



## Pestizide: Auswirkungen auf Umwelt, Biodiversität und Ökosystemleistungen

Pestizide werden primär in der Landwirtschaft, aber auch im Siedlungsraum und in weiteren Bereichen eingesetzt. Als Pflanzenschutzmittel vermindern sie Ertrags- oder Qualitätseinbußen durch Schadorganismen. Der heutige Pestizideinsatz belastet aber die Umwelt und insbesondere die Biodiversität beträchtlich. Trotz Wissenslücken sind die unerwünschten Auswirkungen gut dokumentiert. Das Faktenblatt nimmt spezifisch die Auswirkungen von Pestiziden auf Umwelt, Biodiversität und Ökosystemleistungen in den Blick und zeigt mögliche Handlungsansätze für Politik und Gesellschaft zur Reduktion der unerwünschten Nebenwirkungen des Pestizideinsatzes auf. Nicht thematisiert werden im Faktenblatt etwa die Bedeutung von Pestiziden für die landwirtschaftliche Produktion oder die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.

Pestizide sind in der Schweiz vor allem als Pflanzenschutzmittel (PSM) und Biozide zugelassen (Box 1). Sie werden hauptsächlich in der Landwirtschaft, aber auch im Siedlungsraum (Gartenbau, Gewerbe, Gemeinden, Private), in der Lebensmittel- und Futtermittelindustrie und in der Forstwirtschaft zur Bekämpfung unerwünschter Organismen eingesetzt. Da Pestizide biologisch aktive Wirkstoffe sind und bei den meisten Anwendung in der Regel direkt in die Umwelt ausgebracht werden, lassen sich neben ihrer Wirkung auf Zielorganismen unerwünschte Effekte auf Nicht-Zielorganismen kaum verhindern.

In der Landwirtschaft gehört der Pflanzenschutz zu den grundlegenden Voraussetzungen für den Anbau und die erfolgreiche Ernte von Kulturpflanzen (Abb. 1). Gemäss guter landwirtschaftlicher Praxis müssten indirekte Pflanzenschutzmassnahmen wie beispielsweise eine hohe Biodiversität und die Förderung von Nützlingen die Basis des Pflanzenschutzes bilden. Pestizide sollen höchstens zum Einsatz kommen, wenn alle anderen Massnahmen versagen. Dieses Prinzip wird als Pflanzenschutzpyramide dargestellt. Pestizide werden auch im Biolandbau eingesetzt, allerdings überwiegend solche, die natürlichen Ursprungs sind oder eine identische Struktur wie natürliche Wirkstoffe aufweisen.<sup>a, 1</sup>

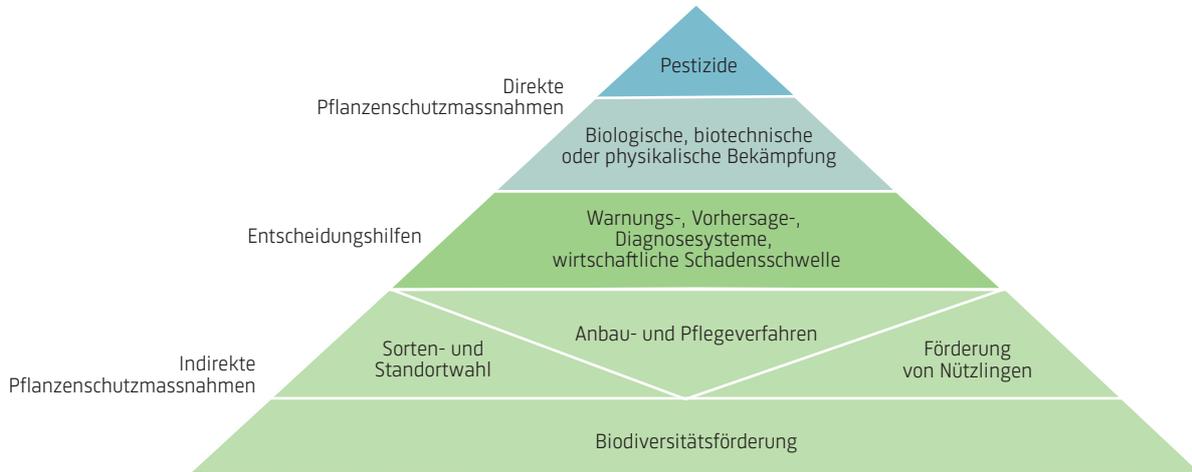


Abb. 1: Die Pflanzenschutzpyramide zeigt die gute landwirtschaftliche Praxis im Pflanzenschutz. Pestizide werden dabei als letzte Wahl eingesetzt, wenn alle anderen Massnahmen versagen. Diese Darstellung untermauert die Bedeutung der Biodiversität, welche die Basis für die Funktionsfähigkeit und Stabilität der Lebensräume, also auch der Agrarökosysteme, bildet. Angepasst von Boller et al. 2004; Meissle et al. 2012; Riedel et al. 2019; Schweizerischer Bundesrat 2017.<sup>9-11</sup>

### Box 1: Was sind Pestizide?

In der Schweiz waren 2020 rund 500 Wirkstoffe als PSM und/oder als Biozide zugelassen. Davon gelten über 300 als Pestizide.<sup>2</sup> Die Wirkung von Pestiziden auf Organismen wird von ihrer Toxizität, die je nach Wirkstoff um mehr als das Tausendfache variieren kann,<sup>3, 4</sup> ihrer Konzentration in der Umwelt, der Expositionsdauer und -häufigkeit sowie dem Einfluss anderer belastender Faktoren bestimmt.<sup>5, 6</sup>

**Pestizide:** Biologisch aktive Wirkstoffe, die zur Bekämpfung unerwünschter Organismen eingesetzt werden. Dabei wird unterschieden zwischen Insektiziden (gegen Insekten), Herbiziden (gegen Pflanzen), Fungiziden (gegen Pilze) und weiteren Wirkstoffgruppen. Pestizide können in der Schweiz als PSM, Biozid oder Arzneimittel zugelassen sein.

**Pflanzenschutzmittel (PSM):** Gemäss Chemikaliengesetz haben PSM zum Ziel, (Kultur)pflanzen oder Erntegüter vor Schadorganismen zu schützen, Lebensvorgänge von Pflanzen in anderer Weise als Nährstoffe zu beeinflussen, ein unerwünschtes Wachstum von Pflanzen zu hemmen, unerwünschte Pflanzen(teile) zu vernichten oder Pflanzenerzeugnisse zu konservieren. Dabei handelt es sich um Produkte aus synthetischen oder natürlichen<sup>a</sup> Wirkstoffen oder um Organismen.

**Biozide:** Gemäss Chemikaliengesetz sind Biozide Wirkstoffe und Zubereitungen, die nicht Pflanzenschutzmittel sind und zum Ziel haben, Schadorganismen zu bekämpfen oder Schäden durch sie zu verhindern. Sie werden eingesetzt, um Krankheitserreger abzutöten (Desinfektionsmittel), Materialien vor Mikroben und Algen zu schützen (Schutzmittel) oder andere unerwünschte Organismen zu bekämpfen (Schädlingsbekämpfungsmittel).<sup>7</sup>

## Gesetzgebung und Zielsetzungen

Zahlreiche Gesetze und Verordnungen regeln die Zulassung von und den Umgang mit Pestiziden und tragen dazu bei, deren unerwünschte Nebenwirkungen auf die Umwelt möglichst zu reduzieren.<sup>2</sup> Hinsichtlich der Gefährdung von Umwelt und Biodiversität spielt das Vorsorgeprinzip in der Gesetzgebung eine bedeutende Rolle. Während es für Gewässer in der Gewässerschutzverordnung (GSchV) numerische Anforderungen bezüglich Pestizidgehalten gibt, fehlen solche für Böden.<sup>b</sup>

Die aktuelle Agrarpolitik beinhaltet keine Etappenziele zu Pestiziden.<sup>c</sup> Die Umweltziele Landwirtschaft, die geltendes Recht konkretisieren, enthalten drei Ziele zu Pestiziden. Die Ziele 1 und 2 sind gemäss aktuellem Statusbericht nicht erreicht, das Potenzial von Ziel 3 ist noch nicht ausgeschöpft.<sup>12, 13</sup>

Gemäss dem Aktionsplan PSM sollen Risiken von PSM halbiert und Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz gefördert werden.<sup>10</sup> Im September 2020 waren von den 51 formulierten Massnahmen 21 eingeführt.<sup>14</sup> Gemäss Modellierungen zeigen die Risiken für Gewässer,<sup>d</sup> die von im Ackerbau eingesetzten PSM ausgehen, zwischen 2012–2015 (Referenzperiode des Aktionsplans) und 2018 bei Herbiziden eine konstante bis abnehmende, bei Fungiziden eine konstante und bei Insektiziden eine konstante bis ansteigende Entwicklung.<sup>15</sup>

In der Frühjahrssession 2021 wurde die parlamentarische Initiative 19.475 «Das Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren» von beiden Räten angenommen.<sup>16</sup> Diese verankert die Risikoreduktion des Pestizideinsatzes im Gesetz: für PSM eine Halbierung der Risiken für Gewässer und naturnahe Lebensräume bis 2027 im Vergleich zur Periode 2012–2015, für Biozide eine nicht genauer festgelegte Reduktion. Nicht vor-

a Z. B. Schwefel, Paraffinöl, Spinosad, Pflanzenextrakte wie Rapsöl oder Pyrethrum (Verordnung des WBf über die biologische Landwirtschaft). Pestizide natürlichen Ursprungs werden normalerweise schneller als synthetische und ohne problematische Abbauprodukte abgebaut.<sup>163-165</sup> Kupfer, das im Biolandbau und der konventionellen Landwirtschaft eingesetzt wird, ist nicht abbaubar.

b Mit Ausnahme der Richt-, Prüf- und Sanierungswerte für Kupfer gemäss Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo)  
 c In der Agrarpolitik 2014–2017 sowie 2018–2021 wurden im Gegensatz zur AP 2005 keine Ziele zu Pestiziden formuliert, obwohl die zuvor formulierten Ziele nicht erreicht wurden.  
 d Ausgedrückt als Risikopotenzial, das sich aus der eingesetzten PSM-Menge, ihrer modellierten Konzentration in Gewässern und ihrer Toxizität ergibt.<sup>15</sup>

gegeben werden die Massnahmen, um diese Ziele bzw. eine Risikoreduktion des Pestizideinsatzes zu erreichen. Eine Risikoreduktion sowie die wirksame Umsetzung der weiteren gesetzlich verankerten Verbesserungen in den Bereichen Zulassung, Information und Gewässerschutz können wichtige Beiträge zum Schutz der Oberflächengewässer, des Grundwassers und der Biodiversität leisten.

