder abgefallen
95	905	50% der Blätter sind verfärbt oder abgefallen
96	906	60% der Blätter sind verfärbt oder abgefallen
97	907	Fast alle oberirdischen Pflanzenteile trocken
99	909	Erntegut

[3] Für die determinanten Sorten
[4] Für die nicht-determinanten Sorten

Sojabohne Munger et al., 1997

BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien der Sojabohne

Code		Beschreibung
2- und 3stellig		
Makrostadium 6: Blüte		
60	600	Erste Blüten vereinzelt im Bestand offen
61	601	Beginn der Blüte: 10% der Blüten offen[3] Beginn der Blüte[4]
62	602	20% der Blüte offen[3]
63	603	30% der Blüten offen[3]
64	604	40% der Blüten offen[3]
65	605	Vollblüte: 50% der Blüten offen[3] Hauptblüte[4]
66	606	60 % der Blüten offen[3]
67	607	Abgehende Blüte[3]
69	609	Ende der Blüte: erste Hülsen sichtbar (ca. 5 mm lang)
2- und 3stellig		
Makrostadium 7: Frucht- und Samenentwicklung		
70	700	Erste Hülsen haben endgültige Länge erreicht (15–20 mm)
71	701	10% der Hülsen haben endgültige Länge erreicht (15–20 mm)[3] Beginn der Hülsenentwicklung[4]
72	702	20% der Hülsen haben endgültige Länge erreicht (15–20 mm)[3] Beginn der Hülsenfüllung[4]
73	703	30% der Hülsen haben endgültige Länge erreicht (15–20 mm)[3] Beginn der Hülsenfüllung[4]
74	704	40% der Hülsen haben endgültige Länge erreicht (15–20 mm)[3] Beginn der Hülsenfüllung[4]
75	705	50% der Hülsen haben endgültige Länge erreicht (15–20 mm)[3] Hauptphase der Hülsenentwicklung; fortschreitende Hülsenfüllung[4]
77	707	70% der Hülsen haben endgültige Länge erreicht (15–20 mm); fortgeschrittene Hülsenfüllung.[3] Fortgeschrittene Hülsenfüllung[4]
79	709	Fast alle Hülsen haben endgültige Grösse erreicht (15–20 mm); Samen füllt die Hülse aus[3, 4]

