

Boden in der Schweiz

Zustand und Entwicklung. Stand 2017



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Boden in der Schweiz

Zustand und Entwicklung. Stand 2017

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), 3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt,
Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Projektleitung

Dr. Fabio Wegmann, BAFU

Autor

Dr. Gregor Klaus

Begleitung BAFU

Dr. Bettina Hitzfeld, Jérémie Millot, Ruedi Stähli,
Dr. Roland von Arx

Begleitung BLW

Dr. Michael Zimmermann

Begleitung ARE

Reto Camenzind

Begleitung Fachexperten

Dr. Sabine Augustin, BAFU; Dr. Sabine Braun, Institut für
Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch; Dr. Andreas
Fliessbach, FiBL; Dr. Andreas Gubler, Nationale Bodenbeobach-
tung NABO; Dr. Frank Hagedorn, WSL; Dr. Elena Havlicek, BAFU;
Anna-Sofia Hug, NABO; Dr. Armin Keller, NABO; Dr. Thomas
Keller, Agroscope; Corsin Lang, BAFU; Magali Lebrun, BAFU; PD
Dr. Jens Leifeld, Agroscope; Dr. Peter Lüscher, WSL; Dr. Reto
Giulio Meuli, NABO; Dr. Volker Prasuhn, Agroscope; Kirsten
Rehbein, NABO; Dr. Andreas Schellenberger, BAFU; Markus
Steger, Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich; Matthias Stettler,
Berner Fachhochschule; Christiane Wermeille, BAFU

Zitierung

BAFU (Hrsg.) 2017: Boden in der Schweiz. Zustand und
Entwicklung. Stand 2017. Bundesamt für Umwelt, Bern.
Umwelt-Zustand Nr. 1721: 86 S.

Gestaltung

Cavelti AG, medien. digital und gedruckt, Gossau

Fotonachweis

Agroscope (Gabriela Brändle, Urs Zihlmann), LANAT (Andreas
Chervet): Titelseite, Kap. 1.0, Kap. 1.2, Kap. 1.3, Kap. 2.5
Agroscope, Urs Zihlmann: Kap. 1.1 (Gleyboden, Podsol, Regosol)
Agroscope, Volker Prasuhn: Kap. 2.2
BAFU/Ex-Press/C. Bärlocher: Kap. 2.6
ETH Zürich, Denise König: Kap. 1.1 (Moorboden)
Gabriela Brändle: Kap. 2.1, Kap. 4
HAFL, Moritz Müller: Kap. 1.1 (Pseudogley)
Agroscope, Gabriela Brändle: Alle weiteren Fotos

Bezug der gedruckten Fassung und PDF-Download

BBL, Verkauf Bundespublikationen, CH-3003 Bern
www.bundespublikationen.admin.ch
Bestellnummer: Art.-Nr.: 810.400.118d
www.bafu.admin.ch/uz-1721-d

Klimaneutral und VOC-arm gedruckt auf Recyclingpapier.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.
Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2017

11.17 620 860412188

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	7
Vorwort	9
1 Einleitung	11
1.1 Böden in der Schweiz	13
1.2 Funktionen und Leistungen des Bodens	15
1.3 Bodennutzung in der Schweiz	17
1.4 Verfügbare Bodeninformationen	19
2 Lagebericht Bodenbedrohungen	23
2.1 Bodenversiegelung	27
2.2 Bodenerosion	31
2.3 Bodenverdichtung	37
2.3.1 Landwirtschaft	37
2.3.2 Waldwirtschaft	38
2.3.3 Bauwirtschaft	39
2.3.4 Ausblick Bodenverdichtung	39
2.4 Schadstoffeintrag	41
2.4.1 Landesweite Belastung durch Industrie, Gewerbe und Verkehr	42
2.4.2 Lineare Belastungen durch den Verkehr	44
2.4.3 Lokale und punktuelle Belastungen durch die Landwirtschaft	45
2.4.4 Lokale und punktuelle Belastungen durch private Haushalte	48
2.4.5 Weitere lokale und punktuelle Belastungen	50
2.5 Humusverlust	53
2.6 Eutrophierung und Versauerung	57
2.7 Verlust an Bodenbiodiversität	61
2.8 Terrainveränderungen	63
3 Bodenschutz	67
3.1 Gesetzliche Grundlagen	67
3.2 Ziele, Massnahmen und Defizite	69
3.3 Notwendige Bodeninformationen	73
4 Fazit	75
Literatur	76
Weblinks	86

Abstracts

This report considers the condition of soils in Switzerland. Because comprehensive information on soil risks is not collected in this country, the report is based on fragmentary pieces of information gathered from the Confederation, the cantons and from research projects. Analysis shows that the non-renewable resource of soil is suffering both qualitative and quantitative damage. This suggests that it may be difficult to retain soil functions in the long-term. Although various measures have helped to prevent an increase in certain types of soil pollution and there has even been a decrease in some types of pollution, Switzerland does not have a sustainable approach to dealing with soil, a basic natural resource.

Der vorliegende Bericht informiert über den Zustand der Böden in der Schweiz. Weil hierzulande keine flächendeckenden Informationen zu den Bodengefahren erhoben werden, stützt sich der Bericht auf fragmentierte Einzelinformationen des Bundes, der Kantone und aus Forschungsprojekten. Die Analyse zeigt, dass verschiedene Belastungen die nicht erneuerbare Ressource Boden quantitativ und qualitativ beeinträchtigen. Dadurch ist die langfristige Erhaltung der Bodenfunktionen in Frage gestellt. Obwohl verschiedene Massnahmen dazu beigetragen haben, dass bestimmte Bodenbelastungen nicht weiter zugenommen und einzelne Belastungen sogar abgenommen haben, erfolgt der Umgang der Schweiz mit der Lebensgrundlage Boden nicht nachhaltig.

Le présent rapport fournit des renseignements sur l'état des sols en Suisse. Il se fonde sur des informations ponctuelles provenant de la Confédération, des cantons et de projets de recherche, car il n'existe pas en Suisse de données collectées à l'échelle nationale sur les menaces pesant sur le sol. L'analyse montre que le sol en tant que ressource non renouvelable subit diverses atteintes tant quantitatives que qualitatives, lesquelles compromettent la conservation à long terme de ses fonctions. Bien que diverses mesures aient contribué à stabiliser, voire diminuer certaines atteintes, l'utilisation du sol en tant que base de la vie n'est pas durable en Suisse.

Il presente rapporto informa in merito allo stato dei suoli in Svizzera. Dato che nel nostro Paese non sono raccolti dati a livello nazionale sulle minacce per il suolo, il rapporto si basa su informazioni frammentarie provenienti da Confederazione, Cantoni e progetti di ricerca. Dall'analisi si evince che numerose minacce pregiudicano la quantità e la qualità del suolo, una risorsa non rinnovabile. La conservazione a lungo termine delle funzioni del suolo è pertanto messa in discussione. Nonostante le diverse misure adottate abbiano contribuito ad arrestare l'aumento e, in alcuni casi, addirittura consentito di ridurre determinati carichi inquinanti nel suolo, in Svizzera la gestione del suolo quale base vitale non è sostenibile.

Keywords:

Soil risks, soil functions, information on soil, soil use, soil condition, monitoring

Stichwörter:

Bodenbedrohungen, Bodenfunktionen, Bodeninformationen, Bodennutzung, Bodenzustand, Monitoring

Mots-clés:

Menaces pour le sol, fonctions du sol, informations pédologiques, utilisation du sol, état du sol, monitoring

Parole chiave:

minacce al suolo, funzioni del suolo, informazioni sul suolo, utilizzazione del suolo, stato del suolo, monitoraggio

Vorwort

Eine Nation, die ihren Boden zerstört, zerstört sich selbst. Zu diesem Schluss kam der Rechtsanwalt und Wissenschaftler Friedrich Albert Fallou vor 150 Jahren in seinem Lehrbuch der Bodenkunde. Seine Warnung ist heute aktueller denn je: Die Ergebnisse einer neuen Studie zum weltweiten Zustand der Böden zeigen, dass die Bodendegradation dramatische Ausmasse angenommen hat. Allein in den letzten drei Jahrzehnten hat die Bodenqualität global auf 33 Prozent des Weidelands, auf 25 Prozent der Ackerböden und auf 23 Prozent der Waldflächen zum Teil massiv abgenommen [1]. Betroffen ist der Lebensraum von etwa 3,2 Milliarden Menschen. Laut der Studie verursacht diese Bodendegradierung Kosten von jährlich rund 300 Milliarden Euro und ist mitverantwortlich für Migration und Unterernährung.

Bilder von grossflächig zerstörten Böden gibt es in der Schweiz nicht. Aber auch bei uns ist die Bodendegradation ein ernstzunehmendes Problem, wie der vorliegende Bericht zeigt. Qualitäts- und Flächenverluste finden allerdings schleichend und im Verborgenen statt. Die festgestellten Bodenbedrohungen deuten darauf hin, dass unser Umgang mit der nicht erneuerbaren, ökologisch und ökonomisch wertvollen Ressource Boden nicht nachhaltig ist.

Der Boden muss als die am wenigsten gewürdigte natürliche Ressource bezeichnet werden. Dabei bildet er zusammen mit der Luft, dem Wasser und der Biodiversität unsere wichtigste Lebensgrundlage. Als zentrale Schaltstelle für alle wichtigen Stoff- und Energieflüsse auf der Erde erfüllt der Boden zahlreiche Funktionen: Er ist Basis für die Lebensmittelproduktion, Lebensraum für Pflanzen und Tiere, Wasserfilter, Kohlenstoff- und Wasserspeicher. Aufgrund der heutigen Bodennutzung in der Schweiz sind allerdings nicht mehr alle Bodenfunktionen dauerhaft sichergestellt.

Tragen wir also Sorge zum Boden. Das gilt besonders für die Schweiz, wo der Boden bereits knapp ist und unsere Böden zu den fruchtbarsten der Welt zählen. Weil Bodenschutz eine Querschnittsaufgabe ist, sind viele Akteure angesprochen: Raumplanung, Land- und Waldwirtschaft, Industrie und Gewerbe, Gärtnerinnen und Gärtner, Altlastensanierer und Bauwirtschaft. Erhalten wir gemeinsam unseren Boden – und damit unsere Nation.

Franziska Schwarz
Vizedirektorin
Bundesamt für Umwelt (BAFU)



1 Einleitung

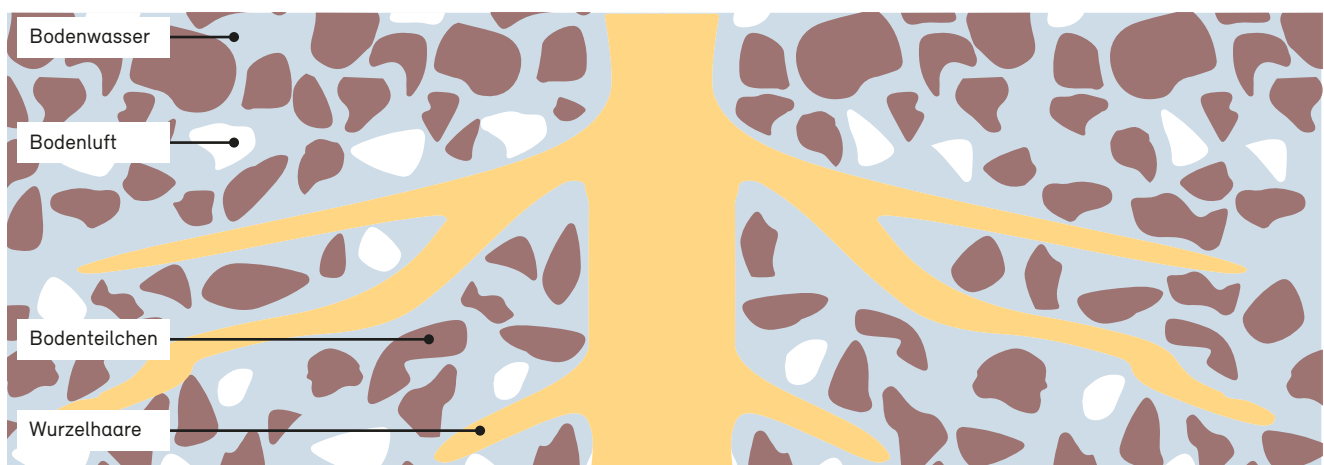
Der Boden ist die dünne Haut der Erdkruste, die sich im Laufe der Zeit unter Einwirkung von Sonne, Regen, Frost, Eis und Lebewesen aus dem Ausgangsgestein gebildet hat. Er gilt als Verbindungselement zwischen Atmosphäre (gasförmige Hülle der Erde), Biosphäre (Lebensraum der Organismen), Hydrosphäre (Grundwasser) und Lithosphäre (äusserste feste Gesteinsschicht der Erde).

Das filigrane Grundgerüst des Bodens besteht aus Mineralien unterschiedlicher Art und Grösse sowie organischen Stoffen (Humus). Zwischen den Bodenaggregaten existiert ein weit verzweigtes Porensystem (Abbildung 1). Dieses Nebeneinander unterschiedlich grosser Hohlräume ermöglicht es, dass Pflanzen gleichzeitig mit Luft und Wasser versorgt werden. Das Porensystem dient zudem der Verankerung der Pflanzenwurzeln und ist Lebensraum unzähliger Pilze, Bakterien und Tiere. Dieser Lebensraum hat gigantische Ausmasse: Die gesamte nutzbare Fläche einer Handvoll tonreicher Erde kann mehr als 1 Quadratkilometer betragen.

Diese Zentimeter bis wenige Meter dünne und verletzbare Haut unseres Planeten bildet die Grundlage allen Lebens auf dem Land und die Basis unserer Zivilisation. Dennoch ist der Boden die am meisten unterschätzte und am wenigsten gewürdigte natürliche Ressource [2].

Abbildung 1

Boden besteht etwa zur Hälfte aus Poren, die miteinander vernetzt sind.





Braunerde



Kalkbraunerde



Parabraunerde



Moorboden



Regosol



Podsol



Schwemmlandboden (Fluvisol)



Pseudogley auf Schwemmlehm



Gleyboden auf Schwemmlehm

1.1 Böden in der Schweiz

Die Entwicklung eines Bodens erfordert viel Zeit. Die meisten heutigen Böden im Schweizer Mittelland begannen sich vor rund 10 000 Jahren am Ende der letzten Eiszeit zu entwickeln. Auf Fels, Moränenmaterial oder Flussschottern wirkten chemische, physikalische und biologische Prozesse ein, die das Gestein und die mineralischen Partikel zerkleinerten. Die Bodenbildung setzte ein, und erste Pflanzen konnten gedeihen (Abbildung 2). Mit der Umwandlung von abgestorbenem pflanzlichem Material reicherte sich Humus im Boden an. Es folgten die Bildung von Tonmineralen, die Oxidation von eisenhaltigen Mineralien sowie, je nach Wasserverfügbarkeit, die vertikale Verlagerung von Stoffen. So entstanden nach und nach verschiedene, schon an der Farbe zu unterscheidende Schichten: die Bodenhorizonte.

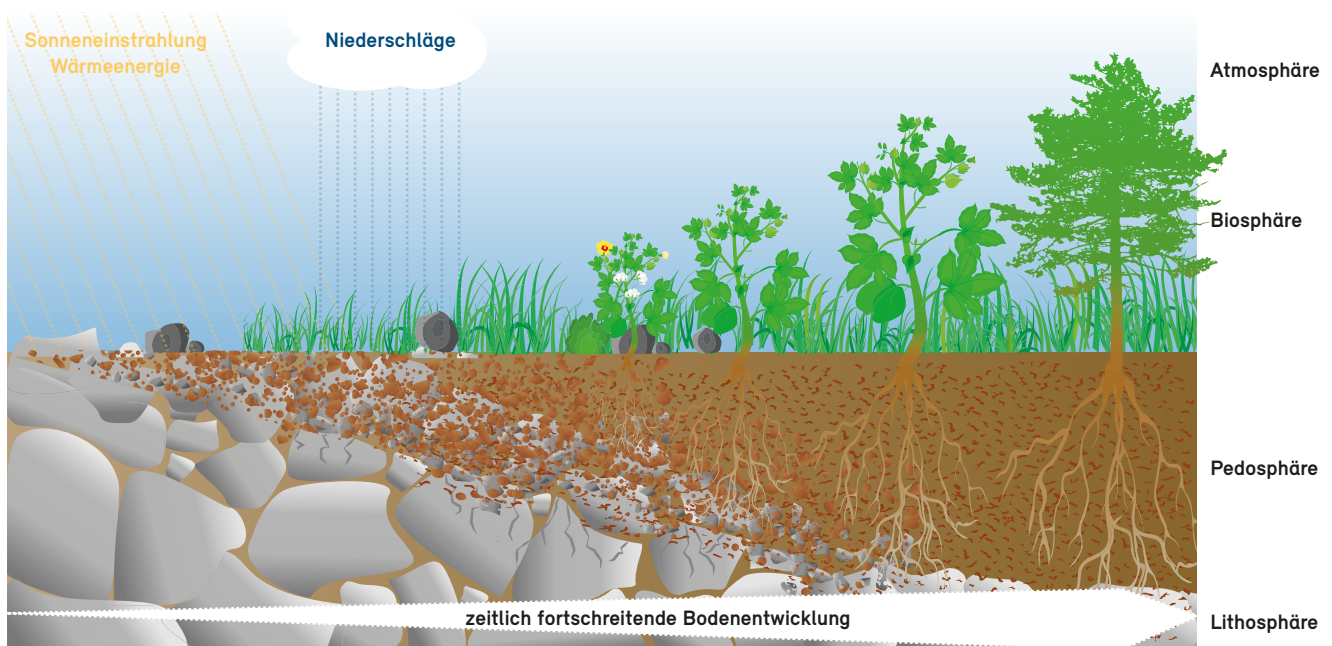
Die Tonminerale und der Humus können Nährstoffe speichern und bei Bedarf an die Pflanzen abgeben. Humus nimmt zudem sehr viel Wasser auf, speichert Kohlenstoff, filtert Schadstoffe und liefert Nährstoffe sowie Energie an Organismen, die massgeblich an der Bodenbildung beteiligt sind.

Die Bodenbildung verläuft sehr langsam: In 10 bis 30 Jahren wächst die Erdschicht durchschnittlich um lediglich 1 Millimeter. Ein einziger Starkregen auf einer unbedeckten Ackerfläche kann diese wertvolle Substanz innerhalb von Minuten durch Erosion abtragen und zerstören.

In der Schweiz mit ihren vielfältigen Naturräumen haben sich sehr unterschiedliche Bodentypen entwickelt. Je nach Ausgangsgestein, Relief, Klima und Wassergehalt weisen die Böden einen völlig anderen Aufbau und ganz andere Bodeneigenschaften auf. Bodenkundler unterscheiden hierzulande rund neun verschiedene Hauptbodentypen mit zahlreichen Untertypen (siehe gegenüberliegende Seite). Ein Blick in eine Baugrube zeigt, dass sich die Ausprägung der Bodentypen innerhalb weniger Meter stark ändern kann. Es gibt flache und tiefe, saure und basische, nährstoffarme und nährstoffreiche, nasse und trockene, sandige und tonige Böden – und alle nur denkbaren Kombinationen.