## Pestizideinsatz in der Schweiz

Die Verkaufsmengen von PSM werden zentral erfasst. Sie nahmen zwischen 2015 und 2019 von 2220 Tonnen auf 1950 Tonnen ab.<sup>17</sup> Dies erlaubt aber kaum Aussagen zur Entwicklung des Risikos für die Umwelt und Biodiversität.<sup>3, 18</sup> Denn dieses wird insbesondere durch die Toxizität der PSM und durch die Exposition der Organismen in der Umwelt bestimmt (Box 1).<sup>5, 6</sup> Die Verkaufsmenge der PSM mit besonderem Risikopotenzial<sup>e</sup> nahm im selben Zeitraum von 244 auf 212 Tonnen ab.<sup>17</sup>

Wo welcher Anteil der PSM eingesetzt wird, ist bisher nicht genau bekannt.<sup>f</sup> Schätzungen gehen davon aus, dass von der gesamten PSM-Wirkstoffmenge 85–90 % in der Landwirtschaft und 10–15 % im Siedlungsraum eingesetzt werden.<sup>19</sup> In der Forstwirtschaft werden ca. 0,02 % der verkauften PSM-Wirkstoffmenge bzw. 15–20 % der verkauften Menge von Cypermerthin, das Gewässerorganismen stark gefährdet, eingesetzt.<sup>20, 21</sup>

Zu den PSM kommen im Siedlungsraum und in der Landwirtschaft mehrere hundert Tonnen Biozide hinzu.<sup>22, 23</sup> Eine Mengenschätzung ist im Gegensatz zu PSM aufgrund der bisher fehlenden zentralen Erfassung schwierig.<sup>f</sup> Für die Umwelt ist der Biozideinsatz mit Ausnahme einiger Wirkstoffe insgesamt aber weniger problematisch als derjenige von PSM,<sup>24</sup> da Biozide bei vielen Anwendungen weniger direkt in die Umwelt gelangen.<sup>8</sup>

In der Landwirtschaft ist der Pestizideinsatz (Menge pro Hektar, Häufigkeit der Ausbringung) am höchsten beim Anbau von Obst, Reben, Kartoffeln, Zuckerrüben sowie gewissen Gemüsen.<sup>25</sup> Herbizide werden auch auf Wiesen und Weiden eingesetzt. Abschätzungen der Risiken des Pestizideinsatzes für Gewässerorganismen sind bisher nur für einige Ackerbaukulturen vorhanden.<sup>15</sup> Abb. 2 zeigt diese Risikopotenziale und gibt Hinweise, bei welchen Ackerbaukulturen kulturspezifische Risikoreduktionsmassnahmen schweizweit gesehen tendenziell am effektivsten wären. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die geschätzten Risiken je nach verwendeten Modellparametern

<sup>e</sup> Wirkstoffe, die entweder gemäss PSMV ein Substitutionskandidat oder die im Boden persistent (DT50 > 6 Monate) sind.<sup>10</sup>

<sup>f</sup> Im Rahmen des Aktionsplanes PSM läuft ein Projekt zur Quantifizierung der PSM-Einsatzmengen in verschiedenen Einsatzgebieten. Aufgrund der parlamentarischen Initiative 19.475 besteht nun auch für Biozide eine Mitteilungspflicht an den Bund für das Inverkehrbringen (bisher nur für PSM). Zudem ist ein zentrales Informationssystem zur Verwendung von PSM und Bioziden geplant. Bisherige Hochrechnungen für nicht-landwirtschaftliche Einsatzgebiete von PSM ergaben für den Gartenbau eingesetzte Wirkstoffmengen von 59 bzw. 29 Tonnen in den Jahren 2006 bzw. 2010.<sup>166</sup> Die Wirkstoffmenge von acht auf den privaten Gebrauch ausgerichteten Herbiziden wurde 2008 auf 97,5 Tonnen geschätzt;<sup>167</sup> eine Tendenz in den verkauften Mengen ist kaum erkennbar.<sup>150</sup>

<sup>g</sup> Zum Teil gelangen Biozide zudem nur über Abwasserreinigungsanlagen, wo ein bedeutender Anteil entfernt wird, in die Umwelt. So finden sich in Gewässern eine geringere Anzahl Biozide als PSM. Aktuell ist zudem der Ausbau von Abwasserreinigungsanlagen mit einer weiteren Reinigungsstufe geplant.<sup>22, 37</sup>

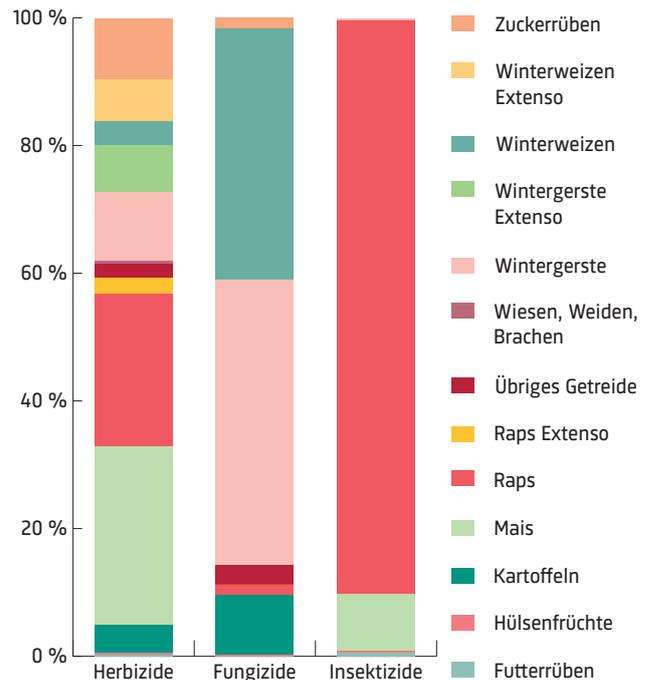


Abb. 2: Risikopotenziale für Oberflächengewässer, ausgehend von Herbizid-, Fungizid- und Insektizidanwendungen in Ackerbaukulturen (hochgerechnet auf gesamtschweizerische Anbauflächen, Mittelwerte der Jahre 2016–2018). Lesebeispiel: Bei den Insektiziden geht rund 90 % des Risikos des Pestizideinsatzes im Ackerbau von Rapskulturen aus. Ein Vergleich der Kulturen ist nur innerhalb und nicht zwischen Herbiziden, Fungiziden und Insektiziden möglich. Für Kulturen mit besonders hohem Pestizideinsatz wie Obst und Reben liegen keine repräsentativen Daten vor. Datenquelle: Agrarbericht 2020, Zentrale Auswertung Agrarumweltindikatoren 2009–2018.

und Werten stark variieren können.<sup>26</sup> Risiken des Pestizideinsatzes, die für Organismen an Land und im Boden bestehen können, wurden bisher nicht kulturspezifisch abgeschätzt.

## Pestizideinträge

Pestizide werden insbesondere als PSM im Allgemeinen direkt in die Umwelt ausgebracht. Dabei wird von den eingesetzten Pestiziden ein Teil in den Boden oder über Abdrift in benachbarte Flächen eingetragen, bevor die Zielorganismen erreicht werden. Ein weiterer Teil gelangt später von den Zielorganismen in Böden und Gewässer, z. B. bei Regenfällen. Je nach Einsatztechnik und Situation unterscheiden sich diese ungewollten Verluste stark.<sup>27</sup> Besonders hoch sind sie bei gebeiztem Saatgut oder bei Ausbringung per Helikopter, bei welchen insgesamt rund 80–98 % der Wirkstoffe in Luft, Boden oder Gewässer gelangen.<sup>28–32</sup>

Die gut dokumentierte Pestizidbelastung in kleinen Fließgewässern ist hauptsächlich auf landwirtschaftliche Einträge zurückzuführen.<sup>33</sup> Aus der Landwirtschaft gelangen Pestizide vor allem durch Abschwemmung, Erosion, via Drainageleitungen und «Kurzschlüsse» wie Einlaufschächte oder Entwässerungsgräben sowie von Punktquellen in die Gewässer.<sup>34–36</sup> Zusätzliche Eintragungspfade sind Auswaschung und Abdrift. Aus dem Siedlungsraum erfolgen die Einträge über Einleitungen von Kläranlagen sowie direkt in die Gewässer.<sup>37</sup>

## Auftreten und Auswirkungen von Pestiziden

Aufgrund des Einsatzes und der Emissionen von Pestiziden kann es in der Umwelt zu kritischen Konzentrationen von Pestiziden für Nichtziel-Organismen kommen, wobei Pestizide teilweise weit verfrachtet und deshalb auch entfernt vom Einsatzort in der Luft, im Boden, in Gewässern oder in Organismen nachgewiesen werden können.<sup>38-41</sup> Dabei sind nicht nur das Auftreten und die Auswirkungen von einzelnen Wirkstoffen, sondern oft auch die Präsenz mehrerer Pestizide und mögliche Mischeffekte relevant. Dazu kommen langlebige Abbauprodukte verschiedener Pestizide, die in ebenso hohen oder höheren Konzentrationen als ihre Ausgangsstoffe in der Umwelt auftreten können und in einigen Fällen sogar toxischer sind als ihre Ausgangsstoffe.<sup>42</sup>

Die Auswirkungen von (einzelnen) Pestiziden auf Organismen und die Umwelt zu bestimmen ist allerdings oft nicht einfach. So bedeutet zum Beispiel ein Nachweis eines Pestizids in der Umwelt nicht zwingend, dass Organismen beeinträchtigt werden (Box 1). Zudem wirken Pestizide in der Umwelt häufig gemeinsam mit anderen Stressfaktoren.

### Wirkungsweise

Die Auswirkungen von Pestiziden auf Organismen werden von der Toxizität und Konzentration der Wirkstoffe, der Dauer und Häufigkeit der Exposition sowie dem Einfluss anderer Faktoren bestimmt.<sup>43-45</sup> Als biologisch aktive Stoffe wirken Pestizide direkt akut oder chronisch auf Organismen und können diese töten oder deren Fortpflanzung, Entwicklung, Gesundheit und Verhalten beeinflussen. Gewisse Pestizide wirken sehr spezifisch, andere auf viele verschiedene Tier- und Pflanzenarten. Von grosser Bedeutung sind indirekte Wirkungen, etwa über eine Reduktion des Nahrungsangebotes oder die Veränderung von Nahrungsnetzen (Abb. 3). Schlussendlich können Pesti-

zide die Empfindlichkeit von Organismen gegenüber anderen Stressfaktoren wie beispielsweise Krankheiten oder Lebensraumverlust erhöhen.<sup>46-50</sup>

Beeinträchtigt werden nicht nur einzelne Individuen, sondern ganze Populationen (Abb. 3).<sup>51</sup> Dies kann zum lokalen und regionalen Verschwinden von Arten führen. Ebenso können durch den Einsatz von Pestiziden auch Lebensgemeinschaften, Lebensräume und Ökosystemleistungen wie z.B. die Bestäubung oder Wasserqualität negativ beeinflusst werden.<sup>51-54</sup> Pestizide stellen damit eine Gefahr für die Biodiversität dar.

### Abschätzung der Auswirkungen von Pestiziden auf die Umwelt

Bei der Zulassung von Wirkstoffen wird ihre Toxizität an ausgewählten Testorganismen geprüft, nicht aber die Mischungstoxizität von verschiedenen Wirkstoffen, die z. B. gleichzeitig in einem Gewässer vorhanden sind (Abb. 4), oder die Wechselwirkungen mit anderen Stressfaktoren. Zudem werden gewisse bedeutende Organismengruppen nicht oder unzureichend berücksichtigt, wie z. B. aquatische Pilze, Amphibien und Reptilien.<sup>57, 58</sup> Mit der bestehenden Risikoabschätzung im Rahmen des Zulassungsverfahrens können unerwünschte Effekte auf die Biodiversität nur begrenzt abgeschätzt werden und sind wohl unterschätzt.<sup>59, 60</sup> Es muss deshalb hinterfragt werden, ob das Ziel der Pestizidzulassung gemäss PSMV und VBP – unannehmbare Nebenwirkungen auf Mensch, Tier und Umwelt zu vermeiden – mit der gegenwärtigen Risikobewertung tatsächlich erreicht wird, insbesondere was Lebensgemeinschaften und Lebensräume betrifft.

