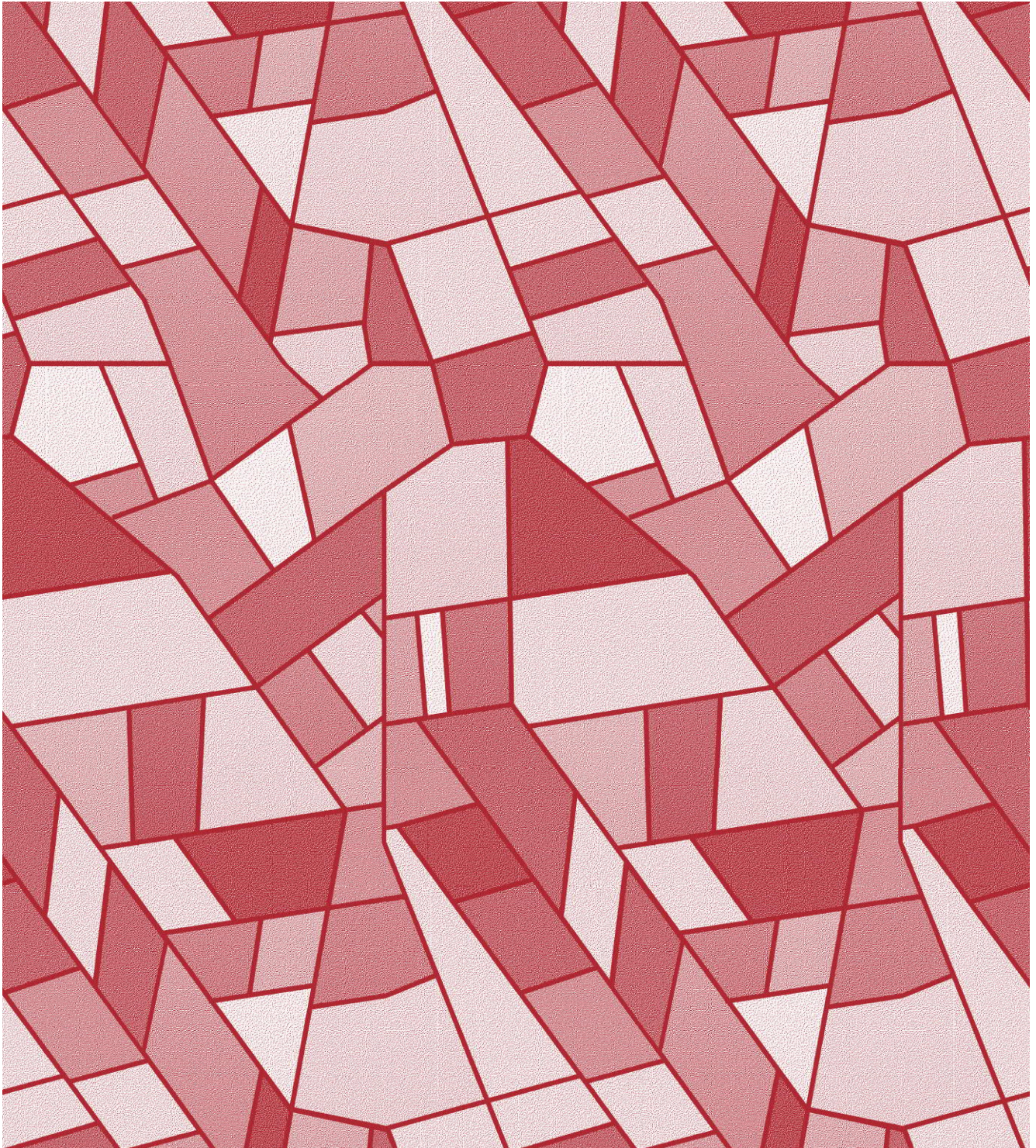




Evaluation von Massnahmen zum Schutz des Grundwassers vor PSM und deren Metaboliten

9. Oktober 2020



Impressum

Projektteam

Simon Spycher, EBP
Christina Dübendorfer, EBP
Risch Tratschin, EBP
Rebecca Schneider, HAFL
Hans Ramseier, HAFL

EBP Schweiz AG
Zollikerstrasse 65
8702 Zollikon
Telefon +41 44 395 11 11
info@ebp.ch
www.ebp.ch

Berner Fachhochschule
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL)
Abteilung Agronomie
Länggasse 85
3052 Zollikofen

Begleitung seitens BAFU

Reto Muralt, Abteilung Wasser
Fabian Soltermann, Abteilung Wasser

Hinweis

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Ergebnisse in Kürze

Der vom Bundesrat verabschiedete Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (PSM) geht mit Massnahme 6.1.2.1 den Schutz des Grundwassers vor Pflanzenschutzmitteln und deren Metaboliten an. Ziel ist eine Auslegeordnung und Beurteilung wirksamer Massnahmen zum verstärkten Schutz des als Trinkwasser genutzten Grundwassers.

Die vorliegende Studie basiert auf drei Teilen: (i) Identifikation der Wirkstoffe bzw. deren Metaboliten mit Potenzial für erhöhte Konzentrationen im Grundwasser, (ii) Bestimmung der für den Einsatz dieser Wirkstoffe relevante Kulturen und (iii) Bewertung der möglichen Massnahmen zur Reduktion des Einsatzes dieser Wirkstoffe sowie der agronomischen und ökologischen Auswirkungen dieser Massnahmen.

(i) Identifikation der prioritären Wirkstoffe

95% der Messungen von PSM-Rückständen im Grundwasser mit Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l betreffen sechs prioritäre Wirkstoffe bzw. deren Metaboliten. Drei weitere Wirkstoffe führten bisher zwar nicht oder nur vereinzelt zu PSM- resp. Metaboliten-Konzentrationen über 0.1 µg/L. Sie werden als beim derzeitigen Verbrauch als nicht prioritär, bei steigendem Verbrauch jedoch als ebenfalls risikoreich beurteilt.

(ii) Bestimmung der relevanten Kulturen

Die neun identifizierten Wirkstoffe sind allesamt Herbizide (Ausnahme: Chlorothalonil, nicht mehr zugelassen) und werden nahezu vollständig im Ackerbau eingesetzt. Die mit Abstand wichtigsten Anwendungen stellen die Unkrautregulierung im Mais, im Raps und in Zuckerrüben dar. Einzig der Wirkstoff Bentazon wird primär in Hülsenfrüchten eingesetzt.

(iii) Bewertung der möglichen Massnahmen

Für die Kulturen Mais, Raps, Zuckerrüben und Hülsenfrüchte wurden die Möglichkeiten eines Verzichts auf die Anwendung der neun Wirkstoffe evaluiert. Für jede Kultur wurden mechanische und chemische Alternativen untersucht. Die Kosten dieser Alternativen im Vergleich zu den Kosten der Anwendung der Wirkstoffe müssen kulturspezifisch betrachtet werden. Für einen mittleren Unkrautdruck sowie eine mittlere Auslastung der benötigten Landmaschinen und Mitarbeiter lassen sich die Resultate wie folgt zusammenfassen:

- Bei Mais und Raps gibt es dank mechanischer Unkrautbekämpfung resp. Untersaaten ein grosses Potenzial für einen herbizidfreien oder zumindest stark herbizidreduzierten Anbau ohne Ertragsverluste. Aufgrund der Ressourceneffizienzbeiträge (REB) für die Reduktion von Herbiziden auf der offenen Ackerfläche sind diese Anbausysteme auch ökonomisch interessant. Diese Möglichkeiten der nicht-chemischen Unkrautbekämpfung können vereinzelt, standortspezifisch eingeschränkt sein. Ein Ausweichen auf chemische Alternativen kann insbesondere im Mais zu einem erhöhten Resistenzrisiko führen.

- Bei Zuckerrüben führt ein kompletter Verzicht auf Herbizide im konventionellen Anbau zu ausgeprägten Mehrkosten. Jedoch ist die Verfügbarkeit von chemischen Alternativen mit günstigem Umweltprofil und ohne erhöhte Resistenzrisiken bei Zuckerrüben gewährleistet. Zudem werden die Mehrkosten bei einem Teilverzicht auf Herbizide mittels den REB für reduzierten Herbizideinsatz in Zuckerrüben kompensiert.
- Bei Hülsenfrüchten würde ein kompletter Verzicht auf Bentazon ebenfalls zu deutlichen Mehrkosten führen. Derzeit stehen keine Ersatzwirkstoffe mit günstigerem Umweltprofil und vergleichbarer Wirkung zur Verfügung.

Die Literatur und Praxisbeispiele zeigen, dass für einen zielführenden Schutz der Trinkwasserfassungen vor mobilen, langlebigen PSM und deren Metaboliten meist eine Umsetzung von Massnahmen im ganzen Zuströmbereich notwendig ist. Dass dies möglich ist, beweist das Programm «Grundwasser 2020» des österreichischen Bundeslands «Oberösterreich». Seit 2015 wird auf rund einem Drittel der Ackerfläche des Bundeslandes, je nach Belastungssituation mit Förderung oder Einschränkungen, auf 5 der 6 in dieser Studie als prioritär erkannten Wirkstoffe verzichtet (seit 2020 ist neu auch der letzte verbliebene, prioritäre Wirkstoff Chlorothalonil nicht mehr zugelassen).

Die Studie zeigt, dass ein effizienter Schutz des als Trinkwasser genutzten Grundwassers vor erhöhten Konzentrationen an PSM und deren Metaboliten durch den Verzicht auf den Einsatz von Wirkstoffen mit besonders hohen Risiken für das Grundwasser umsetzbar ist. Wichtig dabei ist jedoch die entsprechende Ausgestaltung und Kontinuität der finanziellen Unterstützung, um eine langfristige Änderung der Produktionssysteme zu erreichen. Ein derart ausgestalteter Grundwasserschutz beeinträchtigt weder die Rentabilität noch die Produktivität der Landwirtschaft grundlegend.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage und Auftrag	7
2.	Auslegeordnung der möglichen Massnahmen	7
2.1	Massnahmen der Landwirtschaftsbetriebe	8
2.2	Generelle Beurteilung der Massnahmen	9
2.3	Handlungsoptionen von Behörden	12
2.4	Beurteilung der Massnahmen für Karstgebiete	13
2.5	Regionalprojekte in Österreich als Erfolgsbeispiel	14
3.	Auswahl der Wirkstoffe und Metaboliten	15
3.1	Identifikation der vertieft zu untersuchenden Wirkstoffe	15
3.2	Anteilmässige Verteilung der Wirkstoffe auf Kulturen	21
4.	Agronomische Beurteilung der Massnahmen	24
4.1	Kriterien für die spezifische Beurteilung der Massnahmen	24
4.2	Unkrautregulierung in Hülsenfrüchten: Eiweisserben	26
4.3	Unkrautregulierung in Hülsenfrüchten: Soja	29
4.4	Unkrautregulierung in Hülsenfrüchten: Ackerbohnen	31
4.5	Unkrautregulierung in Zuckerrüben	32
4.6	Unkrautregulierung in Mais	42
4.7	Unkrautregulierung in Raps	48
4.8	Pilzbekämpfung in Gerste	55
4.9	Pilzbekämpfung in Weizen	57
4.10	Pilzbekämpfung in Kartoffeln	57
4.11	Betriebliche und ökologische Bewertung	57
5.	Gesamtbeurteilung und Empfehlungen	65
5.1	Zusammenfassung der agronomischen Beurteilung	65
5.2	Empfehlung für die Umsetzung der Massnahmen	71
6.	Literatur	74

1. Ausgangslage und Auftrag

Der Bundesrat hat am 6. September 2017 den Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln verabschiedet (AP PSM). Mit Massnahme 6.1.2.1 des AP PSM wird der Schutz des Grundwassers vor Pflanzenschutzmitteln und deren Metaboliten angegangen. Ziel von Massnahme 6.1.2.1 ist die Erarbeitung einer Auslegeordnung möglicher wirksamer Massnahmen zum verstärkten Schutz des als Trinkwasser genutzten Grundwassers. Die Massnahmen sollen dabei nicht nur Überschreitungen der numerischen Anforderungen von Wirkstoffen abdecken, sondern auch die bis anhin numerisch nicht geregelten sogenannten nicht-relevanten PSM-Metaboliten. Letztere treten deutlich verbreiteter und in z.T. erheblich höheren Konzentrationen im Grundwasser auf.

Das BAFU hat EBP in Zusammenarbeit mit der HAFL beauftragt, die in der Massnahme 6.1.2.1. des AP PSM beschriebene Auslegeordnung und Evaluation von Massnahmen zum Schutz des als Trinkwasser genutzten Grundwassers durchzuführen. Der vorliegende Bericht dokumentiert das Vorgehen und die Ergebnisse:

In einem ersten Schritt wird eine generelle Auslegeordnung möglicher wirksamer Massnahmen zum verstärkten Schutz des als Trinkwasser genutzten Grundwassers vorgenommen (Kapitel 2). In einem nächsten Schritt wird bestimmt, welche Wirkstoffe und Metaboliten nach derzeitigem Wissensstand am meisten zur Belastung des Grundwassers beitragen und in welchen Kulturen diese primär eingesetzt werden. Zusätzlich werden auch Substanzen identifiziert, die bei vermehrtem Einsatz zum Problem werden könnten (Kapitel 3). Anschliessend werden die Massnahmen spezifisch für die identifizierten Kulturen beurteilt, d.h. die Wirksamkeit, die Kosten, die Akzeptanz und die ökologischen und wirtschaftlichen Auswirkungen werden für die als relevant eingestufteten Kulturen beschrieben und am Schluss auch aus betrieblicher Sicht diskutiert (Kapitel 4). Die Synthese der Auswertungen und Bewertungen liefert schliesslich konkrete Empfehlungen für einen verbesserten Schutz des Grundwassers vor PSM und deren Metaboliten (Kapitel 5).

2. Auslegeordnung der möglichen Massnahmen

In diesem Kapitel wird eine generelle Auslegeordnung möglicher wirksamer Massnahmen zum verstärkten Schutz des als Trinkwasser genutzten Grundwassers vorgenommen. Die Massnahmen werden dabei einerseits auf ihre Anwendbarkeit in den verschiedenen Kulturen eingestuft (Relevanzmatrix) und andererseits qualitativ bewertet (Bewertungsmatrix).

2.1 Massnahmen der Landwirtschaftsbetriebe

Wenn in Grundwasser-Einzugsgebieten auf ausgewählte Wirkstoffe verzichtet oder deren Gebrauch eingeschränkt werden muss, stehen den Betrieben verschiedenen Massnahmen für eine angepasste Bewirtschaftung zur Verfügung. Wie in Kapitel 3 noch im Detail hergeleitet, handelt es sich bei den Wirkstoffen überwiegend um Herbizide und um ein Fungizid, daher werden im Folgenden auch ausschliesslich Massnahmen aus dem Bereich Unkrautregulierung bzw. Reduktion des Krankheitsdrucks diskutiert.

- Mechanische Unkrautregulierung – Hacken: Regulation des Unkrautbestandes in Reihenkulturen mit Hilfe von Hackgeräten. Beim Hacken wird der Boden zwischen den Reihen einer Kultur mechanisch so bearbeitet, dass der Unkrautbestand ausreichend reduziert wird, ohne die angebaute Kultur zu beschädigen. Bei Kulturen mit guter Eignung, z.B. beim Mais kann unter günstigen Bedingungen vollständig auf den Einsatz von chemischen Wirkstoffen verzichtet werden, während bei Kulturen mit bedingter Eignung eine partielle Reduktion des Herbizideinsatzes möglich ist. Neben der Kultur sind vor allem die pedoklimatischen Bedingungen entscheidend, wie geeignet ein Standort für die mechanische Unkrautregulierung ist. Das zeigt sich z.B. in den Erhebungen zum Anteil der mechanischen Unkrautregulierung in Frankreich (Agreste 2014), die im Süden und im Westen des Landes deutlich häufiger eingesetzt wird als im Norden und auch Versuche in der Schweiz zeigten einen Einfluss des Bodentyps auf die Wirtschaftlichkeit dieser Massnahme (Keiser 2016).
- Mechanische Unkrautregulierung – Striegeln: Regulation des Unkrautbestandes in Flächenkulturen mit Hilfe eines Striegels. Beim Striegeln wird das Unkraut mit den nach unten zeigenden Metallhaken des Striegels ausgerissen und verschüttet. Bei Kulturen mit guter Eignung, z.B. Getreide kann unter günstigen Bedingungen vollständig auf den Einsatz von chemischen Wirkstoffen verzichtet werden, wobei in gewissen Jahren sogar auf die mechanische Unkrautregulierung verzichtet werden kann, was vor allem auf Getreideflächen in Südfrankreich relativ häufig ist (Agreste 2014).
- Bandspritzung: Chemischer Pflanzenschutz in Reihenkulturen nur in einem Band statt auf ganzer Fläche. Das Herbizid wird hierbei ausschliesslich in die Reihe appliziert, während die Unkrautregulierung zwischen den Reihen in der Regel zusätzliche Durchgänge mit Hackgeräten erfordert. Die eingesetzte Wirkstoffmenge lässt sich so um 1/3 bis 2/3 reduzieren.
- Unkrautunterdrückende Untersaat zu Saat: Mit Kultur ausgesäte Pflanzen, welche Unkraut aber nicht die Kultur unterdrücken sollen. Dieses Verfahren wird seit einigen Jahren erfolgreich im Rapsanbau eingesetzt und wird in der Schweiz gemäss einer Erhebung von 2017/2018 mittlerweile auf etwas mehr als 10% der Rapsflächen eingesetzt (Beaux 2019). Durch die andauernde und weitgehend flächige Bodenbedeckung werden auch weniger Nährstoffe ausgewaschen, was auch die Nitratauswaschung reduzieren kann (Synergie mit Nitratprojekten).
- Unkrautunterdrückende Untersaat in bestehende Kultur: Nach Auflaufen der Kultur zu geeignetem Zeitpunkt ausgesäte Pflanzen, welche Unkraut

aber nicht die Kultur unterdrücken sollen. Die Untersaat in die bestehende Kultur trägt insbesondere im Maisanbau stark zur Reduktion der Nitratauswaschung bei.

- Mulchsysteme: Unterdrückung des Unkrautwachstums durch eine pflanzliche Mulchschicht. Dabei wird eine Deckfrucht mit ausreichend Biomasse plattgewalzt, sodass eine einheitliche Mulchschicht entsteht. Die Hauptkultur wird anschließend durch die Mulchschicht hindurch in den darunterliegenden Boden gesät. Die Unkrautregulierung erfolgt einerseits dadurch, dass das Unkraut beim Walzen der Deckfrucht ebenfalls erfasst wird und andererseits reduziert die Mulchschicht das Wachstum von neuem Unkraut.
- Substitution der Wirkstoffe: Ersatz von Wirkstoffen, die bzw. deren Metaboliten im Grundwasser in erhöhten Konzentrationen vorkommen, durch alternative Wirkstoffe mit niedrigerem Auswaschungspotenzial des Wirkstoffs oder der Metaboliten. Der ursprüngliche Wirkstoff wird dabei um bis zu 100% reduziert, wird aber durch einen anderen Wirkstoff ersetzt.
- Kulturwechsel: Verzicht auf Anbau der Kultur im Einzugsgebiet belasteter Grundwasserleiter. Dabei muss unterschieden werden zwischen dem Verzicht auf eine einzelne Kultur, in der ein für das Einzugsgebiet problematischer Wirkstoff eingesetzt wird, und dem kompletten Verzicht auf Feldbau und Spezialkulturen, also der ausschliesslichen Nutzung als Grünland. Der Verzicht auf eine einzelne Kultur mag die Konzentration des darin eingesetzten Wirkstoffs senken, birgt aber das Risiko, dass andere Wirkstoffe und deren Metaboliten in erhöhten Konzentrationen auftreten.
- Verstärkte Anwendung von Prinzipien der integrierten Produktion (IP) mit folgenden Teilkomponenten, die häufig gemeinsam umgesetzt werden:
 - Fruchtfolge: Optimierung der Fruchtfolge im Hinblick auf Unkraut- und Krankheitsdruck
 - Mechanische Unkrautkur: Striegeln vor Saat der neuen Kultur
 - Blindstriegeln: Striegeln zwischen Saat und Auflauf der Saat
 - Sortenwahl (Krankheiten): Wahl krankheitstoleranter Sorten
 - Schadschwellen (Krankheiten): Beachten der wirtschaftlichen Schadschwellen bei Pilzkrankheiten

2.2 Generelle Beurteilung der Massnahmen

Für die generelle Beurteilung der Massnahmen wird in einer Relevanzmatrix die generelle Anwendbarkeit der Massnahmen in den verschiedenen Kulturen ausgewiesen. In der Bewertungsmatrix werden die Massnahmen angelehnt an das Vorgehen von Prasuhn et al. (2018) in einer Expertenbeurteilung anhand verschiedener Kriterien qualitativ bewertet: Die Bewertung erfolgte für den flächenmässig relevanten konventionellen Anbau und berücksichtigt, dass die Bedingungen für die einzelnen Massnahmen je nach Jahr unterschiedlich günstig sind. Im Biolandbau sind keine Herbizide zugelassen und die Unkrautregulierung erfolgt bereits heute ausschliesslich ohne chemisch-synthetische Wirkstoffe. Die dadurch bedingten Ertragsverluste und

der zusätzliche Arbeitsaufwand lassen sich durch die höheren Preise von Bioprodukten decken. Zur Bekämpfung von Krankheiten und Schädlingen werden im Biolandbau in begrenztem Mass anorganische Fungizide (Speiser 2015) bzw. mineralische oder aus Pflanzen gewonnene Insektizide eingesetzt.

- Unter «Wissensstand» wird der Stand der Agrarforschung und der praxisnahen Beratung verstanden, was auch Daten zu betriebswirtschaftlichen Auswirkungen für den Betrieb umfasst.
- Die «pedo-klimatische Anwendbarkeit» beschreibt klimatische Abhängigkeiten, z.B. bei der mechanischen Unkrautregulierung, in wie vielen Jahren die Bedingungen dafür trocken genug sind, und auf welchem Anteil der Bodentypen die Massnahme gut funktioniert.
- Die «Akzeptanz» beschreibt die grundsätzliche Bereitschaft die Massnahme umzusetzen. Hoch eingestufte Risiken wie z.B. ein über die Jahre akkumulierter Vorrat von Unkrautsamen im Boden führen zu reduzierter Akzeptanz einer Massnahme.

Auf die qualitative Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurde bei der untenstehenden kulturübergreifenden Bewertung verzichtet, denn dieser Aspekt hängt sehr stark von der Kultur ab. Dieser Aspekt wird in der detaillierten agronomischen Beurteilung vertieft untersucht (Kapitel 4). Die folgende Tabelle fasst die Relevanzmatrix und die Bewertungsmatrix (farbig markiert) zusammen und zeigt damit die generelle Beurteilung der Massnahmen.

Massnahme	Anwendbarkeit nach Kultur ^[1]								Wissens- stand ^[2]	pedokli- matische Anwend- barkeit ^[3]	Akzeptanz ^[4]
	Hülsenfrüchte	Kartoffeln	Mais	Raps	Getreide	Zuckerrüben	Gemüsebau	Grünland			
Mechanische Unkrautregulierung - Hacken		■	■	(■)	(■)	■	(■)	-	+	0	+
Mechanische Unkrautregulierung - Striegeln			-		■			-	+	0	+
Unkrautunterdrückende Untersaat zu Saat			(■)	■	(■)	-	(■)	-	0	+	0
Unkrautunterdrückende Untersaat in bestehende Kultur			■					-	-	0	-
Mulchsysteme		■				(■)	(■)	-	0	+	0
Bandspritzung		(■)	■	(■)	-	■	(■)	-	+	+	-
Substitution der Wirkstoffe	(■)	(■)	(■)	(■)	(■)	(■)	(■)	(■)	+	+	0
Kulturwechsel	■	■	■	■	■	■	■	-	+	+	--
Fruchtfolge ^[5]	■	■	(■)	(■)	(■)	(■)	■	(■)	0	+	0
Mechanische Unkrautkur ^[5]	■	■	■	■	■	■	■		+	0	0
Blindstriegeln ^[5]	■	■	■	■	■	■	■		+	0	0
Sortenwahl (Krankheiten) ^[5]				■	■	■	■		+	+	0
Schadschwellen (Krankheiten) ^[5]					■	■			+	+	0

Tabelle 1: Beurteilung der Massnahmen. Erläuterung Relevanzmatrix: ■ in Kultur anwendbar, (■) in Kultur zum Teil anwendbar, - nicht anwendbar, keine Farbe: keine Angaben. Erläuterung Bewertungsmatrix: ++ = sehr gut, + = gut, 0 = mittel, - = gering, -- = sehr gering

[1] Obst und Reben nicht berücksichtigt

[2] Agronomischer Wissensstand zu Machbarkeit und Kosten der Massnahmen

[3] Anteil der Böden und klimatischen Verhältnisse bei der Massnahme wirtschaftlich ist

[4] Reduzierte Umsetzung aufgrund hoch eingestufte Risiken oder niedrig eingestufte Praktikabilität

[5] Grau schattiert (verstärkte Anwendung von Prinzipien der integrierten Produktion - häufig gleichzeitig umgesetzt)

Tabelle 1 zeigt auf, dass die Massnahmen spezifisch für die dafür anwendbaren Kulturen diskutiert werden müssen. Nur die mechanische Unkrautkur und das Blindstriegeln sind generell im Ackerbau anwendbare Praktiken. Zum günstigen Zeitpunkt eingesetzt, ermöglichen diese beiden Massnahmen eine Reduktion des Herbizideinsatzes, aber für sich allein meistens noch keinen Verzicht. Für die im Kapitel 4 folgende spezifische Bewertung sind nur die Massnahmen relevant, für die in der entsprechenden Wirkstoff-Kultur-Kombination auch eine Anwendbarkeit identifiziert wurde.

In der qualitativen Bewertung schneiden viele Kulturen bezüglich Wissensstand, pedoklimatischer Anwendbarkeit und Akzeptanz neutral oder sogar positiv ab, was bedeutet, dass Verschiebungen bei der Wirtschaftlichkeit (z.B. durch Prämien) dazu führen können, dass diese Massnahmen eine erhöhte Verbreitung finden.

2.3 Handlungsoptionen von Behörden

2.3.1 Generelle Möglichkeiten

Auf Seite der Behörden stehen verschiedene Massnahmen zur Verfügung, um auf die Problemstellung Einfluss zu nehmen. Sie können mit verschiedenen Politikinstrumenten unter anderem die Umsetzung der im vorangehenden Kapitel untersuchten Massnahmen auf Betriebsebene steuern. Das Verhalten der Landwirtschaftsbetriebe kann über Anreize und Vereinbarungen oder durch Informationsmassnahmen beeinflusst werden. Konkrete Beispiele sind:

- Direktzahlungen-Anforderungen
- Ressourceneffizienzbeiträge (REB-Beiträge): Reduktion von Herbiziden auf der offenen Ackerfläche, Reduktion von PSM im Zuckerrübenanbau, Beitrag für schonende Bodenbearbeitung (mittlerweile abgelaufen)
- Regionale Projekte (z.B. GSchG-62a-Projekte oder regionale Landwirtschaftliche Strategien, RLS)
- Labels von Produzentenorganisationen
- Angewandte Agrarforschung
- Aus- und Weiterbildung der Fachbewilligungsinhaber
- Beratung und Erfahrungsaustausch
- Informationsanlässe der landwirtschaftlichen Beratungsstellen

Diese Massnahmen seitens der Behörden entfalten ihre Wirkung auf den Grundwasserschutz indirekt über die Wirkung der geförderten betrieblichen Massnahmen.

Eine weitere Einflussmöglichkeit besteht auf der Ebene der Zulassung der Wirkstoffe. Hier bestehen folgende Möglichkeiten:

- Aufhebung der Zulassung einzelner Wirkstoffe
- Anwendungsverbot in Grundwasserschutzzonen S1 und S2 (S3 und gesamter Zuströmbereich bisher nicht möglich)
- Verschärfung der Auflagen

2.3.2 Anwendungsverbote in Grundwasserschutzzonen

Anwendungsverbote in Grundwasserschutzzonen können auch über die Instrumente des planerischen Grundwasserschutzes erlassen werden. Sie sind dann nicht stoffbezogen, sondern können generell für ganze Stoffgruppen erlassen werden. Eine aktuelle Studie der Uni Neuchâtel (Hunkeler 2020) untersuchte die Auswirkungen eines Anwendungsverbots von PSM in den Schutzzonen S2 und S3. Sie kommt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Bei PSM-Wirkstoffen erfolgt eine relevante Auswaschung gemäss Annahmen der Studie primär über präferenzielle Fliesspfade. PSM-Auswaschung im Nahbereich von Pumpwerken führt zu einem markanten Konzentrationspeak. Dieser kann einem Mehrfachen der Hintergrundbelastung von ausserhalb der Schutzzonen entsprechen.
- Eine höhere Hintergrundbelastung von ausserhalb der Schutzzone erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Anforderungswerts.
- Ähnlich der Auswaschung durch präferenziellen Transport bei normaler Anwendung hängt auch bei Unfällen die Konzentrationsentwicklung stark von der Distanz des Unfallorts bis zum Pumpwerk ab.
- Bei den Metaboliten hat der Transport durch die Bodenmatrix eine ausgleichende Wirkung, was zu einem regelmässigeren Konzentrationsverlauf führt. Deshalb überlagert sich der Eintrag aus den Schutzzonen als stark abgeflachte Peaks mit der Hintergrundbelastung. Oft ist die Hintergrundbelastung höher als der Beitrag aus den Schutzzonen.
- Der Effekt einer Unterlassung der PSM-Anwendung auf Metaboliten hängt deshalb davon ab, welchen Anteil die Schutzzonen an der intensiv landwirtschaftlich genutzten Fläche im Einzugsgebiet ausmachen.