Abbildung 2

An der Bodenbildung sind verschiedene Prozesse beteiligt. Boden (Pedosphäre) ist die gemeinsame Schnittstelle von Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre und Biosphäre.





1.2 Funktionen und Leistungen des Bodens

Der Boden erfüllt im Naturhaushalt zahlreiche Funktionen, aus denen sich wertvolle Dienstleistungen für uns Menschen ergeben [3]:

- **Lebensraumfunktion:** Boden dient unzähligen Organismen als Lebensraum. Die Organismen tragen ihrerseits zur Bodenbildung bei, sorgen für fruchtbare Böden und sind Reservoir für pharmazeutische Wirkstoffe.
- **Regulierungsfunktion:** Der Boden ist die Schnittstelle der Stoff- und Energiekreisläufe zwischen der Atmosphäre, dem Grundwasser und der Pflanzendecke. Im Boden werden Stoffe zurückgehalten oder umgewandelt (Filter-, Puffer- und Speicherfunktion). Boden speichert beispielsweise Nährstoffe und Kohlenstoff (Klimaschutz). Er kann Wasser wie ein Schwamm aufnehmen (Hochwasserschutz, Wasserreservoir für Pflanzen) und Schadstoffe aus dem Sickerwasser herausfiltern (Trinkwasser).
- **Produktionsfunktion:** Boden ermöglicht Pflanzenwachstum (Biomasse) und liefert damit Nahrungs- und Futtermittel sowie Holz und Fasern.
- **Trägerfunktion:** Böden sind der Grund, auf dem Bauten und Infrastrukturen erstellt werden können.

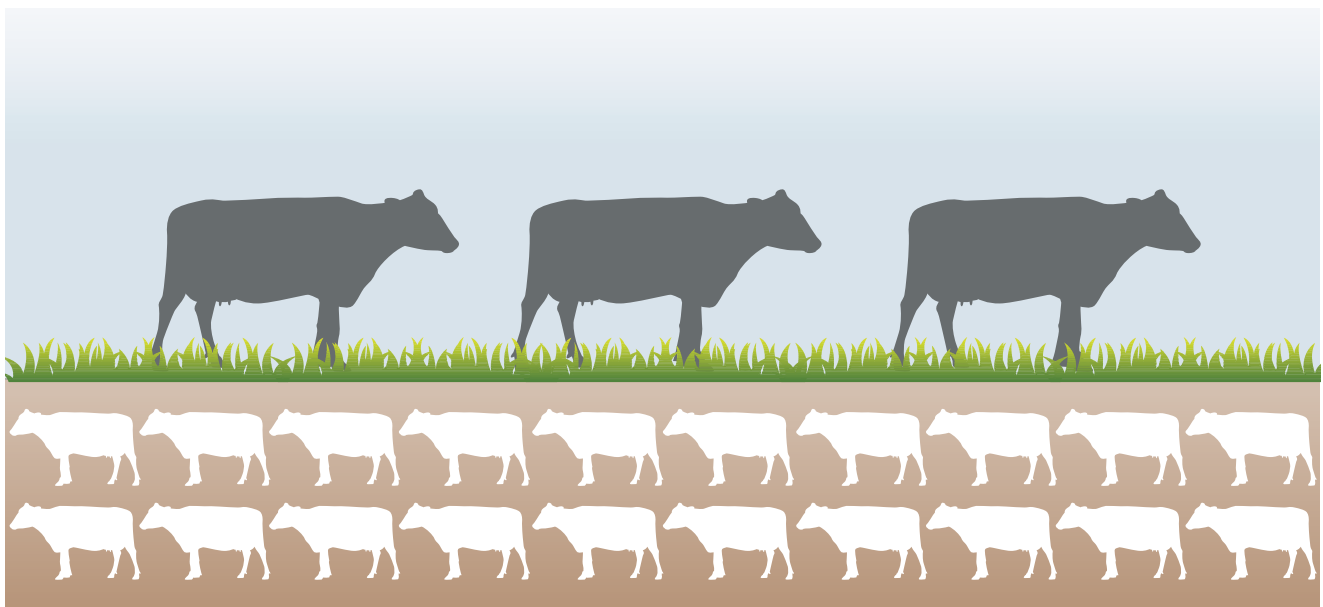
- **Rohstofffunktion:** In und unter den Böden sind Rohstoffe (z. B. Kies, Sand) gespeichert.
- **Archivfunktion:** Im Boden sind Informationen der Natur- und Kulturgeschichte gespeichert.

Das Leistungspotenzial eines Bodens hängt von den Bodeneigenschaften und damit vor allem vom Klima, vom Relief, von der Geologie und vom Alter ab. Wichtige Bodeneigenschaften sind beispielsweise die Zusammensetzung und Grösse der Bodenpartikel, die Verteilung und Grösse der Poren, der Luftgehalt, der Nährstoffgehalt und die Nährstoffverfügbarkeit, die Vielfalt und die Anzahl der Bodenorganismen, der Humusgehalt und die Bodenreaktion (pH-Wert).

Eine zentrale Rolle im Boden spielen Bodenorganismen wie Bakterien, Pilze und Algen, aber auch Milben, Fadenwürmer, Regenwürmer, Tausendfüssler und Insekten. Die Anzahl der Mikroorganismen und Tiere ist riesig (Abbildung 3): So können in einem Kubikzentimeter Boden mehrere Milliarden Mikroorganismen leben, die zu Tausenden von Arten gehören [4].

Abbildung 3

Das Gewicht aller Lebewesen im Boden einer Hektare Land kann bis zu 15 Tonnen betragen [6]. Das entspricht dem Gewicht von 20 Kühen. Damit leben wesentlich mehr Organismen in als auf dem Boden.



Bodenorganismen ...

- bauen pflanzliche und tierische Reststoffe zu Humus um,
- durchmischen die mineralischen Bodenbestandteile mit der organischen Substanz und erzeugen so stabile Ton-Humus-Komplexe sowie Hohlräume für den Wasser- und Lufttransport,
- stabilisieren die Bodenaggregate durch Schleimstoffe und senken damit das Erosionsrisiko,
- speichern und mobilisieren Nährstoffe,
- fixieren Luftstickstoff,
- fördern die chemische Verwitterung und damit die Nährstoffnachlieferung aus den Gesteinen,
- speichern Kohlenstoff und stabilisieren ihn in der Bodenmatrix,
- bauen organische Schadstoffe ab und halten damit das Grundwasser sauber,
- schützen die Pflanzenwurzeln vor Austrocknung und Krankheitserregern,
- erhöhen die Wasserspeicherkapazität des Bodens und reduzieren so das Hochwasser- und Dürreerisiko,
- sind eine wichtige Ressource für Medikamente (z. B. Antibiotika).

Die Nutzung des Bodens durch den Menschen hat vielfältige Auswirkungen auf die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften der Böden und damit auf die Funktionserfüllung des Bodens. Böden sind zwar wahre Multitalente, ihre Leistungen sind aber nicht in jedem Fall gewährleistet. Durch eine (nicht nachhaltige) Nutzung oder durch die Belastung mit Schadstoffen können die Bodenfunktionen zum Teil drastisch eingeschränkt werden. So nimmt beispielsweise die Fähigkeit von Böden, Wasser zu speichern, in der Reihenfolge Wald, Dauergrünland, biologischer Acker- und Futterbau, pfluglose Bodenbearbeitung und schliesslich konventioneller Ackerbau ab [5].

Die vielen wichtigen Leistungen, die der Boden für das Leben jedes Einzelnen erbringt, werden in der Bevölkerung oft unterschätzt oder kaum wahrgenommen. Dies gilt auch für die direkten Nutzerinnen und Nutzer: So sehen viele Landwirte den Boden nicht als einen mit Leben gefüllten Reaktor, und die Konsumenten denken beim Kauf von Lebensmitteln kaum je an den Boden, der letztendlich ihre Ernährung sichert.

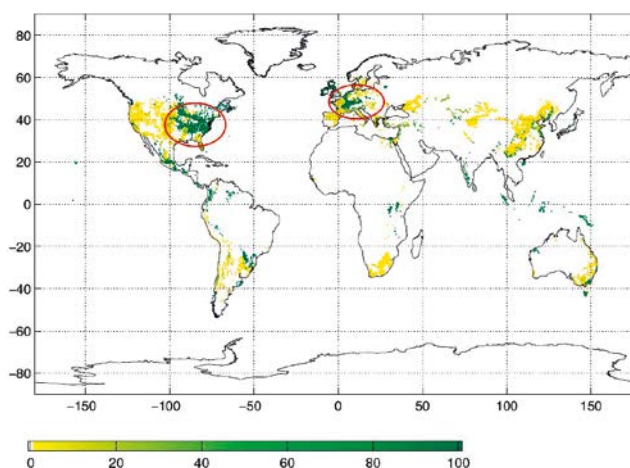
1.3 Bodennutzung in der Schweiz

In der Schweiz wird der grösste Teil der Böden vom Menschen genutzt. Allein die Landwirtschaft bewirtschaftet mehr als ein Drittel (35,9 %) des Schweizer Territoriums (Stand 2009). Äcker existieren dort, wo die Böden von Natur aus besonders fruchtbar sind. Vor allem im Schweizer Mittelland haben sich unter den feuchten und relativ warmen Verhältnissen Böden entwickelt, die zu den fruchtbarsten der Welt zählen (Abbildung 4). Allerdings stehen den Schweizerinnen und Schweizern pro Kopf aufgrund der fortgeschrittenen Versiegelung nur noch 0,14 Hektare Ackerfläche zur Verfügung – nach den Niederlanden ist dies der zweitkleinste Wert in Europa (ohne Kleinstaaten).

Weniger ertragreiche Böden werden als Wälder, Wiesen oder Viehweiden genutzt (Abbildung 5). Insgesamt 31,3 % der Schweiz sind Wald oder Gebüsch, und ein Viertel besteht aus Naturräumen, die fast alle in den oberen Höhenstufen der Alpen liegen (25,3 %). Die Siedlungsfläche bedeckt 7,5 % der Schweiz. Hier sind die Böden zu einem grossen Teil überbaut oder in ihrem natürlichen Aufbau gestört.

Abbildung 4

Die Karte zeigt die am besten geeigneten Regionen für die Nahrungsmittelproduktion nach herkömmlichen landwirtschaftlichen Anbaumethoden. Die rot umkreisten Standorte (Mitteleuropa, östliche USA) gelten als optimal und können als «globale landwirtschaftliche Allgemeingüter» angesehen werden, für deren Erhaltung die einzelnen Staaten eine besondere Verantwortung tragen.

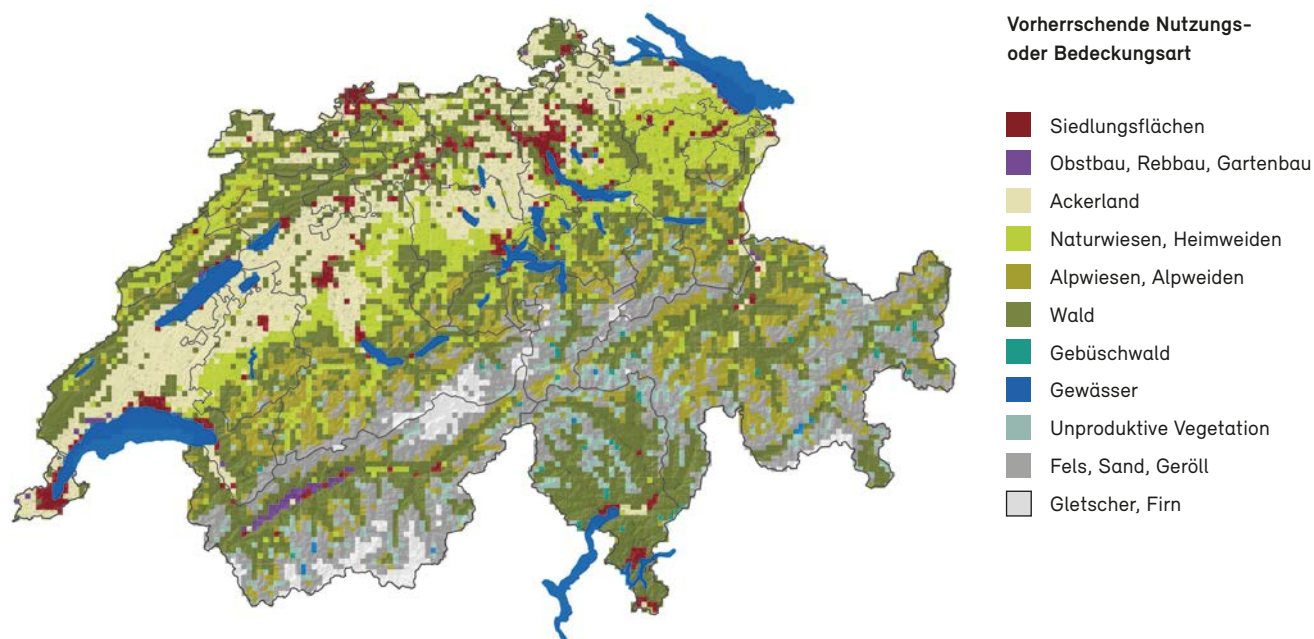


Anteil Fläche in %, die sich optimal für die Nahrungsmittelproduktion eignet.

Quelle: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Abbildung 5

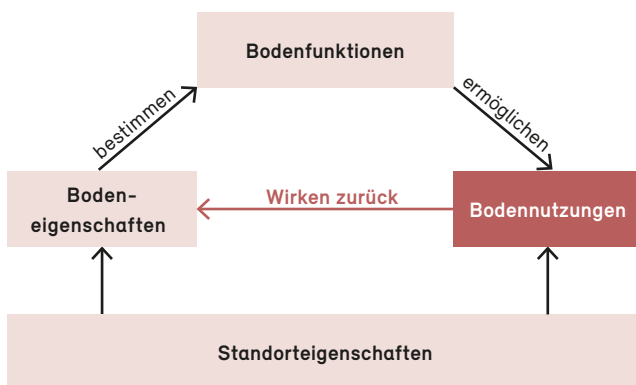
Aktuelle Hauptbodennutzungen in der Schweiz [7].



Die Bodennutzung steht in Wechselwirkung mit den Funktionen und den Eigenschaften des Bodens (Abbildung 6). Sie verändert in der Regel die Qualität bestimmter Bodenfunktionen. Eine nicht standortangepasste Nutzung und andere Belastungen schädigen den Boden. Seine Leistungen für den Menschen sind dann nur noch beschränkt verfügbar.

Abbildung 6

Die Bodenfunktionen werden durch die Eigenschaften des Bodens bestimmt und ermöglichen die Bodennutzungen. Die Nutzungen haben wiederum Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften und damit auf die ökologische und ökonomische Qualität der Bodenfunktionen.



Getreideanbau auf fruchtbarer Braunerde



1.4 Verfügbare Bodeninformationen

Die Ansprüche an den Boden nehmen zu und werden vielfältiger – und nicht immer sind sie miteinander vereinbar. Boden soll unter anderem Nahrungsmittel und Holz liefern, Biodiversität erhalten, Wasser und Kohlenstoff speichern oder als Baugrund dienen. Um die Bodennutzung so zu planen und zu gestalten, dass die Bodenfunktionen langfristig nicht beeinträchtigt werden, braucht es zuverlässige, flächendeckende und detaillierte Bodendaten. Bodenkarten und Bodeninformationssysteme können die Grundlagen dafür liefern, dass Böden gemäss ihren jeweiligen Eigenschaften genutzt werden [8]. Sie spielen eine Schlüsselrolle bei der Integration des Bodenschutzes in die verschiedenen Sektoren und Politikbereiche und helfen dabei, Interessens- und Nutzungskonflikte zu lösen oder zu vermeiden.

Erhebung von Bodeneigenschaften

Informationen zu den Eigenschaften der Schweizer Böden (z.B. Abfolge und Mächtigkeit der Bodenhorizonte, Korngrösse, Humusgehalt, Wasserhaushalt) liegen nur vereinzelt vor [9]. Die einzige nationale Karte mit flächendeckenden Bodeninformationen ist die Bodeneignungskarte im Massstab 1:200 000. Weil sie aber nur auf der Basis von Relief, Höhe, Geologie und punktuellen Profilgrabungen oder Bohrungen erstellt wurde, handelt es sich nicht um eine Bodenkarte im eigentlichen Sinn, mit der nachhaltige Nutzungs- und Planungsentscheide getroffen werden können. Notwendig wären Bodenkarten im Massstab 1:5000 oder grösser.

Detaillierte Bodenkarten wurden für weniger als ein Drittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche erstellt. Noch schlechter steht es um die Kartierung im Wald, im Siedlungsraum und in den übrigen Gebieten der Schweiz. Mit der Schliessung des Bodenkartierungsdienstes an der ehemaligen Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau FAL (heute Agroscope) Ende 1996 kam die systematische Erfassung der Landwirtschaftsböden fast ganz zum Erliegen. Insgesamt sind für die Zeitperiode 1953 bis 1996 im Bodendatenarchiv der Forschungsanstalt Agroscope 13 364 Bodenprofile, rund 5200 Bohrungen und 26 027 Bodenhorizonte mit Analysendaten dokumentiert. Diese Bodendaten wurden in den letzten Jahren von Fachexperten in Zusammenarbeit mit

den Bundesämtern BAFU, BLW und ARE, der Agroscope, den Kantonen und der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz inventarisiert, harmonisiert und digitalisiert [10]. Die Prüfung der Vergleichbarkeit der Daten ist allerdings mit einem sehr grossen Aufwand verbunden, weil diese oft nicht standardisiert erhoben wurden.

Für die Sicherung, Verwaltung und Nutzung aller in der Schweiz verfügbaren Bodeninformationen stellt das BAFU den Kantonen mit dem nationalen Bodeninformationssystem NABODAT seit 2012 eine webbasierte IT-Lösung für eine einheitliche Sicherung, Verwaltung und Weiterbearbeitung der Bodendaten zur Verfügung [11]. Das webbasierte Informationssystem dient in erster Linie den nationalen und kantonalen Bodenschutzfachstellen für den täglichen Vollzug. Von den bekannten Bodendaten wurde bis 2017 die Hälfte bis zwei Drittel importiert. Noch fehlen die Daten aus einigen Kantonen, und grosse Datenquellen (z.B. Bodenanalysen des Ökologischen Leistungsnachweises, Informationen aus Meliorationen) wurden noch nicht einbezogen.