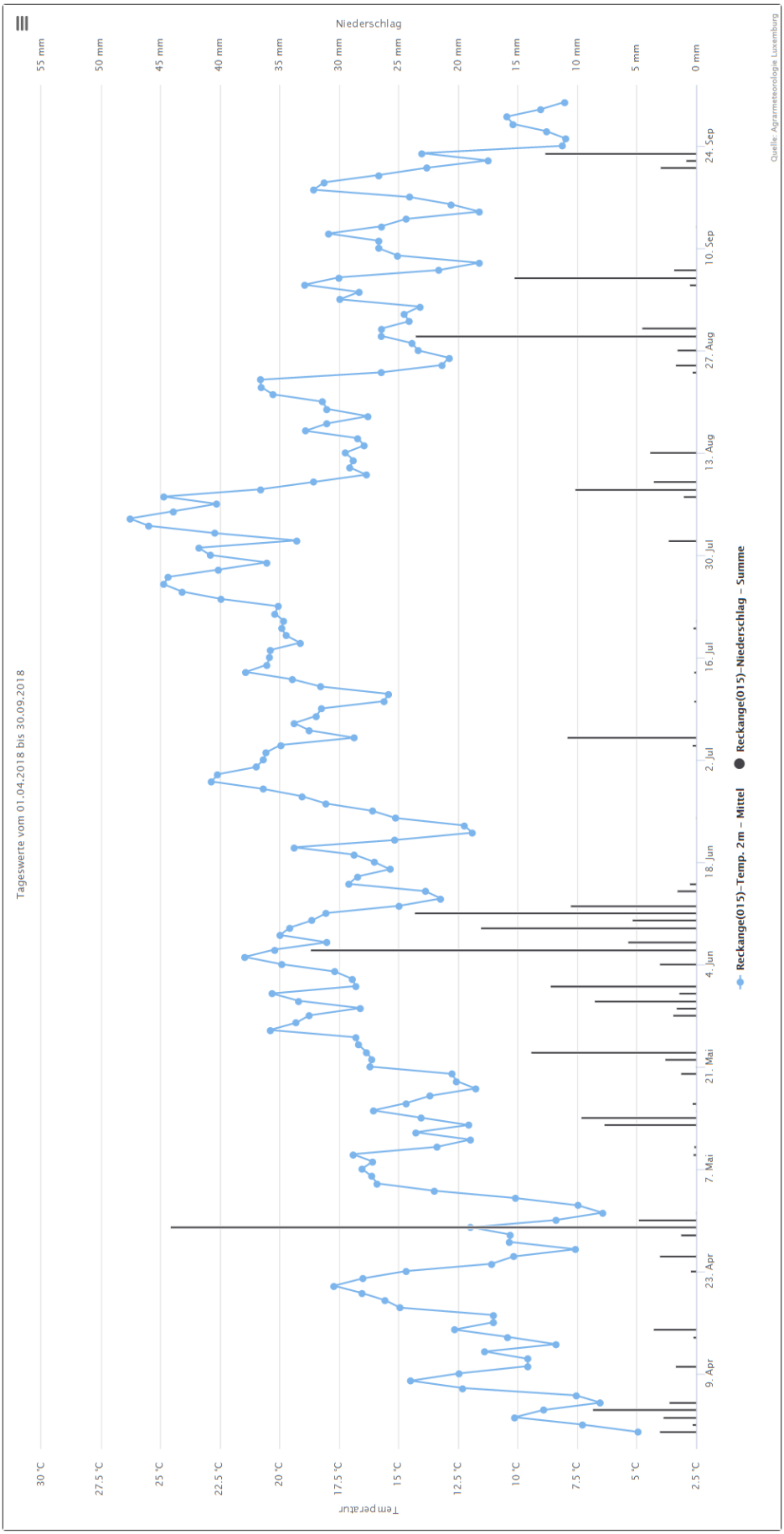
[3] Für die determinanten Sorten
[4] Für die nicht-determinanten Sorten

Sojabohne Munger et al., 1997

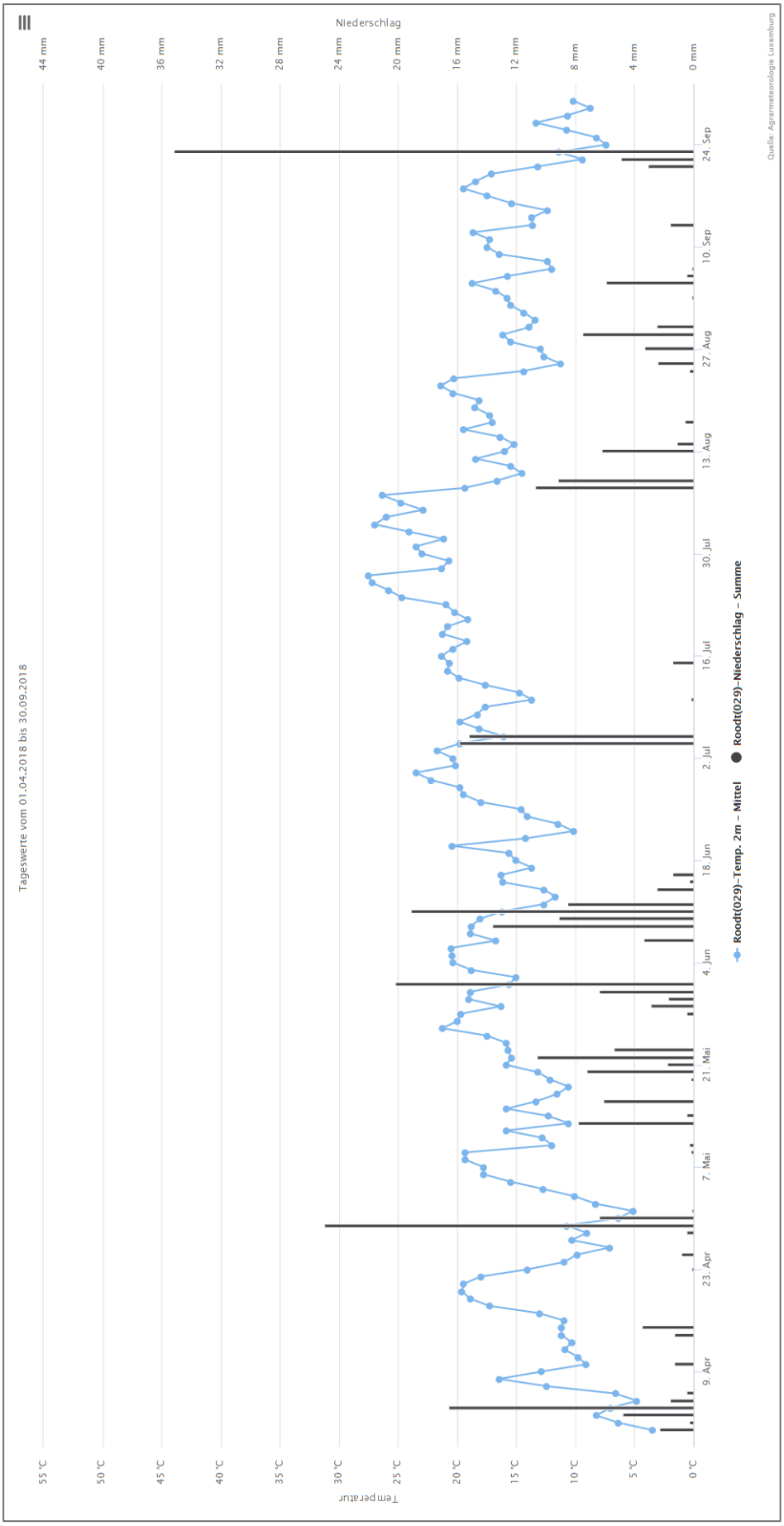
BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien der Sojabohne