Zusammenfassend kann gemäss der Studie gesagt werden, dass Grundwasserschutzzonen zwar nützlich bezüglich ihrer Hauptfunktion, dem Schutz vor Unfällen sind, aber nicht hinreichend, um eine zu hohe Grundbelastung durch den Einsatz grundwassergefährdender Wirkstoffe und/oder Metaboliten im restlichen Zuströmbereich genügend zu senken.

2.4 Beurteilung der Massnahmen für Karstgebiete

In Karstgebieten weist der Untergrund stark erweiterte Hohlräume auf, welche zu einer schnelleren Versickerung der Niederschläge und ausgeprägteren Fliesswegen mit hohen Fliessgeschwindigkeiten führen. Ebenso versickern bzw. verschwinden in Karstgebieten oft Fliessgewässer mitsamt den darin enthaltenen Stoffen konzentriert und rasch über Schluckstellen ins Grundwasser. Grundwasservorkommen in Karstgebieten verfügen darum meist nur über eine geringe Filterwirkung von Boden und Untergrund, was sie besonders sensibel auf oberflächige Stoffeinträge macht.

Die zur Verfügung stehenden Massnahmen für eine angepasste Bewirtschaftung und ihre generelle Bewertung gemäss Kapitel 2.1 und 2.2 gelten auch für Karstgebiete. Da in Karstgebieten jeder Wirkstoff potenziell das Grundwasser erreichen kann, ist hier die effektive Reduktion der eingesetzten Stoffmengen besonders wichtig. Behördenseitig stehen die in Kapitel 2.3 aufgezeigten Handlungsoptionen zu Verfügung, um eine teilweise oder vollständige Reduktion des Einsatzes von chemischen Wirkstoffen zu erreichen. Reine Wechsel des Wirkstoffs durch Substitution oder Kulturwechsel zu einer Kultur mit einem anderen prioritären Wirkstoff haben oft einen beschränkten Nutzen für den Grundwasserschutz in Karstgebieten. Eine Recherche nach konkreten Schutzmassnahmen in anderen Ländern ergab, dass rund 30% der EU-Länder spezifische Massnahmen in Karstgebieten vorsehen (MAGPIE 2013). Es handelt sich dabei primär um freiwillige Verzichtsprogramme oder Verbote von Triazinen und/oder Bentazon. Diese

Massnahmen dürften weniger mit den Eigenschaften der Wirkstoffe zu tun haben, als damit, dass die Wirkstoffe historisch zu den ersten Wirkstoffen mit ausreichend sensitiver Analytik gehörten und sie in vergleichsweise hohen Aufwandmengen angewendet werden.

Im Rahmen der Massnahme 6.3.3.4 des AP PSM wird ab 2020 für drei Jahre eine an die Dynamik von Karstgebieten angepasste Beprobung an 3 ausgewählten NAQUA-Messstellen in Karstgrundwasserleitern mit intensiver Landwirtschaft durchgeführt. Dadurch soll ein besseres Verständnis des zeitlichen Verlaufs von PSM-Einträgen in Karstgrundwasserleiter gewonnen werden.

2.5 Regionalprojekte in Österreich als Erfolgsbeispiel

Eine bemerkenswerte Erfolgsgeschichte stellt das Regionalprojekt *GRUNDWasser 2020* des Bundeslandes Oberösterreich dar (Kuderna 2018). Der Erfolg beruht auf einem pragmatischen Vorgehen beim Ausweisen von Schongebieten, der Lancierung von Regionalprojekten in Regionen mit erhöhtem Handlungsbedarf und einem etablierten Beratungssystem, das auch Arbeitskreise sogenannter "Wasserbauern" umfasst.

Die österreichische Grundwasserschutz unterscheidet Schutzgebiete analog zu den schweizerischen Schutzzonen und Schongebiete, welche unseren Zuströmbereichen entsprechen. Die Schongebiete wurden mittlerweile für 128'558 ha oder etwa 10% der Fläche des Bundeslandes ausgeschieden, wobei diese Angabe auch Flächen ausserhalb der Ackerfläche beinhaltet (Kneidinger 2020). Für die Festlegung der Schongebiete wurde in einem ersten Schritt stark vereinfachend mit hydrologischen Einzugsgebieten gearbeitet. In einem zweiten Schritt wurden hydrogeologische Einzugsgebiete bestimmt und anschliessend sogenannte Schongebiete ausgeschieden und planerisch festgehalten. Der Aufwand der hydrogeologischen Grundlagenarbeiten ist begrenzt (gemäss Auskunft der Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft des Bundeslandes wurden ca. 30 Aufträge im Umfang von 30'000 bis 70'000 EUR an Hydrogeologen vergeben). Aus Schweizer Sicht scheint dies ein prüfenswertes Vorgehen, um mit vergleichsweise mässigem Aufwand eine beträchtliche Fläche planerisch auszuscheiden. Die Massnahmen in den Schongebieten sind weniger strikt als in Schutzgebieten, können aber bei Bedarf angepasst werden und auch im Rahmen der Zulassung verfügte Verbote umfassen. So dürfen gemäss den von der Zulassungsbehörde verfügte Auflagen derzeit die Wirkstoffe Metazachlor, Terbutylazine und Dimethachlor nicht in Schongebieten eingesetzt werden.

In dem seit 2015 laufenden Regionalprojekt Grundwasser 2020 wurde nun für ein zusammenhängendes Gebiet zusätzlich ein Förderprogramm konzipiert, in dem ein Reihe von Massnahmen des vorbeugenden Grundwasserschutzes umgesetzt werden. Auf Seite der Pflanzenschutzmittel umfasst dies den Verzicht auf die Wirkstoffe Metazachlor und Terbutylazine im gesamten Projektgebiet - und nicht nur in den Schongebieten - und zusätzlich der Verzicht auf Chloridazon und Metolachlor. Die Teilnahme ist hoch, denn gemäss Stand von Ende 2017 bewirtschafteten die Teilnehmer 61% der rund 90'000 ha Ackerfläche (Wallner 2019). Erste Auswertungen der Konzentrationen von Terbutylazine und Desethyl-terbutylazine zeigen, dass die

Konzentrationen im Projektgebiet bereits wenige Jahre nach Beginn des Programms zu sinken anfangen (Wallner 2019).

Die Erfolgswahl auf der Seite der Beratung wurde durch die bwsb (Boden.Wasser.Schutz Beratung) gelegt. Sie erarbeitet Beratungsunterlagen, organisiert Feldtage und koordiniert die Arbeitskreise der Landwirte. In diesen Arbeitskreisen diskutieren die beteiligten Landwirte untereinander die für ihre Region relevanten Messergebnisse und auch die Planung von Massnahmen. Ein Vorteil auf Seite der bwsb ist, dass deren Fachspezialistinnen und -spezialisten nicht nur den Gewässer- und Bodenschutz abdecken, sondern auch den Pflanzenschutz.

3. Auswahl der Wirkstoffe und Metaboliten

Prioritäres Ziel der Stoffauswahl ist die Identifikation der Wirkstoffe und Metaboliten, die nach heutigem Wissensstand bei der derzeitigen Pflanzenschutzpraxis am meisten zur Belastung des Grundwassers beitragen, also von Substanzen, die an mehreren Standorten in erhöhten Konzentrationen gemessen wurden (Abschnitt 3.1). Diese Wirkstoffe bzw. deren Metaboliten haben ein ungünstiges Umweltprofil (erhöhte Persistenz und Mobilität) und sollen vertieft auf ihren Einsatz und mögliche Alternativen überprüft werden. Nicht betrachtet werden heute nicht mehr zugelassene Wirkstoffe und deren Metaboliten wie z.B. Atrazin.

Substanzen mit vereinzelt erhöhter Konzentration trotz für das Grundwasser günstigem Umweltprofil (tiefe Persistenz und/oder tiefe Mobilität) werden nicht vertieft betrachtet, da die Nachweise eher auf ungünstige Verhältnisse an der spezifischen Messstelle zurückzuführen sind, was z.B. in Karstgebieten der Fall sein kann.

Eine weitere Gruppe bilden Substanzen mit vereinzelt erhöhten Konzentrationen und ungünstigem Umweltprofil. Bei diesen Substanzen muss davon ausgegangen werden, dass bei vermehrtem Einsatz zusätzliche Überschreitungen auftreten würden, was bei der Substitution von Wirkstoffen relevant ist.

Die Auswahl der vertieft zu evaluierenden Stoffe erfolgte anhand von Messdaten der Nationalen Grundwasserbeobachtung (NAQUA) ergänzt um eine aktuelle Screening-Studie der Eawag. Es werden jeweils die Anzahl Überschreitungen der Schwelle von 0.1 µg/L, die Nachweishäufigkeit sowie die potenzielle Entwicklung des Einsatzes betrachtet.

Für die Identifikation zusätzlicher, potenziell zu Überschreitung führenden Stoffen wurden sowohl Messdaten als auch Modellrechnungen beigezogen.

3.1 Identifikation der vertieft zu untersuchenden Wirkstoffe

Ausgewertet wurden die NAQUA-Messungen des Jahres 2014 (Reinhardt 2017, BAFU 2019) ergänzt um die Eawag Screening-Studie des Jahres 2017

(Kiefer 2019a). Nicht berücksichtigt wurden Wirkstoffe, die nicht in den Regelungsbereich der PSM-Verordnung fallen, z.B. das als Biozid zugelassene DEET.

Die NAQUA-Messungen umfassen standardmässig 530 Probenahmestandorte, wobei es bei bisher selten nachgewiesenen Wirkstoffen und Metaboliten auch weniger Standorte sein können. Von diesen 530 Probenahmestandorten verfügt allerdings maximal rund die Hälfte über ein Einzugsgebiet, in welchem von einer mengenmässig relevanten Verwendung von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft ausgegangen werden kann, bei welcher Konzentrationen von Wirkstoffen oder Metaboliten führen kann (Muralt 2020). Für die Screening-Studie der Eawag wurde je eine Probe von 31 Probenahmestellen auf mehrere hundert Wirkstoffe und Metaboliten untersucht und damit der Fokus auf die Erfassung einer möglichst hohen Anzahl an potenziell relevanten Substanzen gelegt.

Da die beiden verwendeten Datenquellen eine sehr unterschiedliche räumliche Auflösung aufweisen, wurden für die NAQUA-Daten höhere Schwellen für die Nachweishäufigkeit als für die Screening-Studie verwendet.

3.1.1 Auswertung NAQUA-Daten

Für die NAQUA-Daten wurden alle Wirkstoffe und Metaboliten berücksichtigt, die mindestens zweimal über 0.1 µg/L gemessen wurden und eine Nachweishäufigkeit über 3% aufweisen. Dies ist gemäss Tabelle 2 bei vier Substanzen der Fall, nämlich bei Bentazon als Wirkstoff, bei S-Metolachlor als Wirkstoff und auch für zwei seiner Metaboliten und bei einem oder mehreren Metaboliten von Chloridazon und Dichlobenil oder Fluopicolid.

Nicht berücksichtigt wurden die bereits mehrere Jahre nicht mehr zugelassenen Wirkstoffe oder deren Metaboliten Atrazin (Wirkstoff und Metabolit Desethyl-Atrazin) und Dichlobenil (nur Metabolit 2,6-Dichlorbenzamid). 2,6-Dichlorbenzamid kann jedoch auch durch das in Reben und Kartoffeln zugelassene Fluopicolid gebildet werden. Da die Verkaufsmenge von Fluopicolid in den Jahren vor 2014 etwa 10-mal tiefer war als die von Dichlobenil (BLW 2019b) und die Überschreitungen eher im Grünland und Siedlungsgebiet beobachtet wurden (BAFU 2019), wurde angenommen, dass die Überschreitungen von 2,6-Dichlorbenzamid in den nächsten Jahren zurückgehen werden und Fluopicolid wurde daher nicht vertieft evaluiert.

Aufgrund der im NAQUA-Bericht verfügbaren Details wurde hingegen Metazachlor in die Liste aufgenommen, da der Metabolit Metazachlor-ESA in früheren Jahren mehr als einmal in Konzentrationen über 0.1 µg/L gemessen wurde und zudem auch je eine Überschreitungen der Muttersubstanz und des Metaboliten Metazachlor-OXA gemessen wurde (BAFU 2019).

Die vollständige Liste der untersuchten NAQUA-Daten ist in Anhang A1 zu finden. Dort ist auch ersichtlich, dass drei weitere Substanzen jeweils eine Messung über 0.1 µg/L hatten und zwar Mecoprop und die beiden Dimethachlor-Metaboliten Dimethachlor-ESA und Dimethachlor-OXA. Mecoprop wird offenbar selten in von Ackerbau geprägten Gebieten nachgewiesen (BAFU 2019) und wurde nicht weiter untersucht. Dimethachlor-ESA und Di-

methachlor-OXA wurden beide nur einmal nachgewiesen, was einer Nachweishäufigkeit von 1% entspricht und damit unter die oben definierte Schwelle fällt. Der Wirkstoff wird aufgrund der Ergebnisse der Screening-Studie der Eawag und den Modellierungen der Agroscope jedoch in den Abschnitten 3.1.3 und 3.1.4 besprochen.

Substanzname	Muttersubstanz bei Metaboliten	Nachweishäufigkeit in %	Anzahl Messungen > 0.1 µg/L
Bentazon	-	4.7	4
S-Metolachlor	-	6.0	2
Desphenyl-Chloridazon	Chloridazon	31.5	84
Methyl-Desphenyl-Chloridazon	Chloridazon	23.0	24
2,6-Dichlorbenzamid ^[1]	Fluopicolid und Dichlobenil	20.6	10
Metazachlor-ESA ^[2]	Metazachlor	3.6	1 ^[2]
Metolachlor-ESA	S-Metolachlor	26.8	29
Metolachlor-OXA	S-Metolachlor	7.4	2

Tabelle 2: Gemäss NAQUA vertieft zu untersuchende Substanzen. ^[1] Dichlobenil seit 2016 nicht mehr erlaubt. ^[2] Im Jahr 2013 noch 3 Messungen > 0.1 µg/L

3.1.2 Auswertung Eawag-Screening Studie

Von der Screening Studie der Eawag wurden alle Wirkstoffe und Metaboliten berücksichtigt, die mindestens einmal über 0.1 µg/L lagen und zugleich eine Nachweishäufigkeit über 30% aufweisen. Neben den bereits in Tabelle 2 aufgelisteten Wirkstoffen betrifft das zusätzlich einen oder mehrere Metaboliten der Wirkstoffe Chlorothalonil und Terbutylazine (Tabelle 3).

Substanzname	Muttersubstanz bei Metaboliten	Nachweishäufigkeit in %	Anzahl Messungen > 0.1 µg/L
Chlorothalonil-TP SYN507900	Chlorothalonil	41.9	1
Chlorothalonil-TP X- carbamoyl-2,3,5-trichloro-6-cyanobenzenesulfonic acid	Chlorothalonil	61.3	1
Chlorothalonil-TP R417888	Chlorothalonil	90.3	11
Chlorothalonil-TP R471811	Chlorothalonil	100.0	21
Metolachlor-TP CGA 368208 (=Acetochlor sulfonic acid)	S-Metolachlor / Acetochlor	64.5	2
Metolachlor-TP NOA413173	S-Metolachlor	71.0	4
Terbutylazine-TP CSCD648241	Terbutylazine	93.5	1

Tabelle 3: Gemäss Screening-Studie der Eawag (Kiefer 2019a) vertieft zu untersuchende Substanzen. Es wurden nur zusätzliche zu NAQUA erfasste Substanzen aufgelistet.

Der Metabolit Fipronil-TP RPA 106681 würde gemäss Anhang A1 die oben genannten Kriterien zwar auch erfüllen, wurde aber nicht berücksichtigt, da die Aufbrauchfrist von Fipronil im Jahr 2014 abgelaufen ist. Die vollständige Liste der in der Screening-Studie der Eawag untersuchten Substanzen ist im Anhang A1 zu finden.

3.1.3 Identifikation potenziell zu Überschreitungen führender Stoffe

Im Folgenden werden Substanzen identifiziert, welche derzeit knapp nicht oder nur eine Überschreitung aufweisen, aber bei erhöhtem Einsatz in Zukunft vermehrt zu Überschreitungen führen könnten. Dies ist relevant, falls es Wirkstoffe betrifft, die als Ersatz für die in Tabelle 2 und Tabelle 3 identifizierten Wirkstoffe eingesetzt werden könnten. Konkret wurden alle Wirkstoffe bestimmt, welche folgende Kriterien erfüllen: Maximalkonzentrationen zwischen 0.05 und 0.1 µg/L UND Nachweishäufigkeiten > 5% (NAQUA) bzw. > 10% (Eawag-Studie) (Tabelle 4).

Substanzname	Muttersubstanz bei Metaboliten	Maximalkonzentration [µg/L]	Nachweishäufigkeit in %	Anzahl Messungen > 0.1 µg/L
Dimethachlor-TP CGA 369873	Dimethachlor	0.095	90.3	0
Fludioxonil-TP CGA 192155	Fludioxonil	0.2	6.5	1
Nicosulfuron-TP UCSN	Nicosulfuron	0.075	87.1%	0
Terbuthylazine-TP MT23-GS16984	Terbuthylazine	0.078	93.5%	0

Tabelle 4: Wirkstoffe oder Metaboliten die bei vermehrtem Einsatz zu erhöhter Anzahl Überschreitungen führen könnten (Werte aus Kiefer 2019a).

Für Dimethachlor würde eine allein auf den NAQUA-Daten basierende Auswertung die Kriterien für einen Wirkstoff mit potenziellen Überschreitungen noch nicht erfüllen, denn in dem für den NAQUA-Bericht verwendeten Untersuchungsjahr wurde für Dimethachlor-ESA und Dimethachlor-OXA je ein einziger Nachweis und nur eine Überschreitung bestimmt. Gemäss Auskunft des BAFU wurden aber die Nachweise und Überschreitungen in den vorangehenden Beobachtungsjahren an wechselnden Standorten beobachtet, was darauf hinweist, dass die wenigen Überschreitungen durch (bisher) seltenen Einsatz des potenziell problematischen Wirkstoffs bedingt sind. In der Eawag-Screening-Studie wurde ein weiterer Metabolit (Dimethachlor-TP CGA 369873) in 28 von 31 Proben mit Konzentrationen bis zu 0.095 µg/L gemessen. Daher ist es angezeigt, Dimethachlor zu den Wirkstoffen zu zählen, die bei vermehrtem Einsatz Metaboliten mit Konzentration über 0.1 µg/L aufweisen dürften. Von den anderen Wirkstoffen ist Terbuthylazine aufgrund der Einstufung in Kapitel 3.1.2 bereits gesetzt, während Fludioxonil und Nicosulfuron als bezüglich Grundwassergefährdung potenziell problematische Substitutionskandidaten bewertet werden müssen.

3.1.4 Vergleich mit Modellrechnungen

Die bisherigen gemessenen Wirkstoffe und Metaboliten decken nur einen Teil der eingesetzten Wirkstoffe bzw. der beim Abbau gebildeten Metaboliten ab. Bei den Wirkstoffen ist die analytische Abdeckung vergleichsweise hoch, während sie bei den Metaboliten eher tief ist. So wurden in der Screening-Studie der Eawag 43% der zum Zeitpunkt der Studie zugelassenen organischen Wirkstoffe auch mit der quantitativen Methode des Target-Screenings untersucht. Die übrigen Wirkstoffe wurden mit dem eher qualitativen Suspect-Screening untersucht (Kiefer 2019b). Bei den Metaboliten beläuft sich der Anteil der mit dem Target-Screening untersuchten Stoffe auf 6% der aus Abbaustudien bekannten insgesamt 1120 Metaboliten, während der Rest nur mit Suspect Screening untersucht wurde. Aus diesem Grund wurden neben den Messdaten auch Modellrechnungen berücksichtigt. Die Modelle ermöglichen es anhand von Stoffeigenschaften wie der Abbaugeschwindigkeit, der Sorption an Bodenpartikel und der Einsatzmengen abzuschätzen, welche Substanzen am häufigsten im Grundwasser zu erwarten sind. Es wurde dafür einerseits auf eine Studie zur Bewertung von PSM-Wirkstoffen (Wittmer und Scheidegger 2020) und von Metaboliten (Agroscope 2020) zurückgegriffen. Mit beiden Ansätzen lässt sich für alle bekannten Wirkstoffe bzw. Metaboliten ein Ranking der Grundwassergefährdung erstellen, das sich anhand der eingesetzten Wirkstoffmengen skalieren lässt. Stimmt das Ranking der bisher gemessenen Substanzen mit denen des Modells überein, dann ist es ein Hinweis, dass die Modelle die relevanten Prozesse abbilden können. Trifft dies zu sollten bisher nicht gemessene Substanzen, die gemäss dem Ranking gehäuft zu Konzentrationen über 0.1 µg/L führen, in der vorliegenden Studie berücksichtigt und in die Bewertung agronomischer Massnahmen mit einbezogen werden.

Modellrechnungen für Wirkstoffe

Die Bewertung auf der Ebene der Wirkstoffe erfolgte anhand der in der Studie von Wittmer und Scheidegger (2020) berechneten Indikatoren, konkret dem SCI-GROW-Indikator (Screening Concentration in Ground Water) der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Barrett 1997) und dem GUS Index (Groundwater ubiquity score) von Gustafson (1988). Beide Indikatoren basieren auf den zwei Stoffeigenschaften Abbaubarkeit im Boden und mittlere Sorptionskonstante an Boden (Koc). Die Indices wurden anschliessend anhand der mittleren Verkaufsmengen der Jahre 2008-2014 normiert, was die Vergleichbarkeit mit den tatsächlich gemessenen Wirkstoffen ermöglichte.

Weil es im Gegensatz zu den Metaboliten nur sehr wenige Wirkstoffe gibt, die an mehreren Messstellen über der numerischen Anforderung gemessen wurden (Tabelle 2), zeigte sich, dass auch das Ranking anhand der Indikatoren SCI-GROW und GUS nur bedingt möglich ist. Bei der Analyse der den Indikatoren zugrundeliegenden Daten (Sorption, Abbau, Menge) fiel aber auf, dass bis auf zwei Stoffe nur Stoffe mit einem Sorptionskoeffizienten von $K_{oc} < 200$ auch im Screening der Eawag und in NAQUA grösser 0.01 µg/l vorgefunden wurden (total 16). Nur 9 Stoffe, die bisher nicht untersucht wurden, fallen unter diese als grobe Klassifikationsregel verwendbare Schwelle. Aufgrund dieser Erkenntnis sowie zusätzlicher Überlegungen (primär bezüglich Abbauraten und Einsatzgebieten) wurde empfohlen, für den Wirkstoff

Metaldehyd weitere Abklärungen und Messkampagnen zu treffen. Es gibt gemäss diesem einfachen Ansatz keine Hinweise, dass weitere Wirkstoffe eingesetzt werden, die eine höhere Grundwassergefährdung als Bentazon aufweisen und zugleich nicht mit analytischen Methoden untersucht wurden. Das bedeutet, dass die Substanzwahl in NAQUA die relevanten Wirkstoffe abdeckt.

Modellrechnungen für Metabolite

Die Bewertung auf der Ebene der Wirkstoffe erfolgte anhand der von den Experten der Agroscope berechneten Grundwasser-Scores (Agroscope 2020). In der Agroscope-Studie wurden die berechneten Sickerwasserkonzentrationen in 1 m Tiefe («predicted environmental concentrations in groundwater», PECGW) auf eine Anwendung pro Jahr normiert und anschliessend wurde für jeden Wirkstoff ein Score aus der Summe aller für den entsprechenden Wirkstoffe bekannten Metaboliten berechnet.

Multipliziert man die Scores mit den Verkaufsmengen (BLW 2019b) ergibt sich ein Ranking der Wirkstoffe, die am ehesten zu Überschreitungen führen dürften. Die anhand der NAQUA und Eawag-Daten in Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 identifizierten Substanzen belegen in diesem Ranking die Plätze 1-4 (Chlorothalonil, S-Metolachlor, Terbutylazine, Chloridazon) und 6 (Metazachlor) und auch Platz 5 wurde anhand der Eawag-Studie als potenzielle zu Überschreitungen führend eingestuft (Tabelle 26 im Anhang A1). Dieser erste Vergleich von Messdaten und Modellrechnungen zeigt also eine erstaunlich gute Übereinstimmung und ist ein starkes Indiz, dass die oben vorgeschlagene Auswahl tatsächlich auch die höchste Eintragswahrscheinlichkeit hat. Wegen der offenbar guten Vorhersagekraft des Modells wurde beschlossen, neben Dimethachlor noch zwei weitere Substanzen mit vergleichsweise hohen Scores für die vertieften Untersuchungen zu berücksichtigen und zwar Pethoxamid und Dimethenamid-P.

Dieser Vergleich von Messdaten und Modellrechnungen liesse sich noch besser abstützen, wenn anstelle der Summen-Scores die Scores der einzelnen Metaboliten mit den Messdaten dieser Metaboliten (sofern gemessen) vergleichen würden. Auch sollte noch einmal systematisch abgeklärt werden, ob die Modellrechnungen nicht auch falsch negative Ergebnisse produzieren, z.B. welchen Score für den in der Eawag-Studie in 85% der Proben nachgewiesene Metabolit Nicosulfuron-TP UCSN berechnet wurde (Tabelle 4).

3.1.5 Fazit Stoffauswahl

Anhand der heute verfügbaren Messdaten wurden die sechs Wirkstoffe Bentazon, Chloridazon, Chlorothalonil, Metazachlor, S-Metolachlor und Terbutylazine für die vertiefte agronomische Auswertung ausgewählt. Diese wurden durch drei Wirkstoffe Dimethachlor, Pethoxamid und Dimethenamid-P ergänzt. Bei Dimethachlor gaben die NAQUA-Daten noch keinen Anlass dazu. Die kombinierte Evidenz aus EAWAG-Screening-Studie und Modellrechnungen spricht aber dafür. Die im Modell mit hohem Score bestimmten Metaboliten von Pethoxamid (MET-42, i.e., Pethoxamid-Sulfonat) und Dimethenamid-P (M31 (STGA)) wurden bisher nicht gemessen. Es erscheint aber angezeigt, diese beiden auch vertieft zu untersuchen, da für alle Metaboliten

mit vorhandenen Messdaten die Übereinstimmung von Modell und Messdaten gut ist. Bestätigt sich in vertieften Untersuchungen die hohe Vorhersagekraft des Modells, bedeutet das auch, dass die übrigen über 1000 mit dem Modell gerechneten Metaboliten ein kleineres Risiko darstellen.

Insgesamt wurden also 9 Wirkstoffe für vertiefte Untersuchungen ausgewählt. Für die mittlerweile nicht mehr zugelassenen Wirkstoffe Chloridazon und Chlorothalonil hat der Ersatz schon stattgefunden, aber es wurde geachtet, in welchen Kulturen sie eingesetzt werden, um einen potenziell höheren Einsatz von Substituenten zu erkennen. Für sieben Wirkstoffe sind Messdaten vorhanden, während für zwei nur Modellrechnungen vorliegen. Die sieben Wirkstoffe und ihre Metaboliten machen den überwiegenden Anteil der mit den beiden Datenquellen bestimmten Überschreitungen von 0.1 µg/L aus, nämlich 92% von insgesamt 212 Überschreitungen. Lässt man die Überschreitungen durch heute nicht mehr verfügbare Wirkstoffe und ihre Metaboliten wie Atrazin weg, deckt die Auswahl sogar 97% ab. Es gilt jedoch zu beachten, dass die beiden Datenquellen eine unterschiedliche räumliche Auflösung haben, weshalb alle weiteren Auswertungen auf Ebene der einzelnen Wirkstoffe vorgenommen werden.

3.2 Anteilsmässige Verteilung der Wirkstoffe auf Kulturen

Alle sieben noch zugelassenen, vertieft zu untersuchenden Wirkstoffe sind Herbizide. Zusätzlich sollen das Herbizid Chloridazon und das Fungizid Chlorothalonil untersucht werden, welche beide seit Anfang 2020 nicht mehr zugelassen sind. Da deren Einsatz bereits verboten ist, interessiert bei den beiden Wirkstoffen vor allem, durch welche anderen Wirkstoffe sie ersetzt werden. Für die Bestimmung, welcher Anteil der eingesetzten Wirkstoffmenge auf die einzelnen Kulturen fällt, konnte auf die von der Agroscope erhobenen Daten des Agrarumweltmonitoring-Betriebsnetzes zurückgegriffen werden (de Baan 2015, Spycher 2013). Das Betriebsnetz deckt ungefähr 1% der landwirtschaftlichen Nutzfläche ab und ermöglicht für die flächenmässig relevanten Kulturen Hochrechnungen auf Wirkstoffebene. Es werden nur landwirtschaftliche Anwendungen erfasst, wobei im Gemüsebau die Datenlage momentan noch zu gering ist, um belastbare Aussagen zum Wirkstoffeinsatz zu treffen. Nicht-landwirtschaftliche Anwendungen (z.B. durch Private, im Garten- und Landschaftsbau, auf Zierpflanzen, Strassen, Schienen, in der Forstwirtschaft etc.) sind darin nicht enthalten, diese sind für die untersuchten Stoffe aber auch kaum relevant, das sie für Privatanwender, Strassen und Schienen, Forstwirtschaft und Anwendungen auf Zierpflanzen nicht zugelassen sind, und ausserhalb des Feldbaus nur in wenigen Gemüse-, Kräuter- und Beerenkulturen eingesetzt werden dürfen.