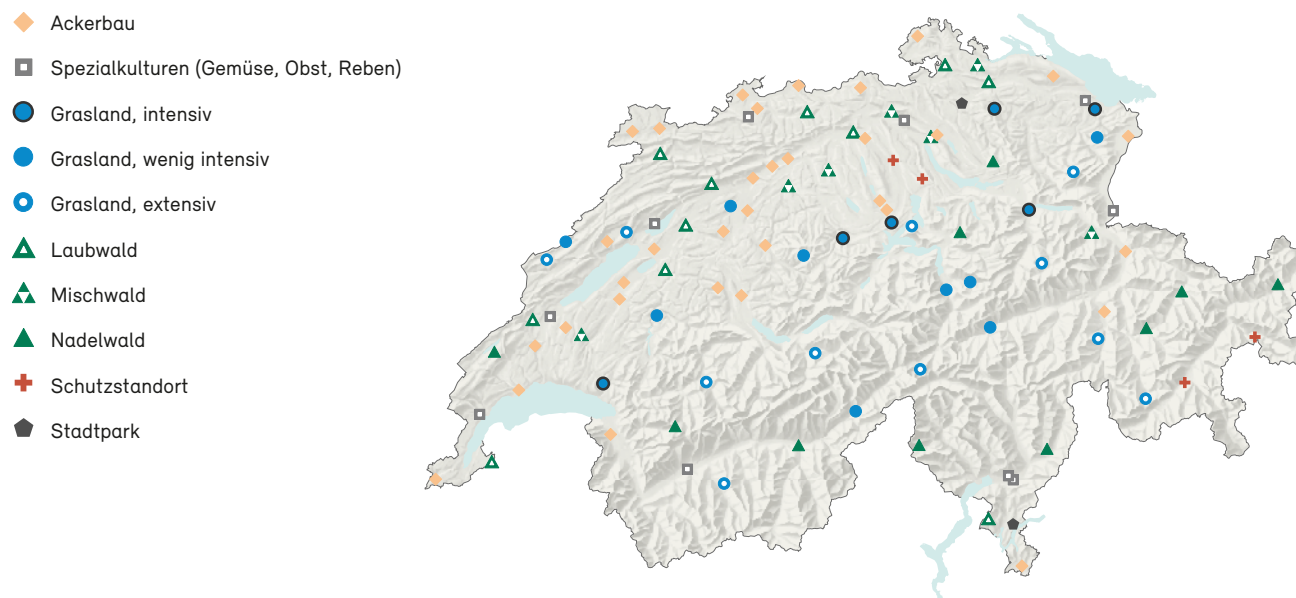
Das Datenmodell von NABODAT 1.5 eignet sich für punkt- und flächenhafte Bodeninformationen. Zu den Punktdaten zählen beispielsweise Bodeninformationen zu Bodenprofilen, Bohrungen oder Flächenmischproben. Flächendaten sind in Bodenkarten oder Anwenderkarten aufgeführt. Das Datenmodell berücksichtigt Bodendaten aus der Bodenkartierung, aus Schadstoffuntersuchungen, aus nationalen oder kantonalen Messnetzen und anderen Spezialuntersuchungen [12]. Es wurde auf Basis nationaler und kantonaler Systeme entwickelt und immer wieder erweitert. Für den Vollzug des Geoinformationsgesetzes wurde auf Basis des Datenmodells NABODAT das minimale Geodatenmodell Boden erarbeitet und 2017 publiziert [13].

Langfristige Bodenbeobachtung und Bodenüberwachung

Die periodische Messung und Erhebung von Bodendaten, etwa zur Schadstoffbelastung, liefert wichtige Hinweise auf Veränderungen der Bodeneigenschaften und der Bodenfunktionen. Die Überwachung ist Aufgabe der Kantone (VBBo, Art. 4); der Bund und damit die NABO haben die Aufgabe, den Boden zu beobachten (Art. 3).

Abbildung 7

Dauerbeobachtungsstandorte der nationalen Bodenbeobachtung NABO [17].



Das BAFU betreibt in Zusammenarbeit mit dem BLW seit 1983 ein Referenzmessnetz von über 100 Standorten (Nationale Bodenbeobachtung NABO). Die Standorte wurden so ausgewählt, dass verschiedene Naturräume der Schweiz sowie unterschiedliche Nutzungs- und Bewirtschaftungstypen vertreten sind (Abbildung 7) [14]. Hauptziel ist die landesweite Erfassung und Beurteilung von chemischen, physikalischen und biologischen Bodenbelastungen. Die Prognose und Früherkennung von Veränderungen gehören ebenfalls zu den Aufgaben der NABO. Damit leistet sie einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltige Nutzung der Böden.

Die Anforderungen an das NABO-Messnetz verändern sich laufend. Zu Beginn der Messungen lag der Fokus auf Schwermetalleinträgen aus der Luft sowie durch landwirtschaftliche Hilfsstoffe (z. B. Klärschlamm, Düngemittel). Die Analysen umfassten auch den Säuregrad und den Kohlenstoffgehalt des Bodens. Neue Themen wie der Einfluss des Klimawandels oder der Verlust an Biodiversität im Boden erfordern Anpassungen des NABO-Messnetzes. So werden seit 2012 biologische Bodeneigenschaften wie zum Beispiel die mikrobielle Biomasse erhoben [15]. Mit der im NABO-Messnetz angewendeten Kombination von wiederholten Bodenmes-

sungen und der jährlichen Erfassung der Bewirtschaftungsdaten können die Ursachen für die gemessenen Veränderungen aufgedeckt werden.

Nachdem der Bund die NABO als nationales Referenznetz eingerichtet hatte, führten viele Kantone ab Anfang der 1990er-Jahre ebenfalls grössere Erhebungen von Bodeninformationen durch. Es wurden kantonale Dauerbeobachtungsnetze eingerichtet, um den Zustand der Böden zu erfassen und zu verfolgen sowie Bodenbelastungen zu überwachen. Aufgrund fehlender finanzieller Mittel finden die Messungen allerdings in vielen Fällen nicht regelmässig statt.

Seit 2011 besteht zwischen der NABO und dem Biodiversitätsmonitoring Schweiz BDM eine Zusammenarbeit. Beim BDM wird die langfristige Entwicklung der Artenvielfalt ausgewählter Pflanzen- und Tierarten erhoben. Die Zusammenarbeit zwischen NABO und BDM ermöglicht es, Bodeninformationen von vielen bisher nicht kartierten oder untersuchten Standorten zu gewinnen: An insgesamt knapp 1200 Standorten des BDM wurden zwischen 2011 und 2015 Bodenproben entnommen und aufbereitet. Zudem können Aufnahmen von Gefässpflanzen, Moosen und Mollusken direkt mit Bodeneigenschaften

wie pH-Wert und Kohlenstoffgehalt in Beziehung gesetzt und interpretiert werden [16].

Lücken und Handlungsbedarf

Trotz der bisherigen Bemühungen muss festgestellt werden, dass Bodeninformationen und Bodendaten in der Schweiz unzureichend erhoben werden. Für den vorliegenden Bericht wurden deshalb auch Bodeninformationen aus Fallstudien, Forschungsprojekten und einmaligen Erhebungen von Bund und Kantonen beigezogen.

Die Lücken sind gross, [18, 19] – obwohl der Bedarf an Bodeninformationen zugenommen hat: So ist das Bewusstsein der Gesellschaft und der Politik in Bezug auf den ökonomischen und ökologischen Wert des Bodens sowie die Bodenbedrohungen in den letzten Jahren deutlich gestiegen [20]. Um globale und nationale Herausforderungen wie die Bodenzerstörung durch Überbauung, Nahrungsmittelknappheit, Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Hochwasser bewältigen zu können, sind umfangreiche Bodeninformationen unerlässlich [21]. Lücken bestehen nicht nur bei der räumlichen und standardisierten Aufnahme von Bodendaten, sondern auch bei den erhobenen Bodenparametern. Die bisherigen Bodenkartierungen hatten primär zum Ziel, die Eignung der Böden für die landwirtschaftliche Nutzung zu bewerten; für den Schutz der Böden und die Erhaltung der Bodenfunktionen sind zusätzliche Parameter erforderlich.

Entnahme einer Bodenprobe





2 Lagebericht Bodenbedrohungen

Die Ressource Boden ist eine wichtige Lebensgrundlage und in menschlichen Zeitmassstäben nicht erneuerbar. Dennoch sind unsere Böden vielfältigen Belastungen ausgesetzt (Tabelle 1). Dadurch verlieren sie vielerorts ihre natürliche Funktions- und Ertragsfähigkeit. Die Spannweite der Belastungen reicht von der kompletten Zerstörung durch Überbauungen bis hin zur Versauerung durch übermässige Stickstoffeinträge aus der Luft.

Dieses Kapitel präsentiert einen Überblick über den Zustand und die Entwicklung der Böden in der Schweiz. Die Analyse basiert auf den Daten verschiedener Monitoringprogramme von Bund und Kantonen sowie auf Studien von Forschungseinrichtungen. Da die Datengrundlage für eine landesweite Beurteilung der Bodengefahren unvollständig ist, musste auf fragmentierte Einzelinformationen des Bundes, der Kantone und aus Forschungsprojekten zurückgegriffen werden, um daraus einen nationalen Trend zu extrapolieren. Die Analysen zeigen, dass es in der Schweiz keine unbelasteten Böden mehr gibt. Der Boden ist zahlreichen Bedrohungen ausgesetzt (Tabelle 2),

die die Qualität der Bodenfunktionen (z. B. Bodenfruchtbarkeit, Wasserfiltervermögen) reduzieren.

Verschiedene Massnahmen haben in den letzten Jahren dazu beigetragen, dass die schlimmsten Auswüchse der Bodenbeeinträchtigung zurückgegangen sind oder gestoppt werden konnten. So hat sich etwa beim Eintrag von Schwermetallen die Situation nicht weiter verschärft. Die älteren Einträge sind allerdings noch immer im Boden gespeichert; zudem werden Schwermetalle lokal über die Düngung in Böden eingetragen. Nur leicht abgeschwächt hat sich der Verbrauch von Boden für den Siedlungsbau und den Bau von Infrastrukturanlagen. Probleme bereiten nach wie vor die Bodenerosion und die Bodenverdichtung sowie der flächendeckende Eintrag von Stickstoff über die Luft.

Die aufgezeigten Bodenbedrohungen belegen, dass die Ressource Boden in der Schweiz nicht nachhaltig genutzt wird. Das Problem ist erkannt. Notwendig ist nun die Erarbeitung und Umsetzung einer Bodenstrategie mit dazugehörigem Massnahmenplan.

Tabelle 1

Bodennutzungen und die damit verbundenen Bodenbedrohungen.

Nutzung	Versiegelung	Abnahme der Bodenqualität
Wohnen	Ausbreitung der Siedlungsfläche	Schadstoffeintrag (Abfälle, Klärschlamm)
Industrie und Gewerbe	Ausbreitung des Industrie- und Gewerbeareals	Schadstoffeintrag
Verkehr	Bau von neuen Strassen und Eisenbahnliesen	Schadstoffe entlang von Verkehrswegen
Landwirtschaft	Bau von Strassen, Anlagen und Gebäuden (z. B. Ställe, Aussiedlerhöfe)	Bodenerosion Bodenverdichtung Schadstoffeintrag durch Mineral- und Hofdünger sowie Pflanzenschutzmittel Biodiversitätsverlust Drainagen (Verlust organischer Substanz)
Waldwirtschaft	Bau von Erschliessungsstrassen und Gebäuden	Bodenverdichtung durch Holzernte
Tourismus, Freizeitaktivitäten	Bau von Strassen, Anlagen und Gebäuden	Bodenverdichtung durch intensive Nutzung, Befahren und Parkplätze auf der Wiese, Schadstoffeintrag
Gärten	Bau von Wegen und Anlagen	Schadstoffeintrag durch Dünger, Pflanzenschutzmittel, Asche etc.
Landesverteidigung	Bau von Strassen, Anlagen und Gebäuden	Bodenbelastung auf Schiessplätzen Bodenverdichtung auf Waffenplätzen

Verlust natürlich gewachsener Böden durch Terrainveränderungen

Tabelle 2

Zustand der Schweizer Böden nach Bodenbelastungen

Bodenbelastung	Zustand und Entwicklung
Versiegelung (Kap. 2.1)	Innerhalb von 24 Jahren (1979/85 bis 2004/09) haben die versiegelten Flächen (v. a. Wohn-, Büro- und Gewerbegebäude, Strassen) in der Schweiz um fast ein Drittel zugenommen. 2009 war ein Zwanzigstel der Schweiz dauerhaft mit luft- und wasserdichten Materialien bedeckt. Gesamtschweizerisch hat das Tempo des Siedlungswachstums seit der Jahrtausendwende abgenommen. Die Versiegelung hat sich dadurch zwar verlangsamt, ist aber noch weit von einem nachhaltigen Niveau entfernt.
Bodenerosion auf Ackerland (Kap. 2.2)	Über ein Drittel der Ackerfläche gilt als potenziell erosionsgefährdet. Bodenerosion tritt unregelmässig und räumlich begrenzt auf, ist aber ein weit verbreitetes Phänomen auf Schweizer Äckern. Es besteht die Gefahr, dass die Gründigkeit und Fruchtbarkeit der Böden an vielen Orten abnimmt und sich die Erosionsgefahr (z. B. durch den Klimawandel) verschärft.
Bodenerosion auf Alpweiden (Kap. 2.2)	Auf Alpweiden übersteigt die Erosionsrate bei zu intensiver Nutzung die Bodenbildungsrate deutlich.
Hangrutschungen (Kap. 2.2)	6 bis 8 % der Schweizer Landfläche sind von Rutschprozessen betroffen. Rutschungen beeinträchtigen die Bodenfunktionen und können durch eine nicht an den Standort angepasste Nutzung ausgelöst oder beschleunigt werden.
Bodenverdichtung (Kap. 2.3)	Bodenverdichtung ist in der Schweiz ein verbreitetes Phänomen. Es muss zumindest lokal mit Einbussen der Bodenfunktionen und der Bodenfruchtbarkeit aufgrund von Bodenverdichtungen gerechnet werden. Der anhaltende Trend zu schwereren Maschinen in der Land-, Wald- und Bauwirtschaft sowie einem Bearbeitungs- bzw. Erntezwang in der Landwirtschaft auch bei ungünstigen Verhältnissen wird die Situation verschärfen.
Schadstoffeintrag Industrie und Gewerbe (früher) (Kap. 2.4.1)	Schadstoffeinträge über die Luft haben dazu geführt, dass es in der Schweiz keine völlig unbelasteten Böden mehr gibt. Auch heute werden weiterhin Schadstoffe aus der Industrie in die Böden eingetragen, dank strengerer Luftreinhaltevorschriften aber deutlich weniger als früher.
Belastung entlang von Verkehrswegen (Kap. 2.4.2)	Ein 5 bis 10 Meter breiter Streifen entlang von stark befahrenen Strassen ist mit Schadstoffen belastet. Bei Eisenbahnlinien ist die Belastung deutlich geringer.
Schadstoffeintrag Landwirtschaft (Kap. 2.4.3)	Im intensiv genutzten Grasland werden steigende Zink- und Kupfereinträge beobachtet. Diese stammen aus der Gülle bzw. den Futtermitteln. Mit Phosphor-Mineraldünger gelangen weitere Schwermetalle wie Cadmium und Uran in die Ackerböden. Problematisch ist auch der Antibiotikaeintrag via Gülle sowie die Stickstoffverluste bzw. der flächendeckende Stickstoffeintrag in die Böden.
Kupfereintrag Rebbau (Kap. 2.4.3)	In Böden von Rebbaustandorten nimmt der Kupfergehalt weiterhin zu.
Belastung mit Pflanzenschutzmitteln (Kap. 2.4.3)	Pflanzenschutzmittel sind auch längere Zeit nach der Anwendung im Boden nachweisbar. Rückstände von verbotenen Organochlorpestiziden und ihre Abbauprodukte können noch immer in landwirtschaftlich genutzten Böden sowie Gartenböden nachgewiesen werden.
Stark belastete Siedlungsböden und Gärten (Kap. 2.4.4)	Böden von Haus- und Familiengärten sind oft mit Schadstoffen belastet. Diese stammen vor allem aus der Düngung (zu viel Mineraldünger, Einsatz von Asche und belastetem Kompost) und der oft unsachgemässen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.
Klärschlamm Entsorgung (Kap. 2.4.4)	Flächen, auf denen bis 1996 Klärschlamm ausgebracht wurde, weisen bis heute Überschreitungen des Richt- oder Prüfwertes (vgl. Abbildung 33) für mehrere Schadstoffe auf.
Altlasten (Kap. 2.4.5)	Schweizweit existieren rund 38 000 belastete Standorte (Industriestandorte, Ablagerungen von Siedlungs-, Gewerbe- und Industrieabfällen, Schiessanlagen und Schiessplätze sowie Unfallstandorte). Diese bedecken eine Fläche von rund 225 km ² (0,6 % der Landesfläche).

Bodenbelastung	Zustand und Entwicklung
Humusverlust (Kap. 2.5)	Ackerböden haben deutlich tiefere Humusgehalte als die Böden von Wiesen und Weiden. In den meisten mineralischen Landwirtschaftsböden scheint der Humusgehalt auf tiefem Niveau stabil zu sein. In landwirtschaftlich genutzten ehemaligen Moorböden nimmt die organische Substanz kontinuierlich ab.
Eutrophierung (Kap. 2.6)	Der atmosphärische Eintrag von biologisch aktivem Stickstoff in die Böden liegt fast flächendeckend deutlich über dem natürlichen Wert. Die Böden versauern, und natürliche Ökosysteme werden durch den Stickstoffeintrag geschädigt. Betroffen sind 98 % der Hochmoore, 95 % der Wälder, 76 % der Flachmoore und 49 % der Trockenwiesen.
Versauerung (Kap. 2.6)	Die Versauerung der Böden durch den Stickstoffeintrag bedroht den Wald, die Biodiversität und die Bodenfunktionen. Die Versauerung konnte gebremst, aber nicht gestoppt werden.
Verlust an Bodenbiodiversität (Kap. 2.7)	Es muss davon ausgegangen werden, dass die hohe landwirtschaftliche Nutzungsintensität in der Schweiz das Bodenleben vielerorts beeinträchtigt.
Terrainveränderungen (Kap. 2.8)	Die Bautätigkeit in der Schweiz löst in erheblichem Umfang Bodenverschiebungen aus. Zwei Drittel aller früheren Bodenüberschüttungen haben zu dauerhaften Schäden am Boden geführt. Die Qualität von Terrainveränderungen hat sich in den letzten Jahren verbessert. Dies gilt vor allem für Projekte, bei denen eine bodenkundliche Baubegleitung verlangt wird.



2.1 Bodenversiegelung

Die Versiegelung der Erdoberfläche mit luft- und wasserdichten Materialien wie Asphalt oder Beton ist die gravierendste Veränderung des Bodens durch den Menschen. Sie führt zum Verlust der natürlichen Funktionen des Bodens als Lebensraum, Speicher und Filter sowie seiner Fähigkeit, Stoffe umzuwandeln und abzubauen. Der Gasaustausch mit der Atmosphäre wird durch die Versiegelung weitgehend gestoppt, Regenwasser kann nicht mehr oder nur unter erschwerten Bedingungen versickern. Dadurch steigt das Risiko, dass bei starken Regenfällen die Kanalisation, aber auch Bäche und Flüsse die oberflächlich abfliessenden Wassermassen nicht fassen können und es zu örtlichen Überschwemmungen kommt. Gleichzeitig werden die Grundwasservorräte nur noch reduziert aufgefüllt. Bodenversiegelung kann nur mit sehr grossem Aufwand und mit hohen Kosten rückgängig gemacht werden.

