



Thomas Nemecek, Maria Bystricky, Sebastian Röthlin | 14. Mai 2020

Kurz-Gutachten zu Händen des BLW

Umweltwirkungen von Alternativen zur Glyphosatanwendung

Evaluation basierend auf der Ökobilanzierung

INTERN

Referenz/Aktenzeichen: nkth/byma/rosb

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Zielsetzung	2
2	Literaturanalyse	3
2.1	Evaluation des Glyphosatverzichts	3
2.2	Ökobilanzstudien zum Glyphosateinsatz	4
3	Charakterisierungsfaktoren für die Öko- und Humantoxizität	5
3.1	Humantoxizität	5
3.2	Aquatische Ökotoxizität	6
4	Vergleich der Umweltwirkungen von alternativen Verfahren	7
4.1	Vorgehen	7
4.2	Ergebnisse	9
5	Zusammenfassung und Fazit	12
	Literatur	13

Agroscope
Thomas Nemecek
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich / Schweiz
T: +41 58 468 72 54, F: +41 58 468 72 01
thomas.nemecek@agroscope.admin.ch
www.agroscope.ch | gutes Essen, gesunde Umwelt

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Der Wirkstoff Glyphosat wird in der Öffentlichkeit hinsichtlich gesundheitlicher und ökologischer Risiken kontrovers diskutiert. Die weltweite öffentliche Debatte begann mit der Einstufung von Glyphosat durch die internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) als "wahrscheinlich krebserregend für den Menschen". Darauf wurde von der Kommission für Wissenschaft, Bildung und Kultur ein Postulat eingereicht, welches Informationen zu den Auswirkungen von Glyphosat in der Schweiz verlangt. In seiner Antwort kam der Bundesrat zum Fazit, dass die Aufnahme von Glyphosat für die Ernährung für den Menschen kein Gesundheitsrisiko darstellt und dass die Rückstandsmenge in Schweizer Lebensmitteln vernachlässigbar sind. Somit würde ein Anwendungsverbot die Glyphosataufnahme nur unwesentlich verändern. Ende 2017 wurde von Adèle Thorens Goumaz (Grüne Partei Schweiz) ein Postulat (17.4059) für eine Studie zum schrittweisen Ausstieg aus der Glyphosatverwendung vorgelegt. Mit dem Hintergrund potenzieller Glyphosatverbote in EU-Ländern nahm der Nationalrat das Postulat im September 2018 an. Die Diskussion über eine weitere Regulierung, Teilverzicht oder Verbot des Wirkstoffes Glyphosat dauert an. Da das Postulat fordert, die Zweckmässigkeit eines Glyphosatausstieges im Dialog mit der Landwirtschaft zu prüfen, erarbeitete die HAFL im Auftrag des Bundesamts für Landwirtschaft (BLW) eine Studie, die sich auf Betriebsebene mit der Thematik einer Reduktion und Verzichts von Glyphosat auseinandersetzt (Keiser & Ramsebner, 2020).

Ergänzend dazu wurde die FG Ökobilanzen von Agroscope beauftragt, Abklärungen zu den möglichen Umweltfolgen aus Ökobilanz-Sicht durchzuführen. In der vorliegenden Kurz-Expertise werden die vorhandenen Grundlagen in der Ökobilanz-Literatur, Ökobilanz-Datenbanken und -Methoden hinsichtlich der Frage ausgewertet: *Welches sind die Auswirkungen alternativer Verfahren auf die Umwelt im Vergleich zu einer Glyphosat-Anwendung?*

Diese Expertise wurde wie folgt abgegrenzt:

- Es werden nur Ökobilanz-Studien analysiert. Zusätzlich werden aber auch wenige allgemeine Studien ausgewertet, welche die Wirkung von Glyphosat im Verhältnis zu dessen Alternativen evaluieren und umweltrelevante Aussagen erlauben.
- Diese Kurz-Expertise stützt sich auf bereits vorhandene Daten und Methoden.
- Es wird keine Risikoanalyse durchgeführt. Diesbezügliche Grundlagen und entsprechende Literatur wird nicht berücksichtigt.

Die Expertise besteht aus drei Elementen:

1. Analyse der Ökobilanzliteratur
2. Analyse der Charakterisierungsfaktoren für Ökotoxizität und Humantoxizität (USEtox) im Vergleich zu anderen Pestiziden oder Herbiziden.
3. Ökobilanzberechnungen zu alternativen Verfahren.

2 Literaturanalyse

2.1 Evaluation des Glyphosatverzichts

Studien mit einem Bezug zur Schweiz sind spärlich; deshalb wurden in diesem Unterkapitel hauptsächlich Studien aus den Nachbarländern berücksichtigt, welche sich explizit mit den Alternativen zum Glyphosateinsatz befassen und gewisse Aussagen zu deren Umweltwirkungen erlauben.

Kehlenbeck *et al.* (2015) evaluierten mögliche Umweltfolgen eines Glyphosatverzichts für Deutschland. Die wichtigsten Alternativen zum Glyphosateinsatz sind verschiedene Bodenbearbeitungs- und mechanische Unkrautregulierungsmassnahmen. Glyphosat ermöglicht es insbesondere, auf Pflugeinsatz und wendende Bodenbearbeitung zu verzichten und ermöglicht damit Anbausysteme ohne Pflug und ohne intensive Bodenbearbeitungsverfahren (konservierende, minimale oder reduzierte Bodenbearbeitung oder Direktsaat). Der Energiebedarf für die Bodenbearbeitung kann dadurch deutlich reduziert werden. Entsprechend werden auch die CO₂-Emissionen aus fossilen Energieträgern vermindert, mit günstiger Auswirkung auf das Klima. Schmitz *et al.* (2015) ermittelten beispielsweise für eine Zuckerrüben-Winterweizen-Wintergerste-Fruchtfolge jährlich um 0,065 t höhere CO₂-Emissionen pro Hektare durch einen höheren Dieserverbrauch, wenn die Bodenbearbeitung mit dem Pflug und nicht konservierend (mit zusätzlicher Anwendung von Glyphosat) erfolgte. Böcker *et al.* (2020) fanden eine schlechtere Energieeffizienz in Glyphosat-freien Anbausystemen von Mais. Ähnliche Ergebnisse wurden für Weizenanbau ohne Glyphosat gefunden (Böcker *et al.*, 2019). Falls jedoch Erträge vermindert sind oder mehr N-Dünger benötigt wird, können diese Einsparungen wieder zunichte gemacht werden.