Im Folgenden werden Nachweise von Pestiziden in Böden und Gewässern sowie ihre Auswirkungen auf ausgewählte Organismengruppen, Lebensgemeinschaften und Ökosystemleistungen besprochen.

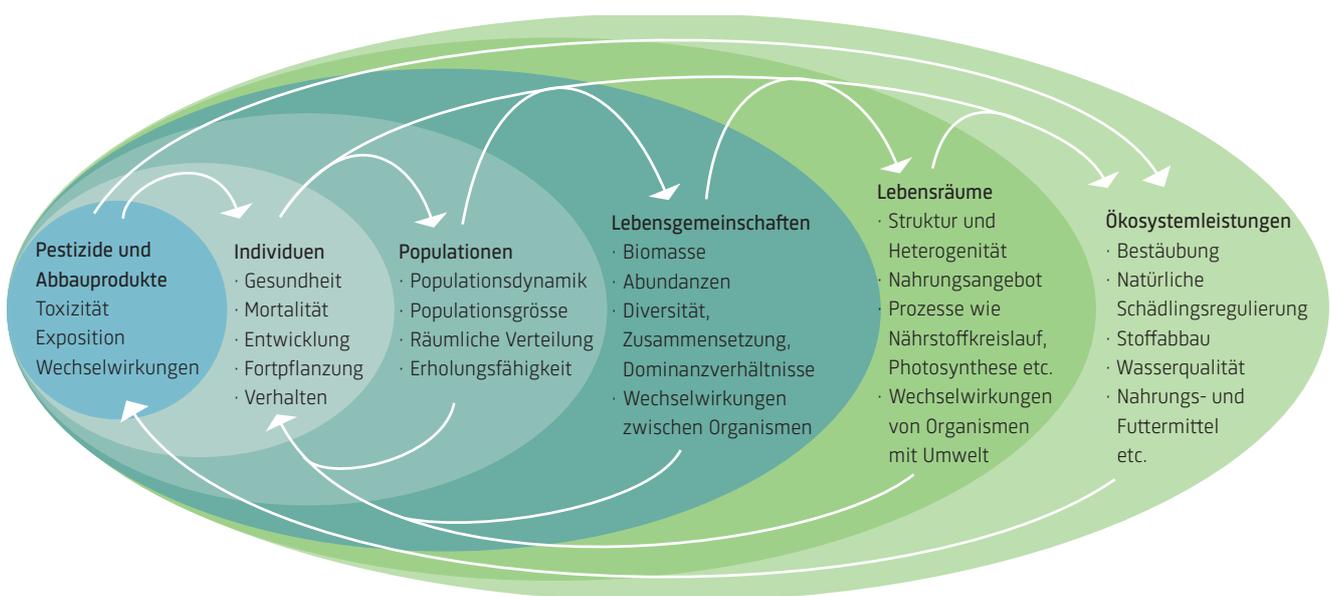


Abb. 3: Der Pestizideinsatz kann die Biodiversität vom einzelnen Individuum bis zum Lebensraum ungewollt beeinflussen. Dies kann sich negativ auf Ökosystemleistungen wie die natürliche Schädlingsregulierung auswirken und unter Umständen wiederum den Einsatz von Pestiziden erhöhen. Der Einfluss auf Nahrungs- und Futtermittel kann mit der beabsichtigten Wirkung des Pestizideinsatzes auf Zielorganismen positiv, aber über ungewollte andere Wirkungen auf Nicht-Zielorganismen oder aufgrund von Pestizid-Rückständen auch negativ sein. Aufbauend auf Köhler & Triebkorn 2013, TFSP 2015, Søgaard Jørgensen et al. 2018.<sup>51, 55, 56</sup>

## Böden

In zwei Schweizer Studien mit Bodenproben von 100 bzw. 169 Feldern wurden Pestizide in sämtlichen konventionell oder nach IP Suisse-Richtlinien und in über 90 % der biologisch bewirtschafteten Feldern nachgewiesen.<sup>61, 62</sup> Auch nach 20 Jahren biologischer Bewirtschaftung wurden bis zu 16 synthetische Pestizide gefunden. Dies weist auf die lange Verweildauer dieser Stoffe in Böden und allfällige Einträge aus Nachbarparzellen hin. Die Konzentrationen in den konventionell bewirtschafteten Böden waren rund zehnfach höher als in den biologisch bewirtschafteten. Eine der beiden Studien untersuchte nur Neonikotinoide<sup>h</sup> und fand diese in mehr als 80 % der Böden von Biodiversitätsförderflächen.<sup>62</sup>

Diverse Studien zeigen negative Effekte von Insektiziden und Fungiziden auf Bodenorganismen, etwa auf Mykorrhiza-Pilze, die Nutzpflanzen mit Nährstoffen versorgen.<sup>61, 63-71</sup> Die Saatgutbeizung kann sich unter anderem negativ auf Regenwürmer sowie auf Bakteriengemeinschaften im Wurzelbereich der Pflanzen auswirken.<sup>72, 73</sup> Bei Herbiziden sind hingegen nur wenige signifikante Auswirkungen auf Bodenorganismen dokumentiert<sup>70</sup> und andere Bewirtschaftungsfaktoren können relevantere Rollen spielen als der Herbizideinsatz.<sup>74</sup> Bodenorganismen erholen sich nach einer Pestizidanwendung unterschiedlich schnell, was die Dominanzverhältnisse und Diversität zwischen ihnen beeinflussen kann.<sup>75, 76</sup>

Die Auswirkungen des Pestizideinsatzes auf das gesamte Bodenökosystem und insbesondere auf Ökosystemleistungen wie die Bodenfruchtbarkeit<sup>77, 78</sup> sind allerdings noch nicht umfassend verstanden.<sup>79</sup> Zudem fehlen zur Beurteilung des Bodenzustandes hinsichtlich Pestizidgehalten etablierte Qualitätskriterien und gesetzlich festgelegte Höchstwerte wie bei Gewässern weitgehend. Veränderungen der Bodenbiodiversität infolge des Pestizideinsatzes können aber potenziell Ökosystemleistungen negativ beeinflussen, z. B. den biologischen Stoffabbau, an welchem Mikroorganismen ausschlaggebend beteiligt sind.<sup>80</sup>

## Oberflächengewässer

In Schweizer Gewässern mit landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebieten sind Pestizide allgegenwärtig – um die 150 Wirkstoffe konnten in Gewässern und ihren Sedimenten nachgewiesen werden, teilweise um die 100 im Jahresverlauf in einzelnen Gewässern und bis zu 65 gleichzeitig in einer Probe.<sup>24, 33, 81-85</sup>

Pestizide beeinträchtigen die Gewässerorganismen, wie z. B. Insektenlarven, Algen, Pilze, Fische, insbesondere in kleinen Fließgewässern mit landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebieten stark. Die Anforderungswerte der GSchV für Einzelstoffe<sup>i</sup> und weitere chronische Qualitätskriterien<sup>j</sup> für einzelne

Wirkstoffe werden häufig und oft monatelang, akute Qualitätskriterien wiederholt überschritten (Abb. 4), in vielen Fällen um mehr als das zehnfache.<sup>6, 33, 52, 83, 84, 86-90</sup> Zudem werden die Qualitätskriterien oft durch verschiedene Wirkstoffe gleichzeitig überschritten, wodurch Organismen Wirkstoffmischungen ausgesetzt sind. Die Gesamtkonzentration der Pestizide ist dabei häufig anhaltend so hoch, dass die Mischungsrisikobewertung anhand der gemessenen Wirkstoffkonzentration eine schlechte Wasserqualität anzeigt.<sup>6, 88</sup> Die anhaltenden und wiederholten Überschreitungen haben zur Folge, dass Lebensgemeinschaften sich nicht erholen können. In Fließgewässern wurden die Spitzenkonzentrationen und damit auch die Exposition der Gewässerorganismen aufgrund der begrenzten zeitlichen Auflösung von Messreihen und der Analyseverfahren bis vor Kurzem teilweise um mehr als das Hundertfache unterschätzt.<sup>81, 82</sup>

Eine europäische Studie zeigt Auswirkungen von Pestiziden auf wirbellose Gewässerorganismen mit Verlusten von bis zu 42 % der regional vorkommenden Artengruppen.<sup>91</sup> In der Schweiz wurde eine Verschlechterung des Zustands von Lebensgemeinschaften in Gewässern mit zunehmendem Anteil Ackerbaukulturen in ihren Einzugsgebieten festgestellt.<sup>92</sup>

Indem Pestizide die Anzahl, die Diversität und die Gemeinschaften von Gewässerorganismen negativ beeinflussen, können sie auch den Abbau von organischem Material und von Schadstoffen beeinträchtigen.<sup>57, 93</sup>

## Grundwasser

Bei über der Hälfte der Grundwasser-Messstellen in der Schweiz werden regelmässig Pestizide oder deren Abbauprodukte nachgewiesen – insgesamt über 40 verschiedene der getesteten Stoffe.<sup>94, 95</sup> Bei Messstellen mit hauptsächlich intensiver Landwirtschaft im Einzugsgebiet werden Pestizide praktisch in allen Proben nachgewiesen.<sup>96</sup> Die Konzentrationen einzelner Pestizide oder ihrer Abbauprodukte liegen im Mittelland bei mehr als der Hälfte aller Grundwasser-Messstellen über 0,1 µg/l.<sup>k, 97</sup> Je nach Kanton wurden an 0–70 % der Trinkwasser-Probenahmestellen, wo Probleme vermutet wurden, Konzentrationen über 0,1 µg/l festgestellt.<sup>98</sup> Rund 95 % davon werden durch sechs Wirkstoffe, die fast nur im Ackerbau eingesetzt werden, und deren Abbauprodukte verursacht.<sup>99</sup>

Ins Grundwasser gelangen nur langlebige und mobile Stoffe, Abbauprozesse laufen hier langsam ab und die Wasser-Verweildauer ist oft lang. Deshalb verbleiben Verunreinigungen selbst nach Verwendungsverboten von Wirkstoffen meist noch jahre- bis jahrzehntelang im Grundwasser.<sup>94, 95</sup>

h Für die Neonikotinoide Acetamiprid, Imidacloprid, Thiamethoxam (Ausverkaufsfrist: 1.7.21, Verbrauchsfrist: 1.7.22) und Thiacloprid (Ausverkaufsfrist: 30.9.20, Verbrauchsfrist: 30.9.21) sind in der Schweiz momentan noch PSM Produkte zugelassen,<sup>168</sup> wobei letzteres auf der Liste der Substitutionskandidaten für PSM mit besonderem Risikopotenzial steht (PSMV).

i 0,1 µg/l oder für gewisse Wirkstoffe substanzspezifische, ökotoxikologische begründete numerische Anforderungen.

j Umweltqualitätskriterien für einen bestimmten Stoff, bei dessen lang- bzw. kurzfristiger Überschreitung eine Schädigung von Organismen nicht ausgeschlossen werden kann.<sup>37</sup> Um Gewässerorganismen vor akuten Schädigungen zu schützen, dürfen die akuten Qualitätskriterien nicht überschritten werden. Für einige Pestizide sind in der GSchV die Qualitätskriterien mit den numerischen Anforderungswerten festgehalten.