Entwicklung der Siedlungsfläche

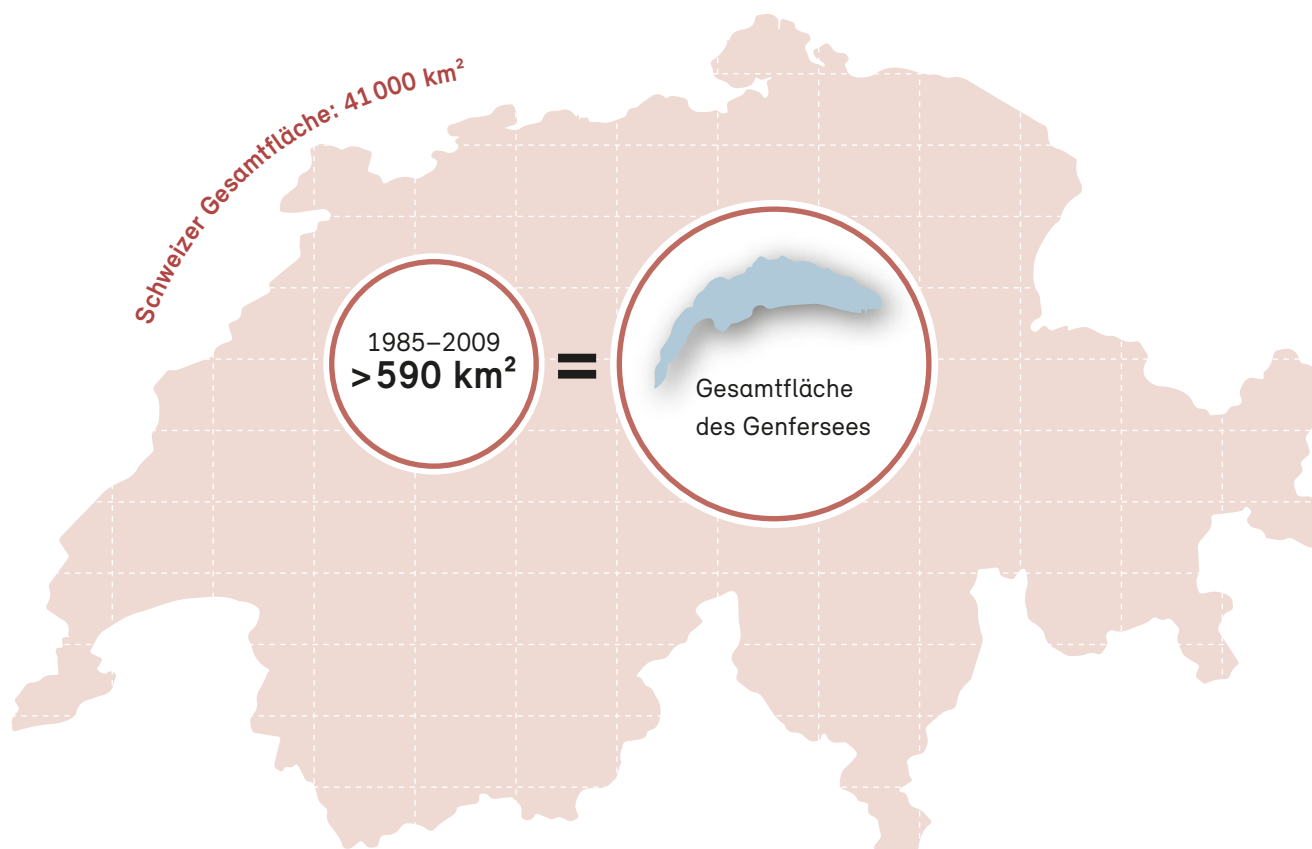
Das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum sowie die zunehmende Mobilität und der erhöhte durchschnittliche Wohnflächenbedarf pro Einwohnerin und Einwohner haben in den vergangenen Jahrzehnten zu einem gesteigerten Bedarf an Wohn- und Bürogebäuden, Strassen und Eisenbahnlinien, Einkaufszentren, Industrie- und Gewerbegebieten, Freizeit- und Sportanlagen geführt. Dadurch ist die Siedlungsfläche zwischen 1985 und 2009 um 23,4 % oder 584 Quadratkilometer gewachsen. Dies entspricht der Grösse des Genfersees (Abbildung 8) oder einer Flächenzunahme von rund 0,75 Quadratmeter pro Sekunde [22]. Im Jahr 2009 bedeckten Siedlungen 7,5 % der Schweiz.

Die besten Böden in Gefahr

Die zwischen 1985 und 2009 neu entstandenen Siedlungsflächen waren vorher zu 32 % Ackerland, 33 % Naturwiesen, 13 % Obstgärten, Reben oder Gartenbauanlagen

Abbildung 8

Die Siedlungsfläche in der Schweiz ist zwischen 1985 und 2009 um 23,4 % bzw. um die Fläche des Genfersees gewachsen.



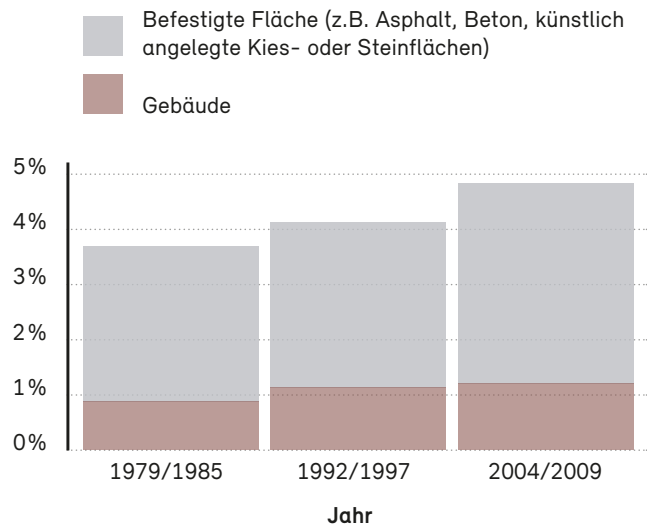
und zu 9 % Weiden. Die Siedlungsausdehnung fand vor allem in den flachen Tallagen statt und betrifft damit die besonders wertvollen und produktiven Landwirtschaftsböden der Schweiz (Abbildung 9). Zwischen den beiden Beobachtungsperioden der Arealstatistik (1985 bis 1997 und 1997 bis 2009) lässt sich gesamtschweizerisch eine Abschwächung des Siedlungswachstums beobachten – allerdings auf hohem Niveau. Deutlich abgeschwächt hat sich das Wachstum des Industrie- und Gewerbeareals (von 22 % auf 8,7 %), etwas weniger beim Gebäudeareal (von 18 % auf 12 %) und bei den Verkehrsflächen (von 9,5 % auf 5,5 %).

Anteil versiegelter Böden

Über 62 % der Siedlungsfläche ist versiegelt (Gebäude und Strassen) [23]. Innerhalb von 24 Jahren (1985 bis 2009) haben die versiegelten Böden in der Schweiz um 29 % zugenommen (Abbildung 10). Insgesamt sind 4,7 % der Landesfläche dauerhaft mit luft- und wasserdichten Materialien bedeckt (1900 km²). Selbst in geschützten Gebieten wie den Landschaften und Naturdenkmälern von nationaler Bedeutung (BNL), Moorlandschaften und Naturparks hat die Versiegelung in einem bedenklichen Ausmass (zwischen 10 und 14 %) zugenommen [24].

Abbildung 10

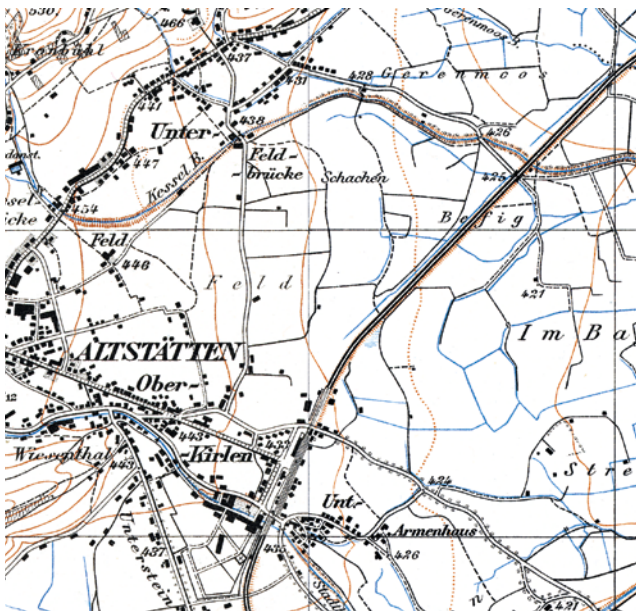
Anteil der versiegelten Fläche in der Schweiz [24].



Knapp 40 % der Siedlungsfläche entfällt auf Grünflächen wie Gärten, Parks, Blumenrabatte und begrünte Strassenränder [23]. Allerdings sind die Siedlungsböden meist durch Umlagerungen, den Eintrag fremden Materials und Umweltverschmutzung tiefgreifend verändert worden. Dies gilt sowohl für den Aufbau als auch für die

Abbildung 9

Siedlungen beanspruchen die besten Böden der Schweiz. Die Karte zeigt den gleichen Landschaftsausschnitt 1944 (links) und 2014. Der Flurname «Feld» ist verschwunden. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA170160)



Bodeneigenschaften. Dennoch erbringen sie in reduziertem Umfang wichtige Ökosystemleistungen. Stadtböden sind beispielsweise die Basis der Stadtnatur, speichern Schadstoffe und Regenwasser und sorgen über die Verdunstung für ein angenehmeres Klima.

Bautätigkeit ausserhalb des Siedlungsraums

Ausserhalb der Bauzonen bedecken vor allem Strassen und andere Infrastrukturanlagen sowie landwirtschaftliche Gebäude einen Teil des Bodens. Zusammen mit den Flächen für Tourismus, Freizeit, Kommunikation, Energie, Abbau, Deponien und Militär liegen fast 38 % der Siedlungsfläche ausserhalb der Bauzonen [25]. Dieser hohe Anteil ist vor allem auf das feinmaschige Netz von landwirtschaftlichen Erschliessungsstrassen im ländlichen Raum zurückzuführen. Insgesamt liegen zwei Drittel aller Verkehrsflächen ausserhalb der Bauzonen (Abbildung 11); beim Gebäudeareal sind es 22 %.

Zwischen den beiden Beobachtungsperioden 1985 bis 1997 und 1997 bis 2009 hat sich die Zunahme der Verkehrsfläche ausserhalb der Bauzonen abgeschwächt [25]. Mehr als verdoppelt hat sich dagegen die Zunahme der Erholungs- und Grünanlagen. Dies ist vor allem auf den Bau von Golfplätzen zurückzuführen.

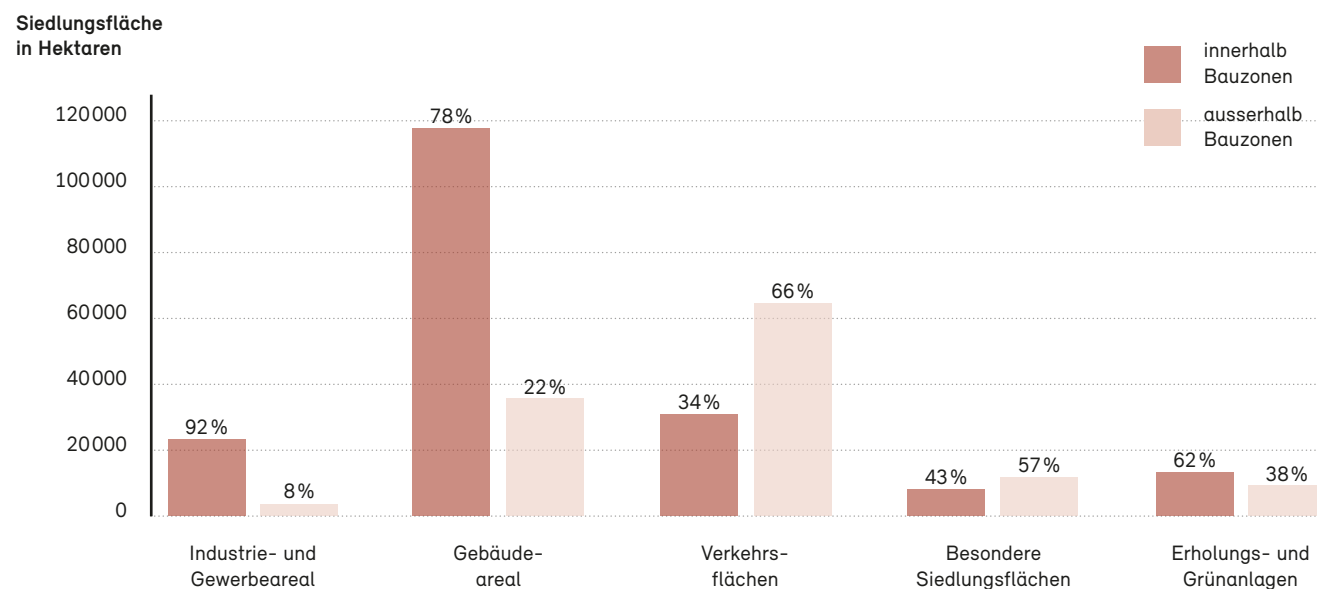
Unversiegelte Siedlungsböden

Im Siedlungsraum gibt es zwischen versiegelten Böden offene Flächen wie Gärten und Parkanlagen. Fast 40 % des Siedlungsraums sind nicht versiegelt, weisen allerdings Böden auf, die in der Regel nicht natürlich gewachsen sind, sondern mindestens einmal umgelagert wurden und oft mit Bau- und Trümmerschutt, Abfall, Schlacken und Schlämmen durchsetzt sind. Diese sogenannten Siedlungsböden erfüllen trotzdem wichtige Funktionen:

- Sie erlauben es dem Wasser zu versickern und reduzieren damit das Hochwasserrisiko.
- Sie nehmen gesundheitsschädliche Feinstäube und Schadstoffe auf und binden diese dauerhaft.
- Sie beherbergen Bodenlebewesen, die organische Schadstoffe abbauen.
- Sie ermöglichen das Wachstum von Pflanzen, die das Stadtklima positiv beeinflussen und Hauptbestandteile der Erholungsräume sind.
- Sie sind Grundlage für Freizeitgestaltung und Erholung und Lebensgrundlage für viele Tiere und Pflanzen.

Abbildung 11

Siedlungsflächen innerhalb und ausserhalb der Bauzonen nach Teilkategorien (in Hektaren)
(Datenstand 2009/2012) [25].

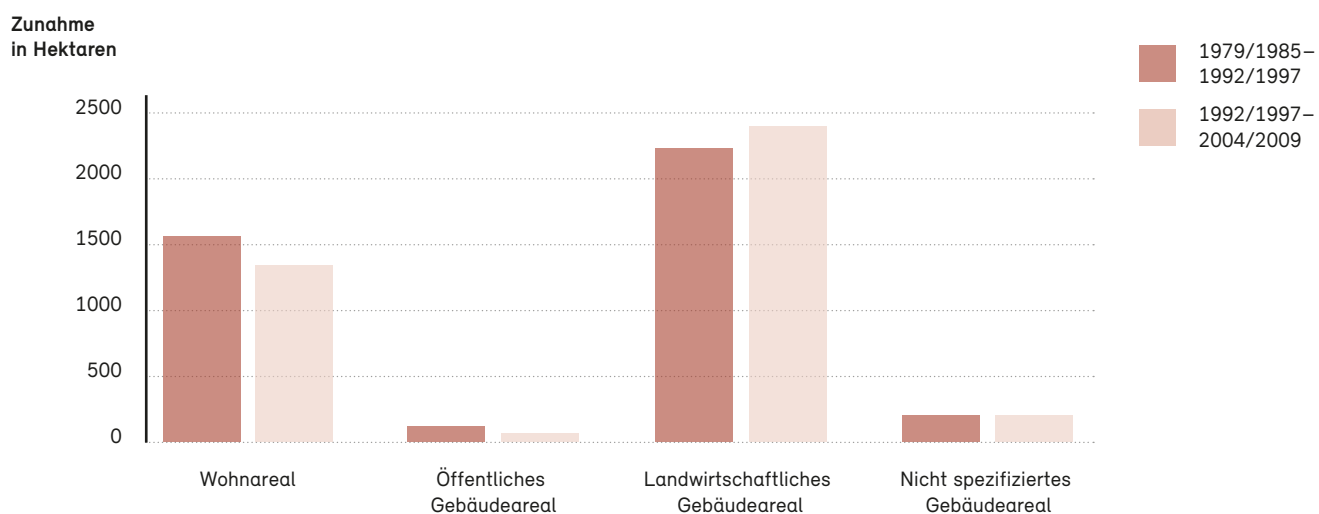


Zugenommen hat auch die Fläche des Gebäudeareals ausserhalb der Bauzonen, und zwar um insgesamt 8000 Hektaren. Alle Gebäudekategorien haben dazu beigetragen. Die Zunahme fand zum grossen Teil bei den Wohnarealen sowie beim landwirtschaftlichen Gebäudeareal statt.

Im Vergleich der beiden Beobachtungsperioden 1985 bis 1997 und 1997 bis 2009 hat sich die Zunahme des Wohnareals etwas abgeschwächt; dagegen hat sich die ohnehin schon recht massive Zunahme des landwirtschaftlichen Gebäudeareals noch verstärkt (Abbildung 12).

Abbildung 12

Zunahme des Gebäudeareals ausserhalb der Bauzonen (in Hektaren) nach Gebäudekategorien [25].



2.2 Bodenerosion

Bei besonders starken Regenfällen kann das Wasser nicht mehr im Boden versickern, sondern fliesst oberflächlich ab. Geschieht dies auf geneigten Ackerflächen mit geringer Bodenbedeckung, werden Bodenpartikel mitgerissen. Ein verdichteter Boden, ergiebige und intensive Regenfälle, wassergesättigte oder ausgetrocknete Ackerböden, steile und lange Hänge sowie eine geringe Pflanzenbedeckung können zu besonders starkem Bodenabtrag führen.

Bodenerosion hat zahlreiche negative Folgen [26]. Die Bodenfruchtbarkeit verringert sich, wichtige Bodenfunktionen werden beeinträchtigt (z. B. die Fähigkeit des Bodens, Kohlenstoff, Nährstoffe und Wasser zu speichern sowie Wasser zu reinigen), Kulturpflanzen nehmen Schaden. Ausserhalb der direkt betroffenen Flächen kann es zu beträchtlichen ökologischen Schäden kommen, weil Düngemittel, Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel, die an die Bodenpartikel gebunden sind, in angrenzende Gewässer und Lebensräume verfrachtet werden und die dortigen Lebensgemeinschaften schädigen [27]. Strassen und Wohngebiete können ebenfalls mit Erdmaterial verunreinigt werden, was die öffentliche Sicherheit beeinträchtigt

und hohe Reinigungs- und Reparaturkosten an öffentlichen und privaten Infrastrukturen nach sich zieht.