Verschiedene Publikationen postulieren einen höheren Humusgehalt bei einer reduzierten Bodenbearbeitung, weil der Boden weniger gemischt und durchlüftet wird und sich dadurch der Humusabbau verlangsamt (Kehlenbeck *et al.*, 2015). Diese These ist allerdings umstritten, da sich die organische Substanz bei nichtwendender Bodenbearbeitung an der Bodenoberfläche anreichert und über das ganze Bodenprofil nicht zwingend eine Zunahme stattfindet (Baker *et al.*, 2007). Einige Publikationen postulieren höhere Lachgas-Emissionen bei reduzierter Bodenbearbeitung (Lemke *et al.*, 1999; Rochette, 2008), dieser Befund ist allerdings auch umstritten (Mallast *et al.*, 2015). Gemäss Steinkellner *et al.* (2019) wurden keine negativen Effekte auf Bodenorganismen durch den Glyphosateinsatz nachgewiesen.

Andererseits wirken sich Pflugeinsatz und intensive Bodenbearbeitung sehr negativ auf Regenwürmer und Springschwänze aus (STOATE *et al.*, 2001; MENTA, 2012; MULEWF, 2012). Sie beeinträchtigen die Struktur und mindern die Tragfähigkeit des Bodens. Auf erosionsgefährdeten Flächen wird das Erosionsrisiko massgeblich erhöht. Dabei sind sowohl Wasser- als auch Winderosion betroffen. Eine Pflugsohle kann zudem zu Verdichtungen führen, was den Wasserhaushalt stört (Kehlenbeck *et al.*, 2015). Die mechanische Bodenbearbeitung kann zu einer erhöhten Mineralisierung von Stickstoff führen. In Folge kann ev. die N-Düngung reduziert werden. So empfiehlt beispielsweise GRUD 2017 die N-Düngung zu reduzieren (in Abhängigkeit des Humusgehalts), wenn gehackt wird (Agroscope, 2017). Andererseits kann das Nitratauswaschungsrisiko nach mechanischer Bodenbearbeitung steigen (Richner *et al.*, 2014).

Als Herbizid wirkt sich Glyphosat stark auf die Biodiversität der Pflanzen und auf die damit assoziierte Biodiversität aus. Steinkellner *et al.* (2019) kommt jedoch zum Schluss, dass die Artenvielfalt durch den Glyphosateinsatz nicht stärker beeinträchtigt wird als durch vergleichbar wirksame Alternativen.

In Gewässern wurde v.a. die toxische Wirkung von Glyphosat auf Algen und Amphibien beschrieben; bei den Amphibien scheint aber v.a. das in Glyphosat-haltigen Produkten früher beigemischte Netzmittel Tallowamin ausschlaggebend (Kehlenbeck *et al.*, 2015), das nicht mehr zugelassen ist.

Kehlenbeck *et al.* (2015) präsentiert eine vergleichende Risikobewertung mit dem Modell SYNOPS. Der Einsatz für die Sikkation bei Raps wird hier nicht betrachtet, weil diese Anwendung in der Schweiz nicht zugelassen ist. Alternative Wirkstoffe für die Unkrautregulierung im Obst- und Weinbau führten zumeist zu höheren ökotoxikologischen Risiken als die Anwendung von Glyphosat (Kehlenbeck *et al.*, 2015).

2.2 Ökobilanzstudien zum Glyphosateinsatz

In diesem Abschnitt werden Ökobilanz-Studien analysiert, welche einen gewissen Vergleich der Umweltwirkungen zwischen dem Glyphosateinsatz und Alternativen erlauben. Diese wurde mittels einer Literatur-Recherche ermittelt. In der Ökobilanzliteratur gibt es nur wenige Untersuchungen, die solche Vergleiche ermöglichen.

Eine Ökobilanz des Oberackerversuchs (Schaller *et al.*, 2006; Nemecek *et al.*, 2011) verglich ein Direktsaatsystem (mit Glyphosat) mit konventionellem Pflugeinsatz über eine 6-jährige Fruchtfolge. Mit Direktsaat waren der Ertrag und auch die N-Düngung leicht erhöht. Pro Tonne TS-Ertrag ergaben sich Reduktionen verschiedener Umweltwirkungen: Energiebedarf -12%, Ozonbildung -22%, Treibhauspotenzial -7%, Eutrophierung -10%, Versauerung -13%, aquatische Ökotoxizität -20% und Humantoxizität -31%. Einzig bei der terrestrischen Ökotoxizität ergab sich ein Anstieg von +125%, hauptsächlich durch den Glyphosateinsatz. Dieser Anstieg bei der terrestrischen Ökotoxizität wurde mit der Wirkungsabschätzungsmethode EDIP97 berechnet, wurden aber von den ebenfalls angewandten alternativen Wirkungsabschätzungsmethoden (CML01, CST95) und auch von späteren Studien nicht bestätigt (z.B. Prechsl *et al.*, 2017). Die Direktsaat wirkte sich zudem positiv auf die Bodenqualität aus. Die Regenwurmbiomasse und das Grobporenvolumen konnten in der Direktsaat im Vergleich zum Pflug erhöht werden.

Prechsl *et al.* (2017) verglichen Anbausysteme anhand des FAST-Versuchs mit der Ökobilanzmethodik. Die untersuchten Anbausysteme waren: ÖLN mit Pflug, ÖLN pfluglos, Bio mit Pflug und Bio mit reduzierter Bodenbearbeitung. Pro Hektare waren das Treibhauspotenzial, die Eutrophierung, die Versauerung und die aquatische Ökotoxizität bei ÖLN pfluglos im Vergleich zu ÖLN mit Pflug leicht reduziert; diese Unterschiede wurden aber durch die leicht tieferen Erträge wieder ausgeglichen. Die Methode SALCA-Biodiversität ergab keine Unterschiede zwischen Pflug und Direktsaat. Die reduzierte Bodenbearbeitung bei Bio führte teilweise zu deutlich tieferen Erträgen, und entsprechende höheren Umweltwirkungen als Bio mit Pflug.

Villanueva-Rey *et al.* (2014) verglichen in einer Ökobilanzstudie drei verschiedene Weinbau-Techniken, biodynamisch, konventionell sowie einen Mittelweg. Für den biodynamischen Weinbau wurden unter anderem Herbizide wie Glyphosat durch menschliche Handarbeit ersetzt. Daraus resultierten günstigere Umweltwirkungen für den biodynamischen Anbau, mit Ausnahme einer sinkenden Flächeneffizienz und der steigenden Handarbeit.