k Gemäss TBDV (Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen) und GSchV gilt im Trinkwasser und dafür vorgesehenem Grundwasser ein Höchstwert bzw. Anforderungswert von 0,1 µg/l für Pestizide und relevante, d. h. als problematisch eingestufte, Abbauprodukte. Aufgrund der ungeklärten rechtlichen Situation zur Relevanz der Abbauprodukte von Chlorothalonil kann zum Zeitpunkt der Publikation des Factsheets nicht festgehalten werden, ob Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l dieser Abbauprodukte als eine Überschreitung des Höchstwertes bzw. des Anforderungswertes gelten oder nicht.<sup>169</sup> Der Fall Chlorothalonil zeigt, dass die Problematik der zahlreichen Abbauprodukte noch ungenügend geklärt ist. Neue Erkenntnisse könnten jederzeit zeigen, dass zugelassene Pestizide oder längst vorhandene Abbauprodukte problematisch sein können.<sup>152</sup>

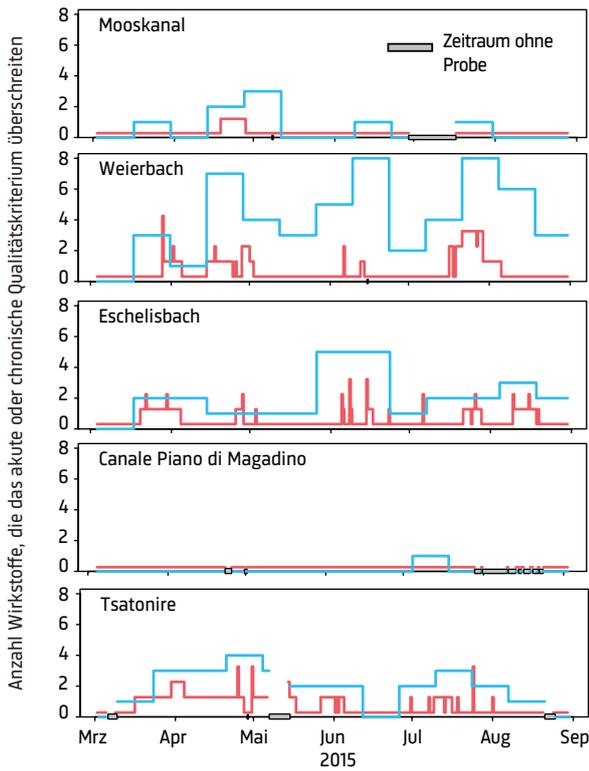


Abb. 4: Anzahl Wirkstoffe, die chronische (blau) und akute (rot) Qualitätskriterien in ausgewählten kleinen Fließgewässern überschritten haben. Für den Vergleich mit akuten Qualitätskriterien wurden die Konzentrationen der Halbtagesmischproben, für denjenigen mit chronischen Qualitätskriterien über 14 Tage gemittelte Konzentrationen verwendet. Angepasst von Doppler et al. 2017.<sup>82</sup>

### Landlebensräume

Effekte von Pestiziden auf die oberirdische Biodiversität zeigen sich sowohl beim Vergleich von Feldern, auf denen Pestizide ausgebracht werden mit solchen ohne Pestizideinsatz, als auch zwischen Regionen mit unterschiedlich intensivem Pestizideinsatz.<sup>100-102</sup> Direkte und indirekte Einträge von Pestiziden beeinträchtigen Pflanzen und Tiere nicht nur in Kulturen, sondern auch in angrenzenden Lebensräumen, wie zum Beispiel Waldrändern.<sup>103-106</sup>

### Pflanzen

Die Vielfalt und Anzahl von Ackerwildpflanzen sind europaweit unter anderem aufgrund des Herbizideinsatzes zurückgegangen.<sup>107-109</sup> Da Pflanzen an der Basis des Nahrungsnetzes stehen, wirkt sich der Rückgang ihrer Diversität, ihrer Häufigkeit, ihrer Biomasse, ihres Blüten- und Samenangebots auf andere Organismen aus.<sup>110</sup> So sind Pflanzen eine Lebensgrundlage für viele Insekten, die wiederum als Nahrung für Vögel dienen.<sup>111-113</sup> Zudem können Blätter, Pollen, Samen und Früchte mit Pestiziden belastet sein<sup>114, 115</sup> und dadurch zu einer Exposition von Tieren führen.<sup>116, 117</sup> Weil im Biolandbau auf Herbizide verzichtet wird, wirkt er sich im Vergleich zum konventionellen Anbau auf Pflanzen besonders positiv aus.<sup>68, 118</sup>

### Insekten

Der Einsatz von Pestiziden ist einer von mehreren bedeutenden Faktoren für den vielerorts festgestellten starken Rückgang der Insektenvielfalt und -häufigkeit.<sup>101, 119-121</sup> Insektizide schädigen Nichtziel-Insekten meistens direkt.<sup>122-124</sup> Herbizide

dagegen reduzieren vor allem die Verfügbarkeit von Nahrung<sup>110, 112</sup> und verändern den Lebensraum von Insekten, so dass ihre Populationen gefährdet werden können.<sup>100, 101</sup>

Dies beeinträchtigt auch die Ökosystemleistungen der Insekten. So kann der Pestizideinsatz die Bestäubung von Wild- und Kulturpflanzen verringern,<sup>112, 125, 126</sup> ebenso die natürliche Schädlingsregulierung durch Insekten, welche räuberisch oder parasitierend leben.<sup>101</sup> Beispielsweise ist die Vielfalt und die Häufigkeit von räuberischen Insekten in konventionell bewirtschafteten Systemen bedeutend tiefer als in biologisch bewirtschafteten.<sup>118, 127</sup>

### Vögel und Säugetiere

Pestizide können Vögel, Säugetiere und ihre Populationen direkt oder indirekt negativ beeinflussen (z. B. Vergiftung bzw. Lebensraumveränderungen).<sup>46, 128-134</sup> Es gibt starke Hinweise, dass Insektizide über die Reduktion der Insektenbiomasse Vogelpopulationen beeinträchtigen.<sup>135-138</sup> In der Schweiz ist der Bestand insektenfressender Vogelarten des Kulturlandes seit den 1990er Jahren um 60 % geschrumpft.<sup>139</sup> Dies dürfte eine Folge des Pestizideinsatzes, moderner Landnutzungstechniken sowie Flurbereinigungen sein. Gleichzeitig sind die Bestände von Vogelarten des Kulturlandes mit gemischter Diät und von Insektenfressern des Waldes stabil geblieben oder zeigen eine leichte Zunahme. Unter den Säugetieren gelten Fledermäuse als besonders empfindlich gegenüber Pestiziden.<sup>140</sup> Als Holzschutzmittel verwendete Insektizide können feldmäuse in ihren Unterschlüpfen direkt schädigen.<sup>141, 142</sup>

### Externe Kosten des Pestizideinsatzes

Der Pestizideinsatz kann Ernte- und Qualitätsverluste reduzieren, Erträge steigern und damit die Einkommen der Landwirtinnen und Landwirte erhöhen. Er verursacht aber immer auch Kosten: direkte durch den Kauf von Pestiziden oder Spritzgeräten und indirekte, indem Ökosystemleistungen wie die natürliche Schädlingsregulierung negativ beeinflusst werden. Für die Gesellschaft entstehen externe bzw. nicht über den Markt abgeglichene Kosten durch Ausgaben für die Regulierung, für die Reduzierung unerwünschter Nebenwirkungen sowie durch die nicht behobenen Beeinträchtigungen der Biodiversität, der Ökosystemleistungen und der menschlichen Gesundheit.<sup>143, 144</sup>

Bisher liegen keine unabhängigen Untersuchungen zu den externen Kosten des Pestizideinsatzes in der Schweiz vor. Avenir Suisse schätzt aufbauend auf einer Studie von Umweltverbänden<sup>145</sup> die externen Kosten des Pestizideinsatzes für 2018 auf 100 Mio. CHF.<sup>146, 147</sup> Die effektiven Kosten dürften noch höher liegen, unter anderem weil gewisse Auswirkungen nicht monetarisiert und Biozide nicht berücksichtigt wurden. Vision Landwirtschaft ermittelte denn für 2018 auch höhere externe Kosten von rund 500 Millionen CHF.<sup>148</sup> Nicht berücksichtigt in den Abschätzungen sind externe Kosten des Pestizideinsatzes im Ausland durch die Produktion importierter Nahrungsmittel sowie allfällige Kosten, die entstehen, wenn die Trinkwasserversorger beispielsweise in Folge der Konzentrationen der Abbauprodukte von Chlorothalonil im Grundwasser weitergehende Massnahmen treffen müssen.

## Handlungsansätze

Rückstände von Pestiziden treten weitverbreitet in Böden und Gewässern auf. Die rechtlichen Anforderungen an Pestizidgehalte wie auch ökotoxikologische Qualitätskriterien sind in zahlreichen Gewässern überschritten. Zudem sind nationale Umweltziele nicht erreicht. Viele Studien zeigen, dass durch den Pestizideinsatz die Umwelt und Biodiversität beeinträchtigt werden. Die bisherigen Massnahmen wie auch teilweise die rechtlichen Anforderungen und deren Vollzug<sup>149, 150</sup> genügen folglich nicht, um unerwünschte Nebenwirkungen von Pestiziden zu vermeiden. Dem Vorsorgeprinzip, welches gemäss Gesetzgebung anzuwenden ist, wird entsprechend nicht genügend Rechnung getragen.

Um die rechtlichen Anforderungen einzuhalten und die unerwünschten Nebenwirkungen von Pestiziden zu verringern, müssen deren Risiken für Biodiversität und Umwelt reduziert werden. Die gesetzliche Verankerung der Risikoreduktion durch die parlamentarische Initiative 19.475 war dazu ein wichtiger Schritt. Im Weiteren ist es nötig, den Einsatz riskanter Pestizide und die behandelte Fläche zu reduzieren,

insbesondere in Zuströmbereichen, im Einflussbereich von Gewässerräumen,<sup>151</sup> Schutzzonen und -gebieten. Die Emissionen müssen vermindert und ein Anwendungsstopp für besonders riskante Pestizide verfügt werden.

Dafür sind gesamtheitliche Lösungsstrategien<sup>152</sup> mit Veränderungen auf gesellschaftlicher, politischer und wirtschaftlicher Ebene nötig, vor allem im Landwirtschafts- und Ernährungssystem, aber auch in anderen Einsatzbereichen von Pestiziden. Box 2 führt entsprechende Handlungsansätze auf. Diese beruhen unter anderem auf Hebeln und Interventionspunkten für einen Wandel hin zu mehr Nachhaltigkeit des Weltbiodiversitätsrates IPBES.<sup>153</sup>

Wichtige Schritte zu verschiedenen Handlungsansätzen sind eingeleitet,<sup>10, 16</sup> viele bekannte Ansätze aus Praxis und Wissenschaft sind aber noch ungenügend genutzt.<sup>154-156</sup> Wenn Massnahmen evaluiert werden, sind ihre potenziellen unerwünschten Auswirkungen auf die Umwelt über die ganzen Lieferketten im In- und Ausland zu prüfen und Zielkonflikte zu thematisieren.<sup>74, 152, 156-158</sup> Umweltprobleme sollen nicht verlagert oder exportiert, sondern müssen gelöst werden.