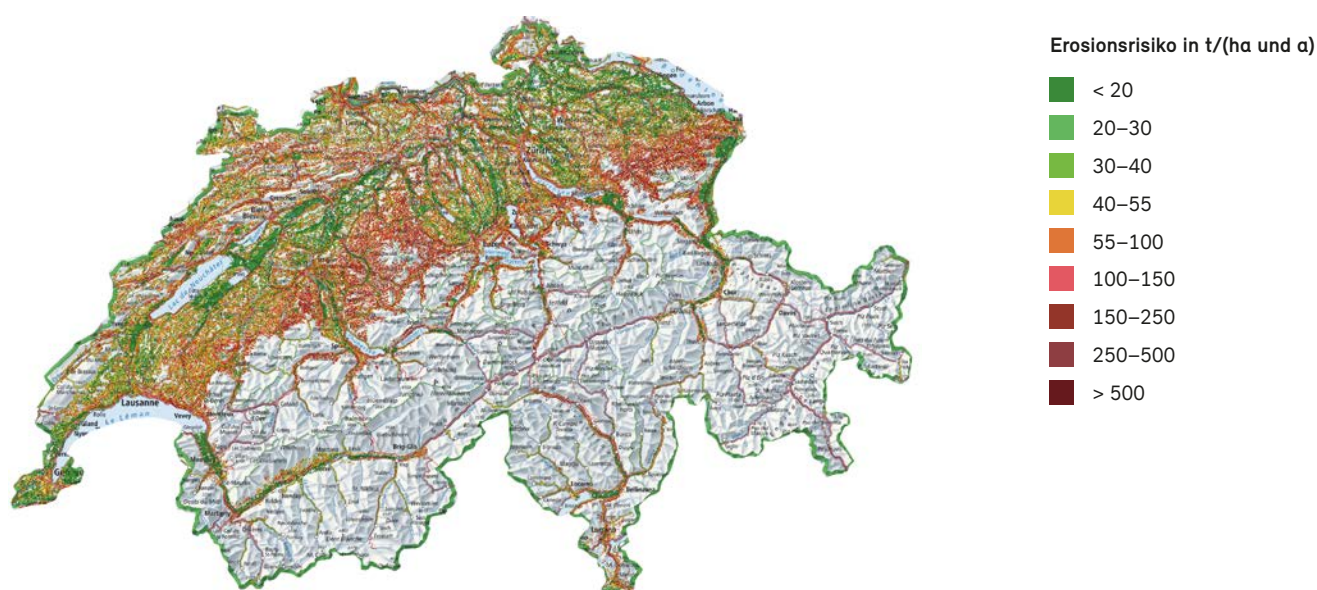
Erosionsrisiko in der Schweiz

Weltweit gehen pro Jahr rund 5 Milliarden Tonnen Ackerboden durch Wassererosion verloren [28]. Das entspricht einem jährlichen Verlust von etwa 1 Prozent des landwirtschaftlich nutzbaren Erdmaterials.

In der Schweiz wurde das Problem der Bodenerosion im internationalen Vergleich lange Zeit als wenig gravierend eingestuft. Als im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms «Nutzung des Bodens in der Schweiz» in den 1980er-Jahren genauere Untersuchungen durchgeführt wurden und sich ein dringender Handlungsbedarf zeigte [29], hat der Bund 1998 die gesetzlichen Grundlagen zur Verminderung von Bodenerosion in der Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBö) geschaffen. Zudem gaben die landwirtschaftlichen Beratungsdienste verschiedener Kantone Anleitungen zur Ermittlung der Erosionsgefährdung (sog. Erosionsschlüssel) sowie Merkblätter heraus [30, 31]. Eine 2013 erschienene Vollzugshilfe konkretisiert die gesetzlichen Grundlagen und bietet Möglichkeiten an, wie der Vollzug in Zukunft verbessert werden kann [32].

Abbildung 13

Potenzielles Erosionsrisiko (ohne Einbezug der aktuellen Bewirtschaftung) für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Tal- und Hügelzone sowie der Bergzonen 1 und 2 in Tonnen pro Hektare und Jahr [37].



In der Schweiz ist die standortbedingte Erosionsgefahr aufgrund der hohen und jahreszeitlich schwankenden Niederschläge sowie des hügeligen Reliefs mit mehr oder weniger starken Hangneigungen gross. Dies zeigt die Erosionsrisikokarte des Bundes (Abbildung 13) [33]. Fast ein Drittel der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Tal- und Hügелgebiet wird als potenziell stark erosionsgefährdet klassiert. Die Vegetationsbedeckung ist dabei allerdings nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich gibt es in allen Kantonen landwirtschaftliche Nutzflächen mit hoher Erosionsgefährdung. Vor allem Kantone, die an die Bergzone angrenzen, weisen hohe Anteile potenziell erosionsgefährdeter Flächen auf; allerdings dürften viele dieser Flächen mit Gras bewachsen sein [34]. Damit sind sie vor Erosion geschützt.

Die aktuelle Landnutzung (Fruchtfolge, Bodenbearbeitungsverfahren) bestimmt das tatsächliche Erosionsrisiko massgeblich. 2018 soll eine verbesserte Erosionsrisikokarte der Schweiz vorliegen, die eine Auftrennung in Acker- und Grasland erlaubt. Grasland, abwechslungsreiche Fruchtfolgen sowie der Anbau von Kunstwiesen und Zwischenkulturen verringern das Erosionsrisiko.

Kartoffel ist die Kultur mit dem höchsten Erosionsrisiko, Kunstwiese sowie Dauergrünland weisen das geringste Risiko auf. Konservierende, pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren reduzieren den Bodenabtrag um den Faktor zehn [35]. Ein Merkblätter-Set mit 31 verschiedenen Massnahmen zeigt Möglichkeiten zur Erosionsverminderung auf [36].

55 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche haben einen potentiellen Gewässeranschluss (Abbildung 14); hier kann Bodenerosion zu Gewässerbelastungen führen. Der grösste Teil ist dabei indirekt über entwässerte Strassen und Talwege ans Gewässer angeschlossen. Rund 60 000 ha bzw. 10 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche im Tal- und Hügелgebiet haben eine hohe Anschlusswahrscheinlichkeit [27].

Lokaler Bodenabtrag

Bodenerosion durch Wasser tritt auf Ackerland in flächenhaften und/oder linienhaften Formen auf. Gut sichtbar sind die schlammig braun verfärbten Bäche und Flüsse nach starken Niederschlägen und die Erosionsrinnen und -rillen auf den Äckern, die aber aufgrund der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung rasch wieder

Abbildung 14

Direkte und indirekte Gewässeranschlusskarte zur Erosionsrisikokarte der Schweiz für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Tal- und Hügелzone sowie der Bergzonen 1 und 2 [27].



verschwinden. Weil Bodenerosion zudem unregelmässig und räumlich begrenzt auftritt, ist die Beobachtung und Bilanzierung der Bodenerosion anspruchsvoll. Um den tatsächlichen regionalen Bodenabtrag durch Wasser zu ermitteln, sind langjährige Untersuchungen notwendig.

Die meisten Erosionsstudien basieren auf Messungen in Testparzellen oder auf Erosionsmodellierungen. Auch die meisten feldbezogenen Untersuchungen betrachten nur Einzelereignisse (meist Extremereignisse) oder erfassen nur wenige Jahre. Eine Ausnahme sind Untersuchungen in vier Gebieten in den Kantonen Aargau, Basel-Landschaft, Uri und Bern. Die mehrjährigen Beobachtungen liefern wichtige Erkenntnisse zum tatsächlichen Erosionsgeschehen in der Schweiz:

- Untersuchungen aus den Jahren 1975 bis 1988 im hügeligen Hochrheintal im Kanton Aargau, zeigen, dass die dortigen Löss-Böden sehr erosionsanfällig sind. Der durchschnittliche Bodenabtrag während 13 Jahren betrug 5 Tonnen pro Hektare und Jahr [38]. Auf einzelnen Äckern wurden Werte bis zu 20 Tonnen nachgewiesen. In bestimmten Jahren konnten auf einzelnen Flächen Spitzenabträge von bis zu 95 Tonnen Boden pro Hektare gemessen werden. Etwa ein Drittel der Ackerfläche war im Untersuchungszeitraum von starken Erosionsschäden betroffen (Bodenabtrag über

5 Tonnen pro Hektare und Jahr).

- Deutlich weniger erosionsgefährdet sind die tonreichen Böden in einem Untersuchungsgebiet im Kanton Basel-Landschaft. Der durchschnittliche Bodenabtrag in den Jahren 1987 bis 1999 lag bei 0,3 Tonnen pro Hektare und Jahr [39]. In Einzelfällen erreichte der Abtrag bis zu 10 Tonnen. Auf kleineren Flächen wurden regelmässige Bodenabträge von 1 bis 2 Tonnen beobachtet.
- Bodenerosion ist auch auf alpinem Grasland ein Problem. So überschreitet im Urserental die Erosionsrate bei intensiver Nutzung die Bodenbildungsrate deutlich [40]. Die durchschnittliche Erosionsrate betrug 1,8 Tonnen pro Hektare und Jahr. Stellenweise betrug dieser Wert 30 Tonnen. Maximal tolerierbar wären angesichts der geringen Bodenbildungsrate 0,3 bis 1 Tonnen pro Hektare und Jahr.
- Aktuelle Daten zum Erosionsgeschehen liefert das Untersuchungsgebiet Frienisberg (265 Hektaren) nordwestlich von Bern im Mittelland. Es repräsentiert eine typische Ackerbauregion der Schweiz. Die dort seit 1998 ohne Unterbruch gewonnenen Daten zur Entwicklung der Bodenerosion sind in der Schweiz und in Europa einzigartig.
- Der durchschnittliche Abtrag betrug im Zeitraum zwischen 1998 und 2007 über 0,7 Tonnen Bodenmaterial pro Hektare und Jahr [41]. Die jährlichen Schwankungen waren allerdings sehr gross. Zwischen dem kleins-

Erosionsrinnen



ten (42 t) und dem grössten (481 t) jährlichen Bodenabtrag liegt ein Faktor von mehr als zehn (Abbildung 15). Die Ergebnisse zeigen ausserdem, dass nur ein kleiner Teil der Ackerparzellen eines Gebietes gravierende Erosionsschäden aufwies. Dabei spielten Extremereignisse eine entscheidende Rolle: Die sechs grössten Abtragsereignisse zwischen 1998 und 2007 trugen zu über 50 % der gesamten Abtragsmenge bei. Sie fanden in sechs verschiedenen Jahren und sechs verschiedenen Monaten statt. Der höchste Bodenabtrag auf einer einzelnen Parzelle lag bei 96 Tonnen pro Hektare. Der gesetzliche Richtwert (Tabelle 3) wurde im Zeitraum zwischen 1998 und 2007 auf 7 % aller Parzellen überschritten [35]. Insgesamt lag der mittlere Bodenabtrag im Gesamtgebiet in den ersten zehn Jahren seit Messbeginn bei knapp 200 Tonnen pro Jahr, über die folgenden neun Jahre (2007 – 2016) aber lediglich bei 56 Tonnen pro Jahr (Abbildung 15). Zwischen den beiden Perioden zeigt sich somit eine markante Abnahme um mehr als zwei Drittel [42]. Die Ursachen für diese Abnahme sind noch nicht restlos geklärt. Änderungen bei Fruchtfolgen und Bodenbearbeitungsverfahren (aufgrund von Kantons- bzw.

Bundesbeiträgen sind die Anteile konservierender, d. h. pflugloser Anbausysteme vielerorts markant angestiegen) sowie die Sensibilisierung der Bewirtschafter durch Fachexperten (z. B. ein in der Landwirtschaft praktizierender Mitarbeiter der Fachstelle Bodenschutz; ein innovativer Lohnunternehmer) im Gebiet dürften einen wesentlichen Einfluss gehabt haben. Dies bedeutet aber zugleich, dass sich die für das Untersuchungsgebiet aufgezeigte Entwicklung nicht einfach auf die ganze Schweiz übertragen lässt. Die Resultate zeigen jedoch, dass eine Reduktion der Bodenerosion möglich ist – auch unter realen Praxisbedingungen.

Tabelle 3

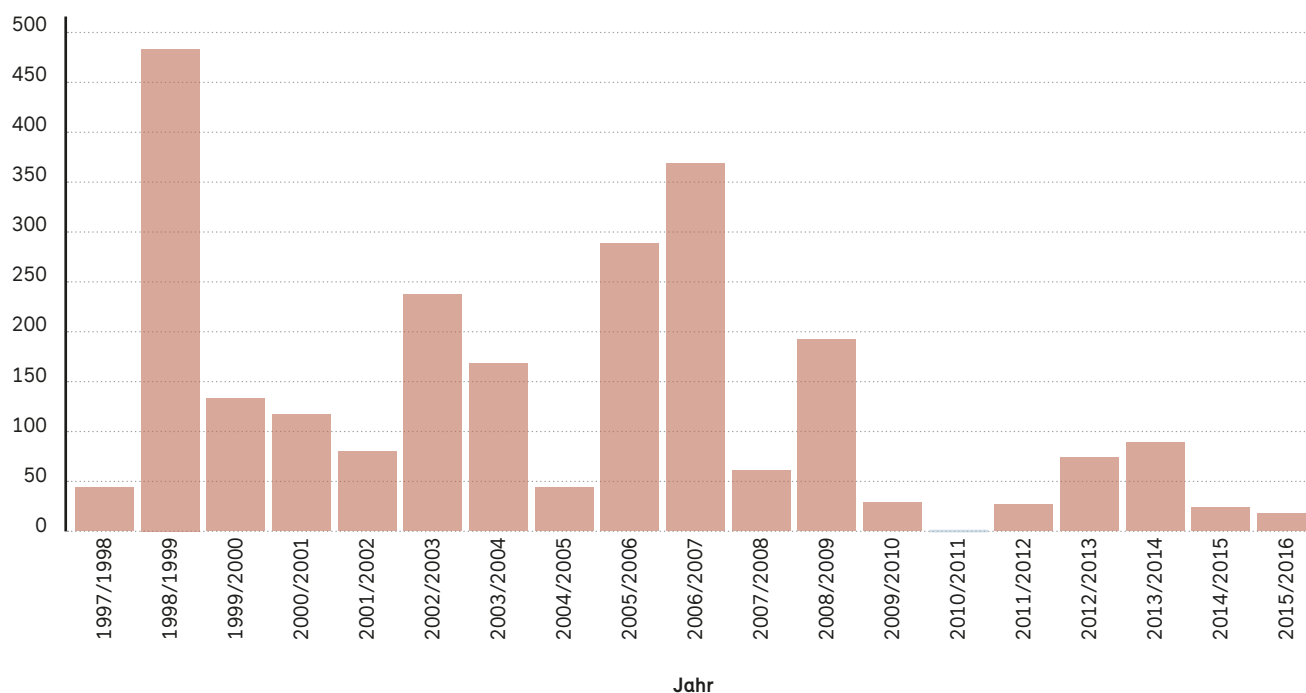
Richtwerte für die Bodenerosion gemäss der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö). Bei deren Überschreitung ermitteln die Kantone die Ursachen der Belastung und treffen Massnahmen.

Richtwert	Bodenverluste in Tonnen pro Hektare und Jahr
Böden bis 70 cm Gründigkeit	2
Böden über 70 cm Gründigkeit	4

Abbildung 15

Entwicklung des jährlichen Bodenabtrags in Tonnen in einem 265 Hektaren grossen Untersuchungsgebiet nordwestlich von Bern [42].

Bodenabtrag (t)



Die Untersuchungen zeigen, dass Bodenerosion in der Schweiz ein weit verbreitetes Phänomen ist und zeitlich und räumlich sehr unregelmässig auftritt [43]. Die Bodenerosion kann mehrere Jahre ruhen, bis ein Jahr mit einem umfangreichen Bodenabtrag folgt. Um Abtragsmengen verlässlich zu bestimmen, braucht es daher lange Beobachtungsreihen [44].

Die gemessenen Abtragswerte und das landesweite Erosionsrisiko deuten darauf hin, dass Erosion einen Teil der Böden bedroht. Ein Bodenverlust von 1 bis 2 Tonnen pro Hektar und Jahr muss als besorgniserregendes Erosionsereignis angesehen werden, das Massnahmen verlangt. Es besteht die Gefahr, dass die Gründigkeit der Böden an vielen Orten abnimmt. Weil auf vielen erosionsgefährdeten Flächen keine standortangepasste Bewirtschaftung stattfindet, reduziert der wenig sichtbare und meist schleichende Bodenverlust insgesamt die Ernährungssicherheit und führt zu ökologischen und ökonomischen Kosten.

Zukünftige Entwicklungen

Wie sich die Erosionsgefahr in den kommenden Jahren und Jahrzehnten entwickeln wird, ist unklar. Einerseits verbreiten sich erosionshemmende (v.a. pfluglose) Anbautechniken in der Schweiz immer mehr und die Sensibilität der Landwirte und Landwirtinnen gegenüber Bodenerosion ist gestiegen. Der Bund unterstützt Massnahmen gegen Bodenerosion: Seit dem 1. Januar 2017 ist der Erosionsvollzug neu geregelt. Setzt der Landwirt nach einem bewirtschaftungsbedingten Erosionsereignis geeignete Massnahmen um, werden die Direktzahlungen weiter ausbezahlt. Andernfalls drohen ihm Direktzahlungskürzungen. Andererseits gibt es Entwicklungen, welche die Erosion begünstigen:

- Der Klimawandel führt zu zunehmenden Starkniederschlägen.
- Der landwirtschaftliche Strukturwandel begünstigt grössere Parzellen mit intensiver Nutzung und damit das Erosionsrisiko.
- Die intensive Bodenbearbeitung mit immer schwereren Maschinen verdichtet den Boden und begünstigt dadurch die Erosion.
- Ackerflächen werden durch die Ausdehnung des Siedlungsraums im Talgebiet in steilere Hanglagen verdrängt.

Hangrutschungen und Bodenfunktionen

Besonders offensichtlich ist Bodenerosion dort, wo ganze Hänge ins Rutschen geraten. Die Massenbewegungen werden meistens durch lang andauernden Regen ausgelöst. Eine geringe Vegetationsbedeckung begünstigt Rutschungen [45]. Bei der Verlagerung der zum Teil grossen Mengen an Erdmaterial werden sowohl am Ort des Abgleitens wie am Ort des Ablagerns die meisten Bodenfunktionen für längere Zeit stark gestört oder ausser Kraft gesetzt. Modelle gehen davon aus, dass extreme Wetterlagen infolge des Klimawandels und damit Hangrutschungen häufiger werden.

Hangrutschungen müssen sich nicht immer innert kürzester Zeit und mit dementsprechend grossen Geschwindigkeiten abspielen [46]. Die meisten Hangrutschungen erfolgen über lange Zeiträume (wenige Millimeter pro Jahr). In der Schweiz sind 6 bis 8 % der Landfläche von Rutschprozessen betroffen (heute aktive und in der Vergangenheit aktive Rutschungen) [47].