Cerutti *et al.* (2015) betrachteten Ökobilanzstudien zum Obstbau. Sie verwiesen auf Nachauflauf-Herbizide wie Glyphosat als umweltfreundlichste Methode zur Kontrolle des Unkrautes, da das Unkraut über Winter nachwachsen kann und der Boden dadurch nicht durchgehend unbedeckt ist. Dadurch soll mehr Biomasse zurück in den Boden gelangen, was die Bodenaktivität anregt. Das Mulchen wird als umweltfreundliche Alternative genannt, jedoch ist noch wenig über dessen Einfluss auf die biologische Aktivität und Nährstoffverfügbarkeit in den Plantagen bekannt. Ebenfalls mit Obstbau beschäftigte sich die Studie von Longo *et al.* (2017). Sie untersuchte die Umweltwirkungen von biologischem und konventionellem Anbau von Äpfeln mit Ökobilanzmethoden. Gegen Unkraut wurden im konventionellen Anbau Mulch und Herbizide (MCPA und Glyphosat) verwendet, während im biologischen Anbau das Mulchen, Pflügen und Bürstmaschinen eingesetzt wurden. Dies führte zu einem um knapp 50% höherem Energieverbrauch des biologischen Land-Managements verglichen mit der konventionellen Methode.

Humbert *et al.* (2007) verglichen die Human- und aquatische Ökotoxizität von den 30 in Costa Rica am häufigsten eingesetzten Pestiziden, darunter Glyphosat, mithilfe von zwei Ökobilanzmodellen. Dabei wurde Glyphosat als eine jener Substanzen hervorgehoben, welche andere Pestizide mit höherer Toxizität ersetzen könnten, um die Umweltwirkungen deutlich zu senken. Im Ranking der 30 Substanzen von hoch nach Tief befand sich Glyphosat auf Platz 24 für Humantoxizität und auf Platz 20 für aquatische Ökotoxizität. Rosenbaum *et al.* (2011) untersuchten die Modellierung der Human- und aquatischen Ökotoxizität von Pestiziden mit dem USEtox Modell. Dabei wurde Glyphosat als eine der Beispielsubstanzen verwendet, um das Modell zu erklären und die wichtigen Mechanismen zu identifizieren. Dabei wird auf die geringe Aufnahme von Glyphosat via tierische Produkte verwiesen, wodurch es mehrheitlich über das Trinkwasser aufgenommen wird.

3 Charakterisierungsfaktoren für die Öko- und Humantoxizität

Die Wirkungsabschätzungsmethoden in der Ökobilanz verwenden sogenannte Charakterisierungsfaktoren. Ein Beispiel sind CO₂-Äquivalente, welche verschiedene Treibhausgase in derselben Einheit ausdrücken, wodurch sich ihre Wirkung vergleichen und addieren lässt. In diesem Kapitel werden die Charakterisierungsfaktoren für die Human- und Ökotoxizität ausgewertet. Dabei geht es um die Frage, wie die Toxizität von Glyphosat im Vergleich zu anderen Wirkstoffen einzustufen ist.

3.1 Humantoxizität

Fantke *et al.* (2016) präsentierten eine Abschätzung von Charakterisierungsfaktoren (CF) für die Wirkung von 875 Pestiziden auf die Humantoxizität. Dabei werden folgende Austrags- und Wirkungspfade berücksichtigt:

- Austrag in die Gewässer und Aufnahme über Trinkwasser
- Rückstände auf den Erntegütern (Blätter, Früchte, Stengel und Wurzeln/Knollen) und Aufnahme über die Nahrung. Dabei wird die Reduktion der Rückstände bei der Nahrungsmittelverarbeitung mit Verarbeitungskoeffizienten berücksichtigt.
- Emissionen in die Luft und anschliessende Inhalation.

Diese drei Wirkungspfade werden addiert. Berücksichtigt werden die Verteilung der Pestizide in der Umwelt (inkl. Abbau), sog. *fate*, die Exposition und der Effekt (d.h. die Toxizität). Die Berechnung erfolgt mit dem dynamiCROP-Modell und die Bewertung der Wirkung mit USEtox, der von der EU empfohlenen Methode für Ökobilanzen. Bei der Wirkung auf die menschliche Gesundheit wird zwischen *cancer* und *non-cancer* Wirkungen unterschieden. Bei vielen Pestiziden gibt es keine Charakterisierungsfaktoren für die Kanzerogenität; dies ist auch bei Glyphosat der Fall, d.h. dass eine mögliche Kanzerogenität bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt ist. Da die Rückstände auf den Nahrungsmitteln vom Anwendungszeitpunkt, Erntezeitpunkt, der Kultur und den verzehrten Pflanzenteilen abhängt, werden CFs für sechs Archetypen von Kulturen berechnet:

- Weizen: Getreide, Getreidekulturen
- Paddy-Reis: Kulturen in überfluteten Feldern
- Tomate: Krautartige Früchte und Gemüse
- Apfel: Obst von Fruchtbäumen
- Salat: Blattgemüsekulturen
- Kartoffel: Wurzel- und Knollenfrüchte

Die Berechnung erfolgt jeweils systematisch für alle Wirkstoffe bei allen Kulturen, unabhängig davon, ob diese zugelassen sind oder auch angewendet werden.

Tabelle 1 stellt die Auswertung der Charakterisierungsfaktoren aus Fantke *et al.* (2016) pro kg ausgebrachte Wirkstoffmenge dar. Dabei wird der CF für Glyphosat zuerst allen Pestiziden, anschliessend allen Herbiziden gegenübergestellt. Der Quantilswert von Glyphosat bewegt sich zwischen 0.4% und 7.1% des Wertes aller Pestizide, bzw. zwischen 2.0% und 8.2% aller Herbizide. Der Wert von 3.0% für Glyphosat innerhalb aller Herbizide bedeutet beispielsweise, dass 3% der Herbizide eine tiefere und 97% eine höhere Wirkung pro kg Wirkstoff aufweisen. Weiter wird der CF von Glyphosat mit dem Median (50%-Quantil) und dem arithmetischen Mittelwert verglichen. Die Mediane und Mittelwerte für alle Pestizide liegen höher, als die Werte für alle Herbizide. Im Vergleich zum Median liegen alle Glyphosat-Werte ausser jene für Kartoffeln unter 1%. Im Vergleich zum Mittelwert liegen sämtliche Werte tiefer als 1%, viele sind nahe bei Null. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Verteilung der CFs aller Pestizide extrem schief ist. Es gibt wenig sehr hohe Werte, was sich im Mittelwert stark niederschlägt. Die höchsten und tiefsten CFs unterscheiden sich um neun Grössenordnungen (10⁹) für die Pestizide und sechs Grössenordnungen (10⁶) für die Herbizide!

Aufgrund dieser Daten ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass bei einem Ersatz von Glyphosat durch die gleiche Menge eines anderen Herbizids sich die Humantoxizität erhöht.

Bei dieser Grob-Analyse sind allerdings folgende Aspekte nicht berücksichtigt:

INTERN

Referenz/Aktenzeichen: nkth/byma/rosb

- Ob die Wirkstoffe (noch) zugelassen sind,
- Die unterschiedlichen Aufwandmengen pro Behandlung und
- Eine mögliche Kanzerogenität von Glyphosat.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Charakterisierungsfaktoren (CF, cases/kg_{applied}) für die Humantoxizität aus Fantke *et al.* (2016).