Anhand der Agroscope-Daten und den Daten zur angebauten Fläche wurde für die Jahre 2015 bis 2017 berechnet, welchen Anteil die verschiedenen Kulturen durchschnittlich am Gesamtverbrauch haben. Die Variabilität der Schätzungen zwischen den drei untersuchten Jahren ist in den meisten Fällen gering (bis auf 2 bzw. 6 Ausnahmen Standardabweichungen < 10 bzw. 5%). Abweichungen > 10% treten bei Bentazon auf, dessen Einsatz auf Wiesen je nach Jahr sehr unterschiedlich geschätzt wird. So reichten der Anteil der mit Bentazon behandelten Wiesenfläche von 0% im Jahr 2016 über 0.5%

im Jahr 2015 bis 1.5% im Jahr 2017). In künftigen Studien liesse sich durch die Berücksichtigung zusätzlicher Erhebungsjahre und durch den Abgleich mit Verkaufszahlen die Schätzung des Bentazon-Einsatzes in Wiesen und Weiden noch verbessern. Des Weiteren sind wegen der wenigen erfassten Freilandgemüseparzellen die Schätzungen des Metazachlor- und Chlorothalonil-Anteils der Kulturgruppe Freilandgemüse ebenfalls mit erhöhten Unsicherheiten behaftet. Die hochgerechnete Menge der untersuchten Wirkstoffe liegt im Durchschnitt der drei untersuchten Jahre bei 93% der verkauften Mengen, was belegt, dass die Agroscope-Daten für die untersuchten Wirkstoffe von hoher Qualität sind. Da bei Bentazon die Hochrechnung bei 84% der verkauften Menge liegt, ist auch der Einsatz auf Wiesen und Weiden trotz der starken Streuung der Werte ausreichend realistisch.

Kultur	Chloridazon (X)	S-Metolachlor	Chlorothalonil (X)	Bentazon	Terbuthylazine	Metazachlor	Dimethachlor	Pethoxamid	Dimethenamid-P
Hülsenfrüchte				80				4	1
Kartoffeln			30	1					
Kernobst					1				
Mais		66			95			55	53
Raps						93	100	41	
Reben			9		4				
Wintergerste			20						
Winterweizen			20	2					
Zuckerrüben	100	25							39
Weitere Kulturen (Angaben schwach abgestützt)		Wiesen (2%) Andere Nutzungen (7%)	Übriges Getreide (1%) Freilandgemüse (19%)	Wiesen (16%) Andere Nutzungen (1%)		Andere Nutzungen (1%) Freilandgemüse (6%)			Andere Nutzungen (7%)

Tabelle 5: Anteil des Wirkstoffverbrauchs der verschiedenen Kulturen in % in den Jahren 2015 - 2017. Zu den hellgrau schattierten Kulturen sind nur wenige Datenpunkte verfügbar und die Schätzungen daher schwach abgestützt. Die beiden dunkelgrau eingefärbten Wirkstoffe Chloridazon und Chlorothalonil sind seit dem Jahr 2020 nicht mehr für den Einsatz zugelassen (X). Anteile zwischen 10 und 50% sind gelb eingefärbt und Anteile >50% orange.

Es zeigt sich, dass fünf der neun untersuchten Wirkstoffe überwiegend oder sogar vollständig in einer Kultur eingesetzt werden (Tabelle 5) nämlich Bentazon (Hülsenfrüchte), Dimethachlor (Raps), Chloridazon (Rüben), Metazachlor (Raps) und Terbuthylazine (Mais). Die anderen Wirkstoffe werden primär in zwei Kulturen eingesetzt, nämlich Dimethenamid (Raps und Zuckerrüben), Pethoxamid (Mais und Raps), S-Metolachlor (Mais und Zuckerrüben) und Chlorothalonil (Kartoffeln und Getreide).

Da die Metaboliten von Chloridazon und S-Metolachlor die grösste Anzahl Überschreitungen aufweisen, ist die Reduktion des Chloridazon- und S-Metolachlor-Einsatzes in Zuckerrüben und des S-Metolachlor-Einsatzes in Mais und Zuckerrüben die effektivste Art, die Metaboliten-Konzentrationen zu senken. Bei Chlorothalonil macht das Getreide den grössten Anteil aus, aber auch Kartoffeln und Gemüse fallen ins Gewicht. Da Chlorothalonil gut gegen Sprenkelnekrosen der Gerste wirkt, muss die spezifische Bewertung für Gerste und Weizen getrennt erfolgen.

4. Agronomische Beurteilung der Massnahmen

4.1 Kriterien für die spezifische Beurteilung der Massnahmen

Die Beurteilung der Massnahmen auf der Ebene der einzelnen Kulturen erfolgt jeweils im Vergleich zum chemischen Pflanzenschutz. Es wurden folgende Kriterien beigezogen:

- Wirksamkeit: Die Wirksamkeit im Vergleich zur derzeit üblichen chemischen Unkrautregulierung wurde primär anhand der Auswirkungen auf den Ertrag beurteilt. Falls vorhanden, wurden auch Daten zu den Auswirkungen auf die Bestände von Problemunkräutern verwendet. Es wird von einem mittleren Grad der Anwendbarkeit ausgegangen, also weder von besonders günstigen noch besonders ungünstigen Verhältnissen.
- Kosten: Es wurden jeweils die Verfahrenskosten der chemischen und der alternativen Unkrautregulierung verglichen. Dabei wurden die Kosten für Maschinen und Arbeit und die Einsparungen durch reduzierten PSM-Einsatz bestimmt. Die Kosten basieren auf den im Jahr 2019 bestehenden Produzentenpreisen und agrarpolitischen Rahmenbedingungen wie den REB-Beiträgen für schonende Bodenbearbeitung oder reduzierten Herbizideinsatz.
- Wirtschaftliche Auswirkungen: Diese wurden als Hochrechnung für die ganze Schweiz bestimmt. Eigentlich müssten die Massnahmen nur in Zuströmbereichen umgesetzt werden. Weil deren Lage nicht bekannt ist, wurden die Kosten mit der gesamten Anbaufläche der entsprechenden Kultur in der Schweiz und dem betroffenen Anteil multipliziert. Würden die Zuströmbereiche in den Gebieten mit Acker- und Gemüsebau ausgeschieden und die Massnahmen auf diese Flächen beschränkt, würden die Kosten erheblich geringer ausfallen. Es sind derzeit noch weitere Faktoren nur zum Teil bekannt, konkret der betroffene Anteil der Anbaufläche (auf dem z.B. ein bestimmtes Problemunkraut vorkommt), der Anteil der Anbaufläche auf dem die Massnahmen geringeren oder zusätzlichen Aufwand bedeuten und die Verteilung der angebauten Flächen pro Betrieb. Deshalb wurden die wirtschaftlichen Auswirkungen als Bereichsangabe und nicht als fixe Zahl angegeben.

Für die agronomische Beurteilung der Massnahmen wurde zudem die Akzeptanz berücksichtigt, denn diese hängt auch von der Struktur des Betriebs ab und nicht nur von der einzelnen Kultur.

- Akzeptanz: Mit der Akzeptanz ist die Bereitschaft gemeint, den Aufwand für die Umstellung und das Risiko für die Anwendung einer alternativen Anbaumethode auf sich zu nehmen. Gewisse Massnahmen haben trotz ausreichender Wirksamkeit und Kostenneutralität eine tiefe Akzeptanz, z.B. weil die Anbaumethode eine gewisse Erfahrung oder eine zusätzliche Ausbildung erfordert oder weil gewisse Vorstellungen bezüglich akzeptabler Verunkrautung bestehen. Gewisse Massnahmen haben schlichtweg deshalb eine tiefe Akzeptanz, weil sie deutlich erhöhte Kosten oder stark reduzierte Erträge verursachen und daher nicht umsetzbar sind.

Die ökologische Beurteilung der Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz erfolgte primär anhand folgender für die Verfahren bekannten und auf gewissen Parzellen relevanten Umweltbelastungen:

— Auswirkungen auf Nitratauswaschung, Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen und Erosion

Falls die nötige Information vorhanden war, wurden auch die weiteren in Kapitel 2 aufgeführten Kriterien Wissensstand und pedo-klimatische Anwendbarkeit qualitativ beurteilt.

Im Fall der Substitution wurden für alle bis 2019 zur Verfügung stehenden Wirkstoffe zusätzliche, durch die Eigenschaften der Substanzen bedingte Kriterien berücksichtigt. Sie können wie folgt beschrieben werden:

— Resistenzgruppe: Die Resistenzgruppe gemäss dem Herbicide Resistance Action Committee wurde als Mass für die Ähnlichkeit des Substituenten (Ersatzwirkstoffs) mit dem zu ersetzenden Wirkstoff angegeben. Für ein effektives Resistenzmanagement ist es unabdingbar, über Wirkstoffe verschiedener Gruppen zu verfügen. Die Wahrscheinlichkeit einer Resistenzbildung ist je nach Resistenzgruppe unterschiedlich hoch. Bei den Herbiziden haben insbesondere die beiden Gruppen A (Acetyl-CoA-Carboxylase-Hemmer) und B (Acetolactat-Synthase-Hemmer) ein erhöhtes Resistenzrisiko. Entscheidend ist aber schlussendlich die Anzahl resp. die Häufigkeit der Anwendungen von Wirkstoffen aus der gleichen Resistenzgruppe. So sind gerade in der Schweiz nach wie vor Resistenzen gegenüber Wirkstoffen aus der Gruppe C1 vorhanden.

— Grundwasserscore: Dieser basiert auf den im Abschnitt 3.1.4 beschriebenen, an der Agroscope durchgeführten Modellrechnungen zur Grundwasser-Eintragswahrscheinlichkeit von Metaboliten. Als Vorschlag für die qualitative Einstufung der quantitativen Angaben wurden Wirkstoffe mit einem oder mehreren Metaboliten-Scores > 10 als mit mobilen Metaboliten, Wirkstoffe mit Scores zwischen 5 und 10 als mit Metaboliten im Übergangsbereich und Wirkstoffe mit einem Score < 5 als mit nicht mobilen Metaboliten eingestuft. Gemäss dieser Einstufung gibt es insgesamt 15 Wirkstoffe mit mobilen Metaboliten also mehr als die 9 in Stoffauswahl identifizierten Wirkstoffe, wobei es wie dort bereits erwähnt nicht um einen Verzicht sondern darum geht, einen starken Anstieg des Verbrauchs solcher Wirkstoffe zu verhindern. Die Schwellen liessen sich durch den Vergleich mit den verfügbaren Monitoringdaten noch besser abstützen (siehe Abschnitt 3.1.4).

— Risiko für Oberflächengewässer: Das Risiko für Oberflächengewässer wurde anhand des von der Eawag und der Plattform Wasserqualität des VSA entwickelten Eintragsindikators quantifiziert (Wittmer 2014). Dieser wurde von den Autorinnen mit aktualisierten Stoffdaten und unabhängig von den verkauften Mengen berechnet, damit allein die Stoffeigenschaften verglichen werden und Substituenten nicht allein aufgrund ihres zum Berechnungszeitpunkt geringen Einsatzes als risikoarm bewertet werden. Der wirkstoffspezifische Eintragsindikator wurde zudem durch die vom Ökotoxzentrum abgeleiteten chronischen Qualitätskriterien dividiert, um so einen Eintragsrisikoindikator (ERI) pro Stoff zu erhalten. Der auf diese

Weise abgeleitete ERI ist für eine erste Abschätzung einsetzbar, liesse sich mittelfristig aber noch verfeinern und allenfalls auch durch alternative Ansätze wie den von der Agroscope berechneten Risikoscores für Oberflächengewässer ersetzen (Agroscope 2020). Durch den Vergleich mit Überschreitungshäufigkeiten in Oberflächengewässern (Spycher 2019) wurden Schwellenwerte für erhöhte Risiken festgelegt, und zwar wurden Wirkstoffe mit $ERI > 2000$ als hohes Risiko und Wirkstoffe mit $200 < ERI < 2000$ als mittleres Risiko für Überschreitungen chronischer Qualitätskriterien eingestuft. Auch die Wahl dieser Schwellenwerte liesse sich verfeinern, denn im Rahmen des Aktionsplans wird das Monitoring von Oberflächengewässern substanziell ausgebaut.

- PSM mit besonderem Risikopotential: Es wurde abgeklärt, ob der Substituent auf der Liste der PSM mit besonderem Risikopotenzial gemäss Anhang 9.1 des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel ist (BLW 2020). Die dort aufgelisteten Wirkstoffe erfüllen zwar die Kriterien für die Zulassung, aber falls Alternativen verfügbar sind, sollte auf sie verzichtet werden. Der Aktionsplan gibt für diese Wirkstoffe das quantitative Ziel einer Reduktion von 30% bis im Jahr 2027 vor.

4.2 Unkrautregulierung in Hülsenfrüchten: Eiweisserbsen

Die durchschnittliche Eiweisserbsenfläche von 2015-2018 liegt bei 4'227 ha (1.54% der offenen Ackerfläche). Die Anbaufläche ist tendenziell sinkend (BLW 2019a).

Die Ansprüche von Eiweisserbsen an die Fruchtfolge sind sehr gross, es muss eine Anbaupause von 6-7 Jahren eingehalten werden. In der Fruchtfolge werden Eiweisserbsen häufig nach Getreide angebaut. Bei Sommereweisserbsen, was meistens der Fall ist, wird ein Zwischenfutter (i.d.R. Standardmischung 106: Westerwoldisch Raigras, Perserklee, Alexandrinerklee; alles abfrierende Arten) oder eine abfrierende Gründüngung angesät. Der bezüglich Grundwasser relevante Wirkstoff des Anbaus von Hülsenfrüchten ist Bentazon. Gemäss Tabelle 5 sind 80% des gesamten Einsatzes auf den Einsatz in Hülsenfrüchten zurückzuführen (siehe dort zu allenfalls nötigen Abklärungen zum Einsatz auf Wiesen).

4.2.1 Mechanische Unkrautregulierung

Der Wirkstoff Bentazon, wird im Nachauflauf eingesetzt gegen eine allgemeine Verunkrautung, speziell gegen Kamille und Klebern (Fachstellen Pflanzenschutz 2020). Mit mechanischer Unkrautbekämpfung können diese hartnäckigen Unkräuter nicht genügend unter Kontrolle gehalten werden, sodass empfohlen wird, auf Parzellen mit schwer kontrollierbaren Unkräutern (Klettenlabkraut, Kamille, Windenknöterich, verschiedene Gräser) eine andere Parzelle zu wählen oder eine chemische Unkrautregulierung vorzunehmen (Agridea 2020).

Wird eine mechanische Unkrautregulierung angestrebt, sollte die Saatchichte um 10-20% erhöht werden, um Schäden der mechanischen Unkrautregulierung zu kompensieren. Des Weiteren sorgt ein dichter Bestand für eine bessere Unterdrückung der später auflaufenden Unkräuter (ebd.). Für eine me-

chanische Unkrautregulierung sollte auf eine exakte, tiefe Saatgutablage geachtet werden. Bei rein mechanischer Unkrautregulierung besteht das Risiko einer Spätverunkrautung und damit von Ernteerschwernissen und möglicherweise Qualitätseinbussen.

Bei einmaliger Anwendung des Striegels liegt die Regulierungsquote bei 32% - 60%. Diese ist stark abhängig von anderen Faktoren wie Einsatzzeitpunkt, Bodenbedingungen, Entwicklungsstadium, Unkrautarten, Geräteeinstellung und Witterung (Kolbe et al. 2002).

Gerät	Wintereiwisserbse	Sommereiwisserbse	Bemerkungen
Hackstriegel	1) Voraufbau: Falls Unkräuter vorhanden sind und der Boden nicht zu feucht ist. 2) Nachaufbau: Ende Winter bevor sich Ranken berühren	1) Um das Auflaufen 2) Ab 2-3-Blattstadium bis Ranken sich berühren	Wirksamkeit nimmt ab 2-Blattstadium der Unkräuter stark ab.
Rotorhacke	1) Um das Auflaufen 2) Ab 2-3-Blattstadium bis Ranken sich berühren	1) Um das Auflaufen 2) Ab 2-3-Blattstadium bis Ranken sich berühren	Einsatz nur möglich bis sich die Ranken berühren.
Mischanbau mit Gerste	Identische Möglichkeiten wie im Anbau in Reinkultur (siehe oben)		Nur wirksam gegen Unkräuter bis zum 2-Blattstadium

Tabelle 6: Herbizidlose Unkrautregulierungsstrategien in Proteinerbsen.

In Tabelle 7 ist ersichtlich, dass die mechanische Unkrautregulierung ungefähr CHF 50/ha weniger kostet als die chemische, weil das Herbizid recht teuer ist. Eine Voraufbaubehandlung kostet um CHF 100/ha: Bandur – Aclo-nifen CHF 109 bis CHF 112/ha; Bolero – Imazamox CHF 86 bis CHF 99/ha. Nachaufbaubehandlungen sind eher noch teurer.

Massnahmen		Mechanische Unkrautregulierung 2 Durchgänge mit dem Hackstriegel	Chemische Unkrautbekämpfung 1 Flächenbehandlung
Maschinenkosten Traktor (60kW) (Fr./ha)	Fixe Maschinenkosten	8.54	4.78
	Kosten Reparatur	2.22	1.24
	Kosten Treibstoff	9.90	1.92
Maschinenkosten 15m Anbaufeldspritze (Fr./ha)		0.00	25.00
Maschinenkosten 6m Hackstriegel (Fr./ha)		44.00	0.00
Arbeitsaufwand Lohn (Fr./ha)		40.32	24.08
Kosten 10% mehr Saatgut		14.00	0.00
Kosten Pflanzenschutzmittel (Fr./ha)		0.00	104.00
Total (Fr./ha)		118.98	161.03
Feldarbeitszeit (h/ha)		0.50	0.28
Gesamte Arbeitszeit (inkl. Stör- und Rüstzeit) (h/ha)		1.44	0.86

Tabelle 7: Arbeits- und Maschinenkosten der mechanischen und chemischen Unkrautregulierung in Proteinerbsen im Vergleich, ohne Arbeitskosten für Handjäten (Gazzarin und Lips 2018).

Gemäss den Erhebungen der Agroscope werden bei Hülsenfrüchten durchschnittlich 1.5 Herbizidbehandlungen vorgenommen (BLW 2019a). Dies wurde in den Kosten in der Tabelle 7 nicht berücksichtigt. Demzufolge dürfte der Unterschied noch einmal etwa CHF 50/ha grösser zugunsten der mechanischen Unkrautregulierung ausfallen. Die Wirkungssicherheit einer Herbizidbehandlung ist in den Eiweisserbsen jedoch deutlich höher als mit der rein mechanischen Unkrautregulierung und als Folge davon sind die Erträge bei der rein mechanischen Unkrautregulierung tiefer.

Nach DB-Katalog (Agridea 2018) werden 250 kg/ha gesät zu einem Saatgutpreis von 140.00 Fr./ha. Wird 10% mehr Saatgut eingesetzt, entstehen zusätzliche Kosten von 14.00 Fr./ha in der mechanischen Unkrautregulierung.

	ÖLN-Intensiv	ÖLN-Extensio	ÖLN-Extensio mit rein mechanischer UK-Regulierung
Bemerkung	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Düngung • Herbizid + Insektizid 	<ul style="list-style-type: none"> • Herbizid 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Hackstriegel-durchgänge
Ø- Ertrag (dt/ha)	42	35	32
Richtpreis (Fr./dt)	37.00	37.00	37.00
Ertragslös (Fr./ha)	1554	1295	1184

Tabelle 8: Erträge, Richtpreis und Erlös in verschiedenen Anbausystemen in Eiweisserbsen (Agridea 2019), verändert und ergänzt

Bei rein mechanischer Unkrautregulierung kann davon ausgegangen werden, dass ähnliche Erträge wie im biologischen Anbau erreicht werden. Mit 32 dt/ha Ertrag wird in der Betriebswirtschaftlichen Datensammlung (Agridea 2019) unter Biobedingungen gerechnet. Dem Minderertrag von CHF 111/ha (3dt/ha) stehen Minderkosten bei der rein mechanischen Unkrautregulierung von ca. CHF 80/ha (bei 1.5 Herbizidbehandlungen) gegenüber. Gemäss DB-Katalog (Agridea 2018) fallen bei rein mechanischer Unkrautregulierung in Erbsen 5 Stunden Handjäten an. Bei einem Stundenlohn Landwirtschaft von CHF 28/h ergeben sich somit zusätzliche Kosten von CHF 140/ha. Wenn bei herbizidlosem Anbau noch CHF 250/ha REB-Beiträge dazukommen, ergibt sich so bei den Eiweisserbsen ein leichtes Plus bei rein mechanischer Unkrautregulierung gegenüber dem Einsatz eines Herbizides. Wenn die Erbsen pfluglos angebaut werden, können CHF 150/ha plus CHF 200 für herbizidfreien Anbau als REB-Beiträge ausgelöst werden. Auf der anderen Seite ist der Unkrautdruck bei pfluglosem Anbau höher, insbesondere durch Gräser, so dass unter Umständen ein zusätzliches Gräserherbizid eingesetzt werden muss. Aus der Praxis besteht jedoch eine nicht genügende Datenbasis, um eine dementsprechende Berechnung zu erstellen.

4.2.2 Substitution

Bentazon wird praktisch immer in Mischung mit einem anderen Wirkstoff (wie zum Beispiel Imazamox und/oder Pendimethalin) eingesetzt (Fachstellen Pflanzenschutz 2020), eine Sololanwendung bringt nicht den gewünschten

sicheren Erfolg gegen Klebern und Kamille. Der in Deutschland als Alternative zu Bentazon bewilligte Wirkstoff Prosulfocarb hat in der Schweiz keine Bewilligung auf Erbsen. Eine systematische Recherche zu den in Deutschland und Österreich als Alternativen zu Bentazon verfügbaren Wirkstoffe wurde nicht vorgenommen.

Alle bewilligten Produkte im Nachauflauf in den Eiweisserbsen enthalten Bentazon, mit Ausnahme von MCPB (Produkt Divopan). Dieser Wirkstoff hat aber eine ungenügende Wirkung auf Klebern und gar keine Wirkung auf Kamille. Er wird eingesetzt, wenn Winden oder Disteln vorhanden sind. Der Wirkstoff Imazamox kann im Voraufbau oder im frühen Nachauflauf eingesetzt werden. Allerdings hat er im Nachauflauf eingesetzt ein erhöhtes Phytotox-Risiko (Aufhellungen an Blättern und verzögerte Blüte) und eine schlechtere Wirkung auf Hirsen. Zudem ist Imazamox ein Wirkstoff mit hohem Risiko für Oberflächengewässer (ERI > 2000) und zugleich auf der Liste des AP PSM als Wirkstoff mit besonderem Risikopotential. Es gibt also derzeit keine echte chemische Alternative für Bentazon im Nachauflauf in den Erbsen. Im Voraufbau gibt es Mittel, welche eine Kleberwirkung haben. Das Problem ist oft, dass Klebern klassische Tiefkeimer sind (keimen auch aus 6-8cm Bodentiefe) und deshalb mit Voraufbaumitteln, welche nach Positionselektivität funktionieren, nicht erfasst werden.

4.2.3 Fazit Eiweisserbsen

Die derzeit zugelassenen Produkte ermöglichen keine chemische Substitution mit einer ähnlichen Wirkung wie die der Produkte mit Bentazon. Die rein mechanische Unkrautregulierung ist wirtschaftlich mit den REB-Beiträgen ebenbürtig, jedoch ist mit vermehrter Spätverunkrautung zu rechnen. Unter der Annahme, dass die genannten Problemunkräuter auf geschätzten 30-50% der Fläche rein mechanisch reguliert werden müssen, steigt das Risiko von Handarbeitseinsätzen. Sobald zusätzliche Handarbeit anfällt, wird die Wirtschaftlichkeit der rein mechanischen Variante rasch unrentabel. Wenn Erbsen pfluglos angebaut werden, können zusätzliche REB-Beiträge ausgelöst werden, was möglicherweise die Rechnung zugunsten der rein mechanischen Unkrautregulierung beeinflussen könnte. Der in Tabelle 6 erwähnte Anbau in Mischbau mit Gerste ist eine interessante Option, die aber derzeit von den Annahmestellen nicht akzeptiert wird.

4.3 Unkrautregulierung in Hülsenfrüchten: Soja

Die durchschnittliche Soja-Anbaufläche von 2015-2018 liegt bei 1'745 ha, dies entspricht lediglich 0.64% der offenen Ackerfläche. 2018 wurden 214 ha als Bio angebaut (Brunner 2020). Die Anbaufläche blieb in den letzten Jahren stabil, mit leichten Schwankungen.

Die Ansprüche von Soja an die Fruchtfolge sind gross, es muss eine Anbaupause von mindestens 3 Jahren eingehalten werden. In der Fruchtfolge wird Soja wie die Eiweisserbse häufig nach Getreide angebaut. Ein Zwischenfutter resp. eine Gründüngung ist unter ÖLN-Bedingungen Pflicht (i.d.R. Standardmischung 106: Westerwoldisch Raigras, Perserklee, Alexandrinerklee; alles abfrierende Arten oder Standardmischung 200: Italienisches Raigras und Rotklee), oder es wird eine abfrierende Gründüngung angesät.

4.3.1 Mechanische Unkrautregulierung

Bei einer rein mechanischen Unkrautregulierung kann von einem ähnlichen Ertragsniveau ausgegangen werden wie in der biologischen Landwirtschaft. Der Ertrag im ÖLN wird im DB-Katalog der Agridea (2018) mit 26 dt/ha und derjenige unter Biobedingungen mit 21 dt/ha angenommen. Der Richtpreis 2019 (Agridea 2019) betrug bei den Sojabohnen CHF 41/dt. Somit ergibt die rein mechanische Unkrautregulierung einen monetären Minderertrag von CHF 205/ha. Beim Anbau unter Biobedingungen wird eine höhere Saattiefe von 10% gewählt, um Pflanzenverluste bei der mechanischen Unkrautregulierung auszugleichen. Bei Saatgutkosten von CHF 300/ha macht dies CHF 30/ha aus. Den Mindererträgen steht ein Kostenersparnis von 90 CHF/ha der chemischen Unkrautbekämpfung gegenüber (Tabelle 9).

Massnahmen	Mechanische Unkrautregulierung 2 Hackstriegeldurchgänge und 2 Scharhackdurchgänge	Chemische Unkrautbekämpfung 2 Flächenbehandlungen
Maschinenkosten Traktor (60kW) (Fr./ha)	26.64	9.56
Fixe Maschinenkosten		
Kosten Reparatur	6.93	2.49
Kosten Treibstoff	28.30	3.84
Maschinenkosten 15m Anbaufeldspritze (Fr./ha)	0.00	50.00
Maschinenkosten 6m Hackstriegel (Fr./ha)	44.00	0.00
Maschinenkosten Hackgerät, 6-reihig (2 Personen) (Fr./ha)	72.00	0.00
Arbeitsaufwand Lohn (Fr./ha)	192.64	48.16
Kosten 10% mehr Saatgut	30.00	0.00
Kosten Pflanzenschutzmittel (Fr./ha)	0.00	90.00
Total (Fr./ha)	400.51	204.05
Feldarbeitszeit (h/ha)	1.56	0.56
Gesamte Arbeitszeit (inkl. Stör- und Rüstzeit) (h/ha)	6.88	1.72

Tabelle 9 Arbeits- und Maschinenkosten der mechanischen und chemischen Unkrautregulierung in Sojabohnen im Vergleich, ohne Arbeitskosten für Handjäten (Gazzarin und Lips 2018).

Sojabohnen sind sehr konkurrenzschwach gegenüber Unkraut. Gängig sind deshalb 2 Hackstriegel- und 2 Hackdurchgänge.

Aufwandposten	Kosten (in CHF)
Minderertrag	205
Erhöhte Saatmenge	30
Mehrkosten Arbeit und Maschinen	90
Handarbeit Jäten	560
Total	885

Tabelle 10: Vergleich chemische und rein mechanische Unkrautregulierung (Angaben/ha)

Je nach Grad der Verunkrautung ist neben den Durchgängen mit dem Hackstriegel und dem Hackgerät auch Handarbeit nötig. Vor einigen Jahren

waren beim Biosoja-Anbau 50 bis 150 Handarbeitsstunden pro Hektare üblich. Heute geht die Spannweite von 10 bis 25 Stunden pro Hektare, im schlimmsten Fall von 50 h/ha. Durchschnittlich wird mit einem Aufwand von 20h/ha für das Handjäten gerechnet. Um den Handarbeitsaufwand zu minimieren, muss das Unkraut auch in den Reihen maschinell reguliert werden (zum Beispiel mit einer Fingerhacke) und vor der Aussaat sollte unbedingt eine Unkrautkur gemacht werden (BIOAktuell 2019). Wenn man nun noch die durchschnittliche Arbeitszeit für das Handjäten dazurechnet, kommen noch CHF 560/ha dazu, was insgesamt Mehrkosten von CHF 885/ha verursacht (Tabelle 10).

4.3.2 Substitution

In Soja sind in der Schweiz einzig zwei Wirkstoffe im Nachauflauf bewilligt: Bentazon und Imazamox. Bentazon kostet zwischen CHF 116 und CHF 140/ha, Imazamox zwischen CHF 86 und CHF 99/ha, ist also rund CHF 30/ha günstiger. Der in Österreich als Alternative zu Bentazon eingesetzte Wirkstoff Thifensulfuron-methyl, hat in der Schweiz keine Bewilligung in Soja (bwsb 2020). Bentazon und Imazamox werden beide solo angewendet oder können zusammen gemischt ausgebracht werden. In Soloanwendung und in Mischung, haben sie nur eine Teilwirkung auf Klebern. Bei Kamille hat Imazamox nur eine ungenügende Wirkung. Falls Klebern das Problem sind, kann also auf Bentazon verzichtet werden, weil es eine ungefähr gleich gute Alternative gibt. Allerdings gilt es hier zu erwähnen, dass Imazamox ein Wirkstoff mit hohem Risiko für Oberflächengewässer (ERI > 2000) ist und zugleich auf der Liste des AP PSM als Wirkstoff mit besonderem Risikopotential aufgeführt ist (BLW 2020). Imazamox stellt deshalb nur bedingt eine Alternative dar. Wenn Kamille das Problem ist, gibt es unter den derzeit zugelassenen Produkten keine Alternative im Nachauflauf. Für die Abschätzung wurde angenommen, dass dies auf 10-30% der Flächen der Fall ist.