Hangrutschungen können ausgelöst werden durch menschliche Landnutzungen, die nicht dem Standort angepasst sind:

- Eine intensive landwirtschaftliche Nutzung von rutschgefährdeten Hängen erhöht die Rutschgefahr. Wurzeln von Bäumen und Sträuchern können für einen besseren Zusammenhalt der Bodenteile und eine bessere Aggregatbildung im Boden sorgen.
- Das Anschneiden eines Hangfusses, defekte Wasserleitungen und Bodenverdichtungen können Rutschungen auslösen.
- Eine zu intensive Nutzung reduziert die Artenvielfalt bei den Pflanzen. In den Alpen konnte gezeigt werden, dass die Bodenstabilität bei einer höheren Anzahl von Pflanzenarten grösser ist [48].



2.3 Bodenverdichtung

Rund die Hälfte des Bodens besteht aus einem weit verzweigten Porensystem, das mit Wasser und Luft gefüllt ist. Werden die Poren zusammengepresst oder die Verbindungen untereinander gekappt, spricht man von Bodenverdichtung. Sie entsteht beim Befahren des Bodens mit schweren Maschinen in der Land- und Waldwirtschaft sowie auf Baustellen, durch unsachgemässes Abtragen, Zwischenlagern und wieder Auftragen von Bodenmaterial, durch die Beweidung mit zu vielen und zu schweren Tieren oder durch die Begehung von Böden durch zu viele Menschen bei Freizeitanlagen und während Freizeitveranstaltungen (z. B. Open-Air, Turnfest). Entscheidend für die Verdichtungsempfindlichkeit sind die Feuchtigkeit und der Tongehalt des Bodens. Je feuchter ein Boden, desto geringer ist seine Stabilität. Ab einem Niederschlag von mehr als 10 Millimetern während 24 Stunden sind alle Bodenbearbeitungen in Bezug auf die Verdichtung als kritisch zu betrachten [49].

Ein sichtbares Zeichen für Bodenverdichtung sind vorübergehende Wasseransammlungen auf den Äckern, im Wald und auf Baustellen, weil das Regenwasser in den verdichteten Böden nicht mehr ausreichend versickern kann. Verdichtungen können sich summieren und für lange Zeit erhalten bleiben. Die natürliche Regeneration des Wurzelraums ist ein langwieriger Prozess.

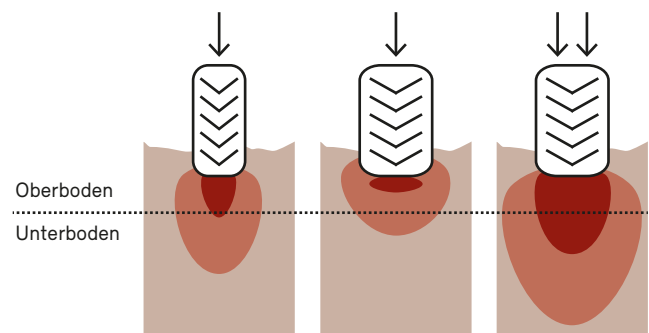
Besonders problematisch sind Verdichtungen ab 30 Zentimeter Tiefe. Schwere Maschinen und Geräte belasten den Boden in diesen Bereichen, auch wenn durch technische Massnahmen wie breitere Reifen und Absenken des Reifeninnendrucks die Kontaktfläche vergrössert wird (Abbildung 16). Je tiefer eine Verdichtung reicht, desto weniger kann sie durch maschinelle Lockerung, durch die Tätigkeit der Bodenorganismen, durch das Gefrieren und Auftauen sowie das Quellen und Schrumpfen des Erdmaterials beseitigt werden. In vielen Fällen sind solche Verdichtungen gar nicht oder nur im Zeitraum von Jahrzehnten reversibel.

Bodenverdichtungen beeinträchtigen die Bodenfruchtbarkeit und verursachen ökologische sowie wirtschaftliche Schäden [50]:

Abbildung 16

Druckwirkung beim Befahren des Bodens [51].

In der Abbildung sind die Auswirkungen von zwei unterschiedlichen Radlasten (ein Pfeil: einfache Last, zwei Pfeile: doppelte Last) sowie zwei unterschiedlichen Reifenbreiten dargestellt. Der Bodendruck ist in der roten Zone am höchsten. Mit zunehmender Radlast reicht die Bodenverdichtung in immer grössere Tiefen. Mit der Verwendung breiter Reifen wird der Unterboden nur dann geschont, wenn die Radlast nicht zunimmt.



- Bodenverdichtung beeinträchtigt den Gas- und Wasseraustausch zwischen der Atmosphäre und dem Boden und damit wichtige Bodenfunktionen. Das Regenwasser versickert nur langsam, die Luftzirkulation ist gehemmt. Es kann zu anaeroben Zuständen kommen.
- Bodenverdichtungen hemmen das Wurzelwachstum. Die Pflanzen können weniger Nährstoff- und Wasserreserven erschliessen. Dies kann zu beträchtlichen Ertragsausfällen führen (Abbildung 17) und eine nachhaltige Nutzung ausschliessen.
- Um ein gleichbleibendes Ertragsniveau zu erzielen, steigt der Aufwand bei der Bodenbearbeitung und der Düngung.
- Fliesst das Regenwasser als Folge der Verdichtung oberflächlich ab, kann es bei starken Regenfällen zu vermehrter Bodenerosion kommen.

2.3.1 Landwirtschaft

Ende der 1980er-Jahre schätzten Fachexperten, dass 10 bis 15 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche von Bodenverdichtung betroffen sind [52]. Seither sind die Fahrzeuge und Maschinen in der Land-, Wald- und Bauwirtschaft immer leistungsfähiger und zumeist auch schwerer geworden (Abbildung 18). In Extremfällen müssen Böden Fahrzeuggewichte von bis zu 60 Tonnen

Abbildung 17

Entwicklung der Ernteverluste nach einer einmaligen Bodenverdichtung [51].

Verdichtungen beeinflussen das Pflanzenwachstum vor allem direkt nach dem Ereignis. Nach fünf Jahren spielt die Oberbodenverdichtung kaum noch eine Rolle, weil maschinelle Bearbeitung, Bodenlebewesen und Wurzeln den Boden gelockert haben. Die Unterbodenverdichtung bleibt hingegen über lange Zeit unverändert bestehen. Über mehrere Jahrzehnte wird wegen der Unterbodenverdichtung nur zirka 95 Prozent des möglichen Ertrags erreicht.

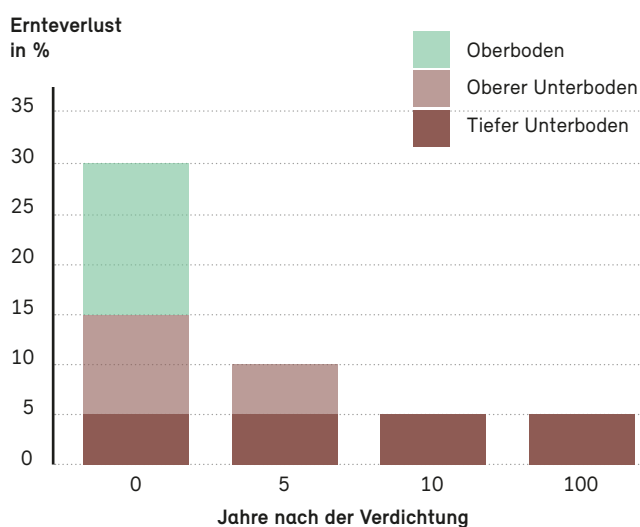
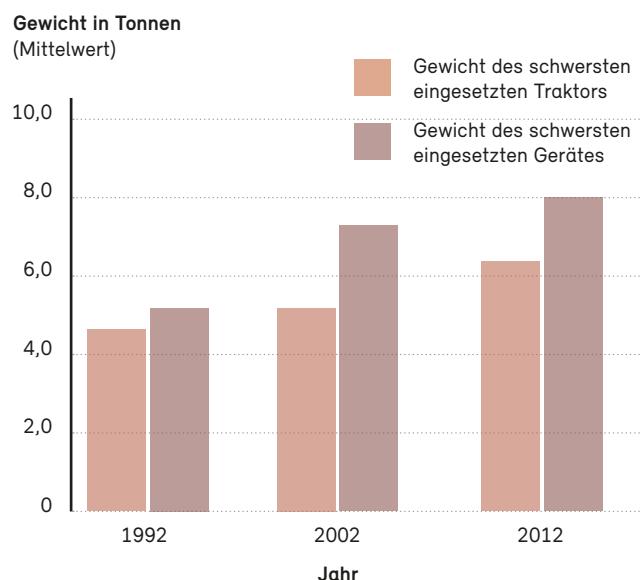


Abbildung 18

Entwicklung des Traktorgewichts und der Achsenlasten in Betrieben mit Ackerbau im Kanton Basel-Landschaft zwischen 1992 und 2012 [55].



tragen (Radlasten bis über 10 Tonnen). Dies übersteigt das im Strassenverkehr zugelassene Gesamtgewicht von maximal 40 Tonnen deutlich.

Untersuchungen von landwirtschaftlich genutzten Böden in der Zentralschweiz bestätigen, dass das Ausmass der Bodenverdichtung heute deutlich über der Schätzung aus den 1980er-Jahren liegen dürfte und Bodenverdichtung in der Schweiz mit ihren lehmigen Böden und feuchten Klimaverhältnissen ein verbreitetes Phänomen ist. Gemäss Experteneinschätzung wurden rund ein Drittel der untersuchten Standorte als schwach bis stark bodenphysikalisch beeinträchtigt eingestuft [53]. Es muss zumindest lokal mit Einbussen der Bodenfunktionen aufgrund von Bodenverdichtungen gerechnet werden. Untersuchungen aus Deutschland bestätigen die in der Zentralschweiz ermittelte Grössenordnung für den Flächenanteil, der von Bodenverdichtung betroffen ist [54].

2.3.2 Waldwirtschaft

Bodenverdichtungen im Wald können die Lebensraumfunktion einschränken [56, 57]. Die Folgen für die darin lebenden Pilze und Bakterien und damit für die Baumverjüngung sind beträchtlich [58]. Es werden Bakterienarten begünstigt, die an sauerstoffarme Verhältnisse angepasst sind, was zur Bildung von klimarelevantem Lachgas und Methan führt. Zudem verschwinden die für das Baumwachstum so wichtigen Mykorrhiza-Pilze, die in Lebensgemeinschaften mit Baumwurzeln leben.

Im Wald ist der Anteil an beeinträchtigten Flächen allerdings deutlich geringer als auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche, weil die Holzernte zum Teil im Winter auf gefrorenen und damit tragfähigen Böden stattfindet, weil nie die ganze Fläche befahren wird, die Häufigkeit der Überfahrten viel geringer ist als im Kulturland, Waldböden oft mehr Steine enthalten und damit weniger verdichtungsanfällig sind und steile Waldflächen nicht befahren werden können.

Dennoch können auch im Wald die Folgen der Verdichtung des Bodens durch zu schwere Maschinen lokal beträchtlich sein [59]. Vor allem die Räumungsarbeiten nach dem Orkan Lothar (Dezember 1999) führten vielerorts zu Bodenbeeinträchtigungen und Schäden.

Im Rahmen des 3. Landesforstinventars (2004–2006) wurden erstmals die sichtbaren Fahrspuren erfasst und so ein gesamtschweizerischer Überblick erarbeitet. Zusammenhänge zwischen Spurbild und Bodenfunktionalität erlaubten es, einen Typ zu definieren, dessen Auftreten ein eindeutiges Signal für einen ökologischen Schaden im System Boden ist. Über die ganze Schweiz betrachtet weisen 0,7 % der Waldfläche sichtbare Spuren von Fahrzeugen für die Holzernte auf [60]. Dieser Wert ist im Mittelland, wo diese Maschinen vorwiegend eingesetzt werden, am Grössten (2,2 %). Stark geschädigte Böden finden sich auf 0,1 % der Schweizer Waldfläche.

Die Grundlagen zu den wesentlichen Aspekten des physikalischen Bodenschutzes im Wald liegen mittlerweile vor [59]. Die vorgeschlagenen Massnahmen tragen dazu bei, die negativen Auswirkung der Waldbewirtschaftung zu minimieren.

2.3.3 Bauwirtschaft

Die Bautätigkeiten für Infrastrukturen und Gebäude sind anhaltend hoch (siehe Kapitel 2.1). Die Baustellen liegen immer häufiger auch in den Berggebieten, wo sich Böden besonders langsam regenerieren [61].

Beim Bauen werden oft grosse Mengen an fruchtbarem Boden abgetragen, zwischengelagert und später beispielsweise für Rekultivierungen oder Auffüllungen verwendet. Boden wird zudem vorübergehend auch für Bauinstallationen, -pisten, -depots oder -unterkünfte beansprucht. Durch einen wenig sorgsamen Umgang mit dem Boden können diese Umlagerungen und Aktivitäten zu Bodenverdichtung führen. Wichtige Funktionen der Siedlungsböden wie die Beeinflussung des Mikroklimas durch Verdunstung und die Gewährleistung von Natur und damit Lebensqualität im Siedlungsraum werden so ausser Kraft gesetzt oder geschwächt.

Die zunehmende Einsicht, dass Boden ein nicht vermehrbares und immer knapper werdendes Umweltgut ist, gesetzliche Grundlagen, Richtlinien und Ausbildungsprogramme haben dazu geführt, dass der Bodenschutz beim Bau mittlerweile breit akzeptiert ist [62]. Wenn das Projekt einen Umgang mit verdichtungsempfindlichen Böden, den Einsatz von schweren Baumaschinen oder die Verschiebung grosser Mengen abgetragenen Bodens

vorsieht, empfehlen die Behörden die Anstellung einer bodenkundlichen Baubegleitung, und zwar schon ab der Planungsphase. Die Analyse der gängigen Praxis in den Kantonen zeigt, dass die Behörden eine Baubegleitung durch eine bodenkundlichen Baubegleitung fordern, wenn das Projekt temporär Flächen von über 5000 m² beansprucht oder wenn gewisse kritische Situationen vorliegen [63]. Handlungsbedarf besteht allerdings auf der Stufe Vorplanung, bei kleinen Baustellen und teilweise bei der bodenkundlichen Baubegleitung [62].

2.3.4 Ausblick Bodenverdichtung

Die Gefährdung der Böden durch Bodenverdichtung könnte aufgrund folgender Entwicklungen weiter zunehmen:

- Das Gewicht von Fahrzeugen und Maschinen in der Land-, Wald- und Bauwirtschaft nimmt tendenziell immer noch zu [64].
- Infolge der Klimaänderung wird im Winterhalbjahr eine erhöhte Bodenfeuchtigkeit und damit ein erhöhtes Verdichtungsrisiko erwartet [65].
- Immer öfter führen feste Termine bei der Maschinennutzung (z. B. bei der Zuckerrüben- und -logistik) und bei der Lieferung von Agrarprodukten (z. B. bei nicht lagerbarem Frischgemüse) zu einem Bearbeitungs- bzw. Erntezwang [64]. Das bedeutet, dass der Boden auch bei ungünstigen Verhältnissen bearbeitet bzw. befahren wird.



2.4 Schadstoffeintrag

Praktisch alle Böden enthalten mehr oder weniger hohe Konzentrationen an Schadstoffen. Dazu gehören vor allem Schwermetalle, organische Stoffe, Rückstände von schwer abbaubaren Pflanzenschutz- und Arzneimitteln sowie Radionuklide wie Cäsium. Sie stammen einerseits aus natürlichen Quellen, andererseits aus Aktivitäten des Menschen.

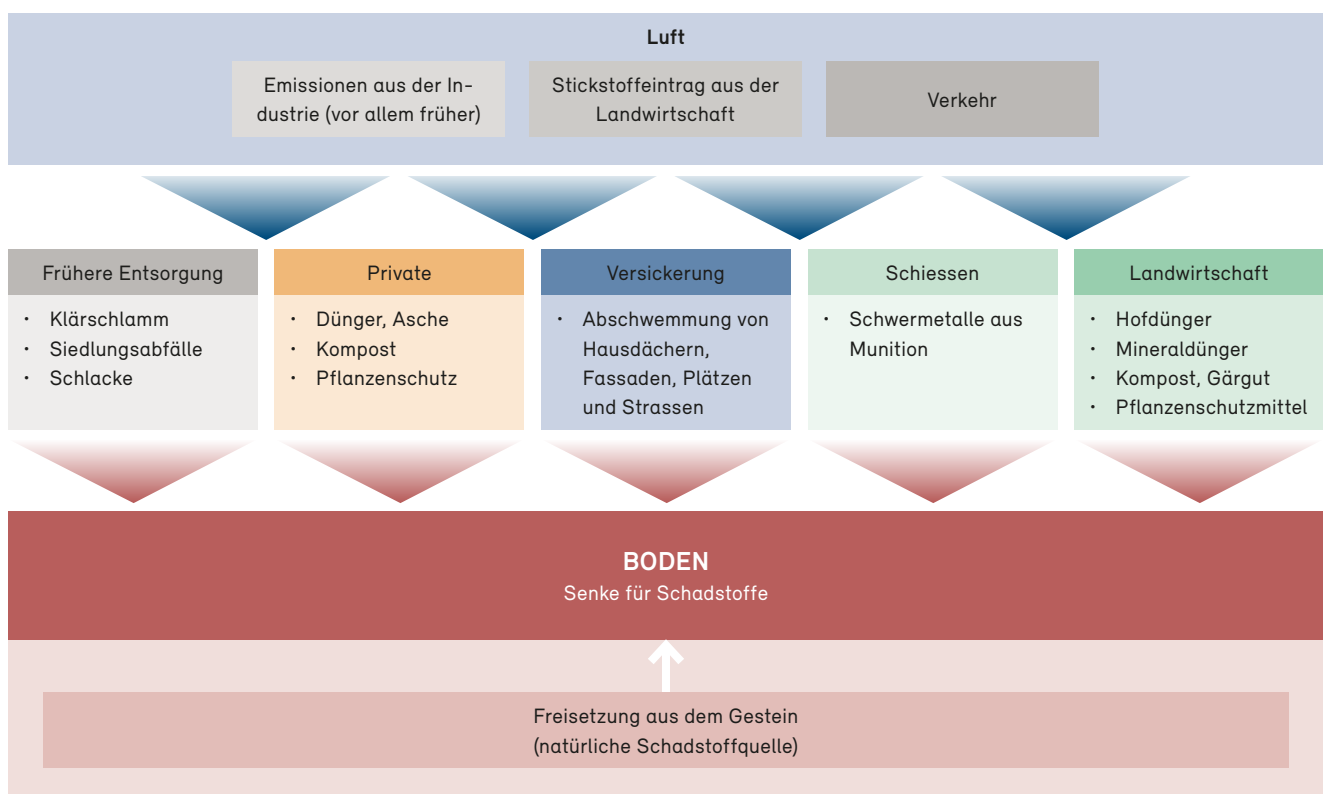
Natürliche Quellen für Schwermetalle sind die im Ausgangsgestein enthaltenen Elemente und Mineralien, die durch Verwitterung freigesetzt werden. Je nach chemischen Rahmenbedingungen werden sie im Boden angereichert, umgewandelt oder ausgewaschen. Hinzu kommen die vom Menschen in die Umwelt freigesetzten Schadstoffe aus Industrie, Gewerbe, Verkehr, Landwirtschaft und Privathaushalten, die früher oder später in den Boden gelangen, sich dort anreichern und die natürliche Hintergrundbelastung überlagern (Abbildung 19). Bei-

spielsweise haben Luftschadstoffe aus filterlosen Abluftkaminen in der Vergangenheit lokal bis regional zu einer starken Belastung der Böden geführt [66].