		Weizen	Reis	Tomaten	Äpfel	Kartoffeln	Salat
	CF Glyphosat	2.50E-08	1.01E-08	4.06E-08	2.46E-08	8.72E-09	3.21E-08
Pestizide	Quantil Glyphosat in allen Pestiziden	5.2%	2.1%	0.4%	0.7%	7.1%	4.0%
	CF Median aller Pestizide	8.43E-06	9.96E-05	6.41E-04	2.81E-04	2.87E-07	2.00E-03
	Glyphosat in % des Medians aller Pestizide	0.30%	0.01%	0.01%	0.01%	3.04%	0.00%
	CF Mittelwert aller Pestizide	2.13E-03	1.09E-02	1.83E-02	1.74E-02	1.39E-05	4.50E-02
	Glyphosat in % des Mittelwerts aller Pestizide	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.063%	0.000%
Herbizide	Quantil Glyphosat in allen Herbiziden	3.0%	2.0%	2.0%	2.0%	8.2%	5.1%
	CF Median alle Herbizide	3.61E-06	8.28E-05	6.57E-05	2.09E-05	1.61E-07	3.60E-05
	Glyphosat in % des Medians aller Herbizide	0.69%	0.01%	0.06%	0.12%	5.41%	0.09%
	CF Mittelwert aller Herbizide	3.04E-05	6.48E-04	4.48E-04	1.55E-04	1.12E-06	3.86E-04
	Glyphosat in % des Mittelwerts aller Herbizide	0.08%	0.00%	0.01%	0.02%	0.78%	0.01%

3.2 Aquatische Ökotoxizität

Für die Abschätzung der aquatischen Ökotoxizität (Süßwasser-Ökotoxizität oder *freshwater ecotoxicity*) standen aus dem Projekt TWILCA angepasste CFs zur Verfügung (Bystricky *et al.*, 2020).

Die Verteilung in der Umwelt nach der Ausbringung wurde mit dem PestLCI-Konsensmodell berechnet. Dabei kommt die sog. Primärverteilung zur Anwendung, welche die Verteilung wenige Stunden nach der Anwendung auf die Luft, die Pflanzen, den Boden im Feld, und Flächen ausserhalb des Feldes durch Drift (*off-field surfaces*) beschreibt. Diese Verteilung wurde mit dem CFs aus USEtox V2.11 kombiniert (www.usetox.org; Rosenbaum *et al.*, 2008). USEtox ist ein Modell mit elf Umweltkompartimenten und beschreibt die Gleichgewichtsverteilung in der Umwelt. Die so ermittelten CFs werden nachfolgend analysiert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Vergleich des Charakterisierungsfaktors (CF) für Glyphosat, mit den anderen Pestiziden pro kg ausgebrachte Wirkstoffmenge. PAF = *potentially affected fraction*

	Wert	Einheit
CF Glyphosat	71.8	PAF*m ² *d/kg _{applied}
Quantil	40%	%
CF Median aller Pestizide	166.9	PAF*m ² *d/kg _{applied}
Glyphosat in % des Medians	43%	%
CF Mittelwert aller Pestizide	4850.0	PAF*m ² *d/kg _{applied}
Glyphosat in % des Mittelwerts	1.5%	%

Der Wert für Glyphosat liegt auf der 40% Perzentile, d.h. 40% der Pestizide haben tiefere Wert und 60% höhere. Bei einem Ersatz von Glyphosat durch einen anderen Wirkstoff kann die Wirkung auf die aquatische Ökotoxizität daher höher oder tiefer sein, je nach gewähltem Wirkstoff.

Im Vergleich zum Median liegt Glyphosat bei 43%, im Vergleich zum Mittelwert bei 1.5%.

4 Vergleich der Umweltwirkungen von alternativen Verfahren

4.1 Vorgehen

Mit Hilfe von Expertenwissen (HAFL, Agroscope) und basierend auf Vorschlägen von Landwirten wurde eine Liste von möglichen Alternativverfahren zum Glyphosateinsatz erstellt. Grundlagen dafür sind in Keiser & Ramsebner (2020) zu finden. Diese Vorschläge wurden mit Judith Wirth (Agroscope) und Nicole Ramsebner (HAFL) validiert. Daraus wurden jene Verfahren ausgewählt, zu denen aus den Datenbanken SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) und ecoinvent v3.5 (ecoinvent Centre, 2018) Ökoinventare zur Verfügung standen. Damit konnten Umweltwirkungen jedes Verfahrens berechnet und mit einer Glyphosatbehandlung verglichen werden. Die Bezugsgrösse (funktionelle Einheit) war dabei 1 ha bearbeitete Fläche, da hier Verfahren verglichen werden¹. In die Systemgrenze einbezogen wurde die Produktion der Maschinen und Geräte und der Pestizidwirkstoffe, die Bereitstellung von Treibstoff, die Abgase und weitere Emissionen während des Arbeitsgangs sowie der Austrag der eingesetzten Pflanzenschutzmittel in Boden, Luft und Wasser. Tabelle 3 listet die Alternativverfahren auf, die betrachtet wurden, und die Glyphosatanwendung, mit der die Alternativverfahren jeweils verglichen wurden. Aufgrund der Datenverfügbarkeit beziehen sich die alternativen Verfahren auf den Ackerbau und den Grünlandumbruch. Für die alternativen Verfahren im Obst- und Rebbau fehlten die entsprechenden Ökoinventare; daher konnten diese nicht untersucht werden.

Ausserdem wurden die Umweltwirkungen von 1 ha Winterweizen-, Winterraps- und Silomaisanbau berechnet und ins Verhältnis gesetzt zur Wirkung eines Durchgangs der betrachteten Pflanzenschutzverfahren. Die Ökoinventare zu Weizen, Raps und Mais stammen aus der SALCA-Datenbank und repräsentieren den ÖLN-Anbau, nicht extenso, im Talgebiet. Sie umfassen den Ressourcenbedarf und die Emissionen der Bereitstellung von Infrastruktur, Energieträgern, Saatgut, Pflanzenschutzmitteln und Düngemitteln sowie die Emissionen, die direkt auf der Anbaufläche entstehen. Damit lassen sich die ermittelten Unterschiede zwischen den Verfahren im Kontext einer typischen Produktion einordnen.

¹ Ein Vergleich pro kg Produkt würde die relativen Umweltwirkungen nicht ändern, sofern die Verfahren zu denselben Erträgen führen (d.h. die gleiche Wirksamkeit in der Unkrautregulierung aufweisen).

INTERN

Referenz/Aktenzeichen: nkth/byma/rosb

Tabelle 3: Pflanzenschutzverfahren für die Berechnung von Umweltwirkungen. Dg = Durchgang bzw. Durchgänge.