4.3.3 Fazit Soja

Die derzeit zugelassenen Produkte ermöglichen keine chemische Substitution, da die einzige Alternative Imazamox ein Wirkstoff mit besonderem Risikopotential ist. In den Produkten für den Voraufbau sind entweder Dimethenamid-P oder Pethoxamid enthalten. Voraufbau-Behandlungen sind also auch keine Alternative.

Mit den verwendeten Kriterien kommt als einzige Option die mechanische Unkrautregulierung in Frage. Bei der Substitution müsste überprüft werden, welche Wirkstoffe in anderen Ländern wie z.B. in Österreich und Deutschland als Ersatzkandidaten für Bentazon verwendet werden, denn in beiden Ländern sind heute keine Produkte mit dem Wirkstoff Bentazon mehr zugelassen.

4.4 Unkrautregulierung in Hülsenfrüchten: Ackerbohnen

In Ackerbohnen gibt es keine Bewilligung für Bentazon. Damit erübrigt sich eine genauere Betrachtung der Bentazon-Problematik.

4.5 Unkrautregulierung in Zuckerrüben

Die durchschnittliche Zuckerrübenfläche von 2015-2018 liegt bei 19'142 ha (7% der offenen Ackerfläche). Die Anbaufläche ist in den letzten 3 Jahren gesunken. Futterrüben wurden im gleichen Zeitraum nur noch auf 494 ha angebaut (Anbau seit Jahren rückläufig).

Die Ansprüche von Zucker- und Futterrüben an die Fruchtfolge sind gross. Sie dürfen nur alle 4 Jahre auf der gleichen Fläche angebaut werden resp. ihr Anteil darf 25% der offenen Ackerfläche nicht übersteigen.

Zuckerrüben werden in der Fruchtfolge häufig nach Winterweizen mit einem Zwischenfutter (i.d.R. Standardmischung 106: Westerwoldisch Raigras, Perserklee, Alexandrinerklee; alles abfrierende Arten) oder einer abfrierenden Gründüngung angesät.

Auf einem beachtlichen Teil der Fläche wird nach wie vor für die Grundbodenbearbeitung gepflügt. Die Fläche mit Mulchsaat (z.B. Grubber und Zinkenrotor) nimmt jedoch zu. Direktsaat wird kaum praktiziert.

Der bezüglich Metaboliten ausschliesslich dem Zuckerrübenanbau zuzuschreibenden Wirkstoff ist gemäss Tabelle 5 Chloridazon, während bei Dimethenamid-P mit 39% und S-Metolachlor mit 25% Anteil an der insgesamt eingesetzten Menge die Zuckerrüben eine relevante Kultur darstellen. Gemäss Tabelle 15 lag der Anteil an allen Herbizidbehandlungen im Mittel der Jahre 2015-2017 bei knapp 2 % (Chloridazon und Dimethenamid-P) bzw. 7% (S-Metolachlor). Bei der Substitution von Herbiziden im Zuckerrübenanbau ist darauf zu achten, dass es nicht zu einem vermehrten Einsatz des Wirkstoffs Dimethenamid-P kommt.

4.5.1 Mechanische Unkrautregulierung

Vollständiger Verzicht auf Herbizide

Ein vollständiger Verzicht auf Herbizide im Zuckerrübenanbau ist momentan noch mit sehr viel Handarbeit verbunden. Neben mindestens drei Hackdurchgängen sind zusätzlich zwei Durchgänge von Hand nötig, um auch das Unkraut in den Reihen zu beseitigen (Irla et al. 2004). Der durchschnittliche Handarbeitsaufwand für das Jäten in den Zuckerrüben liegt je nach Quelle bei 150Akh – 185Akh (FiBL 2018; Irla et al. 2004; Böhler et al. 2017). Wird dieser Arbeitsaufwand aufgerechnet entstehen bereits Lohnkosten von rund CHF 4'700/ha (CHF 4'200 bis CHF 5'180) alleine für das Jäten von Hand auf den Reihen. Dieser grosse Arbeitsaufwand kann auch durch den REB-Beitrag von CHF 800/ha für den vollständigen Verzicht auf Herbizide im Zuckerrübenanbau bei weitem nicht wettgemacht werden.

Um den Handarbeitsaufwand zu senken, verfolgt das FiBL gemeinsam mit Lenzberg Precision Farming die Idee quer zur Reihe zu hacken, um so auch die Unkräuter in der Reihe zu erfassen. Das Querhacken setzt allerdings eine sehr genaue Saatablage voraus und befindet sich noch in der Testphase (FiBL 2018).

Spezifische Literatur zu Ertragsunterschieden im herbizidlosen Anbau von Zuckerrüben wurde nicht gefunden. Die durchschnittlichen Biozuckerrüben-erträge, bei welchen das Anwenden von Herbiziden untersagt ist, liegen zwischen 450dt-600dt/ha (Böhler et al. 2017). Der durchschnittliche Rübenertrag aller Zuckerrübenproduzenten lag im Durchschnitt von 2015-2018 bei 703 dt/ha (BLW 2019a). Bei diesem tieferen Bio-Ertrag spielt aber auch noch die Düngung eine Rolle.

Kombination mechanisch-chemische Unkrautregulierung

Durch die Kombination von mechanischen und chemischen Unkrautbekämpfungsmassnahmen lassen sich die Herbizidmengen im Vergleich zur chemischen Flächenbehandlung um bis zu 65% reduzieren und dies bei gleichbleibenden Erträgen. Die Herbizidreduktionen werden mit Bandspritzungen in der Reihe und mit Hacken zwischen den Reihen erreicht (Keiser et al. 2016). Es kann davon ausgegangen, dass kombinierte Verfahren zu einer linearen Reduktion der Wirkstoffmenge führen, d.h. es fallen nicht bestimmte Wirkstoffe weg, sondern alle gängigen Wirkstoffe werden eingesetzt aber in entsprechend tieferen Mengen pro Hektare.

Einerseits können so Kosten für die Herbizide reduziert werden, andererseits führt die mechanische Unkrautregulierung aber zu erhöhten Arbeitskosten.

Strategie	Erläuterung zur Herbizidreduktion	Herbizidreduktion	REB-Beitrag
Flächenbehandlung bis 4-Blattstadium, dann nur noch Hacken	<ul style="list-style-type: none"> Ab Auflaufen der Unkräuter bis 4-Blattstadium der Rübe gewohnte Flächenbehandlung möglich (1 bis 2 Split-Behandlungen) Ab 4-Blattstadium zwischen den Reihen nur noch mechanische Unkrautregulierung durch Hacken (Bandbehandlung in den Reihen ist weiterhin erlaubt)	0-30%	200.00 Fr./ha
Bandspritzung bis 4-Blattstadium, dann nur noch Hacken	<ul style="list-style-type: none"> Vorauflaufbehandlung im Band ab Saat möglich Ab 2-4 Blattstadium der Rüben Hacken mit Pflanzenschutzscheibe evtl. mit angebauter Fingerhacke (Bekämpfung Unkräuter in der Reihe) (Bandbehandlung in den Reihen ist weiterhin erlaubt)	35-65%	400.00 Fr./ha

Tabelle 11: Erprobte Strategien zur Herbizidreduktion in Zuckerrüben

Nach DB-Katalog (Agridea 2018) werden rund CHF 475/ha an Herbiziden im Zuckerrübenanbau verwendet (3 Behandlungen à CHF 125/ha und ein Herbizid gegen Spezialunkräuter à CHF 100/ha).

Anhand Tabelle 12 könnte man davon ausgehen, dass die mechanische Unkrautregulierung die kleinsten Kosten verursacht. Da jedoch bedeutend mehr Hackdurchgänge als Spritzdurchgänge nötig sind, um das Unkraut unter Kontrolle zu halten, sind Verfahren mit mechanischer Unkrautregulierung trotzdem kostenintensiver.

1 Hektare	Kostenstelle	Kosten (Fr)	Feldarbeitszeit (h)
1 Flächenspritzung (FS)	Kosten Traktor	10.64	0.28
	Kosten Anbaufeldspritze	25	
	Kosten PSM	125	
	Kosten Arbeit	7.84	
	TOTAL	168.48	
1 Bandspritzung (BS)	Kosten Traktor	19	0.5
	Kosten Bandspritze	25	
	Kosten PSM (-60%)	50	
	Kosten Arbeit	14	
	TOTAL	108	
1 Hackdurchgang (6-reihig) Kameragesteuert	Kosten Traktor	24.7	0.65
	Kosten Hackgerät	55	
	Kosten Arbeit	18.2	
	TOTAL	97.9	

Tabelle 12: Kostenaufwand für einen Durchgang des jeweiligen Verfahrens für eine Hektare Zuckerrüben (Agroscope 2019; Keiser et al. 2016, eigene Darstellung)

Es ist schwierig, eine allgemeingültige Aussage zu den Verfahrenskosten zu machen, da sie sehr abhängig von der Anzahl Durchgänge in den Verfahren und diese wiederum sehr abhängig vom Unkrautdruck, der Bodenart, den Witterungsverhältnissen usw. sind. Bei hohem Unkrautdruck sind sehr viel mehr Hackdurchgänge nötig, um den Unkrautdruck mechanisch unter Kontrolle zu halten. Vermehrte Hackdurchgänge führen dementsprechend zu höheren Kosten für die Unkrautbekämpfung.

Arbeitsschritte/Verfahren	Chemisch	Flächenspritzung + Hacken	Band-spritzung + Hacken	Mechanisch
Anzahl Flächenspritzungen	4	2	0	0
Kosten Flächenspritzungen (CHF/ha)	673.92	336.96	0.00	0.00
Anzahl Bandspritzungen	0	2	4	0
Kosten Bandspritzungen (CHF/ha)	0.00	216.00	432.00	0.00
Anzahl Hackdurchgänge	0	2	4	4
Kosten Hackdurchgänge (CHF/ha)	0.00	195.80	391.60	391.60
Anzahl Handarbeitsstunden (h)	0	0	0	168
Kosten Handarbeit	0.00	0.00	0.00	4704.00
Kosten TOTAL (CHF/ha)	673.92	748.76	823.60	5095.60
REB-Beiträge (CHF/ha)	0.00	200.00	400.00	800.00
Kosten abzgl. REB-Beiträge (CHF/ha)	674.00	549.00	424.00	4296.00

Tabelle 13 Gegenüberstellung der Verfahrenskosten verschiedener Unkrautregulierungsstrategien in den Zuckerrüben (Agroscope 2019, Keiser et al. 2016, eigene Darstellung)

Anhand Tabelle 13 wird ersichtlich, dass die mechanisch-chemische Unkrautbekämpfung verglichen mit der rein chemischen Unkrautbekämpfung zu Mehrkosten führt. Dieser Kostennachteil wird durch die REB-Beiträge ausgeglichen, ausser beim rein mechanischen Verfahren.

Auch darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass in Jahren mit kleinem Unkrautdruck vielleicht nur gerade 3 Herbizid-Spritzungen nötig sind, aber trotzdem 2-3 Hackdurchgänge gemacht werden müssen, denn der Erfolg des Hackgeräts beruht auf mehrfacher Anwendung. Dies bestätigen auch die Untersuchungen von Keiser et al. (2016), ersichtlich in Tabelle 14.

	Flächenbehandlung bis 4-Blatt, dann nur noch Hacken	Bandspritzung bis 4-Blatt, dann nur noch Hacken	Chemisch
Erläuterungen zum Herbizidverzicht	<ul style="list-style-type: none"> Ab Auflaufen der Unkräuter bis 4-Blattstadium der Rübe gewohnte Flächenbehandlung möglich (i.d.R. 1-2 Splitbehandlungen) Ab 4-Blattstadium mechanische Unkrautregulierung durch Hacken (Bandbehandlung ist weiterhin erlaubt)	<ul style="list-style-type: none"> Vorauflaufbehandlung im Band gleichzeitig mit Saat Ab 2-4 Blattstadium der Rüben hacken mit Pflanzenschutzscheibe und evtl. mit angebauter Fingerhacke (Bekämpfung Unkräuter in der Reihe) (Bandbehandlung ist weiterhin erlaubt)	Chemische Flächenbehandlung (Standardverfahren)
Herbizidreduktion	25-30% In 2 von 5 Versuchen war keine Herbizidreduktion möglich Ø:16.8%	34-67% Ø: 56.7%	0%
Anzahl Hackdurchgänge	3/2/2 1/2 Ø=2	5/4/3 2 Ø=3.5	–
Anzahl Spritzdurchgänge^[1]	5/5/3 3/3 Ø=4	5/5/3 3 Ø=4	8/6/3 3/4 Ø=5
Arbeitsaufwand je ha	1.30h (Hacken) ^[2] 1.12h (Spritzen) = 2.42 (Gesamt)	2.28h (Hacken) ^[2] 2.00h (Spritzen) = 4.28 (Gesamt)	1.40h (Spritzen) = 1.40h (Gesamt)
Mehrkosten je ha	100-320Fr Mehrkosten verglichen mit chemischem Standard	100-320Fr Mehrkosten verglichen mit chemischem Standard	–
REB-Beiträge	M1 200.-Fr	M2 400.-	–

Tabelle 14: Zusammenfassung der Ergebnisse der Studien von Keiser et al. 2016

[1] Da im Versuch auch auf Humusböden gearbeitet wurde, ist der Durchschnitt der Herbizidbehandlungen höher als im Durchschnitt der Schweiz üblich

[2] Arbeitsaufwand kleiner, da mit kameragesteuerten Geräten gearbeitet wurde und keine zweite Person auf dem Hackgerät nötig ist

Anwendbarkeit und Akzeptanz im Zuckerrübenanbau

Die Anwendbarkeit hängt vor allem vom Bodentyp und den Witterungsbedingungen ab. Die Studien von Keiser et al. (2016) haben gezeigt, dass die mechanische Unkrautregulierung in Humusböden an die Grenzen kommt resp. der Unkrautdruck so hoch ist, dass mit vermehrtem Handarbeitseinsatz gerechnet werden muss. Ebenfalls entscheidend ist das Wetter: erfolgreiche mechanische Unkrautregulierung ist nur möglich, wenn zur rechten Zeit, das heisst, wenn die Unkräuter noch klein sind und nach dem Hackdurchgang

mindestens 1 Tag keine Niederschläge fallen. Da mehrere Hackdurchgänge nötig sind, werden schätzungsweise etwa jedes zweite Jahr ein oder mehrere Hackdurchgänge nicht die volle Wirkung aufweisen.

Die Anschaffung eines modernen Hackgerätes ist mit hohen Kosten verbunden. So kostet ein 6reihiges kameragesteuertes Hackgerät ca. CHF 35'000. Damit die Kosten pro Hektare nicht zu hoch ausfallen, müssen entsprechend mindestens 20 ha pro Jahr gehackt werden können (Keiser et al. 2016). Deshalb werden Hackgeräte heute überwiegend überbetrieblich eingesetzt. Zunehmend werden Hackarbeiten auch von Lohnunternehmern angeboten. Hacken ist eher in der Westschweiz verbreitet, was einerseits mit den günstigeren Witterungsbedingungen und andererseits mit den grösseren Flächen zusammenhängen dürfte.

Die anstehenden Investitionen (vor allem wenn auf dem Betrieb bereits eine Pflanzenschutzspritze vorhanden ist), die Unsicherheiten im Einsatz (Witterung, Mehrarbeit) und zusätzlich nötiges Wissen sind sicher die hemmenden Faktoren in der Akzeptanz der mechanischen Unkrautregulierung in den Zuckerrüben. Ebenfalls hört man in der Praxis häufig, dass die zeitliche Begrenzung der REB-Beiträge die Bereitschaft, in die Hacktechnik zu investieren, hemmen.

4.5.2 Substitution

Chloridazon: Für den Wirkstoff Chloridazon wurde die Bewilligung auf den 6.1.2020 zurückgezogen. Die Ausverkaufsfrist endet am 6.1.2021 und die Aufbrauchfrist am 6.1.2022. Aus diesem Grund wird auf die Diskussion betreffend Substitution verzichtet. Der Wirkstoff Chloridazon hatte seine Stärke in erster Linie bei der Bekämpfung von Windenknöterich. Hier war er dem Wirkstoff Metamitron klar überlegen. Die pro Jahr verkauften Mengen haben von 2008 bis 2018 von 20.4 auf 3.8 t/a abgenommen (BLW 2019b). Dies dürfte die in den letzten Jahren vergleichsweise tiefe relative Bedeutung im Vergleich zu anderen Herbiziden erklären (Tabelle 15).

S-Metolachlor: Der Wirkstoff S-Metolachlor (verschiedene Produkte, die meist eingesetzten Produkte in den Zuckerrüben sind Dual Gold, Calado und Frontex) wird häufig eingesetzt, wenn Gräser bekämpft werden müssen. Er hat eine gute Wirkung auf verschiedene Hirsearten und auf Ripengrasarten. Er hat eine gute Dauerwirkung und verhindert auch ein spätes Auflaufen von Hirsen. Eine gute Wirkung ist auch gegen Amarant und Franzosenkraut vorhanden. Ab der zweiten Splitbehandlung kann Dual Gold einer gängigen Herbizidmischung zugesetzt werden. Es dürfen maximal 1.5kg Wirkstoff/ha innerhalb von 3 Jahren auf der gleichen Parzelle eingesetzt werden (Ausnahme Bekämpfung von Erdmandelgras). Der Wirkstoff darf nicht in Karstgebieten eingesetzt werden.

In dem von der Agroscope erstellten Ranking der schweizweit im Zuckerrübenanbau eingesetzten Herbizide lagen Chloridazon und S-Metolachlor an der 10. und 6. Stelle (Tabelle 15). Am häufigsten wurden die drei Wirkstoffe Phenmedipham, Ethofumesat und Metamitron eingesetzt, welche zusammen bereits mehr als die Hälfte der Applikationen abdecken. Eine mit S-

Metolachlor vergleichbare Wirkung haben die 11 Wirkstoffe in der Spalte "Wirkung gegen Gräser" plus zwei weitere mit Teilwirkung.

Wirkstoff	Anteil aller Herbizidbehandlungen	Kumulativer Anteil	Wirkung gegen Gräser X = gute Wirkung, (X) = Teilwirkung	Resistenzgruppe	Grundwasser-Score (Agroscope 2020)	Risikoindikator (ERI) für Oberflächengewässer	PSM mit besonderem Risikopotential (BLW 2020)
Phenmedipham	19%	19%	-	C ₁	0	NA	
Ethofumesat	18%	37%	(X)	N	0	17.0	
Metamitron	17%	54%	X	C ₁	0.1	15.8	
Desmedipham	14%	68%	-	C ₁	<0.1	NA	
Lenacil	10%	78%	-	C ₁	<0.1	324.0	X
S-Metolachlor	7%	85%	X	K ₃	200	38.4	
Triflursulfuron-methyl	5%	90%	(X)	B	4.7	556.9	
Dimethenamid-P	2%	92%	X	K ₃	24	208.5	
Glyphosat	2%	94%	X	G	0	0.0	
Chloridazon	2%	95%	X	C ₁	73	6.2	
Clopyralid	1%	97%	-	O	0	1446.7	
Fluazifop-P-Butyl	1%	98%	X	A	5	0.9	
Clethodim	1%	98%	X	A	4.6	0.9	
Quizalofop-P-ethyl	1%	99%	X	A	<0.1	NA	
Haloxyfop-(R)-Methylester	<0.1%	>99%	X	A	25	0.0	X
Propaquizafop	<0.1%	>99%	X	A	<0.1	NA	
Cycloxydim	<0.1%	>99%	X	A	0.1	0.0	

Tabelle 15: Prozentuale Verteilung der in den Jahren 2015-2017 im Zuckerrübenanbau eingesetzten herbiziden Wirkstoffe (Quelle: Agroscope). Wirkstoffe bis zum kumulativen Anteil von 99% aufgeführt plus zusätzlich einige für den Einsatz gegen Gräser zugelassenen aber in den Erhebungsjahren kaum genutzter Herbizide. Die Grundlagen der Beurteilungskriterien gemäss Abschnitt 4.1. Dunkelgraue Schattierung bedeutet Wirkstoff mit einem oder mehreren mobilen Metaboliten. Hellgraue Schattierung bedeutet Wirkstoff mit einem oder mehreren Metaboliten im Übergangsbereich zwischen mobil und nicht mobil bzw. mittleres Risiko für Oberflächengewässer, NA: Fehlende Angaben zur Berechnung des ERI.

Für Chloridazon gibt es wie oben erwähnt, keine Wirkstoffe mit ähnlicher Wirkung gegen Knötericharten. Als möglicher Ersatzwirkstoff käme Dime-thenamid-P in Frage. Bei den dikotylen Unkräutern hat der Wirkstoff eine mindestens ebenbürtige, teilweise sogar leicht bessere Wirkung. Bei den Gräsern ist eine gleich gute Wirkung auf Hirsen zu erwarten, bei den Ris-

pengrasarten eine etwas schwächere Wirkung. Die Pflanzenschutzmittelkosten/ha sind praktisch gleich. Es ist aber ein Wirkstoff mit erhöhtem Grundwasserscore, d.h., er könnte bei vermehrtem Einsatz zu Überschreitungen führen. Zudem weist er ein mittleres Risiko für Oberflächengewässer auf und in nationalen Messkampagnen wurden in zwei von 13 untersuchten Oberflächengewässern Überschreitungen festgestellt (Spycher 2019). Aus diesen Gründen kommt er nicht als Ersatzwirkstoff in Frage.

Die Gräser könnten auch mit einem spezifischen Gräsermittel bekämpft werden. Dazu stehen folgende Wirkstoffe resp. Produkte zur Auswahl: Pro-paquizafoxop (Agil), Quizalofop-P-Ethyl (Targa Super), Fluazifop-P-Butyl (Fusilade Max), Haloxyfop-(R)-Methylester (Gallant 535), Cycloxydim (Focus Ultra) und Clethodim (Select). Alle haben weder einen erhöhten Grundwasserscore, noch einen erhöhten ERI und figurieren auch nicht auf der Liste der Wirkstoffe mit besonderem Risikopotential.

Haloxyfop-(R)-Methylester fällt als Alternative weg. Es ist auf der Liste der Pflanzenschutzmittel mit besonderem Risikopotenzial (Anhang 9.1) des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel und auf der Rangliste der Grundwasserscores ist es auf Rang 9 (Agroscope 2020). Trotz dieser Einschränkung stehen genügend andere Wirkstoffe von spezifischen Gräsermitteln zur Verfügung. Die Kosten pro Hektare sind etwas höher als von S-Metolachlor und die spezifischen Gräsermittel erfassen natürlich keine breitblättrigen Unkräuter wie Amarant, Franzosenkraut oder Hundspetersilie.

4.5.3 Conviso-Rüben

Das Conviso-Smart-System im Zuckerrübenanbau ist ein gemeinsames Projekt der Firmen Bayer (Pflanzenschutz) und KWS (Züchtung). Seit 2001 wurden 1.5 Milliarden Rüben-Genotypen auf eine natürlich vorhandene Acetolactat-Synthase-Resistenz getestet und man hat einen resistenten Genotyp gefunden. Damit kann nun in diesen Rüben das Herbizid «Conviso One» eingesetzt werden. Das Herbizid enthält die beiden Wirkstoffe Foramsulfuron und Thienincarbazone, beide aus der Gruppe der Sulfonylharnstoffe. Das Herbizid hat ein breites Wirkungsspektrum gegen alle wichtigen dikotylen und monokotylen einjährigen Unkräuter und eine Teilwirkung gegen Wurzelunkräuter (Convisosmart 2020). Das Herbizid resp. das «Paket» Saatgut & Herbizid ist seit 2019 in der Schweiz zugelassen. Es wird relativ spät, ab dem 2-4-Blattstadium in einer einmaligen Behandlung mit der vollen Menge (1 l/ha) oder in zwei Splitbehandlungen à je 0.5 l/ha eingesetzt. Ein wesentlicher Vorteil dieses Systems ist sicher, dass viel weniger Wirkstoffmenge pro Hektare (nur 80 g) gegenüber dem klassischen Kleinmengensplit eingesetzt wird und dass eben mit der ersten Behandlung länger zugewartet werden kann, was gewisse positive Effekte betreffend Erdflöhbefall (Ablenkfutter durch Unkräuter) erwarten lässt. Nur zwei gegenüber 3-5 Splitbehandlungen bedeutet natürlich auch weniger Durchfahrten und weniger Kosten. Im klassischen Anbau entstehen im Durchschnitt CHF 475/ha Herbizidkosten (Agridea 2020) bei 4 Durchfahrten à CHF 60/ha Totalkosten von CHF 715/ha. Bei Convisorüben sind die Herbizidkosten CHF 96/ha und 2 Durchfahrten CHF 120/ha und somit Gesamtkosten Pflanzenschutz von CHF

216/ha, also ziemlich genau CHF 500/ha weniger. Der grösste Nachteil ist, dass beide Wirkstoffe aus der HRAC-Gruppe B - Aminsäuresynthesehemmer – stammen. Die ALS-Hemmer gelten als Herbizidgruppe mit hohem Resistenzrisiko. Es ist unabdingbar, dass der Betrieb, welcher Conviso-Rüben anbaut ein Resistenzkonzept für den ganzen Betrieb erarbeitet. Zudem müssen Feldhygieneregeln strikt befolgt werden. Das heisst, Schosser-Rüben müssen konsequent ausgerissen werden und die Rübenköpfe müssen nach der Ernte eingearbeitet werden. Gemäss der Schweizerischen Fachstelle für Zuckerrüben ist bei Conviso-Rüben mit einem Minderertrag im bereinigten Zuckerertrag von 5-10% zu rechnen (SFZ 2019).

Als Ersatz für den problematischen Wirkstoff S-Metolachlor scheint der Ansatz sehr vielversprechend. Es gilt jedoch zu bedenken, dass der Wirkstoff Foramsulfuron zu den Wirkstoffen mit häufigen Überschreitungen in Oberflächengewässern zählt.

4.5.4 Fazit Zuckerrüben

Ein vollständiger Verzicht auf Herbizide führt trotz derzeit verfügbaren REB-Beiträgen für herbizidfreien Zuckerrübenanbau zu Mehrkosten von ungefähr CHF 3'700.-/ha. Zusätzlich muss mit einem Ertragsverlust gerechnet werden, der sich durch Vergleich mit den im biologischen Anbau erzielten Erträgen teilweise abschätzen liesse. Kombinierte Verfahren sind zwischen CHF 70 und 150.-/ha teurer als rein chemische Verfahren, dank den verfügbaren REB-Beiträgen aber wirtschaftlicher und ermöglichen es, den Wirkstoffeinsatz um 25-67% zu reduzieren. Voraussetzung ist eine ausreichende Auslastung der Maschinen von mindestens 20 ha, was auf ca. 50% der Betriebe möglich sein sollte. Bei den kombinierten Verfahren sind keine Auswirkungen auf den Ertrag zu erwarten.

Die chemische Substitution der für Zuckerrüben relevanten Wirkstoffe ChloRIDAZON und S-Metolachlor ist von der Wirkung her möglich und führt nicht zu einer Verlagerung auf Wirkstoffe mit anderweitig ungünstigem Profil (Grundwasser, Oberflächengewässer, generelles Risiko, Resistenzen). Die alternativen Produkte sind ca. CHF 20.- bis CHF 40.- teurer (wenn eine separate Durchfahrt mit einem spezifischen Gräsermittel nötig wird, steigen die Kosten um CHF 120 bis CHF 200).

4.6 Unkrautregulierung in Mais

Mais ist in der Schweiz eine flächenmässig wichtige Kultur. Gemäss Agrarbericht (BLW 2019a) wurden in der Schweiz im Durchschnitt von 2015-2018 15'282 ha Körner und 46'758 ha Silo- und Grünmais angebaut. Dies macht 5.6 resp. 17.1% der offenen Ackerfläche aus. Zusammengezählt sind das 22.7% also fast ein Viertel der gesamten offenen Ackerfläche.

Die Ansprüche von Mais an die Fruchtfolge sind nicht gross. Gemäss ÖLN gelten folgende Vorgaben beim Mais:

Mais mit Untersaat, Mais als Mulch-, Streifenfrässaat oder Direktsaat nach Gründüngung, Zwischenfutter oder Grünland, maximal 2 Jahre hintereinander, dann 2 Jahre Anbaupause

Mais (übrige Anbauformen) maximal 2 Anbaujahre hintereinander, dann 3 Jahre Anbaupause

Mais wird in der Fruchtfolge häufig direkt nach Kunstwiese (Nährstoffe der Kunstwiese können so am besten genutzt werden oder nach Getreide und einer Zwischenkultur wie zum Beispiel eine Gras-Kleemischung angesät.

Die Grundbodenbearbeitung wird nach wie vor recht häufig mit dem Pflug gemacht und als Folgebearbeitung wird die Kreiselegge oder der Zinkenrotor eingesetzt. In den letzten Jahren hat die Streifenfrässaat recht stark zugenommen. Die Direktsaat stagniert auf einem relativ tiefen Niveau. Bei diesen beiden Anbausystemen wird im ÖLN Glyphosat zur Regulierung des Grünbewuchses eingesetzt. Im Biolandbau ist eine Direktsaat bisher nicht praktikabel. Streifenfrässaaten sind möglich, aber sehr aufwändig und werden nur selten praktiziert, denn es sind Spezialmaschinen nötig, mit denen die Zwischenbegrünung gemulcht werden kann.

4.6.1 Mechanische Unkrautregulierung

Einfluss der mechanischen Unkrautregulierung auf den Ertrag

Die nachfolgenden Resultate beziehen sich auf Streifenversuche des Forum Ackerbau (2018, 2019), des BBZN Hohenrain (2018, 2019) und der HAFL (2019) in den Jahren 2018 und 2019.