**Box 2: Handlungsansätze zur Reduktion der unerwünschten Auswirkungen von Pestiziden auf die Biodiversität und Umwelt.**<sup>10, 18, 19, 34, 35, 99, 152, 153, 159-161</sup> **Eine bedeutende Reduktion kann nur erreicht werden, wenn ein geeigneter Mix aus ordnungspolitischen, ökonomischen und kommunikativen Instrumenten eingesetzt wird.**<sup>152, 153, 162</sup>

### Nachhaltige Produktionssysteme

- 1. Umsetzung nachhaltigerer Produktionssysteme:** Pflanzenschutzmassnahmen ohne oder mit reduziertem Pestizideinsatz und geringeren Emissionen umsetzen (natürliche Schädlingsregulierung, technologiebasierte Massnahmen etc.) (Abb. 1 und 2). Auf standortgerechte, nachhaltige Produktionssysteme umstellen, die weniger von Pestiziden abhängig sind (Biolandbau, robuste Kulturen und Sorten etc.).
- 2. Investitionen in Innovation und Forschung:** indirekte und nichtchemische Pflanzenschutzmassnahmen (Nützlingsförderung, Pflanzenzüchtung, technologiebasierte Massnahmen etc.) und Methoden für umweltverträglicheren Biozideinsatz entwickeln.
- 3. Verbot besonders riskanter Pestizide:** Pestizide mit hohen Risiken für Umwelt und Biodiversität verbieten, wobei sichergestellt werden muss, dass allfällige Ersatzwirkstoffe nicht zu anderen unerwünschten Nebenwirkungen führen. Zulassungsentscheide aufgrund realer Auswirkungen der Pestizide in allen Umweltkompartimenten überprüfen.
- 4. Stärkung der Bildung und Wissensverbreitung:** Wissen zu indirektem Pflanzenschutz, Alternativen zu Bioziden sowie weiteren Risikoreduktionsmassnahmen verbreiten. Unabhängige Beratung fördern.

### Wertvorstellungen und Konsumverhalten

- 5. Unterstützung nachhaltiger Verhaltensweisen:** Gesellschaft und Akteure über Konsequenzen ihres Verhaltens informieren und nachhaltiges Verhalten fördern (vgl. BV Art 73). Nahrungsmittelverluste reduzieren, Konsumverhalten wie die Lebensmittelauswahl so verändern, dass Nebenwirkungen des Pestizidein-

satzes im In- und Ausland reduziert werden. Auf den Pestizideinsatz im Privatbereich verzichten.

### Günstige Rahmenbedingungen

- 6. Berücksichtigung externer Kosten:** Externe Kosten in Entscheidungen berücksichtigen, internalisieren und auf Verursacherseite verrechnen. Subventionen, die zu diesen Kosten beitragen, abschaffen oder umleiten. Nicht monetär quantifizierbare Auswirkungen auf die Biodiversität z. B. mittels Biodiversitätsförderung ausgleichen.
- 7. Setzung von Anreizen und gerechte Gestaltung von Systemveränderungen:** Mit gezielten Anreizen Systemveränderungen einleiten, Betroffene unterstützen.
- 8. Festlegung und Überprüfung verbindlicher Ziele:** Einsatzbereiche, -orte und -anwendungen, Konzentrationen von Pestiziden in der Umwelt und deren Risikopotenziale dokumentieren. Verbindliche Ziele setzen und geeignete Indikatoren definieren.
- 9. Transparente und zeitgerechte Information:** Entscheidungen bei der Zulassung von Pestiziden, dabei vorgenommene Güterabwägungen, wie z.B. zwischen Produktion und Umweltschutz, sowie Informationen zu Risiken und Einsatzbereichen transparent kommunizieren. Fortschritte bei der Zielerreichung zeitgerecht aufzeigen.
- 10. Stärkung des Umweltrechts und des Vollzugs:** Schwächen in der Gesetzgebung und im Vollzug beheben (Anforderungswerte basierend auf ökotoxikologischen Qualitätskriterien und Beurteilung von Mischungsrisiken festlegen, im Rahmen der Zulassung vollzugstaugliche Auflagen formulieren, Gewässerräume und Zuströmbereiche umsetzen etc.).

## Fazit

Die negativen Auswirkungen von Pestiziden auf Nicht-Zielorganismen, auf die Biodiversität sowie speziell auf Gewässer sind wissenschaftlich gut belegt. Für teilweise hohe und lang andauernde Überschreitungen gesetzlicher Anforderungen sowie ökotoxikologisch basierter Umweltqualitätskriterien liegen in der Schweiz zahlreiche Nachweise vor. Dies führt zu bedeutenden, aber kaum vollständig quantifizierbaren Kosten für die Gesellschaft.

Gleichzeitig bestehen Wissenslücken: Zum Beispiel zu den Einsatzbereichen von Pestiziden, ihrer Mischtoxizität und den Wechselwirkungen mit anderen Gefährdungsfaktoren – was die negativen Effekte auf die Biodiversität verstärken kann – sowie zu ihren Auswirkungen auf Lebensgemeinschaften und Ökosystemleistungen. Die für die Zulassung von Pestiziden notwendigen Toxizitätstests berücksichtigen wesentliche biodiversitätsrelevante Aspekte wie die Mischungstoxizität, Wechselwirkungen und Langzeiteffekte nicht oder ungenügend. Somit

werden unerwünschte Nebenwirkungen von Pestiziden nur begrenzt im Voraus erkannt und negative Effekte von Pestiziden auf die Biodiversität dürften dementsprechend immer noch unterschätzt werden.

Zwar bestehen in der Schweiz viele Regelungen zu Pestiziden. Mit dem Aktionsplan Pflanzenschutzmittel, der Verabschiedung der parlamentarischen Initiative 19.475 «Das Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren» und anderen laufenden Aktivitäten sind zudem wichtige Massnahmen eingeleitet. Damit die gesetzlichen Vorgaben eingehalten, verabschiedete Ziele erreicht und wissenschaftlich hergeleitete ökotoxikologische Kriterien für die Umweltqualität nicht länger überschritten werden, ist jedoch die rasche Umsetzung wirksamer Massnahmen notwendig. Das bedingt Veränderungen auf gesellschaftlicher, politischer und wirtschaftlicher Ebene, v.a. im Landwirtschafts- und Ernährungssystem aber auch in anderen Einsatzbereichen von Pestiziden (Box 2).

### SDGs: Die internationalen Nachhaltigkeitsziele der UNO

Mit dieser Publikation leistet die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz einen Beitrag zu SDGs 2, 3, 6, 12, 15:

«Den Hunger beenden, Ernährungssicherheit und eine bessere Ernährung erreichen und eine nachhaltige Landwirtschaft fördern», «Ein gesundes Leben für alle Menschen jeden Alters gewährleisten und ihr Wohlergehen fördern», «Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten», «Für nachhaltige Konsum und Produktionsmuster sorgen» und «Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern»



> [sustainabledevelopment.un.org](https://sustainabledevelopment.un.org)

> [eda.admin.ch/agenda2030/de/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html](https://eda.admin.ch/agenda2030/de/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html)

1 – 169 Eine Version dieses Factsheets mit Literaturangaben ist abrufbar unter [biodiversitaet.scnat.ch/publications/factsheets](https://biodiversitaet.scnat.ch/publications/factsheets)

### IMPRESSUM

#### HERAUSGEBERIN UND KONTAKT

Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) • Forum Biodiversität Schweiz • Haus der Akademien • Laupenstrasse 7 • Postfach • 3001 Bern • +41 31 306 93 40 • [biodiversitaet@scnat.ch](mailto:biodiversitaet@scnat.ch) • [biodiversitaet.scnat.ch](https://biodiversitaet.scnat.ch)

Jodok Guntern, Stellvertretender Leiter Forum Biodiversität: [jodok.guntern@scnat.ch](mailto:jodok.guntern@scnat.ch)

Prof. Dr. Florian Altermatt, Präsident Forum Biodiversität: [florian.altermatt@eawag.ch](mailto:florian.altermatt@eawag.ch)

#### ZITIERVORSCHLAG

Guntern J et al. (2021) Pestizide: Auswirkungen auf Umwelt, Biodiversität und Ökosystemleistungen. Swiss Academies Factsheets 16 (2)

#### AUTORINNEN

Jodok Guntern (Forum Biodiversität Schweiz, SCNAT) • Bruno Baur (Universität Basel) • Karin Ingold (Universität Bern, Eawag) • Christian Stamm (Eawag) • Ivo Widmer (Forum Biodiversität Schweiz, SCNAT) • Irene Wittmer (VSA-Plattform Wasserqualität) • Florian Altermatt (Präsident Forum Biodiversität, SCNAT, Universität Zürich)

#### DANK

Andri Bryner (Eawag) • Tobias Doppler (VSA-Plattform Wasserqualität) • Kathrin Fenner (Universität Zürich, Eawag) • Marion Junghans (Ökotoxizentrum) • Kurt Seiler (Interkantonales Labor AR, AI, SH)

#### REDAKTION

Ursula Schöni und Daniela Pauli (Forum Biodiversität Schweiz, SCNAT)

#### LAYOUT

Olivia Zwygart (SCNAT)

#### ILLUSTRATION

Monika Rohner

ISSN (print): 2297-1580

ISSN (online): 2297-1599

DOI: 10.5281/zenodo.4680574



Cradle to Cradle™-zertifiziertes und klimaneutrales Faktenblatt gedruckt durch die Vögel AG in Langnau.