		Alternativverfahren		Glyphosatanwendung	
		Produkt / Arbeitsgang	Menge	Produkt / Arbeitsgang	Menge
Vernichtung von Gründung und Graslandumbrüche	Pflügen	Pflügen	1 Dg	Glyphosat	1.5 kg/ha
		Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg		
	Fräsen	Fräsen	2.5 Dg	Glyphosat	1.5 kg/ha
		Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg		
Vorsaatbehandlung	Generell	Grubbern	1 Dg	Glyphosat	1.5 kg/ha
		Eggen mit Kreiselegge	1 Dg	Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg
		Eggen mit Federzinkenegge	1 Dg	Grubbern	1 Dg
		Hackstriegeln	1 Dg	Eggen mit Kreiselegge	1 Dg
	Vor Streifenfrässaat von Mais	Pflügen	1 Dg	Glyphosat	1.5 kg/ha
		Eggen mit Kreiselegge	1 Dg	Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg
Nacherntebehandlung	Stoppelbearbeitung Getreide	Eggen mit Federzinkenegge	1.5 Dg	Glyphosat	1.5 kg/ha
		Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg		
	Stoppelbearbeitung Raps	Eggen mit Federzinkenegge	2.5 Dg	Glyphosat	1.5 kg/ha
		Mulchen	1 Dg	Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg
	Behandlung von Problemunkräutern ²	Dicamba	0.24 kg/ha	Glyphosat	1.5 kg/ha
		Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg	Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg
Generelle Anwendungen	Abflammen	Abflammen	1 Dg	Glyphosat	1.5 kg/ha
		Pflanzenschutzmittel ausbringen	1 Dg		

Die SALCA-Methodik berechnet standardmässig eine Reihe von Umweltwirkungen (vgl. Roesch *et al.*, 2016). Von diesen wurden diejenigen ausgewählt, bei denen Bodenbearbeitungsprozesse, die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln oder die eingesetzten Pflanzenschutzwirkstoffe einen deutlichen Anteil an der Wirkung des Schweizer Ackerbaus ausmachen. Um diese Auswahl zu treffen, wurden Daten aus

² Ackerwinde, Rumex-Arten und Zauwinde

INTERN

Referenz/Aktenzeichen: nkth/byma/rosb

einer früheren Arbeit (Bystricky *et al.*, 2017) verwendet. In dem dort untersuchten Referenzszenario für den Schweizer Agrarsektor im Jahr 2025 wurde unter anderem der Schweizer Ackerbau mit den wichtigsten Kulturen abgebildet. Dessen Umweltwirkungen wurden berechnet und dann analysiert, zu welcher Umweltwirkung die oben genannten Feldarbeitsprozesse resp. die Pflanzenschutzwirkstoffe über 2 % beitrugen. Dies ergab die folgenden Umweltwirkungen:

- Bedarf an nicht erneuerbaren Energieressourcen
- Bedarf abiotischer Ressourcen
- Treibhauspotenzial
- Neubildung von Ozon in der Troposphäre (Ozonbildung)
- Versauerungspotenzial
- Süswasser-Ökotoxizität³ anorganischer Stoffe
- Süswasser-Ökotoxizität organischer Stoffe

Diese wurden verwendet, um die Alternativverfahren zum Glyphosateinsatz zu bewerten.

4.2 Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt für die verschiedenen Umweltwirkungen, wie stark die untersuchten Alternativverfahren von der Glyphosatanwendung (100 %-Linie) abweichen. Es wird deutlich, dass alle Alternativverfahren bei der Süswasser-Ökotoxizität organischer Stoffe günstiger abschnitten. Diese lag dort in den meisten Fällen nahe bei 0, da die Wirkung hauptsächlich von Pflanzenschutzwirkstoffen bestimmt wird. Die Verwendung von Dicamba brachte hier eine höhere Wirkung als die übrigen Alternativverfahren, aber sie war immer noch deutlich tiefer als die Wirkung von Glyphosat (-83%). Dies lag daran, dass deutlich weniger Dicamba ausgebracht wurde als Glyphosat; ausserdem hat Glyphosat pro Kilogramm Wirkstoff eine höhere Wirkung auf die Süswasser-Ökotoxizität als Dicamba.

Bei allen anderen Umweltwirkungen schnitten die meisten Alternativverfahren ungünstiger ab als die Glyphosatanwendung. Die Abweichungen schwankten zwischen dem 1- und dem 14-fachen. Dies war auf den höheren Einsatz von Maschinen und Energieträgern zurückzuführen. Vor allem Bodenbearbeitungsprozesse wie Pflügen oder Grubbern resp. der Einsatz von Flüssiggas beim Abflamm-Verfahren hatten eine ungünstige Wirkung.

Das Verfahren "Vorsaatanwendung andere: Mechanische Saatbettbereitung" war bei den meisten Umweltwirkungen ähnlich wie die Glyphosatbehandlung. Das lag daran, dass in diesem Fall die Glyphosatbehandlung ebenfalls Bodenbearbeitungsprozesse mit dem entsprechend hohen Maschinen- und Treibstoffbedarf enthielt (siehe Tabelle 3). Die Umweltwirkungen dieser Glyphosat-Variante lagen deutlich höher als bei der jeweiligen Glyphosat-Variante, mit der die übrigen Alternativverfahren verglichen wurden.

Der Einsatz von Dicamba gegen Problemunkräuter schnitt bei fast allen Umweltwirkungen günstiger ab als der Glyphosateinsatz. Da mengenmässig mehr Glyphosat eingesetzt wurde als Dicamba, hatte die Produktion des Pflanzenschutzmittels eine höhere Wirkung, ausser beim Bedarf abiotischer Ressourcen; dort werden für die Produktion von Dicamba Bromin- und Iodin-Ressourcen eingesetzt, welche für Glyphosat nicht benötigt werden.