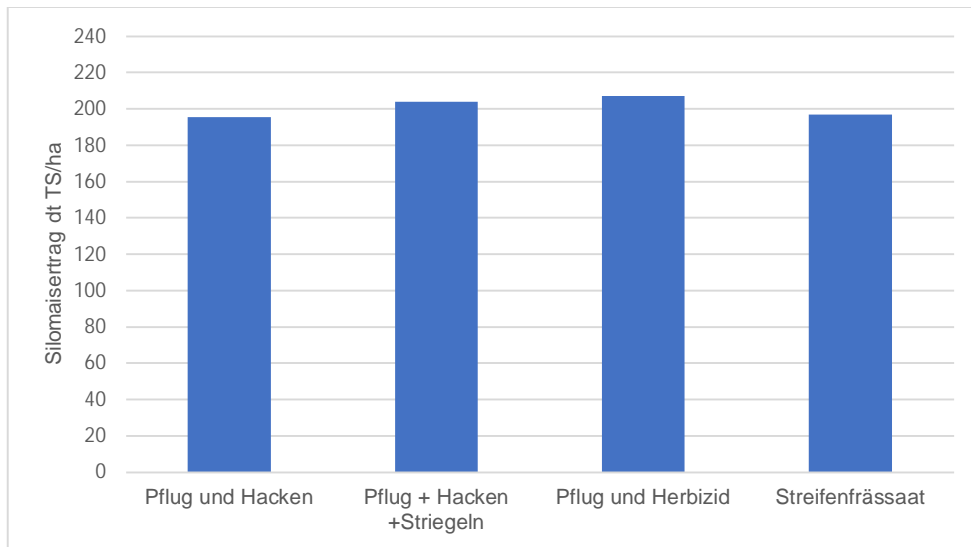


Abbildung 1 Durchschnittlicher Silomaiserttrag (dt TS/ha) in den Verfahren Pflug und Herbizid, Pflug und Hacken, Pflug und Hacken und Striegeln sowie Streifenfrässaat über die Jahre 2018 und 2019, über alle Standorte. Pflug und Hacken und Streifenfrässaat je 6 Versuchsstandorte, Pflug und Hacken und Striegeln 3 Versuchsstandorte.

Kosten

Die Kostenberechnungen basieren auf folgenden Quellen:

- Variable Maschinenkosten werden separat aufgeführt, da der Treibstoffverbrauch der jeweiligen Auslastung nach KTBL angepasst wurde
- Fixe Maschinenkosten, Maschinenkosten Arbeitsgeräte, Feldarbeitszeit, Gesamte Arbeitszeit (LabourScope) nach Agroscope ART (Gazzarin und Lips 2018)
- Erlös Ertrag: es wird mit CHF 17.-/dt gerechnet (Preis nach Fläche, Ernte durch den Verkäufer (Agridea 2019))

Es werden die Anbausysteme Herbizid im Nachauflauf (NA), zweimaliges Hacken, zweimaliges Hacken und Striegeln sowie Streifenfrässaat verglichen.

		Pflug			Streifenfrässaat
		NA-Herbizid	Hacken	Hacken + Striegel	Glyphosat + NA-Herbizid
TS-Ertrag (dt)		196	188	197	190
Erlös Ertrag		3332	3196	3349	3230
REB-Beiträge			250	250	200
Erlös + REB-Beiträge		3332	3446	3599	3430
Pflug (3-scharig)	Fixe Maschinenkosten Traktor (60kW)	36.21	36.21	36.21	
	Var. Maschinenkosten Traktor (60kW)	52.79	52.79	52.79	
	Maschinenkosten Pflug	105.00	105.00	105.00	
	Arbeitsaufwand Lohn	86.24	86.24	86.24	
	TOTAL	280.24	280.24	280.24	
	Feldarbeitszeit (h)	2.12	2.12	2.12	
	Gesamte Arbeitszeit (Akh)	3.08	3.08	3.08	
Kreiselegge (3m)	Fixe Maschinenkosten Traktor (60kW)	15.21	15.21	15.21	
	Var. Maschinenkosten Traktor (60kW)	21.99	21.99	21.99	
	Maschinenkosten Kreiselegge	94.00	94.00	94.00	
	Arbeitsaufwand Lohn	40.04	40.04	40.04	
	TOTAL	171.24	171.24	171.24	
	Feldarbeitszeit (h)	0.92	0.92	0.92	
	Gesamte Arbeitszeit (Akh)	1.43	1.43	1.43	
Glyphosat vor der Saat	Fixe Maschinenkosten Traktor (60kW)				4.78
	Var. Maschinenkosten Traktor (60kW)				3.16
	Maschinenkosten Anbaufeldspritze (15m)				25.00
	Kosten Glyphosat				60.00
	Arbeitsaufwand Lohn				24.08
TOTAL				117.02	
	Feldarbeitszeit (h)			0.28	
	Gesamte Arbeitszeit (Akh)			0.86	
Saat (Einzelkorn 6-reihig)	Fixe Maschinenkosten Traktor (60kW)	10.08	10.08	10.08	52.00
	Var. Maschinenkosten Traktor (60kW)	8.51	8.51	8.51	42.18
	Maschinenkosten Einzelkornsaat/Streifen	58.00	58.00	58.00	210.00
	Arbeitsaufwand Lohn	43.68	43.68	43.68	56.00
	TOTAL	120.27	120.27	120.27	360.18
	Feldarbeitszeit (h)	0.59	0.59	0.59	2.00
	Gesamte Arbeitszeit (Akh)	1.56	1.56	1.56	2.00
Herbizideinsatz	Fixe Maschinenkosten Traktor (60kW)	4.78			4.78
	Var. Maschinenkosten Traktor (60kW)	3.16			3.16
	Maschinenkosten Anbaufeldspritze (15m)	25			25
	Kosten NH-Herbizid	150.00			150.00
	Arbeitsaufwand Lohn	24.08			24.08
TOTAL	207.02			207.02	
	Feldarbeitszeit (h)	0.28			0.28
	Gesamte Arbeitszeit (Akh)	0.86			0.86
Hacken (2x)	Fixe Maschinenkosten Traktor (60kW)		27.32	27.32	
	Var. Maschinenkosten Traktor (60kW)		23.84	23.84	
	Maschinenkosten Hacke		84.00	84.00	
	Arbeitsaufwand Lohn		76.16	76.16	
	TOTAL		211.32	211.32	
	Feldarbeitszeit (h)		1.60	1.60	
	Gesamte Arbeitszeit (Akh)		2.72	2.72	
Striegeln	Fixe Maschinenkosten Traktor (60kW)			4.27	
	Var. Maschinenkosten Traktor (60kW)			6.06	
	Maschinenkosten Striegel			22.00	
	Arbeitsaufwand Lohn			20.16	
	TOTAL			52.49	
	Feldarbeitszeit (h)			0.25	
	Gesamte Arbeitszeit (Akh)			0.72	
Gesamte Feldarbeitszeit (h)		3.91	5.23	5.48	2.56
Gesamter Arbeitszeitbedarf (Akh)		6.93	8.79	9.51	3.72
Kosten TOTAL		778.77	783.07	835.56	684.22
Kosten abzüglich REB		778.77	533.07	585.56	484.22

Tabelle 16: Kostenvergleich Anbausysteme im Mais. Akh: Arbeitskraftstunde, h: Stunde, kW: Kilowatt

Die Berechnungen zeigen, dass es nur relativ kleine Unterschiede zwischen den Verfahren gibt. Ohne REB-Beiträge des Bundes sind die mechanischen Verfahren zwischen 5 und 60 Franken teurer, ausser der Streifenfrässaat,

die 95 Franken tiefere Gesamtkosten aufweist. Die Kosten sind mit Einbezug des REB-Beitrages beim 2maligen Hacken rund 170 Franken und beim 2maligen Hacken plus Striegeln ca. 100 Franken/ha tiefer. Wenn der Landwirt das Hacken im Lohn machen lässt, bezahlt er pro Hackdurchgang zwischen Fr. 140 und 150 (Estermann 2020). Somit sind die Kosten praktisch gleich, wie wenn es der Landwirt selber macht (Tabelle 16). Das kostengünstigste Anbauverfahren stellt die Streifenfrässaat dar. Der Nachteil, der diesem Anbausystem anhaftet ist, dass Glyphosat für die Regulierung des Zwischenreihenbewuchses eingesetzt werden muss. Was auch noch erwähnt werden muss ist, dass in beiden Versuchsjahren sehr günstige Wetterbedingungen zum Hacken waren und die Hackdurchgänge im richtigen Zeitpunkt unter guten Bedingungen durchgeführt werden konnten.

Arbeitsaufwand: In der folgenden Grafik ist der Arbeitsaufwand für die einzelnen Anbausysteme aufgezeigt. Das System Hacken und Striegeln ist am aufwändigsten mit gut 12 h/ha, gefolgt vom System 2maliges Hacken. Die Streifenfrässaat ist das System, das am wenigsten Arbeit verlangt mit nicht einmal 4 h/ha. Dafür muss wie erwähnt Glyphosat zur Regulierung des Zwischenbewuchses eingesetzt werden.

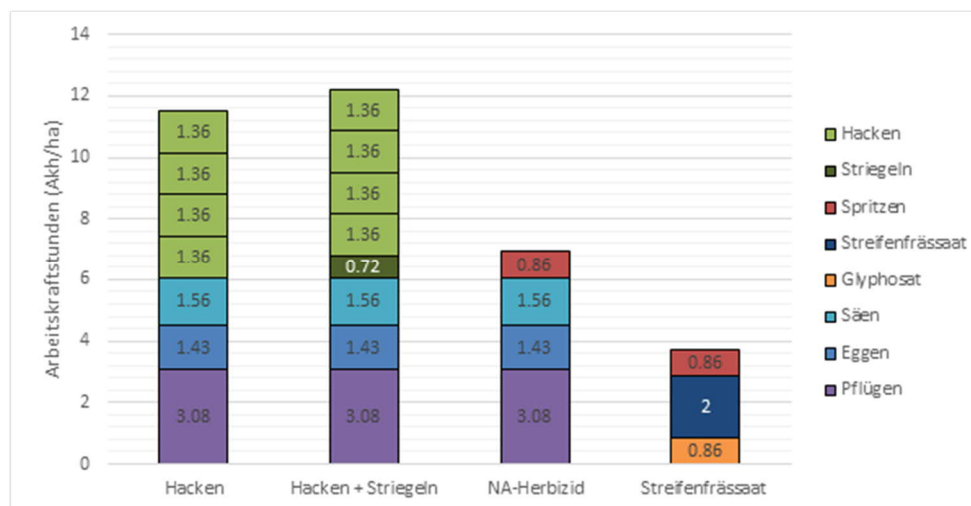


Abbildung 2 Planzeitwerte der jeweiligen Arbeitsverfahren basierend auf Zeitmessungen in der Praxis

4.6.2 Substitution

Neben dem Ersatz der beiden Wirkstoffe S-Metolachlor und Terbutylazine ist bei der Substitution darauf zu achten, dass es nicht zu einem vermehrten Einsatz der Wirkstoffe Dimethenamid-P und Pethoxamid kommt (Tabelle 5).

In dem von der Agroscope erstellten Ranking der schweizweit im Maisanbau eingesetzten Herbizide lagen Terbutylazine und S-Metolachlor an der 1. bzw. 5. Stelle (Tabelle 17). Zusammen mit den drei Wirkstoffen Nicosulfuron, Foramsulfuron, Mesotrione decken diese Top 5 rund die Hälfte der Applikationen ab. Gemäss Tabelle 17 bleiben noch folgende Wirkstoffe ohne höheres Risiko für Grundwasser, Oberflächengewässer oder besonderes Risikopotenzial für den Einsatz übrig: Dicamba, Iodosulfuron, Glyphosat, Tembotrione, Isoxaflotole, Bromoxynil, Pyridate und Tritosulfuron. Mesotrione ist wegen seinem mittleren Risiko für Oberflächengewässer nicht auf der Liste,

stellt aber sonst kein besonders Risikopotential und auch kein erhöhtes Risiko für Grundwassereinträge dar.

Wirkstoff	Anteil aller Herbizid-behandlungen	Kumulativer Anteil	Wirkungsweise	Resistenzgruppe	Grundwasser-Score (Agroscope 2020)	Risikoindikator (ERI) für Oberflächengewässer	PSM mit besonderem Risikopotential (BLW 2020)
Terbuthylazine	19%	19%	D; GE	C ₁	49	408.5	
Nicosulfuron	10%	29%	D; GE; GM	B	6	25661.7	X
Foramsulfuron	9%	38%	D; (W); GE; GM	B	0	5464.4	
Mesotrione	9%	46%	D; (W); GE;	F ₂	0.1	483.9	
S-Metolachlor	8%	54%	(D); GE	K ₃	200	38.4	
Dicamba	7%	61%	(D); W	O	0	41.8	
Iodosulfuron-methyl-Natrium	7%	68%	Nur in Mischung mit anderen WS	B	0.4	NA	
Glyphosat	6%	74%	D; W; GE; GM	G	0	0.0	
Flufenacet	6%	79%	D; GE	K ₃	5	433.1	X
Thiencarbazone	5%	85%	Nur in Mischung mit anderen WS	B	2	7416.6	
Rimsulfuron	4%	88%	Nur in Mischung mit anderen WS	B	0.5	16508.9	
Tembotrione	3%	92%	D; (W); GE	F ₂	2	197.5	
Pethoxamid	3%	95%	Nur in Mischung mit anderen WS	K ₃	48	71.7	
Dimethenamid-P	1%	96%	(D); GE	K ₃	24	208.5	
Isoxaflutole	1%	97%	Nur in Mischung mit anderen WS	F ₂	3	NA	
Sulcotrione ^[PX]	1%	98%		F ₂	Kein Wert	2017.0	X
Thifensulfuron-methyl	0.4%	99%	(D); W	B	6	3964.0	
Bromoxynil	0.2%	>99%	D	C ₃	0	5.0	
Pendimethalin	<0.1%	>99%		K ₁	<0.1	12.7	X
2,4-D	<0.1%	>99%		P	0	87.4	
Florasulam	<0.1%	>99%		B	0.8	418.6	
Bentazon	<0.1%	>99%		C ₃	<0.1	0.4	
Pyridate	<0.1%	>99%	D	C ₃	0.01	NA	
Tritosulfuron	<0.1%	>99%		B	10	1060.4	

Tabelle 17: Prozentuale Verteilung der in den Jahren 2015-2017 im Maisanbau eingesetzten herbiziden Wirkstoffe (Quelle: Agroscope). Beurteilungskriterien gemäss Abschnitt 4.1 mit dunkelgrauer Schattierung für Wirkstoff mit mobilen Metaboliten bzw. mit hohem Risiko für Oberflächengewässer und hellgrauer Schattierung für Wirkstoff mit Metaboliten im Übergangsbereich zwischen mobil und nicht mobil bzw. mit

mittlerem Risiko in Oberflächengewässern, NA: Fehlende Angaben zur Berechnung des ERI. Wirkung gegen: D = Dikotyle einjährige, W = Wurzelunkräuter; GE = Gräser einjährig; GM = Gräser mehrjährig. PX: Mittlerweile nicht mehr zugelassener Wirkstoff

Eine vertiefte Abklärung anhand von Daten aus dem Oberflächengewässermonitoring wäre wegen der guten Wirksamkeit des Wirkstoffs sinnvoll.

- Iodosulfuron ist nur im Produkt Equip Power in Mischung mit Foramsulfuron und Thiencarbazone verfügbar und fällt deshalb ebenfalls weg
- Rimsulfuron kommt nur in Produkten mit dem Wirkstoff Nicosulfuron vor, der den höchsten ERI aller in Tabelle 17 aufgeführten Wirkstoffe und auch die häufigste Anzahl Überschreitungen in den drei NAWA Spez-Studien zu Oberflächengewässern aufweist (Spycher 2019). Rimsulfuron weist seinerseits ebenfalls einen hohen ERI für Oberflächengewässer auf und fällt deshalb ebenfalls weg

Glyphosat wird im Mais bei Streifenfräss- oder Direktsaat eingesetzt, ist also nicht eine klassische Anwendung gegen auflaufende Unkräuter nach der Maissaat.

Die gemäss Tabelle 17 sehr selten eingesetzten Wirkstoffe Bentazon und 2,4-D wurden ebenfalls nicht als Substituenten in Betracht gezogen, weil Bentazon im Rahmen dieses Projektes ersetzt werden soll und 2,4-D in Überprüfung ist und es unklar ist, ob 2,4-D nach der Überprüfung weiter eingesetzt werden kann (Bewilligung 1946).

Damit verbleiben für den Maisanbau nur noch die Wirkstoffe Thiencarbazone, Thifensulfuron-methyl (alle aus der Resistenzgruppe B), Bromoxynil und Pyridate (Resistenzgruppe C₂). Isoxaflutole, Tembotrione (Resistenzgruppe F₂) und Dicamba (Resistenzgruppe 0).

Dicamba ist ebenfalls ein sehr alter Wirkstoff und wird vor allem eingesetzt als Spezialbehandlung gegen Winden. Wie lange er sich noch halten kann, ist ungewiss. Für die gängige Unkrautregulierung stehen dann nur noch Mittel aus den drei Resistenzgruppen B, C₂ und F₂ zur Verfügung. Das Risiko der Bildung von Resistenzen ist dadurch stark erhöht.

4.6.3 Fazit Mais

Der Verzicht auf die problematischen Substanzen hat keine wirtschaftlichen Konsequenzen für den Landwirt. Die Erträge durch eine rein mechanische Unkrautregulierung sind gleich gut wie mit Herbiziden und solange die REB-Beiträge ausbezahlt werden, kompensieren diese auch den Mehraufwand durch die mechanische Unkrautregulierung. Hinderungsgründe, warum nicht mehr Landwirte diesen Weg wählen, sind vermutlich die Mehrarbeit, die Befürchtung, dass die mechanische Unkrautregulierung wegen dem Wetter nicht zur rechten Zeit durchgeführt werden kann, Investitionen in die Hacktechnik resp. die Abhängigkeit vom Lohnunternehmer und vorhandene Problemunkräuter wie zum Beispiel Disteln. Die Beratung und die Landwirtschaftsschulen haben in den letzten Jahren verschiedene Versuche angelegt, um die Landwirte zum Herbizidverzicht zu animieren. Durch den Ausbau von Beratung und Ausbildung kann in Zukunft ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, damit die Fläche des Maisanbaus mit rein mechanischer

Unkrautregulierung steigt. Die ebenfalls evaluierte Streifenfrässaat kommt nicht ohne Herbizide aus, führt aber zu einem tieferen Einsatz potenziell grundwasserbelastender Wirkstoffe und hat zusätzliche Vorteile wie besserer Schutz vor Erosion und weniger Abschwemmung in Oberflächengewässern.

4.7 Unkrautregulierung in Raps

Raps ist in der Schweiz eine flächenmässig wichtige Kultur. Gemäss Agrarbericht (BLW 2019a) wurden in der Schweiz im Durchschnitt von 2015-2018 21'910 ha angebaut. Dies macht 5.5% der offenen Ackerfläche aus. Die Fläche blieb mit jährlichen Schwankungen in den letzten 4 Jahren stabil und dürfte in Zukunft noch zunehmen. Mit der derzeitigen Anbaufläche kann der Bedarf nicht abgedeckt werden. Dies ist in erster Linie darauf zurück zu führen, dass die Firma Zweifel (Kartoffel-Chips) von Sonnenblumenöl auf Schweizer-Rapsöl umgestellt hat.

Die Ansprüche von Raps an die Fruchtfolge sind hoch. Gemäss ÖLN-Richtlinien darf maximal 25% der Ackerfläche mit Raps belegt sein. Die Anbaupause sollte mindestens 3 Jahre betragen.

Raps wird in der Fruchtfolge häufig nach Winterweizen angebaut, ab und zu auch direkt nach Kunstwiese, wenn kein Mais angebaut wird.

Raps verlangt ein mittelfeines Saatbett, in welchem der Raps gleichmässig auf eine Tiefe von 2cm abgelegt werden kann. Klassischerweise wurde deshalb in der Vergangenheit häufig der Pflug eingesetzt. Der Pflug bringt weiter den Vorteil, dass die im Voraufbau eingesetzten Bodenherbizide eine sichere Wirkung haben. Seit einiger Zeit wird aber der Raps vermehrt in Mulchsaaten gesät. Sehr wenig verbreitet ist die Direktsaat.

4.7.1 Mechanische Unkrautregulierung

Wenn Raps gehackt werden soll, muss er mit einem Reihenabstand von 50 cm ausgesät werden, damit er dann später mit einem klassischen Hackgerät wie sie z.B. in Zuckerrüben eingesetzt werden gehackt werden kann. Eine mögliche Alternative wäre der Einsatz eines Hackstriegels. In diesem Fall kann der Raps auch klassisch mit Drillweiten von 12-15 cm gesät werden. Leider konnten keine Resultate aus wissenschaftlichen Versuchen zur mechanischen Unkrautregulierung in der Schweiz gefunden werden. Aus Deutschland (Mecklenburg-Vorpommern wurden zwei Versuche gefunden. In beiden Versuchen wurde der Raps gehackt.

In den Versuchen von Hahn (2020), welche an 5 Standorten im Erntejahr 2019 durchgeführt wurden, wurde mit einer chemischen Unkrautregulierung nur 3.9 dt/ha Mehrertrag gegenüber der Kontrolle herausgeholt (Abbildung 3). Dies zeigt, dass der Raps, wenn die Auflaufbedingungen stimmen, eine gute Konkurrenz gegenüber Unkraut hat. Es wurde leider kein rein mechanisches Verfahren durchgeführt. Angewendet wurde als «kombinierte Variante» Bandspritzung und Hacke. Der Unterschied zwischen der rein chemischen und der kombinierten Variante war statistisch nicht gesichert.

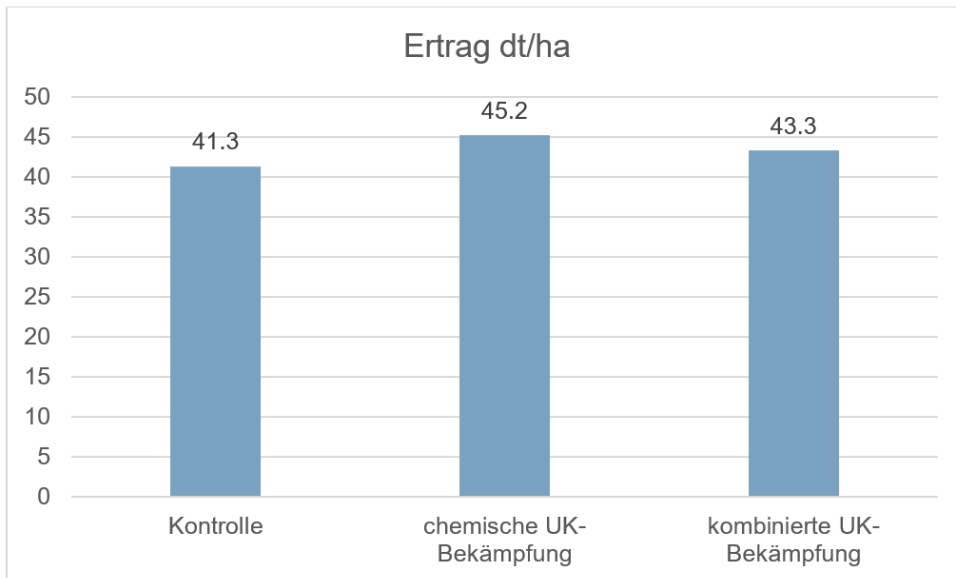


Abbildung 3 Erträge von Winterraps mit unterschiedlicher Unkrautregulierung in Mecklenburg-Vorpommern. Dargestellt sind die Durchschnittsresultate von 5 Versuchsstandorten aus dem Jahr 2019 (Quelle Hahn 2020, eigene Darstellung).

Der bereinigte Mehrerlös war dann aber bei der kombinierten Variante nicht höher als in der Kontrolle, bedingt durch die höheren Maschinen- und Arbeitskosten. Im rein chemischen Unkrautbekämpfungsverfahren hingegen konnte ein geringer Mehrerlös ausgewiesen werden.

In einem weiteren Versuch aus Mecklenburg-Vorpommern mit den gleichen Verfahren konnte Waldschmidt (2020) zeigen, dass es zwischen dem rein chemischen Verfahren und dem kombinierten Verfahren keinen Ertragsunterschied gab (Abbildung 4).

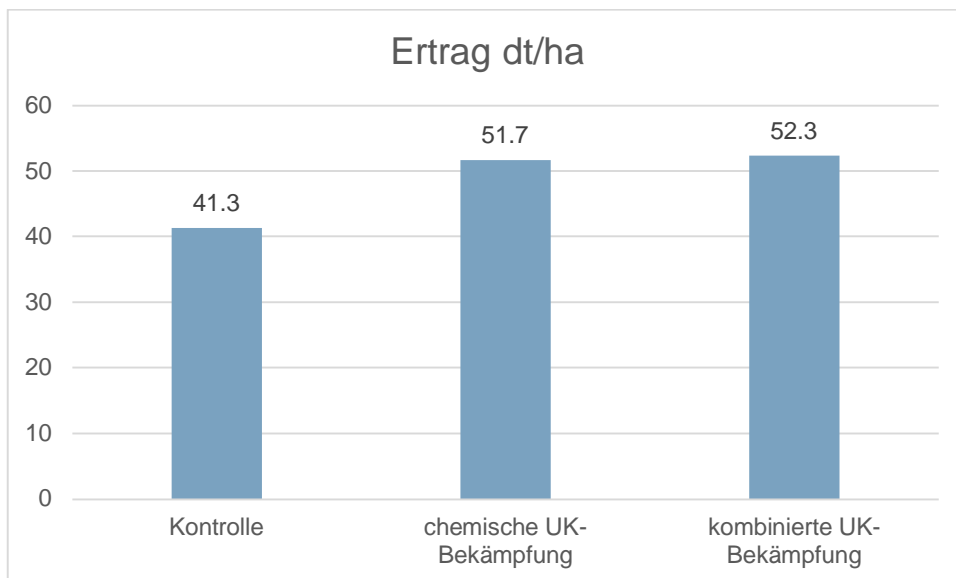


Abbildung 4 Erträge von Winterraps mit unterschiedlicher Unkrautregulierung in Mecklenburg-Vorpommern. Dargestellt sind die Durchschnittsresultate von 5 Versuchsstandorten aus dem Jahr 2019 (Quelle Waldschmidt 2020, eigene Darstellung).

Die Kontrolle hingegen fiel stark ab, weil die Auflaufbedingungen schlechter waren.

4.7.2 Untersaaten

Untersaaten werden zur gleichen Zeit wie der Raps gesät. Verwendet werden verschiedene Mischungen mit abfrierenden Pflanzen. Bei der Auswahl der Mischungspflanzen wird darauf geachtet, dass es Pflanzen sind, die rasch auflaufen. Durch das rasche Auflaufen erfolgt eine natürliche Konkurrenz gegenüber Unkraut (Platz besetzen). Zudem hat es Pflanzen in den Mischungen, welche durch Wurzelausscheidungen andere Pflanzen am Keimen resp. im Wachstum hemmen (Allelopathie).



Abbildung 5 Raps mit der Untersaatmischung Ra2. Zollikofen 24.10.2018

Die Herausforderung ist es nun, die Mischungspflanzen so zu wählen, dass eine möglichst gute Unkrautunterdrückung erfolgt, der Raps selber aber möglichst nicht konkurrenziert wird. Mit Untersaaten sollen in erster Linie Herbizide eingespart werden. Es geht aber auch um Erosionsverhinderung und, falls Leguminosen als Untersaatpflanzen eingesetzt werden, auch um N-Fixierung. Eigene Versuche mit insgesamt 4 verschiedenen Untersaatmischungen (Tabelle 18) wurden während 4 Jahren durchgeführt.

Verfahren	kg/ha											kg/ha
	Alexandinerklee <i>Trifolium alexandrinum</i>	Perserklee <i>Trifolium resupinatum</i>	Bockshornklee <i>Trigonella foenum-graecum</i>	Ramillkraut (Niger) <i>Guizotia abyssinica</i>	Buchweizen <i>Fagopyrum esculentum</i>	Flachs <i>Linum usitatissimum</i>	Linsen <i>Lens culinaris</i>	Sommerwicke <i>Vicia sativa</i>	Platterbse <i>Lathyrus sativus</i>	Phazelia <i>Phacelia tanacetifolia</i>	Erdklee <i>Trifolium subterraneum</i>	
Colza Fix	3			2	7		7	5	6			30
Mischung S2			6		5	4	12		7			34
Mischung Ra1		4	3							3	8	18
Mischung Ra2		3	3	3					3		6	18
Herbizid	Kontrolle 1 (Behandlung mit Herbizid im Voraufbau)											
Kontrolle (0)	Kontrolle 2 (keine Unkrautregulierung, keine Untersaat)											

Tabelle 18 Verfahren in Untersaatversuchen der HAFL in Winterraps 2015-2019 in Zollikofen

Die Resultate zeigen, dass die Untersaaten 30 Tage nach der Saat des Rapses den Boden unterschiedlich bedecken. Die Unkrautunterdrückung ist bei den besten Mischungen fast gleich gut wie mit einer Herbizidbehandlung (Abbildung 6, oben).

Eine gute Unkrautunterdrückung alleine ist aber noch nicht aussagekräftig. Der Raps sollte nicht unter der direkten Konkurrenz der Untersaat leiden. Die Biomasseerhebung im Frühling kurz vor der Blüte ist ein guter Gradmesser für den Ertrag. Hier zeigt sich, dass die besten Mischungen praktisch die gleichen Biomasse-Erträge erreichen wie das Verfahren Herbizidbehandlung (Abbildung 6, rechts). Es kann also durchaus davon ausgegangen werden, dass Untersaaten im Raps eine Herbizidbehandlung praktisch verlustfrei ersetzen können. Wichtig zu erwähnen ist aber auch, dass eine Untersaat nur klappt, wenn keine Problemunkräuter wie zum Beispiel Disteln vorkommen. Auch auf Feldern ohne Problemunkräuter sind verschiedene Voraussetzungen wie eine vorgängige Unkrautkur, eine sorgfältige Bodenvorbereitung sowie ein passender Saatzeitpunkt und eine genügende Saatmenge zu beachten.