Organische Schadstoffe wie Pflanzenschutzmittel, Arzneimittel, Weichmacher, Flammenschutzmittel und diverse Zusätze in Haushalts- und Pflegeprodukten werden durch unsere Industriegesellschaft zunehmend und in grosser Zahl in Umlauf gebracht. In der Schweiz sind zurzeit 18 000 chemische Substanzen in Industrie und Haushalten im Umlauf. Ein Teil davon gelangt in die Umwelt und verteilt sich in den Böden und Gewässern, wo einige Substanzen aufgrund ihrer Toxizität ein Risiko bergen. Einmal im Boden, durchlaufen organische Schadstoffe eine Reihe von Verteilungs- und Umwandlungsprozessen. Weil zwischen dem Inverkehrbringen neuer Substanzen, ihrem Auftreten im Boden und der daraus resultierenden Konsequenzen für Mensch, Tier und Umwelt oft Jahrzehnte vergehen, können die Umweltanalytik und der Gesetzgeber mit den Entwicklungen nicht Schritt halten [67].

Abbildung 19

Eintragungspfade von Schadstoffen in den Boden.



Schadstoffe können im Boden gebunden und teilweise auch abgebaut werden. Das Filter- und Puffervermögen eines Bodens hängt stark von seinen Eigenschaften ab, aber auch von den Eigenschaften des Schadstoffs und den bereits im Boden vorhandenen Schadstoffmengen. Je nach Konstellation gelangt ein grösserer oder kleinerer Anteil der Schadstoffe ins Grundwasser, wird von Pflanzen aufgenommen und kann so in die Nahrungskette des Menschen gelangen.

Risiken ausgesetzt sind auch die Lebensgemeinschaften im Boden. Ab einer bestimmten Menge können Schadstoffe das Wachstum und die Vermehrung von Bodenorganismen beeinträchtigen. In diesem Fall sinkt die Bodenbiodiversität, was zu einer Abnahme der Bodenfruchtbarkeit und zu einer Verschlechterung der Bodeneigenschaften führt. Wichtige Bodenfunktionen wie die Nährstoffnachlieferung, die Wasseraufnahme und die Reinigung von Trinkwasser werden dadurch beeinträchtigt.

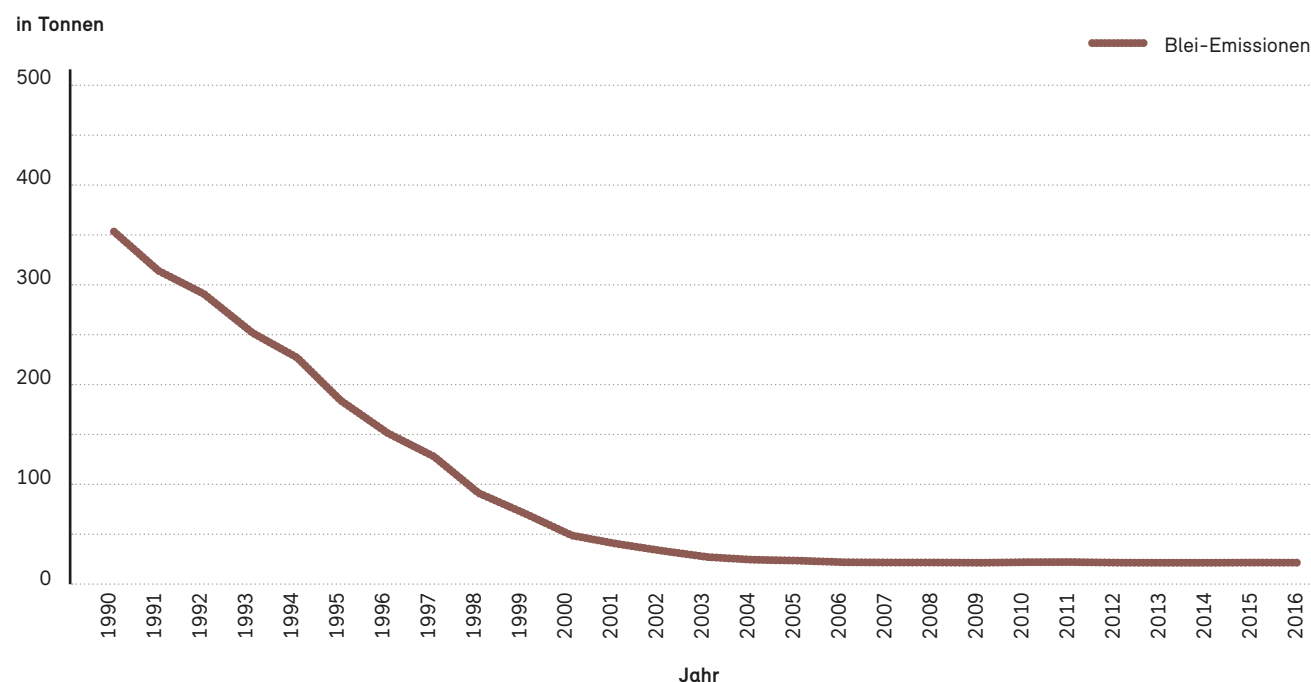
2.4.1 Landesweite Belastung durch Industrie, Gewerbe und Verkehr

Industrielle und gewerbliche Verarbeitungs- und Feuerungsprozesse sowie der Strassen- und Bahnverkehr führen zur Freisetzung von Schwermetallen und organischen Schadstoffen in die Luft. Die Emissionen werden in mehr oder weniger grosser Entfernung in die Böden eingetragen. Dies hat dazu geführt, dass es in der Schweiz keine völlig schadstofffreien Böden mehr gibt [68].

Gesetzliche Regelungen (z. B. strengere Vorschriften bei der Luftreinhaltung, Verbot von verbleitem Benzin, Klärschlammasbringungsverbot) haben mittlerweile den flächenhaften Schadstoffeintrag in die Böden deutlich reduziert. Die Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) zeigen, dass die Grenzwerte für Staubbiederschlag und Schwermetalle seit Jahren flächendeckend eingehalten werden [69]. Vor allem die Verbannung von bleihaltigem Benzin zeigt Wirkung (Abbildung 20).

Abbildung 20

Die Blei-Emissionen sind seit 1990 stark zurückgegangen. Es gilt weiterhin das Vorsorgeprinzip, weil sich Schwermetalle in Nahrungsketten und Ökosystemen anreichern und kaum eliminiert werden können. Quecksilber und Cadmium zeigen einen ähnlichen Verlauf.



Dementsprechend wurden im Rahmen der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) bei den Elementen Cadmium, Nickel, Chrom und Cobalt keine signifikanten Veränderungen über die letzten 20 Jahre beobachtet (Tabelle 4). Die Gehalte an Blei und Quecksilber im Oberboden haben sogar deutlich abgenommen. Zum einen wurden diese Elemente dem Boden entzogen, beispielsweise über die Ernte, zum andern wurden sie aufgrund der

Durchmischung von Ober- und Unterboden durch Tiere (Bioturbation) und Bodenbearbeitung in tiefere Bodenschichten verlagert.

Dass sich der Eintrag von Schwermetallen aus der Luft abschwächt, zeigen auch Messungen der Schadstoffkonzentrationen in Moosen [70]. Landesweit sank die Konzentration von Cadmium zwischen 1990 und 2010 um

Tabelle 4

Generelle Trends der Schwermetallgehalte der rund 100 Probenahmestandorte der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) nach Landnutzung [15].

→ Keine Veränderung der Gehalte. ↘ Abnehmende Gehalte. ↗ Zunehmende Gehalte (siehe Kapitel 2.4.3)

	Cadmium	Zink	Kupfer	Quecksilber	Blei	Nickel	Chrom	Cobalt
Ackerbau	→	↗	↘	↘	↘	→	→	→
Grasland								
intensiv	→	↗	↗	↘	↘	→	→	→
wenig intensiv	→	→	→	↘	↘	→	→	→
extensiv	→	→	↘	↘	→	→	→	→
Wald								
Laub-	→	→	→	↘	→	→	→	→
Misch-	→	→	↘	↘	↘	→	→	→
Nadel-	→	→	→	↘	→	→	→	→
Spezialkulturen								
Gemüse	→	→	→	→	→	→	→	→
Obst	→	→	→	→	→	→	→	→
Reben	→	→	→	↘	↘	→	→	→
Andere								
Schutzstandort	→	↘	→	↘	↘	→	→	→
Stadtpark	↘	↘	→	↘	↘	→	→	→

Cäsiumbelastung nach Tschernobyl

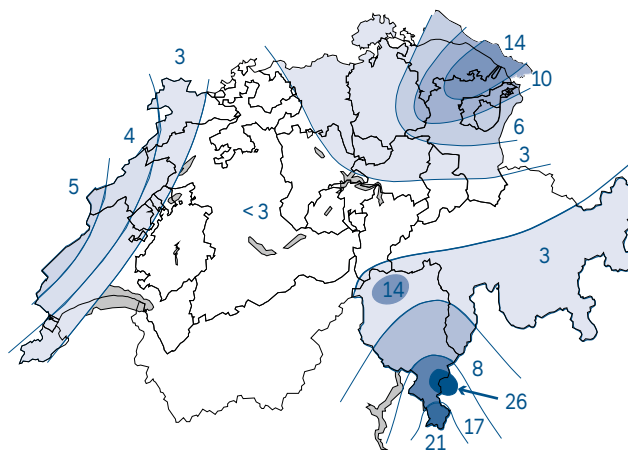
Die Reaktorkatastrophe in Tschernobyl am 26. April 1986 hat exemplarisch gezeigt, wie rasch Böden aufgrund eines einzigen Ereignisses grossflächig verunreinigt werden können. Die Explosion und der anschliessende Brand des Kernkraftwerks setzten grosse Mengen radioaktiver Stoffe frei. Ein Teil davon gelangte ab dem 30. April auch in die Schweiz. Abbildung 21 veranschaulicht die geographische Verteilung der Cäsium-Ablagerungen in der Schweiz nach dem Unfall [73]. Da beim Durchzug der radioaktiven Wolke im Tessin heftiger Regen fiel, wurde in dieser Region am meisten Radioaktivität auf Boden und Pflanzen abgelagert. Weniger stark betroffen waren der Bodenseeraum und einzelne Gebiete des Juras; in der übrigen Schweiz waren die Ablagerungen geringer als diejenigen der oberirdischen Kernwaffenversuche der 1950er- und 1960er-Jahre.

Auch heute, 30 Jahre nach dem Reaktorunfall, ist das langlebige Cäsium-137 (Halbwertszeit: 30 Jahre) noch nachweisbar. Dies gilt vor allem für das Tessin, obwohl dieses Nuklid seither abgeklungen ist und in tiefere Bodenschichten verlagert wurde [74]. Genau dort wächst allerdings der Hirschtrüffel, welcher die Eigenschaft hat, Cäsium anzureichern. Hirschtrüffel sind für Menschen zwar ungeniessbar, sie werden aber von Wildschweinen gerne gefressen. Wenn die Wildschweine im Monat vor der Jagd viele Hirschtrüffel fressen, kann ihr Fleisch auch heute noch stark belastet sein. 2015 wurde bei einem Wildschwein eine achtfache Überschreitung des geltenden Grenzwertes für Cäsium-137 festgestellt.

58 %, jene von Quecksilber um 40 %. Die Konzentration von Blei nahm gar um 87 % ab, jene von Zink um 33 %. Für Kupfer wurde in Moosen keine Veränderung beobachtet. Weil die bisher in die Böden eingebrachten Schadstoffe aber im Boden verbleiben, muss der Bodenschutz weiterhin die langfristige Entwicklung des Ausstosses von Schadstoffen in die Umwelt beobachten.

Abbildung 21

Ablagerung von Cäsium-137 in kBq pro Quadratmeter nach dem Reaktorunfall Tschernobyl [73].



Omnipräsent in Böden sind auch organische Schadstoffe. Aufgrund ihrer Langlebigkeit und Toxizität gerieten sie bereits relativ früh in den Fokus von Wissenschaft und Behörden. So enthält die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö) Grenzwerte für vier Gruppen organischer Schadstoffe: Polychlorierte Dioxine (PCDD), Furane (PCDF), polyzyklische Biphenyle (PCB) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Die Konzentrationen in den Schweizer Böden liegen in der Regel jedoch deutlich unter den Grenzwerten [67]. Während der letzten 30 Jahre blieben die Gehalte der schweren PAK stabil, jene der leichten PAK waren gar rückläufig [71]. Auch für PCB geben die zeitlichen Verläufe derzeit keinen Anlass zur Besorgnis. Für Chlorparaffine sind die Resultate nicht eindeutig und bedürfen weiterer Abklärungen [72].

2.4.2 Lineare Belastungen durch den Verkehr

Strassenstaub, Splitt und Spritzwasser von stark befahrenen Strassen sind durch Schadstoffe aus Brems-, Reifen- und Fahrabrieb sowie den Verbrennungsmotoren belastet. Der grösste Teil wird über die Strassentwässerung abgeführt. Ein Teil der Schadstoffe wird allerdings durch Wind- und Sprüheffekte verfrachtet und gelangt in die Rand- und Böschungsbereiche der Strassen. Die Schadstoffgehalte sind primär vom Verkehrsaufkommen abhängig.

Der Bodenbereich entlang von Verkehrswegen mit hohem Verkehrsaufkommen ist erheblich mit Blei, Cadmium, Zink und organischen Verbindungen (v.a. PAK) belastet, wie Untersuchungen auf nationaler Ebene [75] und aus den Kantonen [76, 77, 78] gezeigt haben. Die Schadstoffbelastung nimmt allerdings mit der Entfernung zur Strasse deutlich ab (Abbildung 22). Im Abstand von mehr als 5 bis 10 Metern liegen die Schwermetallgehalte in den meisten Fällen unterhalb der Richtwerte gemäss der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö).

Bezüglich der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) wird der Richtwert auch in grösseren Entfernungen meist überschritten. Für die PAK-Belastung sind vor allem Art und Zustand der Fahrbahn verantwortlich.

In der Praxis gilt bei grösseren Strassen ein 10 Meter breiter Streifen vorsorglich als belastet. [44] Bei Bauarbeiten darf der abgetragene Boden nicht auf unbelastete Landwirtschaftsflächen ausgebracht werden.

Belastete Bodenstreifen gibt es auch entlang von Eisenbahnlinien. Ursache ist hier der Abrieb von Schienen, Bremsen und Fahrleitungen (v.a. Cadmium). Das Ausmass der Belastung ist allerdings deutlich tiefer als bei

den Strassen [79]. Die beobachteten Werte liegen meist weit unter dem Richtwert.

2.4.3 Lokale und punktuelle Belastungen durch die Landwirtschaft

Organische und anorganische Schadstoffe werden nicht nur aus der Luft, sondern auch als Wirkstoffe in Pflanzenschutzmitteln sowie als Verunreinigungen in Mineral- und Hofdüngern grossflächig in landwirtschaftliche Böden eingetragen.

Einträge via Hofdünger

Die NABO beobachtet kontinuierlich steigende Konzentrationen von Zink und Kupfer in Böden mit einer intensiven Graslandnutzung (Abbildung 23). Eine unveränderte Zunahme würde in 80 bis 200 Jahren zu einer Richtwertüberschreitung führen [15]. Messungen in den Kantonen bestätigen die Zunahme an Kupfer und Zink in Schweizer Landwirtschaftsböden. Im Kanton Aargau weist fast die Hälfte der ackerbaulich genutzten Standorte eine Zunahme des Kupfer-Totalgehalts auf [80]; im Kanton St.Gallen wurde eine bedeutende Zunahme des Zinkgehalts verzeichnet [81].

Besonders starke Zunahmen der beiden Schwermetalle werden nachweislich durch den Einsatz von Hofdünger

Abbildung 22

Bodenbelastung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und Blei entlang von Strassen in Abhängigkeit von der Distanz zum Strassenrand und dem Verkehrsaufkommen [78]. MFz=Motorfahrzeuge



(Schweine- und Rindergülle, aber auch Mist) verursacht [15]. Zink und Kupfer werden dem Tierfutter als Nahrungsergänzung und zur Leistungssteigerung beigegeben und gelangen über den Hofdünger in den Boden. Der Gehalt der beiden Elemente in der Gülle kann je nach Bewirtschaftung beträchtlich variieren.

Analysen haben ergeben, dass die Zufuhr an Zink und Kupfer bei Schweinen und Rindvieh in der Regel über den Empfehlungen liegt [82]. Es ist also anzunehmen, dass die Mengen an Zink und Kupfer im Tierfutter deutlich reduziert werden könnten – und zwar ohne negative Effekte für Tiere und Landwirte.

Die Zunahme des Kupfer- und Zinkgehalts im Boden widerspricht der langfristigen Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, wie sie durch Artikel 33 des Umweltschutzgesetzes gefordert wird. In solchen Fällen müssen die Kantone im Einvernehmen mit dem Bund Massnahmen ergreifen. Ein zu hoher Zinkgehalt im Boden führt zu einem reduzierten Wachstum und zu Stoffwechselstörungen bei Pflanzen. Landwirte müssen mit Ernteverlusten rechnen.

Mit der Gülle gelangen auch Tierarzneimittel auf die Felder, Wiesen und Weiden. Denn der überwiegende Teil der Wirksubstanzen wird durch die Nutztiere in unveränderter Form wieder ausgeschieden. Tierarzneimittel können sich im Boden nicht nur anreichern und die Zusammensetzung

der Mikroorganismen verändern [83, 84], sondern auch die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen begünstigen [85]. Bezüglich Häufigkeit und Konzentrationen von Antibiotika in Schweizer Landwirtschaftsböden gibt es keine aktuellen Untersuchungen im Sinne einer Zustandserhebung [67]. Vorhandene Resultate stammen von experimentellen Versuchen.