³ *Freshwater ecotoxicity* oder aquatische Ökotoxizität

INTERN

Referenz/Aktenzeichen: nkth/byma/rosb

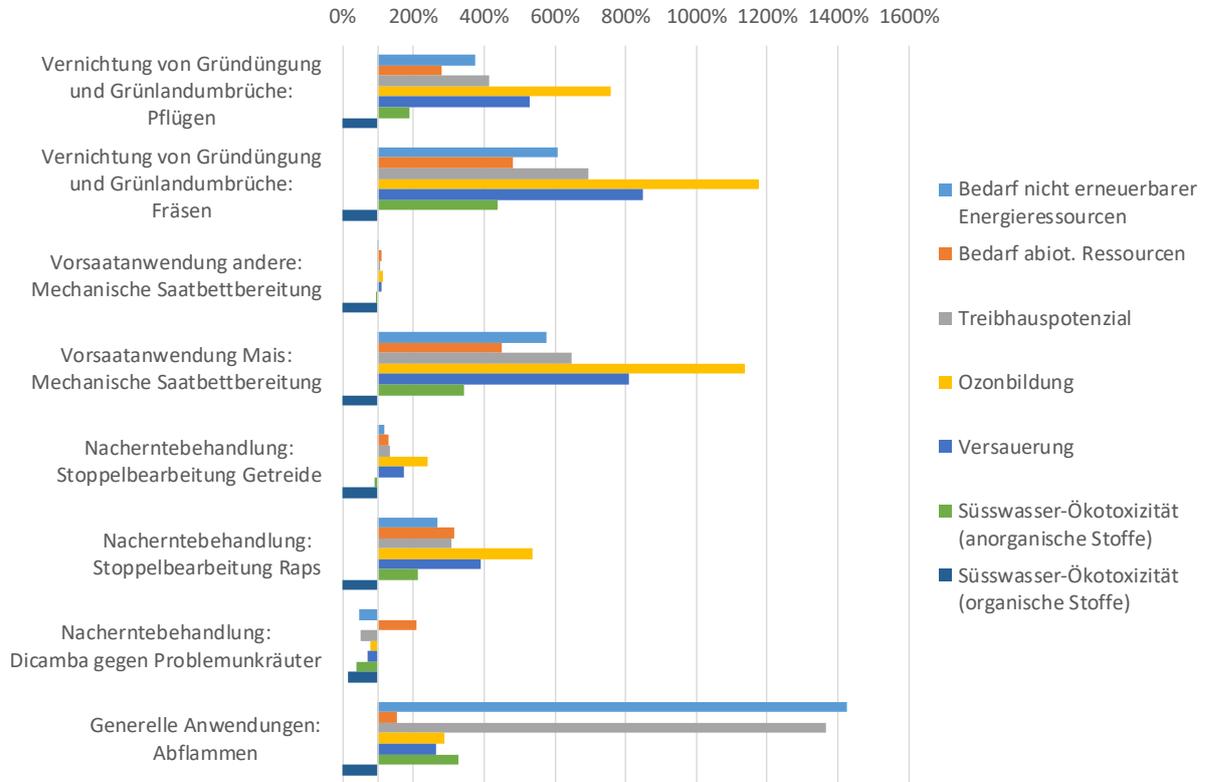


Abbildung 1: Abweichung der Umweltwirkungen von Alternativverfahren von jenen der Glyphosatanwendung (100 %) (Beschreibung der Verfahren siehe Tabelle 3).

Abbildung 2 zeigt, wie hoch die Umweltwirkungen der Pflanzenschutzverfahren pro Hektare sind im Vergleich zu einer Hektare Anbau von Winterweizen, Wintermais und Silomais. Bei jeder Umweltwirkung wird die 100 %-Marke durch das jeweils höchste Ergebnis gebildet. Es wird deutlich, dass die verschiedenen Pflanzenschutzverfahren im Verhältnis zum Anbau einer Kultur auf 1 ha Fläche eine beträchtliche Wirkung ausmachen können. Die Wahl des Pflanzenschutzverfahrens könnte sich potenziell deutlich auf das Abschneiden ganzer Anbauverfahren auswirken, vor allem, wenn sich dadurch die Art und Anzahl der Bodenbearbeitungsprozesse stark ändert. Dies gilt für die hier betrachteten Umweltwirkungen. Andere Wirkungen, wie Flächenbedarf, Wasserknappheit oder Nährstoffausträge in andere Ökosysteme, sind ebenfalls für den Anbau von Ackerkulturen relevant, werden aber weniger stark von Pflanzenschutz und Bodenbearbeitung beeinflusst. Der negative Wert für die Süswasser-Ökotoxizität anorganischer Stoffe bei Silomais kommt dadurch zustande, dass durch die Silomais-Ernte mehr Schwermetalle abgeführt werden, als mit einer durchschnittlichen Bewirtschaftung (hauptsächlich Eintrag durch Dünger) zugeführt werden. Dadurch resultiert ein Netto-Austrag aus dem Boden für verschiedene Schwermetalle, welcher sich jedoch über eine ganze Fruchtfolge ausgleicht und in einen Netto-Eintrag umwandelt.