- eine gute Unkrautbekämpfung vor der Rapssaat, insbesondere gegen Ausfallgetreide ist Bedingung (das heisst, es muss in der Regel eine zusätzliche Unkrautkur gemacht werden z.B. eine bis zwei flache Stoppelbearbeitungen nach der Ernte der Vorkultur)
- die Bodenvorbereitung zur Saat muss exakt und sorgfältig erfolgen, damit der Raps regelmässig aufläuft
- Saatzeitpunkt sollte etwas früher als bei einer Normalsaat erfolgen
- die Saatmenge sollte nicht zu tief gewählt werden (bei Drillsaat 50 Körner/m²)

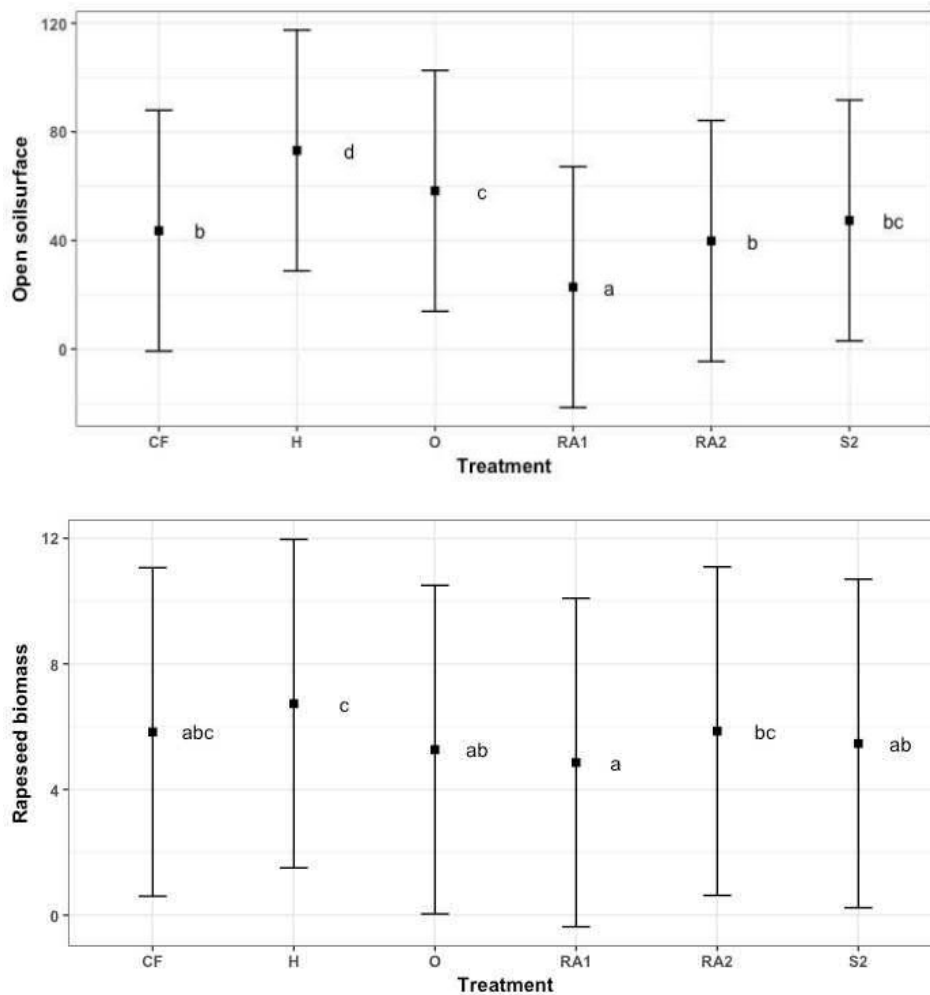


Abbildung 6 Freie Bodenoberfläche in Prozent 30 Tage nach der Rapssaat (oben) und Rapsbiomasse-Produktion im Frühling kurz vor der Blüte (rechts). Herbizidkontrolle (H) und Null (0) = keine Untersaat und keine Unkrautregulierung. Dargestellt sind die Mittelwerte von 4 Versuchsjahren. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistisch gesicherte Unterschiede ($p < 0.05$).

Die Untersaat bringt neben der Unkrautunterdrückung auch noch zusätzlich positive Nebeneffekte

- Verhindert Bodenerosion in der Auflaufphase des Rapses
- in der oberirdischen Biomasse der Untersaatpflanzen wurden je nach Mischung und Jahr zwischen 4 und 54kgN/ha bestimmt
- Die Untersaat hat einen Ablenkeffekt auf die Rapserrflöhe (*Psylliodes chrysocephala*). In den Flächen mit einer Untersaat wurden im Frühling signifikant weniger Erdflöharven gezählt.

Kostenmässig kann eine Untersaat durchaus mit dem Herbizideinsatz mithalten. Ein Herbizid im Voraufbau im Raps kostet zwischen CHF 108/ha und CHF 164/ha (Fenaco 2020). Die Untersaatmischungen zwischen CHF 135/ha (Schweizer Samen – Rapstop Sekunda – entspricht der HAFL-Versuchsmischung Ra2) und CHF 144/ha (UFA Samen Colzafix) (Agridea 2019). Wenn der Raps in Mulchsaat angebaut wird, was durchaus möglich

ist, kommen neben dem Ressourceneffizienzbeitrag für die Mulchsaat von CHF 150/ha noch CHF 200/ha für den Herbizidverzicht hinzu also insgesamt CHF 350/ha. Damit kann auch ein eventueller kleiner Ertragsausfall mehr als ausgeglichen werden. In der Schweiz hat sich die Rapsuntersaat in der Westschweiz gut etabliert und es machen immer mehr Landwirte Untersaaten (Beaux 2019, Lehmann 2020). In der Deutschschweiz sind die Landwirte noch zögerlich und es braucht noch Überzeugungsarbeit.

4.7.3 Substitution

Wenn Herbizide im Raps eingesetzt werden, sind das zum grössten Teil Voraufmittel (welche teilweise auch noch im frühen Nachauflauf eingesetzt werden können). Klassische Nachaufmittel werden nur bei Korrekturbehandlungen eingesetzt zum Beispiel gegen Klebern und/oder Kamille oder wenn Gräser mit einem spezifischen Gräsermittel bekämpft werden müssen.

Der bezüglich Metaboliten primär dem Rapsanbau zuzuschreibenden Wirkstoff ist gemäss Tabelle 5 Metazachlor. Neben dem Ersatz des Wirkstoffs Metazachlor ist bei der Substitution darauf zu achten, dass es nicht zu einem vermehrten Einsatz der Wirkstoffe Dimethachlor, Pethoxamid und Haloxyfop-(R)-Methylester kommt (Tabelle 19).

In dem von der Agroscope erstellten Ranking der schweizweit im Rapsanbau eingesetzten Herbizide lag Metazachlor im Mittel der Jahre 2015-2017 an der sechsten Stelle und machte 6% der erfassten Herbizidbehandlung aus. Dimethachlor und Pethoxamid lagen an dritter bzw. siebter Stelle (Tabelle 19). Der Herbizideinsatz im Rapsanbau ist auf weniger Wirkstoffe verteilt als in anderen Kulturen. So decken die beiden meistbenutzten Wirkstoffe, Clomazone und Napropamid bereits die Hälfte der Applikationen ab.

Im Raps werden mit Ausnahme des Wirkstoffes Metazachlor und der spezifischen Gräsermittel fast nur Produkte mit mehreren Wirkstoffen eingesetzt, um eine genügende Wirkung zu erzielen. Glyphosat wird vor der Rapssaat eingesetzt, um zum Beispiel bei pfluglosen Anbausystemen eine vorhandene stärkere Verunkrautung zu kontrollieren.

Von den klassischen Raps herbiziden im Vorauflauf bleiben gerade noch die beiden Wirkstoffe Clomazone und Napropamid ohne Einschränkungen übrig. Diese beiden Wirkstoffe sind einzig im Produkt Devrinol Top enthalten. Dieses Produkt hat eine im Vergleich zu den anderen Produkten mittelmässige Wirkung. Bei starkem Unkrautdruck wird die Zugabe des Produktes Successor (Pethoxamid) empfohlen. Eine Bewilligung im Raps hat auch noch der Wirkstoff Pendimethalin, der aber auf der Liste der PSM mit besonderem Risikopotenzial ist.

Wirkstoff	Anteil aller Herbizidbehandlungen	Kumulativer Anteil	Anwendung (VA = Vorauflauf, NA = Nachauflauf)	Resistenzgruppe	Grundwasser-Score (Agroscope 2020)	Risikoindikator (ERI) für Oberflächengewässer	PSM mit besonderem Risikopotential (BLW 2020)
Clomazone	30%	30%	VA	F ₄	0	90.6	
Napropamid	23%	52%	VA	K	0	19.7	
Dimethachlor	12%	65%	VA	K ₃	128	225.9	
Glyphosat	9%	74%		G	0	0.0	
Fluazifop-P-Butyl	6%	80%	NA	A	5	0.9	
Metazachlor	6%	86%	VA	K ₃	116	1952.9	
Pethoxamid	5%	91%	VA	K ₃	48	71.7	
Tepraloxydim	2%	93%	NA	A	Kein Wert	1.0	
Clethodim	1%	94%	NA	A	4.6	0.9	
Propyzamid	1%	95%	NA	K ₁	3.7	142.3	
Clopyralid	1%	96%	NA	O	0	1446.7	
Picloram	1%	97%	NA	O	0	58.6	
Quizalofop-P-ethyl	1%	97%	NA	A	<0.1	keine Angaben	
Haloxyfop-(R)-Methylester	1%	98%	NA	A	25	0.0	X
Propaquizafop	0%	99%	NA	A	<0.1	10880.9	

Tabelle 19: Prozentuale Verteilung der in den Jahren 2015-2017 im Rapsanbau eingesetzten herbiziden Wirkstoffe (Quelle: Agroscope). Wirkstoffe bis zum kumulativen Anteil von 99% aufgeführt. Dunkelgraue Schattierung bedeutet Wirkstoff mit einem oder mehreren mobilen Metaboliten bzw. hohes Risiko in Oberflächengewässern. Hellgraue Schattierung bedeutet Wirkstoff mit einem oder mehreren Metaboliten im Übergangsbereich zwischen mobil und nicht mobil bzw. mittleres Risiko für Oberflächengewässer

4.7.4 Fazit Raps

Als möglicher Ersatz für die problematischen Substanzen kommt nur das Produkt Devrinol Top mit den Wirkstoffen Clomazone und Napropamid in Frage. Preislich ist das Produkt mit anderen Produkten vergleichbar, hat aber nur eine mittelgute Wirkung. Somit wird bei höherem Unkrautdruck eine genügende Unkrautbekämpfung mit Herbiziden nicht möglich sein.

Ein vielversprechender Ansatz ist die Untersaat. Wenn keine Problemunkräuter wie Disteln, Klebern und Kamille vorhanden sind und nicht ein generell sehr hoher Unkrautdruck vorhanden ist, kann die Untersaat eine gute Alternative zum Herbizideinsatz sein, die bezüglich Ertrag etwa gleichwertig ist und dank der REB-Beiträge Einsparpotentiale bietet. Es gilt jedoch

verschiedene Voraussetzungen wie eine vorgängige Unkrautkur, eine sorgfältige Bodenvorbereitung sowie eine passender Saatzeitpunkt und eine genügende Saatmenge zu beachten.

- eine gute Unkrautbekämpfung vor der Rapssaat, insbesondere gegen Ausfallgetreide ist Bedingung (das heisst, es muss in der Regel eine zusätzliche Unkrautkur gemacht werden)
- die Bodenvorbereitung zur Saat muss exakt und sorgfältig erfolgen, damit der Raps regelmässig aufläuft
- Saatzeitpunkt sollte etwas früher als bei einer Normalsaat erfolgen
- die Saatmenge sollte nicht zu tief gewählt werden (bei Drillsaat 50 Körner/m²)

Was in Zukunft auch eine Option sein könnte, ist die rein mechanische Unkrautregulierung. Hier fehlen aber breitere Praxiserfahrungen und wissenschaftliche Untersuchungen.

4.8 Pilzbekämpfung in Gerste

Der Wirkstoff Chlorothalonil wurde in mehreren Kulturen eingesetzt. Ein relevanter Anteil davon für den Anbau von Gerste. Da der Wirkstoff seit Ende 2019 nicht mehr eingesetzt werden darf, wurden keine alternativen Praktiken wie z.B. der verstärkte Anbau pilztoleranter Sorten untersucht, sondern nur die Auswirkungen der ab dem Jahr 2020 stattfindenden Substitution.

In dem von der Agroscope erstellten Ranking der schweizweit für den Anbau von Gerste eingesetzten Fungizide lag Chlorothalonil an zweiter Stelle.

Wirkstoff	Anteil aller Herbizidbehandlungen	Kumulativer Anteil	Resistenzgruppe	Grundwasser-Score (Agroscope 2020)	Risiko-indikator (ERI) für Oberflächengewässer	PSM mit besonderem Risikopotential (BLW 2020)
Prothioconazole	19%	19%	3	0	NA	
Chlorothalonil	13%	33%	Y	129	NA	
Bixafen	12%	45%	7	0	81.1	X
Epoxiconazole	11%	56%	3	0	303.9	X
Tebuconazole	5%	61%	3	<0.1	570.6	
Spiroxamine	5%	65%	5	0	11.0	
Azoxystrobin	4%	70%	11	2.7	288.1	
Cyproconazole	4%	74%	3	<0.1	86.6	X
Fenpropimorph	4%	78%	5	0	80.7	
Metrafenone	4%	82%	50	0	4.1	
Kresoxim-methyl	3%	85%	11	<0.1	1.3	
Propiconazole	3%	88%	3	4.3	15.5	X

Wirkstoff	Anteil aller Herbizidbehandlungen	Kumulativer Anteil	Resistenzgruppe	Grundwasser-Score (Agroscope 2020)	Risiko-indikator (ERI) für Oberflächengewässer	PSM mit besonderem Risikopotential (BLW 2020)
Fenpropidin	3%	91%	5	<0.1	105.9	
Fluoxastrobin	2%	93%	11	1.8	1667.2	
Fluxapyroxad	1%	94%	7	4.1	20.1	X
Prochloraz	1%	95%	3	0	28.7	
Pyraclostrobin	0.8%	96%	11	0	6.5	
Boscalid	0.7%	97%	7	0.4	15.1	
Fluquinconazole	0.7%	98%	3	Kein Wert	NA	
Laminarin	0.6%	98%	-	Kein Wert	NA	
Trifloxystrobin	0.5%	99%	11	10	0.2	

Tabelle 20: Prozentuale Verteilung der in den Jahren 2015-2017 für den Anbau von Gerste eingesetzten fungiziden Wirkstoffe (Quelle: Agroscope). Wirkstoffe bis zum kumulativen Anteil von 99% aufgeführt. Dunkelgraue Schattierung bedeutet Wirkstoff mit einem oder mehreren mobilen Metaboliten. Hellgraue Schattierung bedeutet Wirkstoff mit einem oder mehreren Metaboliten im Übergangsbereich zwischen mobil und nicht mobil bzw. mittleres Risiko für Oberflächengewässer, NA: Fehlende Angaben zur Berechnung des RI

Chlorothalonil wurde in der Pilzbekämpfung ausschliesslich als Wirkstoff gegen Sprenkelnekrosen zugemischt. Es ist ein klassisches Kontaktfungizid. Mit ca. CHF 40 bis CHF 50/ha galt es als günstiges Fungizid. Heute gibt es eine ganze Reihe von Produkten, welche von der Wirkung mindestens ebenbürtig, teilweise sogar deutlich bessere Wirkung gegen die Sprenkelnekrosen haben (Tabelle 21).

Wirkung und Einstufung Risikopotential	Produkt	Wirkstoff(e)
Gleichgute oder besser Wirkung aber erfüllt eines der drei Risikokriterien	Adexar/Bronco	Expoxiconazole, Fluxapyroxad
	Elatus Era	Benzovindiflupyr, Prothioconazole
	Variano Xpro	Prothioconazole, Fluoxastrobin,
	Aviator Xpro/Absolut	Bixafen, Prothioconazole
	Tolara	Boscalide, Epoxiconazole
	Pandorra	Tebuconazole, Bixafen
Gleich gute Wirkung, ohne ein Risikokriterium zu erfüllen	Proline	Prothioconazole
Bessere Wirkung, ohne ein Risikokriterium zu erfüllen	Input/Comfort	Prothioconazole, Spiroxamine

Tabelle 21: Zur Substitution von Chlorothalonil geeignete Produkte

Einige Produkte enthalten aber Wirkstoffe, die gemäss Anhang 9.1 des AP PSM zu den PSM mit besonderem Risikopotenzial gehören und in einigen Fällen ein mässiges Risiko für Oberflächengewässer darstellen (Tabelle 20). Letztes hat sich aber in den drei NAWA Spez-Studien zu Oberflächengewässern nur für Azoxystrobin und Fluaxastrobin bestätigt, aber nicht für Epixocnazole und Tebuconazole. Mit dem Wegfall von Chlorothalonil bestehen gegenüber Sprengelnekrosen also echte Alternativen. Kostenmässig dürften die Alternativen gleichgut oder besser sein, da Chlorothalonil zusätzlich zu einem anderen Fungizid zugemischt wurde.

4.9 Pilzbekämpfung in Weizen

Chlorothalonil wurde im Weizen häufig zu einem anderen Fungizid beige-mischt, um das Fahnenblatt besser gegen Septoria und gegen Sprengelnekrosen zu schützen.

Folgende Produkte haben eine gleich gute oder bessere Wirkung, enthalten aber PSM mit besonderem Risikopotenzial:

- Aviator Xpro/Absolut (Wirkstoffe: Bixafen; Prothioconazol)
- Pandorra (Wirkstoffe: Tebuconazole; Bixafen)

Eine gleich gute oder bessere Wirkung, aber ohne Wirkstoffe mit besonderem Risikopotential weisen wie bei der Gerste die Produkte Proline, Elatus Era und Input/Comfort auf. Bei diesen Mitteln kommt zudem der Vorteil dazu, dass sie auch eine kurative Wirkung gegenüber Septoria nodorum und Septoria tritici aufweisen, was bei Chlorothalonil nicht der Fall ist. Auch hier bestehen wie bei der Gerste also echte Alternativen zu Chlorothalonil.

4.10 Pilzbekämpfung in Kartoffeln

In den Kartoffeln wurde Chlorothalonil als Kontaktfungizid mit einer guten Regenfestigkeit vor allem in der Hauptwachstumsphase empfohlen. Es kann jedoch von der Wirkungsseite her mit einem anderen Kontaktfungizid wie Electis (Mancozeb; Zoxamid) oder Mancozeb (mit weniger guten Regenfestigkeit) ersetzt werden. Wenn spezifisch eine Alternaria-Strategie gefahren werden soll, gibt es dem Chlorothalonil deutlich überlegene Wirkstoffe wie Trifloxistrobine (Flint) oder Boscalide; Pyraclostrobin (Signum), welche nicht als PSM mit besonderem Risikopotential eingestuft sind. Der Wegfall von Chlorothalonil kann also ohne Probleme kompensiert werden. Die Alternativ-Produkte sind teilweise teurer (Flint), teilweise günstiger (Signum).

4.11 Betriebliche und ökologische Bewertung

Dieses Kapitel beschreibt übergeordnete, also kultur-unabhängige betriebliche und ökologische Aspekte betreffend der mechanischen Unkrautregulierung. Die wichtigsten Punkte zur Einordnung der mechanischen Unkrautregulierung mit Hackgeräten lassen sich folgendermassen zusammenfassen.

- Eine termingerechte Bekämpfung ist für den Erfolg entscheidend (Köller et al. 2019)
- Der Wirkungsgrad liegt zwischen 0 und 70% während er bei der chemischen Bekämpfung >90% beträgt

beitet werden muss. Ebenso ist die richtige Einschätzung des Bodenzustandes und der Witterung entscheidend. Die Kenntnisse für eine erfolgreiche mechanische Unkrautregulierung sind aber zweifelsohne lern- und umsetzbar und mit der Erfahrung steigt auch der Erfolg.

Die stärkere Abhängigkeit vom Wetter führt wie bereits erwähnt zu Vorbehalten in der Anwendung der mechanischen Unkrautregulierung. Die mechanische Variante bringt aber Vorteile, wenn zum Beispiel Nachtfröste im Frühling auftreten und Herbizide deshalb nicht eingesetzt werden können.

Die teilweise noch ungenügende Akzeptanz der mechanischen Unkrautregulierung hängt auch mit einem «Sauberkeitsdenken» zusammen. Auch wenn eine Restverunkrautung in einer Kultur noch keine Auswirkungen auf den Ertrag hat, wird dies mit einem schlechten Bauern in Verbindung gebracht. Was auch häufig als Argument gegen eine rein mechanische Unkrautregulierung ins Feld geführt wird, ist der steigende Samenvorrat im Boden, was zu einem generell höheren Unkrautdruck und zu mehr Problemunkräutern führen könnte.

Ein weiterer Grund für eine beschränkte Akzeptanz sind vermutlich auch die hohen Kosten in der Anschaffung neuer und moderner Hack- und Striegelgeräte. Diese Geräte sollten aus diesem Grund möglichst überbetrieblich angeschafft werden, was den einzelnen Landwirten zu einem gewissen Grad wieder im Gebrauch einschränkt. Die Alternative ist der Lohnunternehmer, der die Arbeit übernehmen könnte. Auch hier sind häufig Vorbehalte zu hören, dass der Lohnunternehmer nicht zum richtigen Zeitpunkt kommen könne und damit der Erfolg in Frage gestellt sei (was leider ab und zu zutrifft).

Nitratauswaschung

Die Studie von Steinmann (2002), in welcher unter anderem auch die Auswirkung der Lockerung und Belüftung des Bodens mit einer Federzinkenegge auf den Mineral-N-Gehalt des Bodens (NO_3^- und NH_4^+) untersucht wurde, kam zu folgendem Schluss: Das Eggen hat nicht zu einer verstärkten N-Mineralisierung geführt. Bemerkenswert ist, dass an einigen wenigen Probenentnahmedaten nach den Eggenbehandlungen eine signifikante scheinbare Mineral-N-Immobilisierung beobachtet wurde (Steinmann 2002).

In den Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (Flisch et al. 2009) wird bei einem mehrmaligen Hacken ein Abzug in der N-Düngung vorgeschlagen (Tabelle 22). Die Berücksichtigung solcher Abzüge ist auch für den Gewässerschutz relevant, denn sie tragen zur Reduktion der Nitratverluste bei. Diese sind derzeit deutlich zu hoch, denn in 40% der Grundwasservorkommen mit schwergewichtiger Ackerbaunutzung im Einzugsgebiet ist die numerische Anforderung von 25 mg Nitrat/L überschritten (BAFU 2019). Für ein einmaliges Hacken von Rüben, Kartoffeln und Mais werden aber keine Korrekturen vorgeschlagen (ebd.).

Eine intensive Bodenbearbeitung fördert kurzfristig die Stickstoffmineralisierung aus der organischen Substanz des Bodens. Die Zunahme ist nicht linear; sie lehnt sich an den allgemeinen Verlauf der mikrobiologischen Aktivität eines Bodens während der Vegetationsperiode (Walther und Jäggi

1993) in Abhängigkeit von der Bodentemperatur und dem Wassergehalt unter schweizerischen Klimabedingungen an. Hacken wurde der Bodenbearbeitungsintensität 1 von 2 zugeordnet, es müssen also keine Mineralisierungskorrekturen vorgenommen werden (Richner et al. 2014). Die Wissenschaft ist sich also in diesem Punkt nicht einig.

Humusgehalt des Bodens (%)	Korrekturwert Düngung (kg N/ha)
Unter 8	-10
8 bis 20	-15
Über 20	-20

Tabelle 22: Zusätzliche N-Nachlieferung des Bodens durch mehrmaliges Hacken nach dem Auflaufen der Kultur in Abhängigkeit des Humusgehaltes des Bodens (Flisch et al. 2009)

Der Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Mineralisierung ist nicht klar erwiesen. Die Literatur lässt keine klare Aussage darüber zu. Manche Fälle zeigen eine Förderung der Mineralisierung, öfters gibt es keine Effekte und in seltenen Fällen führt die Bodenbearbeitung sogar zu einer kleineren Mineralisierung als ohne Bearbeitung. Tendenziell lässt sich aber eine Förderung der Mineralisierung durch die Bodenbearbeitung feststellen, dies konnte aber noch nicht abschliessend bewiesen werden. Die Experten sind sich aber einig, dass die Bodenbearbeitung aufgrund der dabei im Boden ablaufenden Prozesse die Mineralisierung steigert. Durch die Bearbeitung wird das Bodengefüge zerkleinert und der Boden durchmischt, wodurch die abbaubaren Stoffe für die Mikroorganismen besser zugänglich werden. Der Boden wird auch gelockert und dadurch besser mit Sauerstoff versorgt, dies steigert die Mineralisierung noch weiter (Anken 2003). Die teilweise bei Zuckerrüben beobachteten Ertragssteigerungen dürften darauf zurückzuführen sein (Irla 1989).

Treibstoffverbrauch und CO₂-Emissionen

Die mechanische Unkrautregulierung bringt einen höheren Dieserverbrauch mit sich als die Regulierung mit Herbiziden. Dies wiederum hat einen höheren CO₂-Ausstoss zur Folge (Abbildung 7). Die Verbrennung eines Liter Diesels setzt 2.682kg CO₂ frei (KTBL 2018, eia 2019).

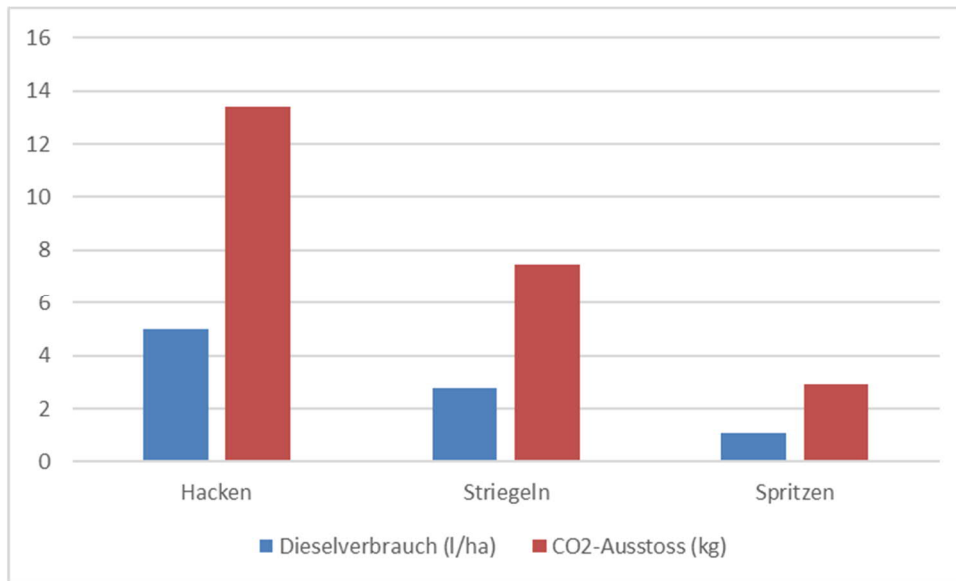


Abbildung 7: Durchschnittlicher Dieselvebrauch und CO₂-Ausstoss je Hektare für **einen Durchgang** mit einem 4-reihigen Scharhackgerät (Hacken), einem 6m Hackstriegel (Striegeln) und einer Anbaufeldspritze mit 15m Balken (Spritzen) (Quelle: nach KTBL 2018; eia 2019, eigene Darstellung).

Der Dieselvebrauch eines Hackdurchganges ist ca. 4.5 Mal grösser als bei einem Spritzdurchgang. Üblich in der Praxis sind je nach Kultur 2-3 Hackdurchgänge, was den Dieselvebrauch verdoppelt bzw. verdreifacht. Der Dieselvebrauch eines Striegeldurchganges ist ca. 2.5 Mal grösser als bei einem Spritzdurchgang. Auch hier sind je nach Kultur und Unkrautdruck mehrere Durchgänge empfohlen. Durch diese mehrfachen Durchgänge oder der auch häufig angewendeten Kombination von Hacken und Striegeln wird ein viel grösser Unterschied des Treibstoffverbrauchs zwischen der mechanischen und der chemischen Unkrautbekämpfung erreicht als in Abbildung 7 aufgezeigt.

Der erhöhte Treibstoffverbrauch, der durch die mechanische Unkrautregulierung entsteht, wirkt sich negativ auf den CO₂-Ausstoss aus. Dieser erhöht sich mit zunehmenden Treibstoffverbrauch rapide. Wird zum Beispiel beim Mais die Unkrautregulierung anstelle einer Herbizidbehandlung rein mechanisch mit einem Striegel- und zwei Hackdurchgängen gemacht, entsteht gut 10x mehr CO₂ bzw. pro Hektare ca. 31kg CO₂ mehr.

Der grösste Anteil des Treibstoffverbrauchs in den einzelnen Verfahren geht jedoch auf den Einsatz des Pfluges (ca. 50%) zurück. Im Verfahren Streifenfrässaat wurde der mit Abstand kleinste Verbrauch an Diesel errechnet. Dieser viel geringere Treibstoffaufwand, kann auf die nicht wendende Bodenbearbeitung zurückgeführt werden (Abbildung 8).