Code		Beschreibung
2- und 3stellig		
Makrostadium 2: Entwicklung von Seitensprossen		
21	201	Erster Seitenspross sichtbar
22	202	2. Seitenspross erster Ordnung sichtbar
23	203	3. Seitenspross erster Ordnung sichtbar
2 .	20 .	Stadien fortlaufend bis ...
29	209	9 oder mehr Seitensprosse erster Ordnung sichtbar (2stellig) 9. Seitenspross erster Ordnung sichtbar (3stellig)
	210	10. Seitenspross erster Ordnung sichtbar
	221	Erster Seitenspross zweiter Ordnung sichtbar
	22 .	Stadien fortlaufend bis...
	229	9. Seitenspross zweiter Ordnung sichtbar
	2N1	Erster Seitenspross N-ter Ordnung sichtbar
	2N9	9. Seitenspross N-ter Ordnung sichtbar
2- und 3stellig		
Makrostadium 4: Entwicklung vegetativer Pflanzenteile Ernteprodukt		
49	409	Erntefähige vegetative Pflanzenteile haben endgültige Grösse erreicht (Schnittgut von Soja zur Verfütterung)
2- und 3stellig		
Makrostadium 5: Entwicklung der Blütenanlagen		
51	501	Erste Blütenknospen sichtbar
55	505	Erste Blütenknospen gestreckt
59	509	Erste Blütenblätter sichtbar; Blüten noch geschlossen