INTERN

Referenz/Aktenzeichen: nkth/byma/rosb

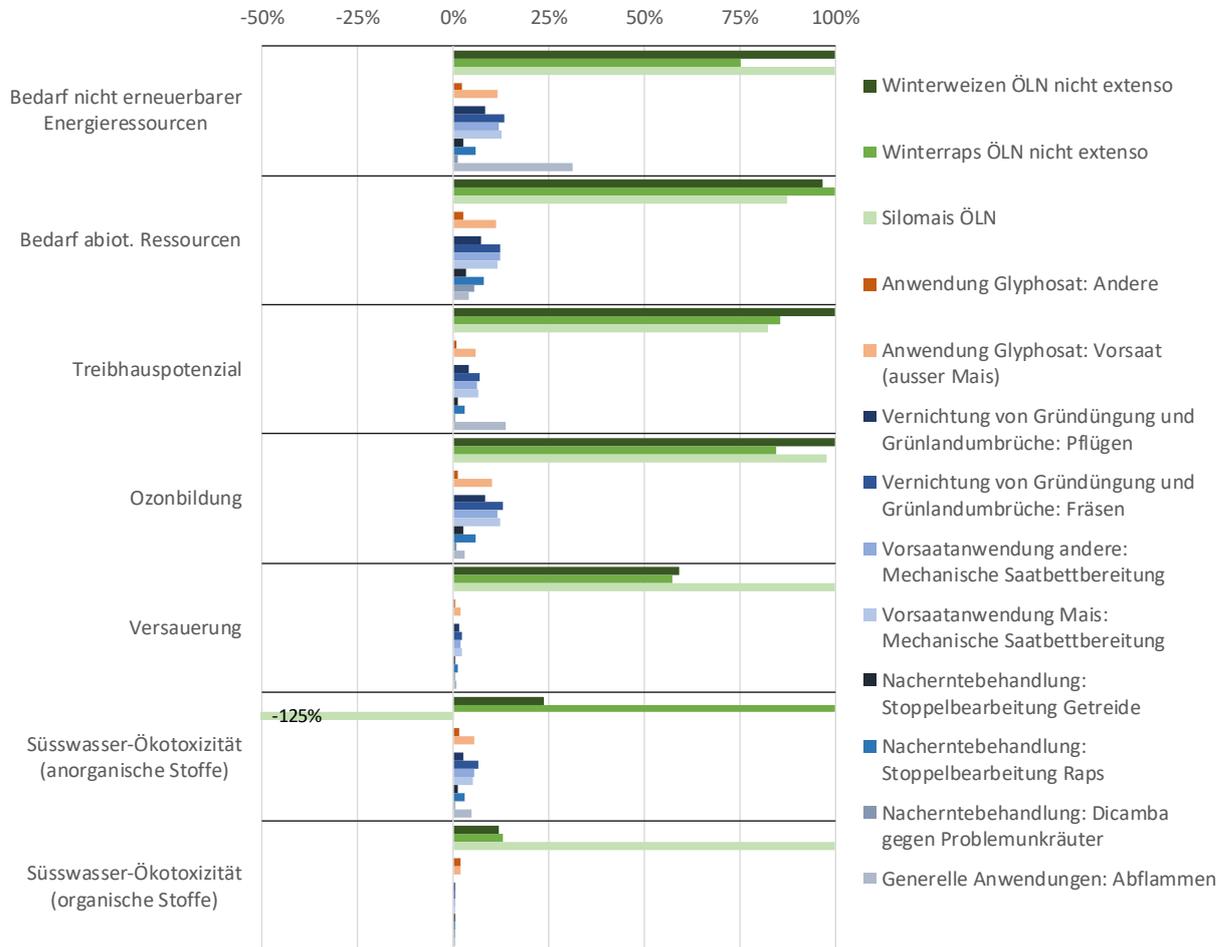


Abbildung 2: Umweltwirkungen des Anbaus von Winterweizen, Winterraps und Silomais sowie von Glyphosatanwendungen und Alternativverfahren pro Hektare Fläche. Die 100 %-Marke wird bei jeder Umweltwirkung jeweils vom höchsten Wert pro Hektare gebildet.

5 Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden Expertise wurden die vorhandenen Grundlagen in der Ökobilanz-Literatur, Ökobilanz-Datenbanken und -Methoden hinsichtlich der Frage ausgewertet: Welches sind die Auswirkungen alternativer Verfahren auf die Umwelt im Vergleich zu einer Glyphosat-Anwendung?

Die Expertise besteht aus drei Elementen: 1) Analyse der Ökobilanzliteratur, 2) Analyse der Charakterisierungsfaktoren für Ökotoxizität und Humantoxizität in der Methode USEtox im Vergleich zu anderen Pestiziden oder Herbiziden, und 3) Abschätzung der Umweltwirkungen alternativer Verfahren mittels Ökobilanzen.

Auswertung der Literatur: Die wichtigsten Alternativen zur Glyphosat-Anwendung sind mechanische Verfahren der Unkrautbekämpfung. Diese sind in der Regel mit einem höheren Aufwand an fossiler Energie mit entsprechendem höheren Treibhauspotenzial verbunden. Die Anwendung von Glyphosat muss im Zusammenhang mit Methoden und Anbausystemen mit konservierender Bodenbearbeitung gesehen werden (Direktsaat, Mulchsaat, reduzierte Bodenbearbeitung, etc.), welche ein vollständiger Verzicht auf Glyphosat stark erschweren würde. Dadurch würden Vorteile konservierender Bodenbearbeitung für die Umwelt (tieferer Energiebedarf, geringeres Treibhauspotenzial, höherer Humusgehalt, Schutz vor Erosion, bessere Bodenstruktur, mehr Regenwürmer) wegfallen oder zumindest reduziert. In der Literatur sind folgende mögliche Folgen eines Glyphosatverzichts und der sich daraus ergebenden intensiveren Bodenbearbeitung beschrieben: geringere Abundanz von Regenwürmern und Springschwänzen und eine Verschlechterung der Bodenstruktur. Viele Studie nennen auch einen geringeren Humusgehalt; dieser Befund ist allerdings umstritten. Ferner werden die Erosionsgefahr und das Nitratauswaschungsrisiko erhöht. Für die Biodiversität wurde kein Unterschied festgestellt; alle Unkrautbekämpfungsmassnahmen wirken sich da ungünstig aus. Auf der anderen Seite fördert eine intensivere Bodenbearbeitung die N-Mineralisierung, was zu Einsparung von N-Düngern führen kann. Teilweise können auch die Lachgasemissionen bei Minimalbodenbearbeitung erhöht sein.

Die vorhandenen Ökobilanzstudien finden mehrheitlich höhere Umweltwirkungen durch Alternativen zum Glyphosateinsatz, v.a. beim Energiebedarf und bei der Treibhausgasen. Auch bei anderen Umweltwirkungen wurden vorwiegend ungünstige Auswirkungen der Alternativen zum Glyphosateinsatz beschrieben. Jene Studien, welche die Bodenqualität untersucht haben, zeigen Nachteile des Glyphosatverzichts auf die Bodenqualität. Im Vergleich zu chemischen Alternativen schneidet Glyphosat mehrheitlich günstiger ab.

Auswertung der Wirkungskoeffizienten: Ein Vergleich der Charakterisierungsfaktoren (Wirkungskoeffizienten) von Glyphosat mit anderen Wirkstoffen zeigt, dass über 90% der Pestizide pro kg Wirkstoff eine höhere Wirkung auf die Humantoxizität haben als Glyphosat. Glyphosat liegt dabei auf den Quantilen 0.4%-8.2%, das bedeutet, dass die Wirkung bei den meisten Ersatzwirkstoffen höher liegen dürfte als bei Glyphosat. Dabei ist aber eine mögliche Kanzerogenität von Glyphosat nicht berücksichtigt. Bezüglich der aquatischen Ökotoxizität liegt die Wirkung von Glyphosat eher im Mittelfeld (40. Perzentile) und der Charakterisierungsfaktor entspricht 1.5% des Mittelwerts aller Wirkstoffe. Die Wirkung von Ersatzwirkstoffen kann also höher oder tiefer sein, als jene von Glyphosat.

Ökobilanz alternativer Verfahren: Für die folgenden Anwendungen von Glyphosat wurden eines oder mehrere Alternativverfahren definiert: Vernichtung von Gründüngung und Graslandumbrüche, Vorsaatbehandlung, Nacherntebehandlung und generelle Anwendungen. Mangels Datengrundlage konnten Anwendungen im Obst- und Rebbau nicht berücksichtigt werden. Ein Vergleich der Umweltwirkungen zeigt, dass die Alternativen – mit Ausnahme der Süsswasser-Ökotoxizität – ungünstiger abschneiden. Die Umweltwirkungen steigen teilweise markant an (bis zu 14x höher). Diese Unterschiede sind im Vergleich mit den gesamten Umweltwirkungen des Anbaus von Weizen, Raps und Silomais relevant.

INTERN

Referenz/Aktenzeichen: nkth/byma/rosb

Schlussfolgerung

Aufgrund der uns bekannten Ökobilanzstudien und der vorhandenen Alternativen gibt es keine ökologisch gesehen schwerwiegende Begründung für einen Verzicht auf Glyphosat. Zwar würde sich die Süsswasserökotoxizität bei nicht-chemischen Alternativen deutlich bessern, dies aber um den Preis einer Verschlechterung in mehreren anderen Umweltbereichen (vor allem Energie, Klima und Boden), Um diese Trade-Offs im Umweltbereich zu beheben, sind signifikante Fortschritte bei den Alternativen erforderlich.