## Literatur

- 1 Tamm L, Speiser B, Niggli U (2018) **Reduktion von Pflanzenschutzmitteln in der Schweiz: Beitrag des Biolandbaus.** Agrarforschung Schweiz 9: 52–59.
- 2 Schweizerische Eidgenossenschaft (2020) **19.475 Parlamentarische Initiative Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren.** Bericht der Kommission für Wirtschaft und Abgaben des Ständerats.
- 3 Schulz R, Bub S, Petschick LL, Stehle S, Wolfram J (2021) **Applied pesticide toxicity shifts toward plants and invertebrates, even in GM crops.** Science 372: 81–84.
- 4 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 106: 31.
- 5 Ashauer R, Kuhl R, Zimmer E, Junghans M (2020) **Effect Modeling Quantifies the Difference Between the Toxicity of Average Pesticide Concentrations and Time-Variable Exposures from Water Quality Monitoring.** Environmental Toxicology and Chemistry 39: 2158–2168.
- 6 Rösch A, Beck B, Hollender J, Stamm C, Singer H, Doppler T, Junghans M (2019) **Geringe Konzentrationen mit grosser Wirkung. Nachweis von Pyrethroid- und Organophosphat-Insektiziden in Schweizer Bächen im pgl-1-Bereich.** Aqua & Gas 11: 54–66.
- 7 BAFU (2020) **Sorgfältiger Umgang mit Biozidprodukten.** <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/fachinformationen/sorgfaeltiger-umgang-mit-biozidprodukten.html>. Accessed 20 Jan 2021.
- 8 Meissle M, Romeis J, Bigler F (2012) **Bt-Mais – Ein möglicher Beitrag zur integrierten Produktion in Europa?** Agrarforschung Schweiz 3: 292–297.
- 9 Boller EF, Avilla J, Joerg E, Malavolta C, Wijnands FG, Esbjerg P (2004) **Integrated production. Principles and Technical Guidelines, 3rd edition.** IOBC/wprs Bulletin 27: 49.
- 10 Schweizerischer Bundesrat (2017) **Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.** Bericht des Bundesrates.
- 11 Riedel J, Meyer S, Guyer U (2019) **Bioforschungstagung 2018: Den Pflanzenschutz neu denken.** Agrarforschung Schweiz 10: 36–39.
- 12 BAFU, BLW (2008) **Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen.** Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern: 221.
- 13 BAFU, BLW (2016) **Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016.** Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1633: 114.
- 14 BLW, BAFU, BLV, SECO, Agroscope (2020) **Umsetzung Aktionsplan Pflanzenschutzmittel.**
- 15 de Baan L, Blom JF, Daniel O (2020) **Pflanzenschutzmittel im Feldbau: Einsatz und Gewässerisiken von 2009 bis 2018.** Agrarforschung Schweiz 11: 162–174.
- 16 WAK-S (2021) **Parlamentarische Initiative 19.475. Das Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren.** In: Curia Vista. <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20190475>. Accessed 12 Mar 2021.
- 17 BLW (2020) **Verkaufsmengen der Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe nach Hauptgruppen.** Excel-Dokument. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html>. Accessed 20 Jan 2021.
- 18 Möhring N, Gaba S, Finger R (2019) **Quantity based indicators fail to identify extreme pesticide risks.** Science of the Total Environment 646: 503–523.
- 19 Vision Landwirtschaft (2016) **Pestizid-Reduktionsplan Schweiz. Aktuelle Situation, Reduktionsmöglichkeiten, Zielsetzungen und Massnahmen.**
- 20 Schütz A, Dietsch P, Thomas M (2020) **Prüfung von Alternativen zu Pflanzenschutzmitteln im Wald. Schlussbericht zur externen Vorstudie.** Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL.
- 21 BLW (2020) **Verkaufsmengen je Pflanzenschutzmittel-Wirkstoff. Wirkstoffe gemäss Anhang 1 der Pflanzenschutzmittelverordnung (SR 916.161) für das jeweilige Jahr.** Excel-Dokument. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html>. Accessed 20 Jan 2021.
- 22 Burkhardt M, Dietschweiler C, Kupper T (2016) **Biozidprodukte – Eintrag in Gewässer. Verbrauchsmengen biozider Wirkstoffe in Schutzmitteln, Antifoulings und im Veterinärbereich.** Aqua & Gas 4: 46–54.
- 23 Burkhardt M, Dietschweiler C (2013) **Mengenabschätzung von Bioziden in Schutzmitteln in der Schweiz – Bautenfarben und -putze (PA 7), Holz (PA 8), Mauerwerk (PA 10) und Antifouling (PA 21).** Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- 24 Wittmer I, Moschet C, Simovic J, Singer H, Stamm C, Hollender J, Junghans M, Leu C (2014) **Über 100 Pestizide in Fließgewässern.** Aqua & Gas 3: 32–43.
- 25 BLW (2020) **Verkauf und Einsatz von Pflanzenschutzmitteln.** In: Agrarbericht 2020. <https://www.agrarbericht.ch/de/umwelt/wasser/verkauf-und-einsatz-von-pflanzenschutzmitteln>. Accessed 20 Jan 2021.
- 26 de Baan L (2020) **Sensitivity analysis of the aquatic pesticide fate models in SYNOPS and their parametrization for Switzerland.** Science of the Total Environment 715: 136881.
- 27 Rodríguez-Eugenio N, McLaughlin M, Pennock D (2018) **Soil pollution a hidden reality.** FAO, Rome. 142.
- 28 Goulson D (2014) **Pesticides linked to bird declines.** Nature 511: 295–296.
- 29 Bonmatin J-M, Giorio C, Girolami V, Goulson D, Kreuzweiser DP, Krupke CH, Liess M, Long E, Marzaro M, Mitchell E, Noome D, Simon-Delso N, Tapparo A (2014) **Environmental fate and exposure; neonicotinoids and fipronil.** Environmental Science and Pollution Research 22: 35–67.
- 30 Simon-Delso N, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, et al (2014) **Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites.** Environmental Science and Pollution Research 22: 5–34.
- 31 Viret O, Siegfried W, Holliger E, Raisig U (2003) **Comparison of spray deposits and efficacy against powdery mildew of aerial and ground-based spraying equipment in viticulture.** Crop Protection 22: 1023–1032.
- 32 Robin SUR, Stork A (2003) **Uptake, translocation and metabolism of imidacloprid in plants.** Bulletin of Insectology 56: 35–40.
- 33 Spycher S, Teichler R, Vonwyl E, Longrée P, Stamm C, Singer H, Daouk S, Doppler T, Junghans M, Kunz M (2019) **Anhaltend hohe PSM-Belastung in Bächen.** Aqua & Gas 4: 14–25.
- 34 Kobierska F, Koch U, Kasteel R, Stamm C, Prasuhn V (2020) **Plant protection product losses via tile drainage: A conceptual model and mitigation measures.** Agrarforschung Schweiz 11: 115–123.
- 35 Prasuhn V, Doppler T, Spycher S, Stamm C (2018) **Pflanzenschutzmitteleinträge durch Erosion und Abschwemmung reduzieren.** Agrarforschung Schweiz 9: 44–51.
- 36 Schönenberger U, Stamm C (2021) **Hydraulic shortcuts increase the connectivity of arable land areas to surface waters.** Hydrology and Earth System Sciences 25: 1727–1746.
- 37 Braun C, Gälli R, Leu C, Munz N, Schindler Wildhaber Y, Strahm I, Wittmer I (2015) **Mikroverunreinigungen in Fließgewässern aus diffusen Einträgen. Situationsanalyse.** Umwelt Zustand Nr. 1514. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- 38 Wood TJ, Goulson D (2017) **The environmental risks of neonicotinoid pesticides: a review of the evidence post 2013.** Environmental Science and Pollution Research 24: 17285–17325.
- 39 Gregorio V, Büchi L, Anneville O, Rimet F, Bouchez A, Chèvre N (2012) **Risk of herbicide mixtures as a key parameter to explain phytoplankton fluctuation in a great lake: the case of Lake Geneva, Switzerland.** Ecotoxicology 21: 2306–2318.
- 40 Amt für Natur und Umwelt Graubünden (2020) **Vom Winde verweht: Messung von Pestiziden in der Luft im Münstertal (2019).**

- 41 TIEM (2020) **Pestizid-Belastung der Luft. Eine deutschlandweite Studie zur Ermittlung der Belastung der Luft mit Hilfe von technischen Sammlern, Bienenbrot, Filtern aus Be- und Entlüftungsanlagen und Luftgüte-Rindenmonitoring hinsichtlich des Vorkommens von Pestizid-Wirkstoffen, insbesondere Glyphosat.** Im Auftrag von Bündnis für eine enkeltaugliche Landwirtschaft e.V..
- 42 Boxall AB, Sinclair CJ, Fenner K, Kolpin D, Maund SJ (2004) **When synthetic chemicals degrade in the environment. What are the absolute fate, effects, and potential risks to humans and the ecosystem?** *Environmental Science & Technology* 38: 368A-375A.
- 43 Ashauer R (2009) **Effekte schwankender Schadstoffbelastungen.** *EAWAG News* 67: 12-14.
- 44 Nyman A-M, Schirmer K, Ashauer R (2014) **Importance of toxicokinetics for interspecies variation in sensitivity to chemicals.** *Environmental Science & Technology* 48: 5946-5954.
- 45 Chevillat V, Balmer O, Birrer S, Doppler V, Graf R, Jenny M, Pfiffner L, Rudmann C, Zellweger-Fischer J (2012) **Gesamtbetriebliche Beratung steigert Qualität und Quantität von Ökoausgleichsflächen.** *Agrarforschung Schweiz* 3: 104-111.
- 46 Schmidt B (2007) **Prädatoren, Parasiten und Geduld: Neue Erkenntnisse zur Wirkung von Pestiziden auf Amphibien.** *Zeitschrift für Feldherpetologie* 14: 1-8.
- 47 Schneeweiss A, Werner I (2019) **Ökotoxikologische Wirkungen von PSM auf Fische. Eine Literaturstudie untersucht mögliche Auswirkungen von priorisierten PSM.** *Aqua & Gas* 11: 82-91.
- 48 Vidau C, Diogon M, Aufaivre J, Fontbonne R, Viguès B, Brunet J-L, Texier C, Biron DG, Blot N, El Alaoui H, Belzunces LP, Delbac F (2011) **Exposure to sublethal doses of fipronil and thiacloprid highly increases mortality of honeybees previously infected by Nosema ceranae.** *PLoS one* 6: e21550.
- 49 Pettis JS, vanEngelsdorp D, Johnson J, Dively G (2012) **Pesticide exposure in honey bees results in increased levels of the gut pathogen Nosema.** *Naturwissenschaften* 99: 153-158.
- 50 Fauser-Misslin A, Sadd BM, Neumann P, Sandrock C (2014) **Influence of combined pesticide and parasite exposure on bumblebee colony traits in the laboratory.** *Journal of Applied Ecology* 51: 450-459.
- 51 Köhler HR, Triebkorn R (2013) **Wildlife ecotoxicology of pesticides: Can we track effects to the population level and beyond?** *Science* 341: 759-765.
- 52 Burdon FJ, Munz NA, Reyes M, Focks A, Joss A, Räsänen K, Altermatt F, Eggen RIL, Stamm C (2019) **Agriculture versus wastewater pollution as drivers of macroinvertebrate community structure in streams.** *Science of the Total Environment* 659: 1256-1265.
- 53 Stamm C, Burdon F, Fischer S, Kienle C, Munz N, Tlili A, Altermatt F, Behra R, Bürgmann H, Joss A, Räsänen K, Eggen R (2017) **Einfluss von Mikroverunreinigungen. Lebensgemeinschaften in Fließgewässern – Ergebnisse aus dem Projekt Ecolmpact.** *Aqua & Gas* 6: 90-95.
- 54 Liess M, Schäfer RB, Schriever CA (2008) **The footprint of pesticide stress in communities--species traits reveal community effects of toxicants.** *Science of the Total Environment* 406: 484-490.
- 55 TFSP (2015) **Worldwide Integrated Assessment (WIA) on systemic insecticides.** Infographic. <http://www.tfsp.info/en/resource>. Accessed 20 Jan 2021.
- 56 Søgaard Jørgensen P, Aktipis A, Brown Z, Carriere Y, Downes S, Dunn RR, et al. (2018) **Antibiotic and pesticide susceptibility and the Anthropocene operating space.** *Nature Sustainability* 1: 632-641.
- 57 Ittner LD, Junghans M, Werner I (2018) **Aquatic Fungi: A Disregarded Trophic Level in Ecological Risk Assessment of Organic Fungicides.** *Frontiers in Environmental Science* 6: 10.3389/fenvs.2018.00105.
- 58 Ockleford C, Adriaanse P, Berny P, et al (2018) **Scientific Opinion on the state of the science on pesticide risk assessment for amphibians and reptiles.** *EFSA Journal* 16: e05125.
- 59 Topping CJ, Aldrich A, Berny P (2020) **Overhaul environmental risk assessment for pesticides.** *Science* 367: 360-363.
- 60 Brühl CA, Zaller JG (2019) **Biodiversity decline as a consequence of an inappropriate environmental risk assessment of pesticides.** *Frontiers in Environmental Science* 7: 2013-2016.
- 61 Riedo J, Wettstein FE, Rösch A, Herzog C, Banerjee S, Büchi L, Charles R, Wächter D, Martin-Laurent F, Bucheli TD, Walder F, van der Heijden M (2021) **Widespread occurrence of pesticides in organically managed agricultural soils – the ghost of a conventional agricultural past?** *Environmental Science & Technology* 55: 2919-2928.
- 62 Humann-Guilleminot S, Binkowski Ł, Jenni L, Hilke G, Glauser G, Helfenstein F (2019) **A nation-wide survey of neonicotinoid insecticides in agricultural land with implications for agri-environment schemes.** *Journal of Applied Ecology* 56: 1502-1514.
- 63 Bünemann EK, Schwenke GD, Van Zwieten L (2006) **Impact of agricultural inputs on soil organisms – A review.** *Australian Journal of Soil Research* 44: 379-406.
- 64 Jänsch S, Frampton GK, Römbke J, Van Den Brink PJ, Scott-Fordsmand JJ (2006) **Effects of pesticides on soil invertebrates in model ecosystem and field studies: A review and comparison with laboratory toxicity data.** *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 25: 2490-2501.
- 65 Pfiffner L, Luka H (2007) **Earthworm populations in two low-input cereal farming systems.** *Applied Soil Ecology* 37: 184-191.
- 66 Pisa L, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, Bonmatin J-M, Downs C, Goulson D, Kreuzweiser DP, Krupke CH, Liess M, McField M, Morrissey CA, Noome DA, Settele J, Simon-Delso N, Stark JD, van der Sluijs JP, Van Dyck H, Wiemers M (2014) **Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates.** *Environmental Science and Pollution Research* 22: 68-102.
- 67 van der Sluijs JP, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, et al (2014) **Conclusions of the Worldwide Integrated Assessment on the risks of neonicotinoids and fipronil to biodiversity and ecosystem functioning.** *Environmental Science and Pollution Research* 22: 148-154.
- 68 Tuck SL, Winqvist C, Mota F, Ahnström J, Turnbull LA, Bengtsson J (2014) **Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis.** *Journal of Applied Ecology* 51: 746-755.
- 69 Lo CC (2010) **Effect of pesticides on soil microbial community.** *Journal of Environmental Science and Health Part B* 45: 348-359.
- 70 Rose MT, Cavagnaro TR, Scanlan CA, Rose TJ, Vancov T, Kimber S, Kennedy IR, Kookana RS, Van Zwieten L (2016) **Impact of Herbicides on Soil Biology and Function.** *Advances in Agronomy* 136: 133-220.
- 71 Hage-Ahmed K, Rosner K, Steinkellner S (2019) **Arbuscular mycorrhizal fungi and their response to pesticides.** *Pest Management Science* 75: 583-590.
- 72 Van Hoesele W, Tiefenbacher A, König N, Dorn VM, Hagenguth JF, Prah U, Widhalm T, Wiklicky V, Koller R, Bonkowski M, Lagerlöf J, Ratzenböck A, Zaller JG (2017) **Single and combined effects of pesticide seed dressings and herbicides on earthworms, soil microorganisms, and litter decomposition.** *Frontiers in Plant Science* 8: 215.
- 73 Nettles R, Watkins J, Ricks K, Boyer M, Licht M, Atwood LW, Peoples M, Smith RG, Mortensen DA, Koide RT (2016) **Influence of pesticide seed treatments on rhizosphere fungal and bacterial communities and leaf fungal endophyte communities in maize and soybean.** *Applied Soil Ecology* 102: 61-69.
- 74 Böcker T, Möhring N, Finger R (2019) **Herbicide free agriculture? A bio-economic modelling application to Swiss wheat production.** *Agricultural Systems* 173: 378-392.
- 75 Frampton GK, van den Brink PJ (2007) **Collembola and macroarthropod community responses to carbamate, organophosphate and synthetic pyrethroid insecticides: Direct and indirect effects.** *Environmental Pollution* 147: 14-25.
- 76 Kattwinkel M, Liess M, Arena M, Bopp S, Streissl F, Römbke J (2015) **Recovery of aquatic and terrestrial populations in the context of European pesticide risk assessment.** *Environmental Reviews* 23: 382-394.
- 77 Mäder P, Fließbach A, Dubois D, Gunst L, Fried P, Niggli U (2002) **Soil fertility and biodiversity in organic farming.** *Science* 296: 1694-1697.
- 78 Sandhu HS, Wratten SD, Cullen R, Case B (2008) **The future of farming: The value of ecosystem services in conventional and organic arable land. An experimental approach.** *Ecological Economics* 64: 835-848.
- 79 Beaumelle L, Thouvenot L, Hines J, Jochum M, Eisenhauer N, Phillips HRP (2021) **Soil fauna diversity and chemical stressors: a review of knowledge gaps and roadmap for future research.** *Ecography* 44: 1-15.
- 80 Fenner K, Canonica S, Wackett LP, Elsner M (2013) **Evaluating pesticide degradation in the environment: Blind spots and emerging opportunities.** *Science* 341: 752-758.
- 81 Dax A, Stravs M, Stamm C, Ort C, Singer H (2020) **MS<sup>2</sup>field: Mikroverunreinigungen mobil messen.** *Aqua & Gas* 12: 14-19.
- 82 Doppler T, Mangold S, Wittmer I, Spycher S, Comte R, Stamm C, Singer H, Junghans M, Kunz M (2017) **Hohe PSM-Belastung in Schweizer Bächen.** *Aqua & Gas* 4: 46-56.