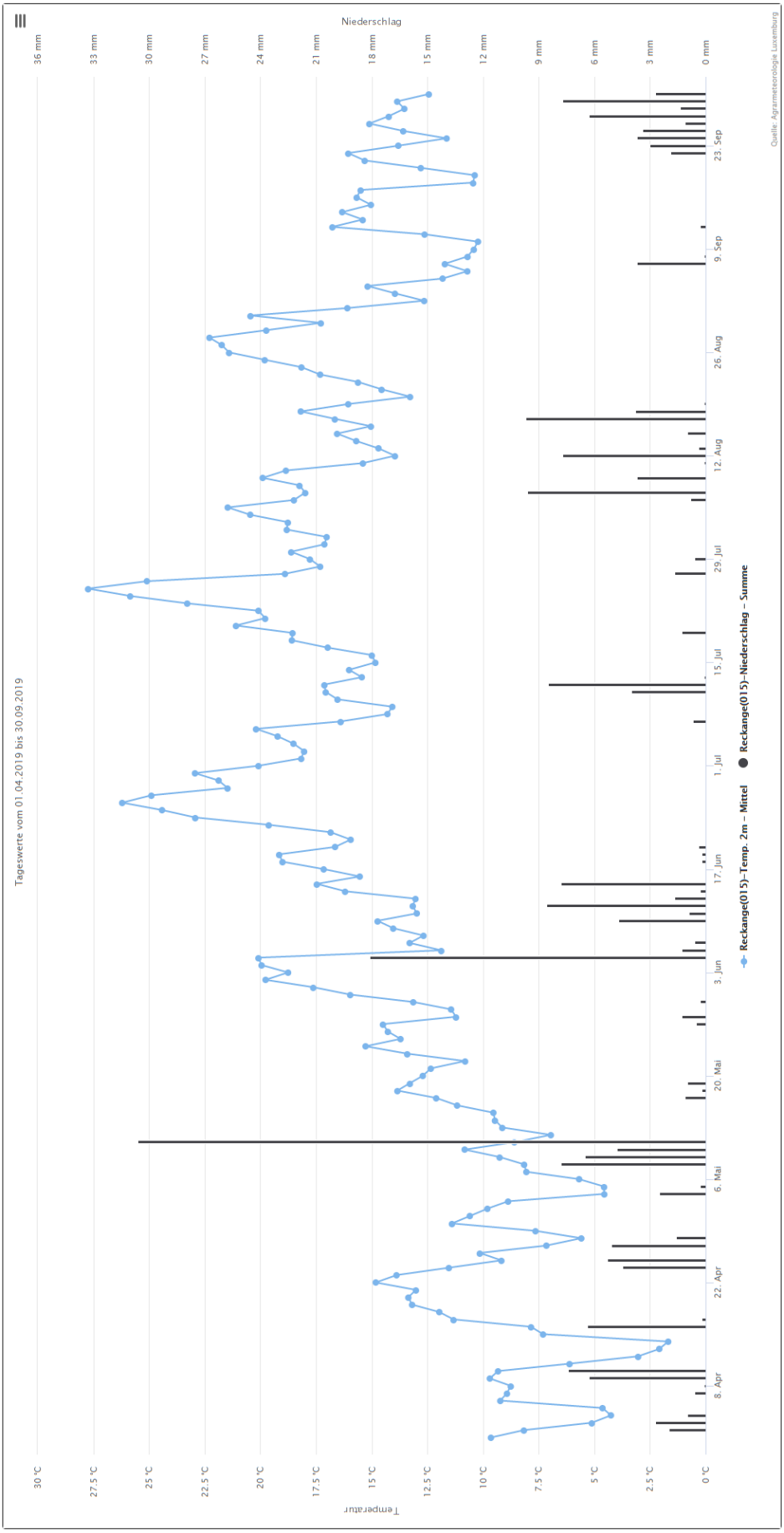
Anhang 3: Tagesmitteltemperatur (blaue Linie) und Niederschlag (schwarze Balken) der Wetterstation Reckange, repräsentativ für den Standort Sprinkange im Jahr 2018 (agrimeteo.lu).