Literatur

- Agroscope, 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz. Spezialpublikation Agrarforschung Schweiz, Juni 2017.
- Baker J.M., Ochsner T.E. Venterea R.T. & Griffis T.J., 2007: Tillage and soil carbon sequestration – What do we really know? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118, 1-5.
- Böcker T, Britz W, Möhring N, Finger R, 2020. An economic and environmental assessment of a glyphosate ban for the example of maize production. *European Review of Agricultural Economics* 47, 371–402.
- Böcker T, Möhring N, Finger R, 2019. Herbicide free agriculture? A bio-economic modelling application to Swiss wheat production. *Agricultural Systems* 173, 378–392.
- Bundesrat, 2018. Studie über die Auswirkungen von Glyphosat in der Schweiz. Bericht des Bundesrates, 9. Mai 2018, 14p. https://www.blv.admin.ch/dam/blv/de/dokumente/lebensmittel-und-ernaehrung/lebensmittelsicherheit/stoffe-im-fokus/glyphosat-bericht-bundesrat.pdf.download.pdf/Glyphosat_Bericht_Bundesrat_DE.pdf
- Bystricky M., Nemecek T., Gaillard G., 2017. Gesamt-Umweltwirkungen als Folge von Gewässerschutzmassnahmen im Schweizer Agrarsektor. *Agroscope Science* 50, Agroscope, Zürich.
- Bystricky M., Nemecek T., Krause S., Gaillard G., 2020 (in Vorbereitung). Potenzielle Umweltfolgen einer Umsetzung der Trinkwasserinitiative. *Agroscope Science*.
- Cerutti, A.K., Beccaro, G.L., Bosco, S., Luca, A.I. de, Falcone, G., Fiore, A., Iofrida, N., Lo Giudice, A., & Strano, A., 2015. Life Cycle Assessment in the Fruit Sector. In B. Notarnicola, R. Salomone, L. Petti, P.A. Renzulli, R. Roma, & A.K. Cerutti (Eds.), *Life Cycle Assessment in the Agri-food Sector: Case Studies, Methodological Issues and Best Practices* (pp. 333–388). Cham: Springer International Publishing.
- ecoinvent Centre (2018) ecoinvent Data - The Life Cycle Inventory Data V3.5. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. www.ecoinvent.org
- Fantke P. & Jolliet O., 2016. Life cycle human health impacts of 875 pesticides. *International Journal of Life Cycle Assessment* 21: 722-733.
- Humbert, S., Margni, M., Charles, R., Salazar, O.M.T., Quirós, A.L., & Jolliet, O., 2007. Toxicity assessment of the main pesticides used in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118, 183–190.
- Keiser A. & Ramsebner N., 2020. Studienauftrag Glyphosat. Bericht z.H. des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW), Mai 2020, 83p.
- Kehlenbeck H, Saltzmann J, Schwarz J, Zwerger P, Nordmeyer H, Roßberg D, Karpinski I, Strassemeyer J, Golla B, Freier B, 2015. Folgenabschätzung für die Landwirtschaft zum teilweisen oder vollständigen Verzicht auf die Anwendung von glyphosathaltigen Herbiziden in Deutschland. Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Quedlinburg.
- Lemke R.L., Izaurralde R.C., Nyborg M. & Solberg E.D., 1999: Tillage and N source influence soil-emitted nitrous oxide in the Alberta Parkland region. *Canadian Journal of Soil Science* 79, 15-24.
- Longo, S., Mistretta, M., Guarino, F., & Cellura, M., 2017. Life Cycle Assessment of organic and conventional apple supply chains in the North of Italy. *Journal of Cleaner Production* 140, 654–663.

INTERN

Referenz/Aktenzeichen: nkth/byma/rosb

- Mallast J., Rühlmann J. & Steinmann H.-H., 2015: Wird »Pfluglos« überbewertet? DLG-Mitteilungen 6, 58-60.
- Menta C., 2012. Soil fauna diversity – Function, soil degradation, biological indices, soil restoration. Parma, Department of Evolutionary and Functional Biology: 36.
- MULEWF, 2012: Bodenbearbeitungssysteme im Fokus von Ökonomie und Ökologie. Handreichung für eine differenzierte Beurteilung. Mainz, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten: 121.
- Nemecek, T., Huguenin, O., Dubois, D., Gaillard, G., Schaller, B. & Chervet, A., 2011. Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. *Agricultural Systems*, 104: 233-245.
- Prechsl U.E., Wittwer R., van der Heijden M.G.A., Lüscher G., Jeanneret P. & Nemecek T., 2017. Assessing the environmental impacts of cropping systems and cover crops: Life cycle assessment of FAST, a long-term arable farming field experiment. *Agricultural Systems* 157, 39-50.
- Richner W., Oberholzer H.-R., Freiermuth Knuchel R., Huguenin-Elie O., Ott S., Nemecek T., Walther U., 2014. Modell zur Beurteilung der Nitratauswaschung in Ökobilanzen - SALCA-NO₃, unter Berücksichtigung der Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, N-Düngung), der mikrobiellen Nitratbildung im Boden, der Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen und verschiedener Bodeneigenschaften. Version 2.0; Juni 2014. *Agroscope Science* 5, 28p.
- Rochette P., 2008. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil and Tillage Research* 101, 97-100.
- Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M.A.J., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H.F., MacLeod M., Margni M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., van de Meent D. & Hauschild M.Z., 2008. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 532-546.
- Rosenbaum R.K., Huijbregts M.A.J. Henderson A.D., Margni M., McKone T.E., van de Meent D., Hauschild M.Z., Shaked, S., Li D.S., Gold L.S. & Jolliet O., 2011. USEtox human exposure and toxicity factors for comparative assessment of toxic emissions in life cycle analysis: sensitivity to key chemical properties. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16, 710–727.
- Schaller B., Nemecek T., Streit B., Zihlmann U., Chervet A. & Sturny W.G., 2006. Vergleichsökobilanz bei Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* 13: 482-487.
- Schmitz M. & Garvert H., 2012. Die ökonomische Bedeutung des Wirkstoffes Glyphosat für den Ackerbau in Deutschland. *Journal für Kulturpflanzen* 64 (5), 150–162.
- Steinkellner S. (Hrsg.), 2019. Nationale Machbarkeitsstudie zum Glyphosatausstieg. Endbericht zum Forschungsprojekt Nummer101347, Wien, 257 S.
- Stoate C., Boatman N.D., Borralho R.J., Carvalho C.R., de Snoo G.R. & Eden P., 2001: Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management* 63, 337-365.
- Villanueva-Rey P., Vázquez-Rowe I., Moreira M.T. & Feijoo G., 2014. Comparative life cycle assessment in the wine sector: biodynamic vs. conventional viticulture activities in NW Spain. *Journal of Cleaner Production* 65, 330–341.