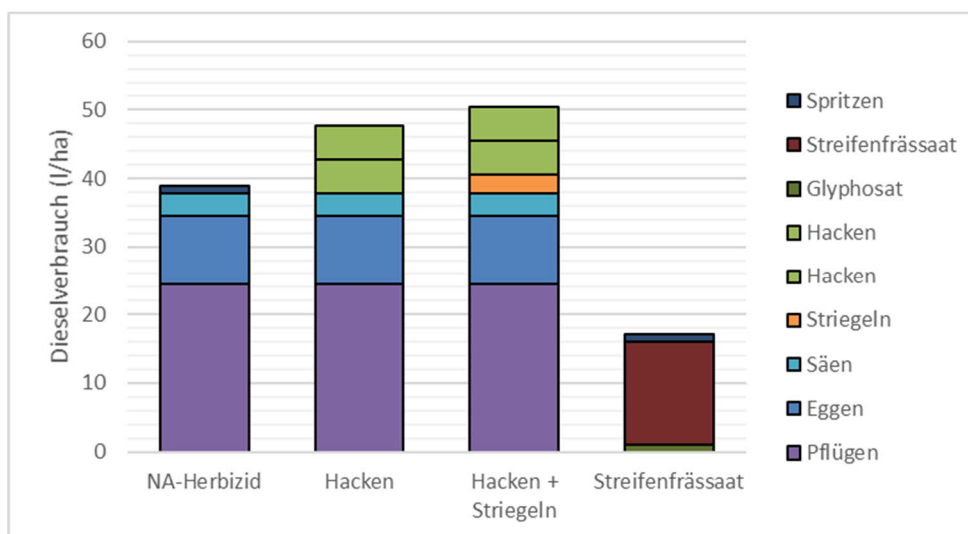


Abbildung 8 Dieselseverbrauch (l/ha) in den unterschiedlichen Verfahren im Maisanbau (Quelle nach: KTBL 2018, eigene Darstellung)

Insgesamt ist zu betonen, dass der CO₂-Austoss der mechanischen Unkrautregulierung auf das landwirtschaftliche Gesamtsystem einen kleinen Effekt hat (Ahlgren 2004), aber trotzdem nicht völlig ignoriert werden sollte.

CO₂-Emissionen durch Humusabbau

Eine intensive Bodenbearbeitung kann auch zu einem Humusabbau und dadurch zu zusätzlichen CO₂-Emissionen führen. Der Einfluss einer mechanischen Unkrautregulierung ist aber klein. Ahlgren (2004) geht deshalb von einem vernachlässigbaren Humusabbau aus.

Erosion

Massnahmen zur Unkrautregulierung bzw. Pflege führen zu einer temporären Bodenlockerung, wodurch transportierbares Material an der Bodenoberfläche geschaffen und so die Erosionsgefahr erhöht wird. In Erosionsmodellen, welche die Transportkapazität des Oberflächenabflusses, deren Auslastung sowie die spezifischen Bodenbearbeitungs- und Pflegemaßnahmen quantifizieren, könnte dieser Effekt berücksichtigt werden (Kainz et al. 2009).

Samenvorrat im Boden

In Abbildung 9 sind die Resultate eines Langzeitversuches von 1989 bis 2004 am Institut Agricole de Grangeneuve IAG dargestellt. In diesem Versuch wurde die Entwicklung des Unkrautsamenvorrates im Boden zwischen den Unkrautregulierungsverfahren chemisch (CHI), integriert (INT - was hiess, wenn möglich mechanische Unkrautregulierung, aber auch chemisch bei hohem Unkrautdruck und/oder Problemunkräutern - und rein mechanisch (MEC) untersucht. Die Resultate zeigen, dass der Samenvorrat im Boden im Verlaufe der Jahre im rein mechanischen Verfahren angestiegen ist (Emmenegger 2005). Bei länger dauernden rein mechanischen Unkrautregulierungsverfahren scheint der Samenvorrat im Boden deutlich anzusteigen.

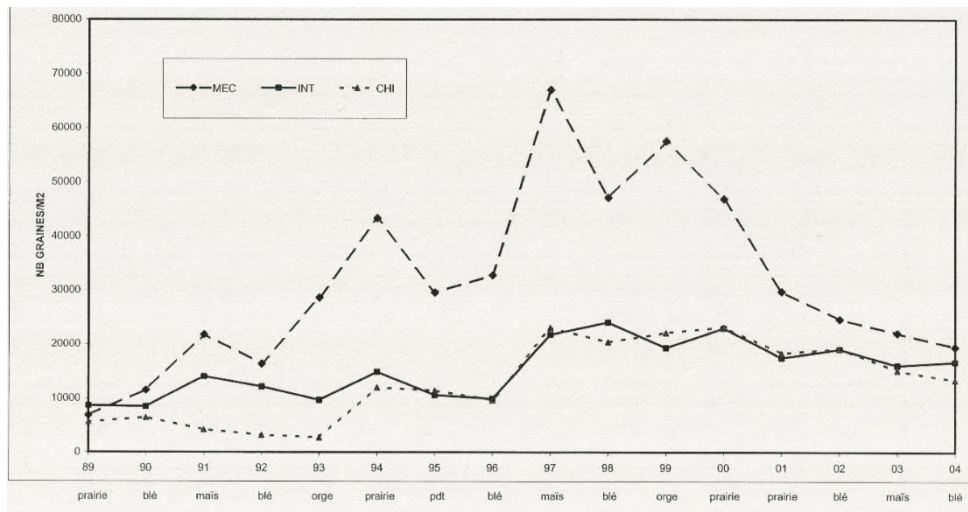


Abbildung 9: Langzeitversuch mit unterschiedlichen Unkrautbekämpfungssystemen. MEC = rein mechanisch, INT = integriert, CHI = rein chemisch. Dargestellt ist der Samenvorrat im Boden pro m² (Emmenegger 2005). Im Jahr 2000 wurde der Vergleich gestoppt und alle Parzellen wurden wieder mit konventioneller Unkrautregulierung bewirtschaftet. Der Samenvorrat im Boden wurde danach noch 5 weitere Jahre untersucht.

Eine weitere Untersuchung, in welcher der Samenvorrat und die Verunkrautung von unterschiedlichen Anbauverfahren untersucht wurden, ist der Burgrain-Versuch. Dieser Langzeitversuch begann 1991 und dauerte bis 2002. In diesem Versuch wurden die Anbausysteme *IPintensiv*, *IPextensiv* und Bio verglichen. Pro Ackerkultur wurden im Mittel in *IPintensiv* 3.3, in *IPextensiv* 1.2 und in Bio 0.6 Einsätze mit Pflanzenschutzmitteln durchgeführt (Zihlmann und Tschachtli 2004). Ein Forschungsgebiet war die Dynamik der Unkrautpopulationen. Streit et al. (2004) haben bezüglich dem Samenvorrat ähnliche Feststellungen gemacht wie Emmenegger (2005). Die mittlere Samendichte pro m² betrug im Anbausystem *IPintensiv* 4'311 Samen, im *IPextensiv* 11'240 Samen und im Bio 10'014 Samen. Die Autoren halten denn auch folgendes fest: «Es wird beispielsweise deutlich sichtbar, dass eine auf hohe Wirksamkeit ausgerichtete Unkrautbekämpfung, wie sie in *IPintensiv* angewendet wurde, längerfristig auch eine vergleichsweise geringe Dichte an Unkrautsamen im Boden zur Folge hat. So kann der generelle Unkrautdruck klein gehalten werden». Zusätzlich zum Samenvorrat wurde auch untersucht, welche Unkräuter in den einzelnen Kulturen aufgetreten sind, denn der Samenvorrat alleine sagt noch nicht aus, was dann effektiv keimt. Die Forscher stellten fest, dass der Weisse Gänsefuss in den Verfahren *IPextensiv* und Bio teilweise dominant auftrat. Als problematisch erwies sich die Wiesenblacke, welche in allen untersuchten Parzellen und Jahren in den Verfahren *IPextensiv* und Bio verstärkt aufgetreten ist (ebd.). Wenn Problemunkräuter wie die Blacke vermehrt auftreten, hat das immer zusätzliche Aufwände zur Folge. Entweder werden die Blacken von Hand gestochen, was sehr rasch viele zusätzliche Arbeitsstunden bedeutet oder sie werden mit einer Rückenspritze resp. einem Handgerät chemisch bekämpft, was zwar effizienter geht, aber trotzdem natürlich Mehrkosten durch Arbeit und Herbizid bedeutet. Die Verunkrautung in den Anbausystemen *IPextensiv* und Bio wurde im Allgemeinen jedoch nicht als ertragslimitierend beurteilt.

Weitere Effekte

Krankheiten der Kulturpflanzen

BBZN (2019) konnte mehr Beulenbrand am Mais feststellen, welcher gestriegelt wurde. Dies ist wahrscheinlich die Folge von Pflanzenverletzungen.

Allgemeiner Einfluss der mechanischen Unkrautbekämpfung auf die Umwelt

Untersuchungen von Ahlgren (2004) ergaben, dass die mechanische Unkrautbekämpfung im Vergleich mit der chemischen grössere Auswirkungen auf den Energieverbrauch, die globale Erwärmung, Eutrophierung, Versauerung und Bildung von Photooxidantien hat (Ahlgren 2004). Die Differenzen sind jedoch klein, wenn das landwirtschaftliche System als Ganzes betrachtet wird.

Die Produktion von mineralischem Dünger hatte den grössten negativen Einfluss auf die globale Erwärmung, im Vergleich dazu war der Einfluss der mechanischen Unkrautregulierung marginal (ebd.).

Es wurde berücksichtigt, dass durch die mechanische Unkrautregulierung kleinere Erträge erreicht werden als bei der chemischen Variante. Deshalb wurde die Fläche der mechanischen Unkrautregulierung erhöht, um die gleichen Erträge zu erhalten. Das bedeutet allerdings auch, dass der Treibstoffverbrauch etc. entsprechend dieser zusätzlichen Fläche ansteigt. Die mechanische Unkrautregulierung wurde in dieser Studie jedoch nur mit dem Striegel gemacht. Das ist kein guter Vergleich mit mechanischer Unkrautregulierung mit der Hacke.

Die wichtigsten Resultate der Studie lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- Der **Energieverbrauch** für die Produktion eines kg Erntegutes liegt in der mechanischen Variante 4% höher als in der chemischen
- Die **GWP (Substances in global warming potential) CH₄, CO₂, N₂O** sind im mechanischen Verfahren leicht höher
- Die **Eutrophierung** war im mechanischen Szenario leicht höher als im chemischen. Höhere NO₃-Werte aufgrund der grösseren zu bewirtschaftenden Fläche bei gleichem Ertrag
- Die **Versauerung** (NH₃, NO_x; SO₂) war im mechanischen Szenario leicht höher als im chemischen
- Die mechanische Unkrautregulierung hat einen leicht höheren Einfluss auf das **Ozon**

5. Gesamtbeurteilung und Empfehlungen

5.1 Zusammenfassung der agronomischen Beurteilung

5.1.1 Beurteilung auf der Ebene Kultur

Durch die im Kapitel 3 vorgenommene Kombination der für die Schweiz verfügbaren Grundwasser-Messdaten mit Daten zum PSM-Einsatz liessen sich die vertieft zu untersuchenden Kulturen identifizieren. Auf dieser Grundlage wurde eine gezielte Auswahl von Massnahmen zur Reduktion der Grundwasserbelastung getroffen und im vorangehenden Kapitel im Detail bewertet. In Tabelle 23 wird die Beurteilung einerseits anhand qualitativer (Wirksamkeit, Akzeptanz, ökologische Auswirkungen) und andererseits anhand quantitativer Kriterien (Kosten, Wirtschaftliche Auswirkungen) zusammengefasst.

Kultur (betroffene Wirkstoffe)	Massnahme	Wirksamkeit	Akzeptanz	Ökologische Auswirkungen	Zusatzkosten (negative Werte = Min- derkosten)	Wirtschaftlichkeit
Hülsenfrüchte (Bentazon)	Mechanische Unkraut-Regulierung	Gering	Tief (Risiko Spätverunkrautung, Alternativen müssen entwickelt werden)	Gering (siehe Abschnitt 4.11)	Keine Aussage möglich (Eiweisserbesen) 855 CHF/ha (Soja)	Keine Aussage möglich für Eiweisserbesen Mehrkosten bei Soja
	Substitution	Gering	Tief	(keine Alternativen bewilligt)		keine Alternativen bewilligt
Zuckerrüben (Chloridazon, S-Metolachlor und bei Substituenten auch Dimethenamid-P)	Rein mechanische Unkraut-Regulierung	Mässig, zusätzliche Handarbeit nötig	Nicht umsetzbar	Gering (siehe Abschnitt 4.11)	3'660 CHF/ha	Mehrkosten
	Kombiniertes Verfahren mit Flächenspritzung und Hacken	Hoch	Teilweise	Gering (siehe Abschnitt 4.11)	-90 CHF/ha	Einsparpotenzial
	Kombiniertes Verfahren mit Bandspritzung und Hacken	Hoch	Teilweise	Gering (siehe Abschnitt 4.11)	-210 CHF/ha	Einsparpotenzial
	Conviso-Rübe	Hoch	Hoch Resistenzrisiko sehr hoch	Erfordert Wirkstoff mit Überschreitungen in Oberflächengewässern	-500 CHF/ha	Einsparpotenzial
	Substitution	Mittel-Hoch	Teilweise	Je nach Wirkstoff (siehe Tabelle 15)	20-40 CHF/ha	Mehrkosten

Kultur (betroffene Wirkstoffe)	Massnahme	Wirksamkeit	Akzeptanz	Ökologische Auswirkungen	Zusatzkosten (negative Werte = Min- derkosten)	Wirtschaft- lichkeit
Mais (S-Metolachlor, Terbutylazine und bei Substi- tuenten auch Dimethenamid- P und Pethoxa- mid)	Mechanische Un- krautregulierung	Hoch	Teilweise, In- formation nö- tig	Gering (siehe Abschnitt 4.11)	- 200 bis -250 CHF/ha	Einsparpo- tenzial
	Streifenfrässaat	Hoch	Teilweise	Gering (siehe Abschnitt 4.11)	- 300 CHF/ha	Einsparpo- tenzial
	Substitution	Derzeit vorhan- den Resis- tenzge- fahr sehr hoch	6 WS aus 3 Wirkklassen verfügbar, plus Dicamba	Je nach Wirkstoff (siehe Ta- belle 17)	Im Durch- schnitt ca. +20 bis +30 CHF/ha (Aus- nahme Di- camba – 40 bis -50 CHF/ha)	Praktisch ausgegli- chen;
Raps (Ersatz Dime- thachlor, Me- tazachlor und bei Substituen- ten auch Petho- xamid)	Bandspritzung (kombinierte Ver- fahren)	Hoch	Tief (Band- spritz-Einrich- tung muss vorhanden sein)	Gering (siehe Abschnitt 4.11) Forschungs- bedarf vor- handen	Datenbasis zu schmal, um verlässliche Aussage ma- chen zu kön- nen	Datenbasis zu schmal, um Aussage machen zu können
	Untersaat mit Kultur	Hoch	Zunehmend	Positiv (je- doch For- schungsbe- darf bezüg- lich Lachgas)	-250 CHF/ha (ohne Bei- träge kosten- neutral)	Einsparpo- tenzial
	Substitution	Gering- Hoch	Schwierig, da beschränkte Wirkung bei hohem Un- krautdruck	Je nach Wirkstoff (siehe Ta- belle 19)	+/- CHF 30/ha	Ausgeglichen
Wintergerste (Substitution Chlorothalonil)	Substitution	Hoch	Zunehmend	Je nach Wirkstoff (siehe Ta- belle 20)	Neutral bis positiv	Ausgeglichen bis positiv
Winterweizen (Substitution Chlorothalonil)	Substitution	Hoch	Hoch	Je nach Wirkstoff	Neutral bis positiv	Ausgeglichen bis positiv
Kartoffeln (Substitution Chlorothalonil)	Substitution	Hoch	Hoch	Je nach Wirkstoff	Neutral	Ausgeglichen

Tabelle 23: Zusammenfassung der kulturspezifischen Massnahmen und ihrer Beurteilung

Bei der Wirksamkeit fällt auf, dass abgesehen von Hülsenfrüchten für die meisten Kulturen wirksame Massnahmen zur Verfügung stehen. Die Akzeptanz ist bei vielen Massnahmen eher tief. Dies unterstreicht die wichtige Rolle der Ausbildung und der Beratung und allen weiteren Möglichkeiten der Wissensvermittlung (z.B. Beraterringe). Die ökologischen Auswirkungen

sind in der Regel gering, wobei die in Kapitel 4.11 beschriebenen Auswirkungen stark parzellenabhängig sind (z.B. Erosionsrisiken).

Mit den ausgewiesenen durchschnittlichen Kosten pro Hektare ist ein beträchtlicher Teil der Massnahmen kostenneutral oder kann sogar zu Einsparungen führen, was primär auf die in den letzten Jahren eingeführten REB für reduzierten Herbizideinsatz zurückzuführen ist (Abbildung 10).

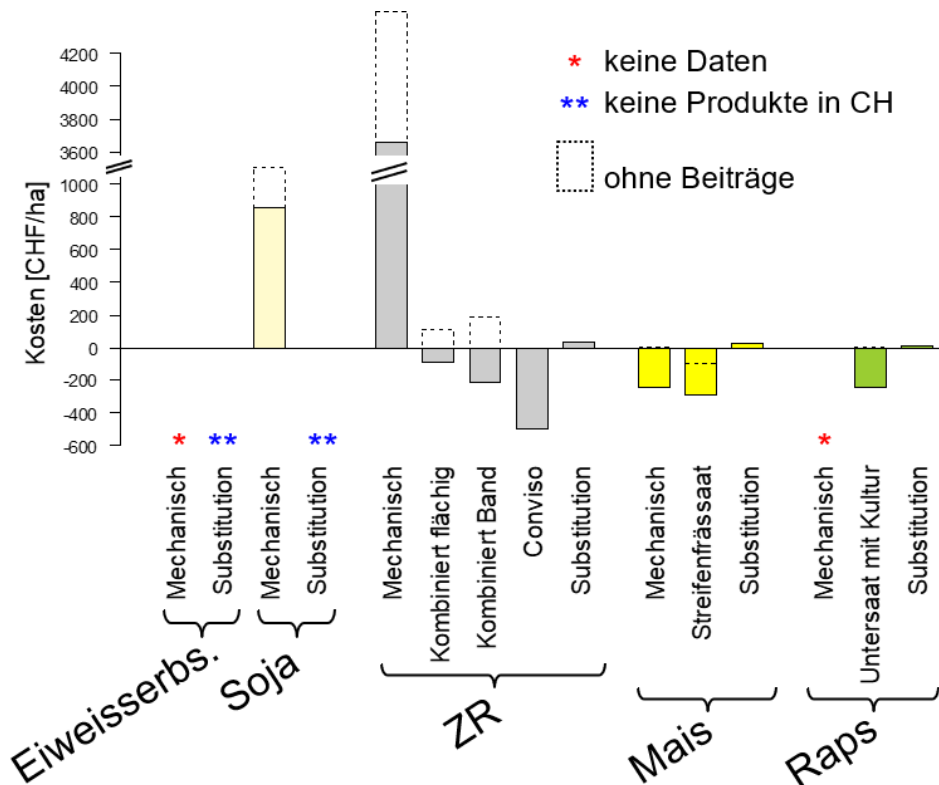


Abbildung 10: .Zusätzliche Kosten im Vergleich zur bisherigen chemischen Unkrautregulierung für die untersuchten Verfahren in Hülsenfrüchten, Zuckerrüben (ZR), Mais und Raps. Negative Werte zeigen Einsparpotentiale auf. Gestrichelte Balken zeigen die Kosten ohne Ressourceneffizienzbeiträge.

Hohe Zusatzkosten werden nur für die rein mechanische Unkrautregulierung in Soja und in Zuckerrüben bestimmt. Bei Zuckerrüben können kombinierte Verfahren ebenfalls zu tieferen Kosten und reduziertem Herbizideinsatz führen.

Qualitativ lässt sich die Beurteilung auf der Ebene der Kulturen folgendermassen zusammenfassen:

- Bei Hülsenfrüchten ist die chemische Unkrautregulierung auf Parzellen mit schwer kontrollierbaren Unkräutern (Klettenlabkraut, Kamille, Windenknöterich, verschiedene Gräser) ohne Bentazon derzeit nicht möglich. Die Umstellung auf mechanische Unkrautregulierung geht mit Ertragsverlusten und Mehraufwand einher. Alternative Produkte mit befriedigender Wirkung stehen derzeit in der Schweiz nicht zur Verfügung. Es gilt zu prüfen, welche Produkte ohne Bentazon in anderen Ländern zugelassen sind. Gemäss Aussagen landwirtschaftlicher Berater im Bundesland Oberösterreich hat die Soja-Anbaufläche seit dem Verbot des Wirkstoffs

eher zugenommen, also ist davon auszugehen, dass in dieser Region eine Lösung mit ausreichender Wirtschaftlichkeit gefunden wurde.

- Bei Zuckerrüben ist der vollständige Verzicht auf Herbizide mit hohem Aufwand verbunden. Kombinierte Verfahren mit chemischer Behandlung in der Pflanzreihe und mechanischer Unkrautregulierung zwischen den Reihen ermöglichen aber eine Reduktion der Herbizidmenge um knapp 60%. Aufgrund der bis 2021 erhältlichen Ressourceneffizienzbeiträgen für die Reduktion von Pflanzenschutzmitteln im Zuckerrübenanbau ist dieses Verfahren sogar etwas kostengünstiger als die Flächenbehandlung mit Herbiziden. Diese Verfahren sind zu empfehlen. Zudem ist eine Substitution der dabei eingesetzten Wirkstoffe durch solche mit günstigerem Profil möglich (keine mobilen Metaboliten, keine verbreitete Belastung von Oberflächengewässern und kein besonderes Risikopotential gemäss Einstufung Agroscope).
- Bei Mais ist in Jahren mit günstiger Witterung der vollständige Verzicht auf Herbizide ohne Ertragsverluste und bei den bis 2021 verfügbaren Beiträgen kostenneutral möglich. Untersaaten kosten für das Saatgut und die Ausbringung zusätzlich ca. CHF 210/ha, bringen aber den Vorteil, dass der Boden bei der Ernte deutlich tragfähiger ist und weniger Wasser oberflächlich abfließt. Untersaaten sind in Pflug- und Mulchsaaten, nicht aber in Direktsaaten möglich. In Jahren mit ungünstiger Witterung kann teilweise auf Substituten mit günstigerem Umweltprofil zurückgegriffen werden. Allerdings verbleiben aktuell nur noch Wirkstoffe aus zwei Resistenzgruppen (B und F₂), was das Resistenzrisiko wesentlich erhöht. Vor diesem Hintergrund ist eine Förderung nicht-chemischer Verfahren ein Beitrag zur Reduktion von Resistenzrisiken (Norsworthy 2012, Owen 2016).
- Bei Raps ermöglicht der Anbau mit Untersaaten einen in der Regel kosten- und ertragsneutralen Verzicht auf Herbizide. Das Verfahren funktioniert auf Standorten ohne problematische Unkräuter und bedingt einige wichtige vorbeugende Massnahmen wie eine gute Unkrautbekämpfung vor der Rapssaat, eine exakte angepasste Bodenvorbereitung und eine um ca. 5 Tage frühere Saat. In Jahren mit ungünstiger Witterung kann auf das Produkt Devrinol Top (Napropamid und Clomazone) mit günstigerem Umweltprofil zurückgegriffen werden. Allerdings ist die Wirkung bei hohem Unkrautdruck limitiert.
- Für die Substitution des mittlerweile nicht mehr zugelassenen Fungizids Chlorothalonil in Gerste, Weizen und Kartoffeln, stehen mehrere Wirkstoffe mit günstigerem Umweltprofil zur Verfügung.

Insgesamt lässt sich sagen, dass in drei der vier vertieft untersuchten Kulturen erhebliche Spielräume bestehen. Vor allem beim flächenmässig besonders relevanten Mais gibt es effektive Massnahmen zur Reduktion des PSM-Einsatzes und bei Zuckerrüben dürfte sich eine Kombination von Reduktion und Substitution anbieten. Dies ist ein vielversprechender Handlungspfad, denn die in diesen beiden Kulturen eingesetzten Pflanzenschutzmittel machen den grössten Teil der Nachweise über 0.1 µg/L im Grundwasser aus.

5.1.2 Beurteilung auf der Ebene Betrieb

Neben einer grundsätzlichen Eignung auf der kulturspezifischen Ebene gibt es eine betriebliche Ebene, die ebenfalls Einfluss auf die Verbreitung von Massnahmen hat. So bedeutet der Ersatz von Herbizidspritzungen mit alternativen Methoden (Striegeln, Hacken, Untersaaten) für den einzelnen Betrieb Mehrarbeit und teilweise auch Mehrkosten. Die Arbeitsbelastung ist auf Landwirtschaftsbetrieben heute generell hoch. Die Arbeit der alternativen Methoden fällt zudem in einer Jahreszeit an (Frühling, Vorsommer), wo sonst schon Arbeitsspitzen vorhanden sind. Dies ist ein wesentlicher Hinderungsgrund, dass solche Methoden nicht schon weiterverbreitet sind, insbesondere, wenn auf dem Betrieb noch eine eigene Feldspritze vorhanden ist.

Striegel und Hackgeräte bedeuten auch Zusatzinvestitionen in einem grösseren Umfang. Darum sollten Hackstriegel und Hackgeräte vermehrt überbetrieblich angeschafft und gebraucht werden, um die Investitionen besser zu amortisieren und die Kosten tiefzuhalten. Zudem bieten immer mehr Lohnunternehmer mechanische Unkrautkontrolle an.

Ein weiterer hemmender Faktor um vermehrt auf mechanische Unkrautregulierung ist die Witterung. Damit der Erfolg einer mechanischen Unkrautregulierung im nötigen Mass da ist, muss die Witterung mitspielen, das heisst es braucht eine Abfolge einiger trockener Tage (Owen 2016). Auch bei der chemischen Unkrautregulierung sollte ausreichend Zeit bis zum nächsten Niederschlag vergehen, aber die für die gewünschte, unkrautregulierende Wirkung nötigen Zeitfenster sind klar kürzer, denn es braucht nicht mehrere trockene Tage bis der gewünschte Effekt eintritt. Ein weiterer Hinderungsgrund dürfte der Respekt vor einem steigenden Samenvorrat resp. vor der Zunahme von schwer bekämpfbaren Unkräutern wie Blacke, Disteln und Quecken sein. Bis zu einem gewissen Grad spielt zudem fehlendes Wissen respektive fehlende Beratung bei der Einführung neuer Methoden und Geräte eine Rolle. Zu guter Letzt spielt auch noch das Image mit, indem die Meinung teilweise immer noch vorhanden ist, dass ein guter Bauer auch "saubere" also 100% unkrautfreie Felder hat, sich also nicht mangelnde Feldhygiene vorwerfen lassen muss.

Bei einer Substitution der problematischen Substanzen steht die Resistenzproblematik an erster Stelle. Bei sinkender Anzahl Wirkstoffgruppen nimmt die Resistenzgefahr zu. Im Fokus stehen die Sulfonylharnstoffe (Resistenzgruppe B). Hier wird der Landwirt in Zukunft gezwungen sein, vermehrt mit Resistenzstrategien für den ganzen Betrieb zu arbeiten, um keine grösseren Probleme zu riskieren. Dies bedeutet aber auch, dass die Beratung unterstützen und helfen muss, entsprechende Konzepte zu erarbeiten resp. die nötigen Werkzeuge dazu zu erarbeiten und bereit zu stellen.

Das Fazit auf der Ebene Betrieb ist, dass Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz selbst bei Kostenneutralität oder Einsparmöglichkeiten auf der Ebene Kultur noch nicht von selbst Verbreitung finden. Für einen künftigen Erfolg müssen weitere Aspekte wie die Auslastung der Maschinen, die Auslastung der Mitarbeiter, der Respekt vor Problemunkräutern und hohe Erwartungen an die Feldhygiene berücksichtigt werden. Bei der Substitution

ist die Resistenzproblematik zentral und eine dahingehende Beratung ist unerlässlich.

5.1.3 Beurteilung der wirtschaftlichen Auswirkungen

Für die Schätzung der Gesamtkosten alternativer chemischer und nicht chemischer Verfahren, die sich durch einen Verzicht der 9 betrachteten Wirkstoffe in den Zuströmbereichen auf der Ebene Schweiz ergeben, wurden als erste Näherung die Kosten pro Hektare (siehe Tabelle 23 / Abbildung 10) mit der Anbaufläche multipliziert (Tabelle 24). Diese Schätzung ist aus mehreren Gründen sehr grob:

- Nur ein Teil der Ackerfläche liegt in Zuströmbereichen von aktuellen oder möglichen Grundwassernutzungen. Da die Zuströmbereiche bisher nicht bestimmt sind, wurde eine optimistische Unter- und eine pessimistische Obergrenze des betroffenen Anteils der Ackerflächen von 10 bzw. 40% angenommen. Eine Unterscheidung nach Kulturen wurde wegen fehlender Information und wegen der Fruchtfolgen nicht vorgenommen.
- Der Anteil der mit Problemunkräutern belasteten Flächen ist je nach Unkraut unterschiedlich hoch und die Kulturen sind unterschiedlich empfindlich. Wegen mangelnder Daten wurde dieser Aspekt nicht berücksichtigt.
- Die Eignung der alternativen Regulierungsmethoden ist regional und lokal unterschiedlich. Je nach Klima und Boden verursachen sie höhere oder niedrigere Kosten als in Tabelle 23 angegeben
- Die Kosten der alternativen Regulierungsmethoden sind abhängig von der Betriebsstruktur und der Methode. Sind zusätzliche Maschinen nötig, z.B. bei Hackgeräten können sich bei hoher Auslastung weitere Kosteneinsparungen ergeben. Bei Untersaaten geht es primär darum, sich die nötigen Kenntnisse anzueignen. Bei der Substitution sind die Kosten unabhängig von der Betriebsstruktur, setzen aber die entsprechenden Beratungsunterlagen voraus.