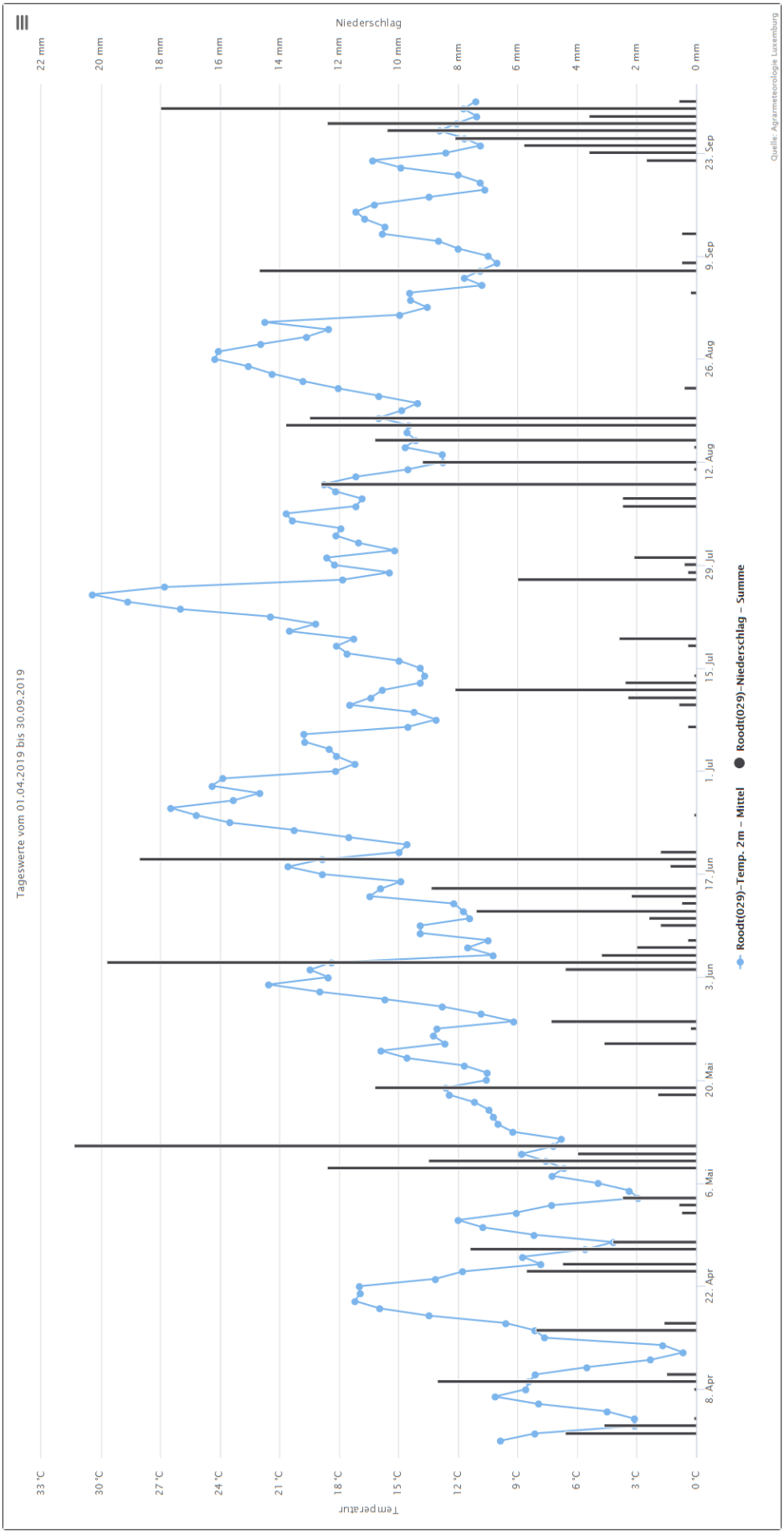
Anhang 4: Tagesmitteltemperatur (blaue Linie) und Niederschlag (schwarze Balken) der Wetterstation Roodt, repräsentativ für den Standort Hostert im Jahr 2018 (agrimeteo.lu).



Anhang 5: Tagesmitteltemperatur (blaue Linie) und Niederschlag (schwarze Balken) der Wetterstation Reckange, repräsentativ für den Standort Sprinkange im Jahr 2019 (agrimeteo.lu).



Anhang 6: Tagesmitteltemperatur (blaue Linie) und Niederschlag (schwarze Balken) der Wetterstation Roodt, repräsentativ für den Standort Hostert im Jahr 2019 (agrimeteo.lu).



Impressum

Herausgeber

Institut fir Biologësch Landwirtschaft an Agrarkultur Luxembourg a.s.b.l.

25, op der Schanz

L-6225 Altrier

Tel / 26 15 13 88

E-Mail / info@ibla.lu

www.ibla.lu

Autoren / Laura Leimbrock-Rosch, David Richard, Dr. Stéphanie Zimmer und in Kooperation mit Geocoptix GmbH: Dr. Gilles Rock, Vanessa Hueffer und LTA: Ronny Krier

IBLA Projekt Team/ Laura Leimbrock-Rosch, David Richard, Dr. Stéphanie Zimmer, Jemp Schweigen, Mathieu Wolter, Gilles Altmann, Evelyne Stoll, Dr. Sabine Keßler und die Praktikanten und Studenten in den drei Projektjahren.

Dezember 2020