- 83 Doppler T, Dietzel A, Wittmer I, Grelot J, Rinta P, Kunz M (2020) **Mikroverunreinigungen im Gewässermonitoring. Ausbau von NAWA Trend und erste Resultate 2018.** *Aqua & Gas* 7/8: 44–53.
- 84 Casado-Martínez MC, Schneeweiß A, Thiemann C, Dubois N, Pinta-do-Herrera M, Lara-Martin PA, Ferrari BJD, Werner I (2020) **Ökotoxizität von Bachsedimenten. Eine Monitoringkampagne zeigt, dass Pestizide in den Sedimenten von fünf kleinen Fließgewässern Auswirkungen auf Sedimentorganismen haben.** *gwf Wasser* 161: 55–67.
- 85 Chiaia-Hernández AC, Zander PD, Schneider T, Szidat S, Lloren R, Grosjean M (2020) **High-Resolution Historical Record of Plant Protection Product Deposition Documented by Target and Nontarget Trend Analysis in a Swiss Lake under Anthropogenic Pressure.** *Environmental Science and Technology* 54: 13090–13100.
- 86 Schneeweiss A, Junghans M, Segner H, Werner I (2019) **Ökotoxikologische Risiken von PSM für Fische. Eine Literaturstudie ermittelt Risiken von PSM und priorisiert die relevantesten Stoffe.** *Aqua & Gas* 11: 74–80.
- 87 Munz NA, Burdon FJ, de Zwart D, Junghans M, Melo L, Reyes M, Schönenberger U, Singer HP, Spycher B, Hollender J, Stamm C (2017) **Pesticides drive risk of micropollutants in wastewater-impacted streams during low flow conditions.** *Water Research* 110: 366–377.
- 88 Junghans M, Langer M, Baumgartner C, Vermeirssen E, Werner I (2019) **Ökotoxikologische Untersuchungen: Risiko von PSM bestätigt. NAWA-SPEZ-Studie 2017 zeigt Beeinträchtigung von Gewässerorganismen.** *Aqua & Gas* 4: 26–35.
- 89 Ochsenbein U, Berset J, Scheiwiller E, Guthruf K (2012) **Mikroverunreinigungen in Aaretalgewässern.** *Aqua & Gas* 11: 68–79.
- 90 Spycher S, Mangold S, Doppler T, Junghans M, Wittmer I, Stamm C, Singer H (2018) **Pesticide risks in small streams – how to get as close as possible to the stress imposed on aquatic organisms.** *Environmental Science and Technology* 52: 4526–4535.
- 91 Beketov M a, Kefford BJ, Schäfer RB, Liess M (2013) **Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates.** *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110: 1–5.
- 92 Leib V (2015) **Makrozoobenthos in kleinen Fließgewässern: schweizweite Auswertung.** *Aqua & Gas* 4: 66–75.
- 93 Relyea R, Hoverman J (2006) **Assessing the ecology in ecotoxicology: a review and synthesis in freshwater systems.** *Ecology Letters* 9: 1157–71.
- 94 BAFU (2019) **Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016.** Umwelt-Zustand Nr. 1901. Bundesamt für Umwelt, Bern: 138.
- 95 Schweizer Kantonschemiker (2019) **Pflanzenschutzmittel in Trinkwasser (Kampagnenbericht): 12.**
- 96 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: 1–20.
- 97 Müller S, Schärer M, Jenny A, Schwab C, Murali R, Reinhardt M, Leu C, Beer M (2020) **Grundwasserschutz muss Qualität des Trinkwassers sichern. Handlungsbedarf in den Zufließbereichen.** *Aqua & Gas* 7/8: 28–35.
- 98 BLV (2020) **Chlorothalonil-Metaboliten: Rohdaten Umfrage bei den Kantonen** (Excel-Dokument, 15.09.2020). <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/lebensmittel-und-ernaehrung/lebensmittelsicherheit/stoffe-im-fokus/pflanzenschutzmittel/chlorothalonil.html>. Accessed 20 Jan 2021.
- 99 Spycher S, Dübendorfer C, Tratschin R, Schneider R, Ramseier H (2020) **Evaluation von Massnahmen zum Schutz des Grundwassers vor PSM und deren Metaboliten.** Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. EBP Schweiz AG, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL).
- 100 Brittain C, Vighi M, Bommarco R, Settele J, Potts SG (2010) **Impacts of a pesticide on pollinator species richness at different spatial scales.** *Basic and Applied Ecology* 11: 106–115.
- 101 Geiger F, Bengtsson J, Berendse F, et al (2010) **Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland.** *Basic and Applied Ecology* 11: 97–105.
- 102 Ewald JA, Wheatley CJ, Aebischer NJ, Moreby SJ, Duffield SJ, Crick HQP, Morecroft MB (2015) **Influences of extreme weather, climate and pesticide use on invertebrates in cereal fields over 42 years.** *Global Change Biology* 21: 3931–3950.
- 103 de Snoo GR, van der Poll RJ (1999) **Effect of herbicide drift on adjacent boundary vegetation.** *Agriculture, Ecosystems & Environment* 73: 1–6.
- 104 Gove B, Power SA, Buckles GP, Ghazoul J (2007) **Effects of herbicide spray drift and fertilizer overspread on selected species of woodland ground flora: comparison between short-term and long-term impact assessments and field surveys.** *Journal of Applied Ecology* 44: 374–384.
- 105 Boutin C, Strandberg B, Carpenter D, Mathiassen SK, Thomas PJ (2014) **Herbicide impact on non-target plant reproduction: what are the toxicological and ecological implications?** *Environmental Pollution* 185: 295–306.
- 106 Carpenter D, Boutin C, Allison JE (2013) **Effects of chlorimuron ethyl on terrestrial and wetland plants: Levels of, and time to recovery following sublethal exposure.** *Environmental Pollution* 172: 275–282.
- 107 Freemark K, Boutin C (1995) **Impacts of agricultural herbicide use on terrestrial wildlife in temperate landscapes: a review with special reference to North America.** *Agriculture, Ecosystems & Environment* 52: 67–91.
- 108 Andreasen C, Streibig JC (2011) **Evaluation of changes in weed flora in arable fields of Nordic countries – based on Danish long-term surveys.** *Weed Research* 51: 214–226.
- 109 Richner N, Holderegger R, Linder HP, Walter T (2014) **Reviewing change in the arable flora of Europe: a meta-analysis.** *Weed Research* 55: 1–13.
- 110 Marshall EJP, Brown VK, Boatman ND, W. LPJ, Squire GR, Ward LK (2003) **The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields.** *Weed Research* 43: 77–89.
- 111 Wilson JD, Morris AJ, Arroyo BE, Clark SC, Bradbury RB (1999) **A review of the abundance and diversity of invertebrate and plant foods of granivorous birds in northern Europe in relation to agricultural change.** *Agriculture, Ecosystems & Environment* 75: 13–30.
- 112 Biesmeijer JC, Roberts SPM, Reemer M, Ohlemüller R, Edwards M, Peeters T, Schaffers a P, Potts SG, Kleukers R, Thomas CD, Settele J, Kunin WE (2006) **Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands.** *Science* 313: 351–354.
- 113 Zurbuchen A, Müller A (2012) **Wildbienenenschutz – von der Wissenschaft zur Praxis.** Bristol Stiftung, Zürich; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- 114 Sanchez-Bayo F (2011) **Impacts of agricultural pesticides on terrestrial ecosystems.** In: Sanchez-Bayo F (ed). *Ecological impacts of toxic chemicals.* Bentham Science Publishers Ltd, USA: 63–87.
- 115 Botías C, David A, Hill EM, Goulson D (2016) **Contamination of wild plants near neonicotinoid seed-treated crops, and implications for non-target insects.** *Science of the Total Environment* 566: 269–278.
- 116 Humann-Guillemainot S, Clément S, Desprat J, Binkowski Ł, Glauser G, Helfenstein F (2019) **A large-scale survey of house sparrows feathers reveals ubiquitous presence of neonicotinoids in farmlands.** *Science of the Total Environment* 660: 1091–1097.
- 117 Botías C, David A, Hill EM, Goulson D (2017) **Quantifying exposure of wild bumblebees to mixtures of agrochemicals in agricultural and urban landscapes.** *Environmental Pollution* 222: 73–82.
- 118 Bengtsson J, Ahnström J, Weibull A (2005) **The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis.** *Journal of Applied Ecology* 42: 261–269.
- 119 Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG (2019) **Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers.** *Biological Conservation* 232: 8–27.
- 120 Gilburn AS, Bunnefeld N, McVean Wilson J, Botham MS, Brereton TM, Fox R, Goulson D (2015) **Are neonicotinoid insecticides driving declines of widespread butterflies?** *PeerJ* 2015: 1–13.
- 121 Wagner DL, Grames EM, Forister ML, Berenbaum MR, Stopak D (2021) **Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts.** *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118: 1–10.
- 122 Zaller JG, Brühl CA (2019) **Editorial: non-target effects of pesticides on organisms inhabiting agroecosystems.** *Frontiers in Environmental Science* 7: 1–3.
- 123 Whitehorn PR, O’Connor S, Wackers FL, Goulson D (2012) **Neonicotinoid pesticide reduces bumble bee colony growth and queen production.** *Science* 336: 351–352.
- 124 Gill RJ, Ramos-Rodríguez O, Raine NE (2012) **Combined pesticide exposure severely affects individual- and colony-level traits in bees.** *Nature* 491: 105–108.
- 125 Akademien der Wissenschaften Schweiz (2014) **Bienen und andere Bestäuber: Bedeutung für Landwirtschaft und Biodiversität.** *Swiss Academies Factsheets* 9: 1–9.