Aus langfristiger Sicht sind zudem mit dem Resistenzrisiko und dem Samenvorrat im Boden zwei Faktoren zu beachten, deren potenzielle Kosten kaum abgeschätzt werden können. Das Resistenzrisiko wird einerseits durch den Verzicht auf gewisse Wirkstoffe erhöht, andererseits durch den kombinierten Einsatz chemischer und mechanischer Verfahren gesenkt. Der zunehmende Samenvorrat im Boden kann potenziell zu vermehrtem Auftreten von Problemunkräutern führen, welche durch zusätzliche Eingriffe reguliert werden müssen.

Trotz der oben genannten Unsicherheiten zeigen die in Tabelle 24 aufgeführten Zahlen deutlich, dass es sich in allen Kulturen um Beträge von weniger als CHF 1 Mio. handelt. Eine Ausnahme stellt die rein mechanische Unkrautregulierung in Zuckerrüben dar, für die bei angenommenen 10-40% der Gesamtfläche mit Zusatzkosten von CHF 7-28 Mio. gerechnet werden muss. Dank der REB-Beiträge stellen mehrere Verfahren auch Einsparpotentiale für die Betriebe dar. Je nach Ausschöpfung der REB-Beiträge führen diese zu durch die öffentliche Hand getragenen Mehrausgaben, welche bei einem Anteil von 40% der Ackerfläche ja nach Kultur von 0.15 (Hülsenfrüchte) bis 6 Mio CHF (Mais) reichen.

Kultur	Anbau- fläche [ha]	Massnahme	Zusatzkosten [CHF/ha]	Bandbreite Gesamtkosten bei 10 bis 40% Flächenanteil [Mio CHF]
Hülsenfrüchte - Eiweisserbsen	4'227	Mechanische Unkrautregulierung	Nicht bestimmbar	N.B.
		Substitution	Keine geeigneten Produkte in CH	N.B.
Hülsenfrüchte – Soja <small>(biologisch bewirt- schaftete Fläche ab- gezogen)</small>	1'500	Mechanische Unkrautregulierung	855.-	0.1 bis 0.5
		Substitution	Keine geeigneten Produkte in CH	N.B.
Zuckerrüben	19'142	Mechanische Unkrautregulierung	3660.-	7 bis 28
		Flächenspritzung + Substitution	-89.-	-0.2 bis -0.7
		Bandspritzung + Substitution	-214.-	-0.4 bis -1.6
		Conviso	-500.-	-0.9 bis -3.8
		Substitution	30	0.06 bis 0.2
Mais	62'040	Mechanische Unkrautregulierung	-246.-	-1.5 bis -6.1
		Streifenfrässaat	-295.-	-1.8 bis -7.3
		Substitution	25.-	0.1 bis 0.6
Raps	21'910	Mechanische Unkrautregulierung	-245.-	N.B.
		Untersaat	-246.-	-0.5 bis -2.2
		Substitution	+/-30.-	-0.3 bis +0.3

Tabelle 24: Grobschätzung der wirtschaftlichen Auswirkungen. N.B.: Nicht bestimmbar

5.2 Empfehlung für die Umsetzung der Massnahmen

Die Untersuchung der Massnahmen auf der Ebene der Kulturen und der Betriebe hat gezeigt, dass für die meisten Kulturen und einen grossen Teil der Betriebe grundwasserschonende Alternativen zur Verfügung stehen, welche keine unannehmbaren Auswirkungen auf andere Umweltkompartimente und auch nicht auf Erträge oder Wirtschaftlichkeit der Produktion haben. Die Erfahrung zeigt, dass auf Seite der Agrar- und Umweltpolitik und auch auf Seite des Marktes zusätzliche Faktoren erfüllt sein müssen, damit die Alternativen in der Praxis Verbreitung finden. Aus der Massnahmenbeurteilung lassen sich die folgenden Empfehlungen ableiten:

- Förderung: Ein zentraler Punkt in der Umsetzung der Massnahmen sind die Beiträge für einen reduzierten Herbizideinsatz. Diese müssten längerfristig zugesichert sein. Dies würde den Anreiz deutlich erhöhen, in neue Methoden einzusteigen. Einerseits, um ein erhöhtes Risiko von Mindererträgen und/oder Mehrkosten abzufedern, andererseits aber auch um eine erhöhte Sicherheit für die Amortisation bei der Anschaffung neuer Geräte für die mechanische Unkrautregulierung zu schaffen. Die allgemeinen Beiträge für den Ackerbau sind nur für 2019-2021 zugesichert und bei

einem derart kurzen Zeitraum lohnt sich eine Neuanschaffung deutlich weniger, als wenn man mit 6 oder 10 Jahren Amortisationszeit rechnen kann.

- Labels: Weitere Anreize zum Umstellen sind von Labelorganisationen konzipierte Programme wie dem von IP-Suisse, in welchem herbizidloser Anbau von Weizen mit einer zusätzlichen Prämie honoriert wird, welche am Markt geholt wird. Durch die zusätzliche Prämie sind die Landwirte bereit, eine neue Herausforderung anzunehmen und auch höhere Risiken zu akzeptieren.
- Räumlich differenzierte Handhabung der Instrumente: Die Massnahmen müssen nicht auf der ganzen Fläche der Schweiz umgesetzt werden, sondern nur in den Zuströmbereichen. In der Schweiz gibt es bisher nur eine geringe Anzahl von ausgeschiedenen Zuströmbereichen, weshalb ein Blick über die Grenze lohnenswert ist. So ist es in Österreich gelungen durch das Ausscheiden von Wasserschongebieten, für die weniger strenge Anforderungen als an Wasserschutzgebiete gelten, mit relativ begrenzten Mitteln die relevanten Einzugsgebiete zu erfassen und auf den Grundwasserschutz in diesen Gebieten zugeschnittene Förderprogramme zu konzipieren. Es wäre denkbar, in definierten Gebieten höhere Beiträge als die gegenwärtigen REB-Beiträge auszuschiessen, wobei Tabelle 23 verdeutlicht, dass die Kostenunterschiede der Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz entweder relativ gering oder dann sehr hoch sind. Für Kulturen wie Hülsenfrüchte wäre eine Evaluation und allfällige Zulassung der in Deutschland und Österreich verwendeten Ersatzstoffe für Bentazon oder ein Verbot des Anbaus innerhalb des Zuströmbereichs die naheliegendste Massnahme.
- Angewandte Agrarforschung: Bei Kulturen wie Mais, wo trotz potenzieller Kostenersparnis die Landwirte nur zögerlich auf mechanische Unkrautregulierung umstellen, braucht es weitere Versuche, um die vorhandenen Daten abzusichern, und eine überzeugende Beratung, dass das Risiko abschätz- und tragbar ist mit entsprechenden Regulierungskonzepten. In Kulturen wie Raps fehlt hingegen im Moment eine nötige minimale Datenbasis, um die reine mechanische Unkrautregulierung (welche durchaus Erfolg haben könnte) in der Praxis zu etablieren. Die erwähnten widersprüchlichen Ergebnisse bezüglich Nitratverluste sind ein weiteres Gebiet mit Forschungsbedarf. Neben den genannten pflanzenbaulichen Aspekten wären für die Konzeption der Förderprogramme auch agrarökonomische Studien zum Einfluss der Betriebsstruktur auf die Wirtschaftlichkeit von Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz nötig.
- Beratung und Erfahrungsaustausch: Eine sehr gute Methode, den Erfahrungsaustausch zu verbessern, sind Arbeitskreise. Dieses Instrument wurde in der Tierhaltung und im Futterbau in der Schweiz eingeführt. In den letzten Jahren wurde versucht, diesen Ansatz auch im Pflanzenschutz einzuführen (Kantone Bern und Freiburg). Leider musste man feststellen, dass es in diesem Bereich viel schwieriger ist, die Landwirte zur Teilnahme zu motivieren. Was die Gründe sind, konnte bis heute nicht eruiert werden.

— Informationsanlässe: Ein sehr interessanter Ansatz sind einfache Demonstrationsversuche auf Landwirtschaftsschulen und/oder Praxisbetrieben. Ein eindrückliches Beispiel dazu war die 2018 durchgeführte Feldtagung «Von der Hacke zum Roboter» am Inforama Rütli mit mehr als 350 Besuchern. An mehreren Posten wurden verschiedene Anbauverfahren mit Herbizidreduktion oder -verzicht in verschiedenen Ackerkulturen vorgestellt. Die Landwirte konnten sich zum Beispiel beim Mais ein direktes Bild machen, dass der Mais mit reiner mechanischer Unkrautregulierung nicht schlechter dastand als der mit einem Herbizid behandelte.

Mit den beschriebenen Politikinstrumenten können die Randbedingungen für eine Umsetzung der Massnahmen verbessert werden. Mit einer Fokussierung auf Mais und Zuckerrüben würden die beiden flächenmässig und bezüglich Reduktionspotenzial vielversprechendsten Kulturen abgedeckt.

6. Literatur

- Agreste 2014 Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt - Secrétariat Général 2014 : Enquête Pratiques culturales 2011 - Principaux résultats, Les Dossiers N° 21 - Juillet 2014, 74 S.
- Agridea 2018 Deckungsbeitragskatalog
- Agridea 2019 Reflex – Betriebswirtschaftliche Datensammlung
- Agridea 2020 Datenblätter Ackerbau, Datenblätter Ackerbau 10.6.1
- Agroscope 2019 Maschinenkosten 2019: Agroscope Transfer, 291 S.
- Agroscope 2020 Korkaric M., Hanke I., Grossar D., Neuweiler R., Christ B., Wirth J., Hochstrasser M., Dubuis P-H., Kuster T., Breitenmoser S., Egger B., Perren S., Schürch S., Aldrich A., Jeker L., Poiger T., Daniel O. 2020: Datengrundlage und Kriterien für eine Einschränkung der PSM-Auswahl im ÖLN, Agroscope Science | Nr. 106 / September 2020
- Ahlgren 2004 Ahlgren S, 2004: Environmental impact of chemical and mechanical weed control in agriculture. A comparing study using Life Cycle Assessment (LCA) methodology. SIK, Göteborg, 59 S.
- Ammann H 1998 Ammann H, Stadler E, 1998: Technische und organisatorische Aspekte des Traktoreinsatzes, FAT-Berichte, 511 S.
- Anken 2003 Anken T, 2003: Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung gepflügter und direkt gesäter Parzellen, Dissertation ETH, Zürich.
- BAFU 2019 BAFU (Hrsg.) 2019: Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1901: S. 138.
- Barrett 1997 Barrett, M. 1997: Initial tier screening of pesticides for groundwater concentration using the SCI-GROW model. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- BBZN 2019 BBNZ Berufsbildungszentrum Natur und Ernährung, 2019: Pflugloser Maisanbau ohne Glyphosat oder ohne Herbizide als wirtschaftliche Alternative: mit Schälen und Hacken. Versuchsbericht Mais 2017 bis 2019, S. 10.

- Beaux 2019 Beaux A., Schumacher P. 2019: Einführung der Rapskultur mit Untersaat: Die Schweizer Produzenten kommen zu Wort, Agrarforschung Schweiz, 10 (3), 128–133.
- BIOAktuell 2019 BIOAktuell.ch: Biosoja: Unkrautregulierung, 16.04.2019. Abgerufen am 02.04.2020, <https://www.bioaktuell.ch/pflanzenbau/ackerbau/koernerleguminosen/soja-hacken-de.html>
- BLW 2019a BLW Bundesamt für Landwirtschaft 2019a: Agrarbericht.
- BLW 2019b BLW 2019b: Verkaufsmengen je Pflanzenschutzmittel-Wirkstoff, Stand: 20.01.2019
- BLW 2020 BLW 2020: PSM mit besonderem Risikopotenzial, Aktualisierte Version des Anhang 9.1 des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel, 1. Januar 2020,
- Böhler et al. 2017 Böhler D, Lichtenhahn M, Dierauer H, (FiBL), Bertschi A, Jenni S, (SFZ), Ramseier H, (HAFL), 2017: Merkblatt: Biozuckerrüben, unveröffentlicht, Frick.
- Brunner 2020 Brunner F, 2020: Anbaufläche Biosoja in der Schweiz, E-Mail vom 11.05.2020
- bwsb 2020 Boden.Wasser.Schutz.Beratung 2020: Gewässerschonender Pflanzenschutz in der Sojabohne. Abgerufen am 25.06.2020, <https://www.bwsb.at/?+Gewaesser-schonende+Herbizidempfehlungen+&id=2500%2C%2C1790123%2C>
- Convisosmart 2020 Convisosmart 2020: Abgerufen am 10.04.2020, <https://www.convisosmart.ch/>
- de Baan 2015 De Baan L., Spycher S., Daniel O. 2015: Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in der Schweiz von 2009 bis 2012, Agrarforschung Schweiz, 6 (2), 48–55.
- eia 2019 eia (U.S. Energy Information Administration), 2019: How much carbon dioxide is produced when different fuels are burned, Abgerufen am 17.03.2020, <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=73&t=11>
- Emmenegger 2005 Emmenegger J, 2005 Stock grainier: Institut Agricole Grandjeanne, unveröffentlicht
- Estermann 2020 Estermann T, Verband Lohnunternehmer Schweiz, persönliche Mitteilung 03.2020
- Fachstellen Pflanzenschutz 2020 Fachstellen Pflanzenschutz LZ Liebegg, BBZ Arenenber und Strickhof) (Hrsg.), 2020: Pflanzenschutzmittel im Feldbau 2020.

- Fenaco 2020 Fenaco 2020: Zielsortiment - Pflanzenbehandlungsmittel im Acker- und Futterbau, S. 85
- FiBL 2018 Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) (Hrsg.), 2018: Tätigkeitsbericht 2018. Zuckerrüben: Präzise Hacken senkt die Kosten.
- Flisch et al. 2009 Flisch R, Sinaj S, Charles R, Richner W: GRUDAF - Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau 2009.
- Forum Ackerbau 2018 Versuchsbericht 2018, S. 43.
- Forum Ackerbau, 2019 Versuchsbericht 2019, S. 69.
- Gazzarin und Lips 2018 Gazzarin C, Lips M (Hrsg.), 2018: Methodische Grundlagen für die Berechnung der Maschinenkosten.
- Gustafson 1988 Gustafson, D.I. 1988: Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. Environmental Toxicology and Chemistry 8, 339-357.
- HAFL 2019 Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL 2019: Untersaaten in Raps, unveröffentlicht.
- Hahn 2020 Hahn M: Ergebnisse und Empfehlungen zum Integrierten Pflanzenschutz im Ackerbau 2020 – Rückblick und Pflanzenschutzintensität in Winterraps. Abgerufen am 06.05.2020, <https://www.isip.de/isip/servlet/resource/blob/305980/8df2284326f5d6694ae7c26e9d3d8a5b/ergebnisse-und-empfehlungen-zum-integrierten-pflanzenschutz-im-ackerbau-2020-data.pdf>
- Hunkeler 2020 Hunkeler D., Cochand F., 2020: Wirksamkeit eines PSM-Verbots in Grundwasserschutzzonen, Zentrum für Hydrogeologie und Geothermie (CHYN), Universität Neuenburg, Mai 2020.
- Irla 1989 Irla E, 1989: Bandspritzung und Hacken in Zuckerrüben und Mais: Verfahrensvergleich der Unkrautbekämpfung – FAT-Berichte 359.
- Irla et al. 2004 Irla E, Spiess E, Heusser J, Streit B, Humphrys C, Böhrler D, 2004: Anbautechnik und Unkrautregulierungs-Verfahren für Biozuckerrüben. Aufwand beim Handhacken lässt sich vermindern, FAT-Berichte, 612, 1–8.
- Kainz et al. 2009 Kainz M, Siebrecht N, Reents H-J (Hrsg.), 2009: Wirkung des Ökologischen Landbaus auf Bodenerosion. Dr. Köster, Berlin.
- Keiser 2016 Keiser A, Jungo B, Bertschi C, Jenni S, 2016: Herbizidreduktion durch eine kombinierte mechanisch - chemische Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben, Schlussbericht, Zollikofen, 42 S.

- Kiefer 2019a Kiefer K., Müller A., Singer H., Hollender J. 2019: New relevant pesticide transformation products in groundwater detected using target and suspect screening for agricultural and urban micropollutants with LC-HRMS, *Water Research*, 165, 114972.
- Kiefer 2019b Kiefer K., Müller A., Singer H., Hollender J. 2019: Pflanzenschutzmittel-Metaboliten im Grundwasser – Ergebnisse aus der NAQUA-Pilotstudie Screening, *Aqua & Gas*, 11, 14-23.
- Kloepfer 2019 Kloepfer F, 2019: Mechanische Unkrautregulierung im Mais. Schlagkraft und die verfügbaren Feldarbeitstage wirken begrenzend. *Mais*, 02.
- Kneidinger 2020 Kneidinger C., Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft der Oberösterreichischen Landesregierung (Persönliche Mitteilung 7.9.2020)
- Kolbe et al. 2002 Kolbe H, Karalus W, Hänsel M, Grünbeck A, Gramm M, Arp B, Krelling B, 2002: Körnerleguminosen im Ökologischen Landbau, Informationen für Praxis und Beratung, unveröffentlicht, Dresden.
- Köller et al. 2019 Köller KH, Vinzent B, Demmel M, 2019: dlG-merkblatt_449. Mechanische Unkrautregulierung - Technik für die Praxis. Abgerufen am 23.02.2020, https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/merkblaetter/dlg-merkblatt_449.pdf
- KTBL 2018 KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft), 2018: Verfahrensrechner Pflanze. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt.
- Kuderna 2020 Kuderna M., Weinberger C., wpa Beratende Ingenieur GmbH 2018: Oberösterreichisches Regionalprojekt GRUNDWasser 2020, Kurzbericht 2017 <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/50557.htm>
- Lehmann 2020 Lehmann M: Produktmanager Futterbau, Ölf Früchte, Getreide, Wildblumen: Persönliche Mitteilung 08.05.2020.
- MAGPIE 2013 MAGPIE (Mitigating the Risks of Plant Protection Products in the Environment), Eds. Alix A. et al., From the two-part SETAC Workshop Mitigating the Risk of Plant Production Products in the Environment, S. 455.
- Muralt 2020 Muralt R. 2020: Persönliche Mitteilung, 15.1.2020.
- Norsworthy 2012 Norsworthy J. K. et al. 2012: Reducing the Risks of Herbicide Resistance: Best Management Practices and Recommendations, *Weed Science*, 31–62.

- Owen 2016 Owen M. D. K. 2016: Diverse Approaches to Herbicide-Resistant Weed Management, *Weed Science*, 570–584.
- Reinhardt 2017 Reinhardt M., Kozeł R., Hofacker A., Leu C. 2017: Monitoring von PSM-Rückständen im Grundwasser, *Aqua & Gas*, 6, 78-89.
- Richner et al. 2014 Richner W, Oberholzer H-R, Ott S, 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, *Agroscope*. Abgerufen am 12.03.2020, <https://p2infohouse.org/ref/37/36390.pdf>
- SFZ 2019 Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau (SFZ CBS) 2019: Conviso SMART eine neue Technologie im Zuckerrübenanbau. Abgerufen am 7.10.2020 https://www.zuckerruebe.ch/fileadmin/pdf/Technisches_Bulletin_Conviso_d.pdf
- Speiser 2015 Speiser B., Mieves E., Tamm L. 2015: Kupfereinsatz von Schweizer Biobauern in verschiedenen Kulturen, *Agrarforschung Schweiz* 6 (4): 160–165, 2015.
- Spycher 2013 Spycher S.; Daniel O., 2013: Agrarumweltindikator Einsatz von Pflanzenschutzmitteln – Auswertungen von Daten der Zentralen Auswertung Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) der Jahre 2009-2010. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW.
- Steinmann 2002 Steinmann HH, 2002: Impact of harrowing on the nitrogen dynamics of plants and soil, S. 53–59, [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00278-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00278-1).
- Streit et al. 2004 Streit B, Scherrer C, Tschachtli R, 2004: Integrierter und biologischer Anbau im Vergleich – Anbausystemversuch Burgrain – Dynamik der Unkrautpopulationen, *Schriftenreihe der FAL* 52 (70-75), Zürich
- Vogelwarte 2020 vogelwarte.ch, Ressourcenprojekt zur Förderung der Biodiversität im Ackerland. Abgerufen am 7.10.2020, <https://www.vogelwarte.ch/de/projekte/lebensraeume/ressourcenprojekt-zur-foerderung-der-biodiversitaet-im-ackerland>
- Waldschmidt 2020 Waldschmidt S: Ergebnisse und Empfehlungen zum Integrierten Pflanzenschutz im Ackerbau 2020 – Herbizideinsatz in Winterraps. Abgerufen am 06.05.2020, <https://www.isip.de/isip/servlet/resource/blob/305980/8df2284326f5d6694ae7c26e9d3d>

8a5b/ergebnisse-und-empfehlungen-zum-integrierten-pflanzenschutz-im-ackerbau-2020-data.pdf

- Wallner 2019 Wallner T. 2019: 3 Jahre ÖPUL/GRUNDWasser 2020 in Oberösterreich: Pflanzenschutzmittel im Grundwasser – eine Zwischenbilanz, OÖ Landes-Pflanzenschutztag, 14. Februar 2019, abz Lambach
- Walther und Jäggi 1993 Walther U, Jäggi W, 1993: Welche Düngewirkung hat Stallmist? Badische Bauernzeitung, S. 46, 24–26
- Wittmer und Scheidegger 2020 Wittmer I.; Scheidegger R., 2020: Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe im Grundwasser - Modellbasierte Abschätzung Prognose des Vorkommens. VSA-Plattform Wasserqualität und Eawag (in Vorbereitung)
- Zihlmann und Tschachtli 2004 Zihlmann U, Tschachtli R, 2004: Integrierter und biologischer Anbau im Vergleich – Anbausystemversuch Burgrain – Standort und Versuchsbeschreibung, Schriftenreihe der FAL 52, 23-27.

Dank

Das umfassende Thema des Projekts war dank der Unterstützung und dem Rat zahlreicher Personen möglich, denen wir herzlich danken wollen. Insbesondere Thomas Wallner (Landwirtschaftskammer Oberösterreich), Christian Kneidinger und Alexander Munteanu (Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft der Oberösterreichischen Landesregierung), Anne Dietzel und Irene Wittmer (VSA Plattform Wasserqualität), Silvio Blaser, Laura de Baan und Thomas Poiger (Agroscope), Karin Kiefer (Eawag), Johannes Ranke (jrwb), Marion Junghans (Ökotoxzentrum).

Auch allen nicht namentlich genannten Kolleginnen und Kollegen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

A1 Auswahl der untersuchten Wirkstoffe

PSM-Wirkstoff	Rechtliche Aspekte [1]	Muttersubstanz (bei Metaboliten)	Anzahl Messstellen	Anzahl > BG	Nachweis-häufigkeit in %	Anzahl > 0.1 ug/L	Ref.
Wirkstoffe - NAQUA (landesweit repräsentativer Datensatz)							
Atrazin [3]	PX		530	145	27.4%	3	[6]
Bentazon	P		530	25	4.7%	4	[6]
Chloridazon	P [2]		530	1	0.2%	0	[6]
Cyanazin	PX		530	0	0.0%	0	[6]
Dichlorprop-P	PX		530	1	0.2%	0	[6]
Diuron	P		530	10	1.9%	0	[6]
Isoproturon	PX		530	6	1.1%	0	[6]
MCPA	P		530	4	0.8%	0	[6]
Mecoprop	P		530	8	1.5%	1	[6]
Metamitron	P		530	7	1.3%	0	[6]
Metazachlor	P		530	1	0.2%	1	[6]
S-Metolachlor [4]	P		530	32	6.0%	2	[6]
Wirkstoffe - NAQUA (kein landesweit repräsentativer Datensatz)							
Alachlor	PX		341	0	0%	0	[6]
Aldicarb	PX		72	0	0%	0	[6]
Bromacil	PX		233	0	0.6%	0	[6]
Diazinon	PX		491	3	0%	0	[6]
Dichlobenil	PX		116	0	0%	0	[6]
Dimethachlor	P		272	0	0%	0	[6]
Dimethenamid-P	P		341	0	0%	0	[6]
Dinoseb	PX		105	0	0%	0	[6]
Hexazinon	PX		290	0	0%	0	[6]
Mesotrion	P		222	0	0%	0	[6]
Propachlor	PX		339	0	0%	0	[6]
Sulcotrion	PX		222	0	0%	0	[6]
Tebutam	PX		133	0	0%	0	[6]
Tolyfluanid	PX		166	0	0%	0	[6]

PSM-Wirkstoff	Rechtliche Aspekte [1]	Muttersubstanz (bei Metaboliten)	Anzahl Messstellen	Anzahl > BG	Nachweis-häufigkeit in %	Anzahl > 0.1 ug/L	Ref.
Metaboliten (landesweit repräsentativer Datensatz)							
Desethyl-atrazin [3]	TP-PX	Atrazin	530	177	33.4%	5	[6]
Desisopropyl-atrazin [3]	TP-PX	Atrazin	530	16	3.0%	0	[6]
Desphenyl-Chloridazon	TP-P [2]	Chloridazon	530	167	31.5%	84	[6]
Methyl-Desphenyl-Chloridazon	TP-P [2]	Chloridazon	530	122	23.0%	24	[6]
2,6-Dichlor-benzamid	TP-P, TP-PX	Fluopicolid, Dichlobenil	529	109	20.6%	10	[6]
Dimethenamid-ESA	TP-P	Dimethenamid-P	530	0	0%	0	[6]
Metolachlor-ESA	TP-P	S-Metolachlor	530	142	26.8%	29	[6]
Metolachlor-OXA	TP-P	S-Metolachlor	530	39	7.4%	2	[6]
Propachlor-ESA	TP-PX	Propachlor-P	529	0	0%	0	[6]
Metaboliten-NAQUA (kein landesweit repräsentativer Datensatz)							
2-Hydroxy-Terbuthylazine	TP-P	Terbuthylazine	91	0	0%	0	[6]
Desethyl-terbuthylazine	TP-P	Terbuthylazine	174	3	1.7%	0	[6]
Dimethachlor-ESA	TP-P	Dimethachlor	96	1	1.0%	1	[6]
Dimethachlor-OXA	TP-P	Dimethachlor	96	1	1.0%	1	[6]
Dimethenamid-OXA	TP-P	Dimethenamid-P	166	0	0%	0	[6]
Desamino-Metamitron	TP-P	Desamino-P	69	0	0%	0	[6]
Metazachlor-ESA [5]	TP-P	Metazachlor	362	13	3.6%	1	[6]
Metazachlor-OXA	TP-P	Metazachlor	323	9	2.8%	1	[6]
Messdaten Eawag-Screening (ausser bereits in NAQUA gemessene WS und TPs)							
Chlorothalonil-TP SYN507900	TP-P	Chlorothalonil	31	13	41.9%	1	[7]
Chlorothalonil-TP X-carbamoyl-2,3,5-trichloro-6-cyanobenzenesulfonic acid_12min	TP-P	Chlorothalonil	31	19	61.3%	1	[7]
Chlorothalonil-TP R417888	TP-P	Chlorothalonil	31	28	90.3%	11	[7]
Chlorothalonil-TP R471811	TP-P	Chlorothalonil	31	31	100.0%	21	[7]

PSM-Wirkstoff	Rechtliche Aspekte [1]	Muttersubstanz (bei Metaboliten)	Anzahl Messstellen	Anzahl > BG	Nachweishäufigkeit in %	Anzahl > 0.1 ug/L	Ref.
Fipronil-TP 106681 [3]	RPA TP-PX	Fipronil	31	11	35.5%	1	[7]
Fludioxonil-TP 192155	CGA TP-P	Fludioxonil	31	2	6.5%	1	[7]
Metolachlor-TP CGA 368208 (=Acetochlor sulfonic acid)	TP-P	S-Metolachlor	31	20	64.5%	2	[7]
Metolachlor-TP NOA413173	TP-P	S-Metolachlor	31	22	71.0%	4	[7]
Terbuthylazine-TP CSCD648241	TP-P	Terbuthylazine	31	29	93.5%	1	[7]

[1] P: PSM im Jahr 2019 zugelassen, PX: PSM im Jahr 2019 nicht mehr zugelassen, TP-P: Metabolit von zugelassenem PSM, TP-PX: Metabolit von nicht mehr zugelassenem PSM

[2] Zulassung Ende 2019 widerrufen

[3] Erfüllt Kriterien aber nicht mehr zugelassen

[4] Erfüllt Kriterium aber Verursacher vermutlich nicht LW

[5] Gemäss NAQUA-Bericht Metazachlor-ESA in früheren Jahren mehr als 1x über 0.1 ug/L

[6] NAQUA (Reinhardt 2017)

[7] Eawag (Kiefer 2019a)

Tabelle 25: Nachweishäufigkeit und Anzahl Überschreitungen der Schwelle von 0.1 µg/L aus NAQUA und Eawag-Screening-Studie. Orange markierte Felder werden in Kap. 3.1 vertieft diskutiert)

PSM-Wirkstoff	Score normiert, Summe aller Metaboliten (Agroscope 2020)	Durchschnittliche Verkaufsmenge 2008-2014 (BLW 2019)	Score x Verkaufsmenge	Einstufung anhand von Messdaten
Chlorothalonil	129.5	56.4	7298.4	Prioritär
S-Metolachlor	199.9	29.7	5931.2	Prioritär
Terbuthylazine	49.2	27.1	1333.5	Prioritär
Chloridazon	72.7	12.5	911.3	Prioritär
Dimethachlor	128.5	6.6	848.2	
Metazachlor	116.4	4.5	522.7	Prioritär
Pethoxamid	48.3	5.9	283.4	
Thiram (TMTD)	31.2	3.4	107.0	
Dimethenamid-P	24.0	4.4	106.4	

Tabelle 26: Grundwasser-Scores und durchschnittliche Verkaufsmenge (alle verfügbaren Jahre bis zur Erhebung der NAQUA-Daten also 2008-2014). Sortiert anhand des Produkts aus Score und durchschnittlicher Verkaufsmenge. Bentazon ist nicht auf der Liste, weil die Scores nur für Metaboliten und nicht für die Wirkstoffe selbst verfügbar waren.