- 126 Kremen C, Williams NM, Thorp RW (2002) **Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 99: 16812–16816.
- 127 Zehnder G, Gurr GM, Kühne S, Wade MR, Wratten SD, Wyss E (2007) **Arthropod pest management in organic crops.** Annual Review of Entomology 52: 57–80.
- 128 Burn A (2000) **Pesticides and their effects on lowland farmland birds.** Ecology and Conservation of Lowland Farmland Birds 89–104.
- 129 Brühl CA, Schmidt T, Pieper S, Alscher A (2013) **Terrestrial pesticide exposure of amphibians: an underestimated cause of global decline?** Scientific Reports 3: 1–4.
- 130 Jenni-Eiermann S, Bühler U, Zbinden N (1996) **Vergiftung von Greifvögeln durch Carbofurananwendung im Ackerbau.** Der Ornithologische Beobachter 93: 69–77.
- 131 Jahn T, Hötter H, Oppermann R, Bleil R, Vele L (2014) **Protection of biodiversity of free living birds and mammals in respect of the effects of pesticides.** Report No. (UBA-FB) 001830. Umweltbundesamt.
- 132 Harrington LA, Macdonald DW, Oxford Univ. (United Kingdom). Wildlife Conservation Research Unit (2002) **A review of the effects of pesticides on wild terrestrial mammals in Britain.** Report to the RSPCA. Wildlife Conservation Research Unit, University of Oxford.
- 133 Filippi-Codaccioni O, Devictor V, Bas Y, Clobert J, Julliard R (2010) **Specialist response to proportion of arable land and pesticide input in agricultural landscapes.** Biological Conservation 143: 883–890.
- 134 Boatman ND, Brickle NW, Hart JD, Milsom TP, Morris AJ, Murray AWA, Murray KA, Robertson PA (2004) **Evidence for the indirect effects of pesticides on farmland birds.** Ibis 146: 131–143.
- 135 American Bird Conservancy, Mineau P, Palmer C (2013) **The impact of the nation's most widely used insecticides on birds.**
- 136 Jenny M (1990) **Nahrungsökologie der Feldlerche *Alauda arvensis* in einer intensiv genutzten Agrarlandschaft des schweizerischen Mittellandes.** Der Ornithologische Beobachter 87: 31–53.
- 137 Morris AJ, Wilson JD, Whittingham MJ, Bradbury RB (2005) **Indirect effects of pesticides on breeding yellowhammer (*Emberiza citrinella*).** Agriculture, Ecosystems & Environment 106: 1–16.
- 138 Hallmann CA, Foppen RPB, van Turnhout CAM, de Kroon H, Jongejans E (2014) **Declines in insectivorous birds are associated with high neonicotinoid concentrations.** Nature 511: 341–343.
- 139 Knaus P, Antoniazza S, Wechsler S, Guélat J, Kéry M, Strebel N, Sattler T (2018) **Schweizer Brutvogelatlas 2013–2016. Verbreitung und Bestandentwicklung der Vögel in der Schweiz und im Fürstentum Liechtenstein.** Schweizerische Vogelwarte, Sempach.
- 140 Carraviera A, Scheifler R (2013) **Effets des substances chimiques sur les Chiroptères: état des connaissances.** Rhinolophe 19: 1–46.
- 141 Natural England (2011) **Bat roosts and timber treatment products.** Natural England Technical Information Note TIN092.
- 142 Schweizerische Koordinationsstelle für Fledermausschutz (2013) **Fledermausverträgliche Holzschutzmittel.** Version vom 2. Mai 2013.
- 143 Kim KH, Kabir E, Jahan SA (2017) **Exposure to pesticides and the associated human health effects.** Science of the Total Environment 575: 525–535.
- 144 Kahn LG, Philippat C, Nakayama SF, Slama R, Trasande L (2020) **Endocrine-disrupting chemicals: implications for human health.** The Lancet Diabetes and Endocrinology 8: 703–718.
- 145 Zandonella R, Sutter D, Liechti R, von Stokar T (2014) **Volkswirtschaftliche Kosten des Pestizideinsatzes in der Schweiz.** Greenpeace, Pro Natura, SVS/BirdLife Schweiz, WWF.
- 146 Dümmler P, Roten N (2018) **Eine Agrarpolitik mit Zukunft.** avenir Suisse.
- 147 Dümmler P, Anthamatten J (2020) **Weiterhin wachsende Kosten der Landwirtschaft.** avenir Suisse.
- 148 Schläpfer F (2020) **Kosten und Finanzierung der Landwirtschaft.** Vision Landwirtschaft.
- 149 Regierungsrat Kanton Zürich (2020) **428. Anfrage (Kontrolle von Auflagen zum Schutz von Oberflächengewässern bei der Verwendung von Pflanzenschutzmitteln).** Auszug aus dem Protokoll des Regierungsrates des Kantons Zürich. Sitzung vom 29. April 2020. Regierungsratsbeschluss Nr. 428.
- 150 Gubser C, Butterweck J (2018) **Stand der Umsetzung des Herbizidverbots. Studie zur Umsetzung des Anwendungsverbots von Herbiziden auf und an Strassen, Wegen und Plätzen.** Umwelt-Wissen Nr. 1815. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- 151 Altermatt F (2020) **Die ökologische Funktion der Gewässerräume.** Umweltrecht in der Praxis 1: 51–67.
- 152 Möhring N, Ingold K, Kudsk P, Martin-Laurent F, Niggli U, Siegrist M, Studer B, Walter A, Finger R (2020) **Pathways for advancing pesticide policies.** Nature Food 1: 535–540.
- 153 IPBES (2019) **IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.** S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guéze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany: 56.
- 154 Vision Landwirtschaft (2020) **best-practice Pestizidreduktion.** <https://www.visionlandwirtschaft.ch/de/bestpractice/allgemein-best-practices-pestizide>. Accessed 12 Mar 2021.
- 155 Latsch A (2021) **Erkenntnisse aus der Forschung umsetzen: Das Ressourcensprojekt PFLÖPF. Pflanzenschutzoptimierung mit Precision Farming.** 8. Nachhaltigkeitsstagung Agroscope.
- 156 Lechenet M, Dessaint F, Py G, Makowski D, Munier-Jolain N (2017) **Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms.** Nature Plants 3: 1–6.
- 157 Fuchs R, Brown C, Rounsevell M (2019) **Europe's Green Deal offshores environmental damage to other nations.** Nature 586: 671–673.
- 158 Furrer C, Stüssi M, Bystricky M (2021) **Einfluss von Import-Herkunftsändern und Nahrungsmittelverlusten auf die Umweltwirkungen des Schweizer Agrarsektors.** Agroscope Science 114: 29.
- 159 Gubler L, Ismail S, Seidl I (2020) **Biodiversitätsschädigende Subventionen in der Schweiz.** Swiss Academies Factsheets 15: 1–16.
- 160 Wuepper D, Roleff N, Finger R (2020) **Does it matter who advises farmers? Pest management choices with public and private extension.** Food Policy 99: 101995.
- 161 Lefebvre M, Langrell SRH, Gomez-y-Paloma S (2014) **Incentives and policies for integrated pest management in Europe: a review.** Agronomy for Sustainable Development 35: 27–45.
- 162 Schweizerischer Bundesrat (2019) **Umwelt Schweiz 2018.** Bericht des Bundesrates.
- 163 Seifert J (2014) **Neonicotinoids.** In: Wexler P (ed) Encyclopedia of Toxicology. Academic Press: 477–481.
- 164 Elliott M (1976) **Properties and applications of pyrethroids.** Environmental Health Perspectives 14: 3–13.
- 165 Elliott M, Farnham AW, Janes NF, Needham PH, Pulman DA, Stevenson JH (1973) **A Photostable Pyrethroid.** Nature 246: 169–170.
- 166 Krebs R, Hartmann F, Wächter D (2011) **Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Schweizerischen Gartenbau: Datenübersicht – indikatorbasierte Risikobeurteilung.** Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). zhaw.
- 167 Wittwer A, Gubser C (2010) **Umsetzung des Verbots von Pflanzenschutzmitteln. Untersuchung zum Stand der Umsetzung des Anwendungsverbots von Unkrautvertilgungsmitteln auf und an Strassen, Wegen und Plätzen.** Umwelt-Wissen Nr. 1014. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- 168 BLW (2021) **Pflanzenschutzmittelverzeichnis (Stand: 19.2.2021).** <https://www.psm.admin.ch>. Accessed 23 Feb 2021.
- 169 Bundesverwaltungsgericht (2021) **Medienmitteilung zur Zwischenverfügung B-3340/2020 vom 15. Februar 2021. Chlorothalonil: Zweite Zwischenverfügung.**