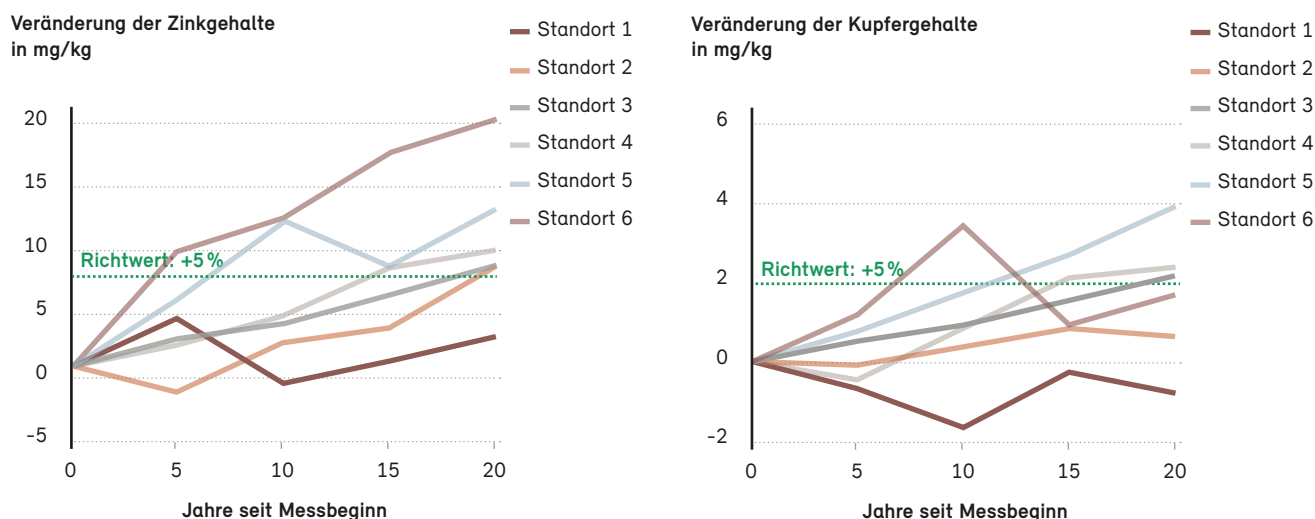
Einträge durch mineralische Dünger

Aktuelle Untersuchungen von Bodenproben aus nationalen und kantonalen Monitoringprogrammen zeigen, dass die Verwendung von Mineraldünger in der landwirtschaftlichen Produktion zu einem erhöhten Eintrag von potenziell toxischen Metallen in Ackerböden führen kann [86]. Dies gilt vor allem für Cadmium und Uran [87].

Die Anforderungen des Düngerrechts für mineralische, organische und organisch-mineralische Dünger werden zurzeit in Bezug auf die Schwermetallgehalte nicht immer vollständig eingehalten. Insbesondere Überschreitungen des Cadmium-Grenzwertes werden relativ häufig festgestellt. Die Analyseresultate von zehn Schwermetallen zeigen, dass mineralische, phosphathaltige Dünger besonders hohe Schwermetallgehalte aufweisen [88]. Es ist daher erfreulich, dass durch die kontinuierliche Optimierung des Nährstoffmanagements in der Schweizer Landwirtschaft der Import von mineralischem Phosphordünger seit Beginn der 1990er-Jahre reduziert werden konnte

Abbildung 23

Veränderung der Zink- und Kupfergehalte im Boden bei intensiver Graslandnutzung an 6 Standorten im NABO-Messnetz [15].



[64]. Dennoch ist das Potenzial zur Reduktion von Phosphordünger noch nicht ausgeschöpft, wie die nationale Phosphorbilanz zeigt: 2012 resultierten im Durchschnitt jährliche Überschüsse von 2 kg Phosphor pro Hektare Landwirtschaftsfläche [89]. Die Überversorgung der Böden mit Phosphor zeigt sich sowohl beim Ackerbau wie auch beim Grünland [90].

Belastung mit Pflanzenschutzmitteln

In landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten ist die Umwelt Pflanzenschutzmitteln ausgesetzt. Es besteht nicht nur ein Risiko für die aquatische und oberirdische Biodiversität (z. B. Fische, Amphibien, Bestäuber) [91], sondern auch für die Bodenbiodiversität und damit für die Bodenfruchtbarkeit. Das Umweltziel Landwirtschaft für Pflanzenschutzmittel («Keine Beeinträchtigung von Umwelt und Gesundheit durch Pflanzenschutzmittel aus der Landwirtschaft») gilt daher als nicht erreicht [64].

In der Schweiz sind rund 250 Wirkstoffe zugelassen. Auf den einzelnen landwirtschaftlich genutzten Standorten der Nationalen Bodenbeobachtung NABO werden im Durchschnitt jährlich 10 Wirkstoffe von Pflanzenschutzmitteln ausgebracht. Eine NABO-Pilotstudie hat gezeigt, dass von 80 Wirkstoffen 73 % auch längere Zeit nach

der Anwendung im Boden nachweisbar sind [67]. Atrazin wurde gar in 85 % der Bodenproben vorgefunden. Ein eigentliches Monitoring für Pflanzenschutzmittel im Boden existiert allerdings nicht.

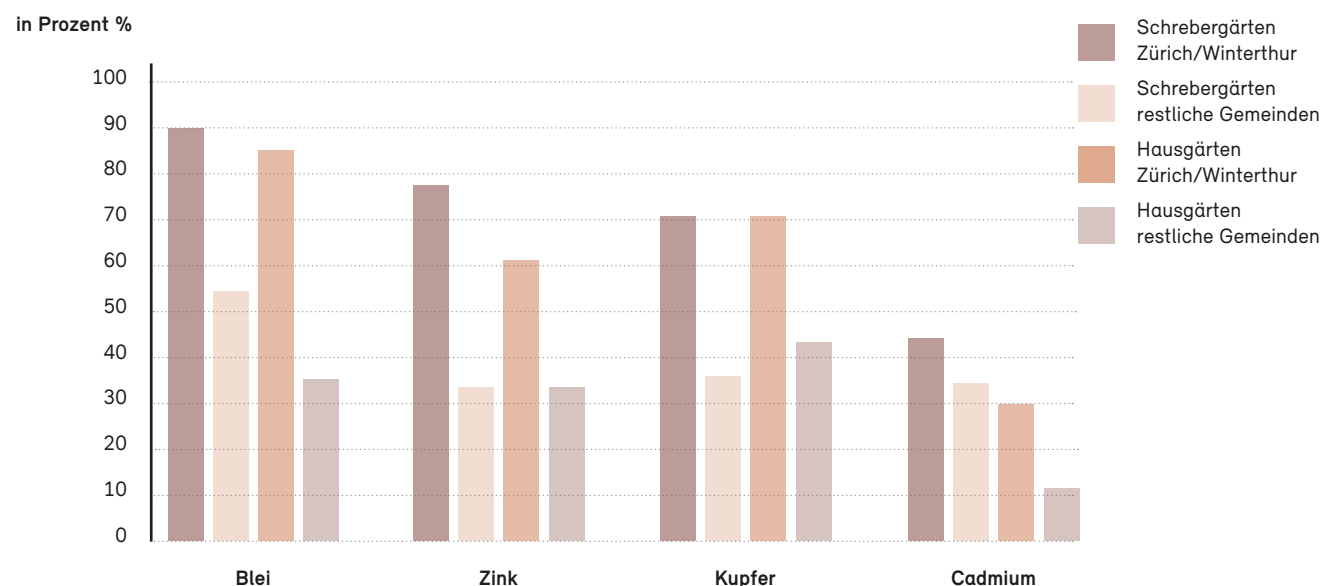
Zur Belastung des Bodens mit Organochlorpestiziden liegt eine kantonale Studie vor [92]. Es wurden Spuren von Organochlorpestiziden und ihren Abbauprodukten im tiefen Mikrogrammbereich in allen untersuchten Bodennutzungstypen entdeckt. Organochlorpestizide werden kaum noch angewendet, sind aber chemisch sehr stabil. Es handelt sich dabei um Schädlingsbekämpfungsmittel wie Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT), Aldrin, Dieldrin, Endosulfan und Lindan, die ab den 1950er-Jahren zur Bekämpfung vor allem von Insekten, Schadpilzen und Milben zum Einsatz kamen. Mit Inkrafttreten der Stockholmer Konvention 2004 und deren Ergänzung 2009 wurden die gefährlichsten Organochlorpestizide weltweit verboten oder deren Nutzung stark eingeschränkt. Ihre Abbauprodukte können aber noch nach Jahrzehnten im Boden nachgewiesen werden.

Kupfergehalte in Rebbergen

Anhaltende Zunahmen an Kupfer werden an Standorten mit landwirtschaftlichem Spezialanbau in der gan-

Abbildung 24

Prozentualer Anteil Zürcher Schrebergärten und Hausgärten, deren Schwermetallgehalt höher als die Richtwerte der Bundesverordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) ist. Proben der Fachstelle Bodenschutz von 205 Schrebergärten und 94 Hausgärten aus verschiedenen Gemeinden [103].



zen Schweiz registriert, allen voran Rebbaugelände und Baumschulen [66, 93, 94]. Dies ist nicht überraschend, da Kupfer nicht biologisch abbaubar ist und durch den Spritzeinsatz weiterhin in grösseren Mengen ausgebracht wird, als es aus dem Boden ausgewaschen werden kann.

Vor allem in den 1920er- bis 1950er-Jahren wurde sehr viel Kupfer verwendet. Seit den 1980er-Jahren werden deutlich geringere Kupfermengen pro Hektare und Jahr ausgebracht [95]. Die Anreicherung konnte dadurch zwar nicht gestoppt, aber verlangsamt werden.

2.4.4 Lokale und punktuelle Belastungen durch private Haushalte

Siedlungsböden sind aufgrund ihrer starken menschlichen Beeinflussung meist mit Schadstoffen belastet [96, 97, 98]. Vor allem die langjährige und intensive Nutzung von Haus- und Familiengärten hat in vielen Gartenböden deutliche Spuren hinterlassen (Abbildung 24). Verglichen

mit der Situation im übrigen Siedlungsgebiet weisen sie die grösste Schadstoffbelastung auf [99]. Dies ist vor allem auf den hohen Einsatz von Mineraldünger, belastetem Kompost, Pflanzenschutzmitteln und Asche (aus Feuerstelle, Grill, Holzheizung) sowie auf das Vergraben und Verbrennen von Abfall vor allem in älteren Anlagen zurückzuführen. Hinzu kommt die Lage der Gärten im städtischen Umfeld (Schadstoffeinträge aus Industrie, Gewerbe und Verkehr) und zum Teil auf ehemaligen und rekultivierten Deponien.

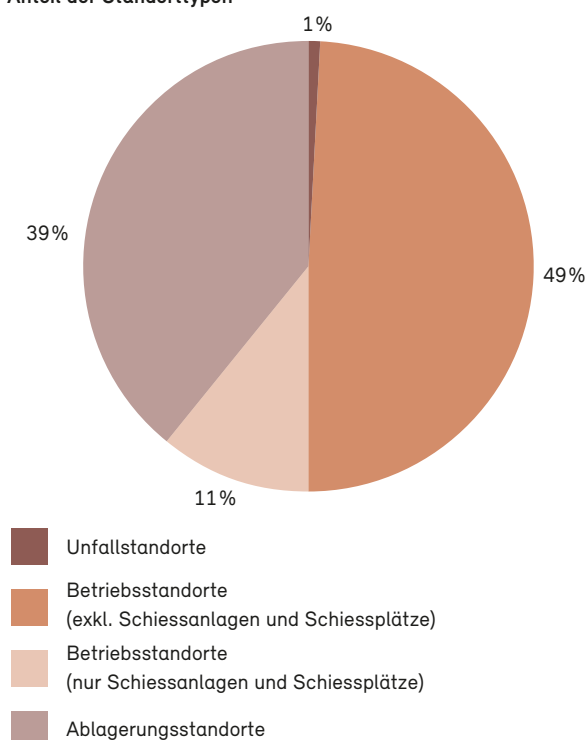
Vor allem Dünger und Pflanzenschutzmittel wurden und werden oft stark überdosiert verwendet [100]. Die durchschnittlich eingesetzte Wirkstoffmenge pro Quadratmeter liegt bei den meisten Produkten wesentlich über den notwendigen Dosierungen (zum Teil bis fünfzigmal über den Empfehlungen).

Kantonale Untersuchungen dokumentieren die hohe Schadstoffbelastung des Bodens [44, 92, 99, 101, 102], wobei die Bodenbelastung innerhalb eines Areals von Einzelgarten zu Einzelgarten extrem unterschiedlich sein kann. Die PAK-Konzentrationen sind vergleichbar mit der Situation an Strassenrändern, die Bleikonzentration in vielen Fällen sogar höher als an Strassen [44].

Abbildung 25

Ursachen der bestehenden Umweltbeeinträchtigungen an den 38 000 belasteten Standorten der Schweiz [105]. Betriebsstandorte (inklusive Schiessanlagen und Schiessplätze) machen weit über die Hälfte aller belasteten Standorte aus.

Anteil der Standorttypen



Obwohl die Anwendung von Organochlorpestiziden schon jahrzehntelang verboten ist, wurden hohe Gehalte in den Böden von Familiengärten nachgewiesen [92]. Es ist davon auszugehen, dass in den 1970er- und 1980er-Jahren noch bedeutend höhere Gehalte in den Böden vorlagen und damit die Gefährdung von Pflanzen, Tieren und Menschen grösser war. Die heutigen Konzentrationen in Gärten könnten neben der chemischen Stabilität der Wirkstoffe eine Folge der weiteren Anwendung und des Aufbrauchs von Restbeständen nach dem Verkaufs- und Anwendungsverbot sein.

Meist bedeutet die Belastungssituation keine gesundheitliche Gefährdung für die Gärtnerinnen und Gärtner, da die meisten Nahrungspflanzen Schwermetalle und PAK nur in geringen Mengen aus dem Boden aufnehmen. Kleinkinder sollten allerdings stark belasteten Boden nicht verschlucken. Im Sinne der Vorsorge und dem nach-

haltigen Umgang mit Böden sollten Gärten nicht weiter belastet werden.

Schadstoffbelastung durch Klärschlammentsorgung

Ab den 1960er-Jahren wurde der Klärschlamm aus den Abwasserreinigungsanlagen an die Land- und Landwirtschaft abgegeben. Ziel war es, die im Schlamm enthaltenen Nährstoffe und organischen Substanzen in den natürlichen Kreislauf zurückzuführen. Allerdings ist Klärschlamm auch mit Schwermetallen, Medikamentenrückständen, Plastikteilen und Hormonen belastet. In zu hoher Konzentration können diese Stoffe schädliche Auswirkungen auf die Ökosysteme und den Menschen haben.

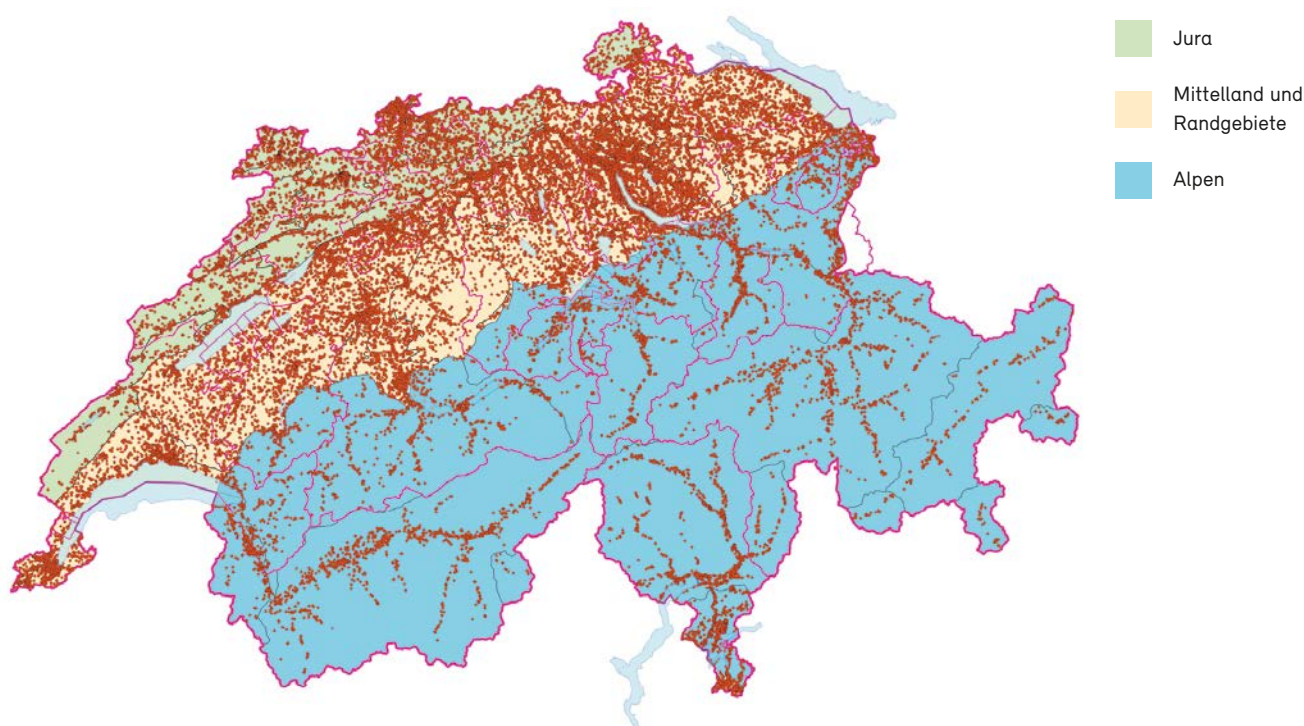
Seit 2006 ist die Nutzung von Klärschlamm als Dünger für die Landwirtschaft aus gesundheitlichen Gründen und zum Schutz der Böden nicht mehr erlaubt. Klärschlamm wird heute in speziellen Anlagen oder in Kehrichtver-

Abbildung 26

Verteilung der 38 000 belasteten Standorte in der Schweiz [105].

Im Mittelland entfallen auf 1 Quadratkilometer durchschnittlich 1,9 belastete Standorte, im Jura sind es 1,2 und im Alpenraum lediglich 0,3.

Die regionale Verteilung widerspiegelt die Besiedelungsdichte und die unterschiedliche Intensität der wirtschaftlichen Aktivitäten. Jeder Punkt entspricht einem belasteten Standort (nicht flächengetreu).



brennungsanlagen verbrannt. Alternativ wird er nach dem Trocknungsprozess auch als Zusatzbrennstoff in Zementwerken verwendet.

Weil sich Schwermetalle in Böden anreichern, sind die Spuren der Klärschlammausbringung vor allem während den 1960er- und 1970er-Jahren noch heute in den Böden nachweisbar. Insgesamt führte die Klärschlammausbringung zu einer erhöhten Belastung der Böden mit Schwermetallen (v. a. Cadmium, Kupfer und Zink).

Für den Kanton Zürich ist das Ausmass der Belastung bekannt. Im Prüfperimeter für Bodenverschiebung sind rund 400 landwirtschaftlich genutzte Parzellen mit einer Gesamtfläche von rund 400 Hektaren verzeichnet, auf denen früher Klärschlamm ausgebracht worden war. Zwölf Standorte der kantonalen Bodenüberwachung (KABO) des Kantons Zürich befinden sich auf solchen ehemaligen Klärschlammausbringflächen. Die Messungen zeigen, dass die Cadmiumgehalte zwischen 2000 und 2010

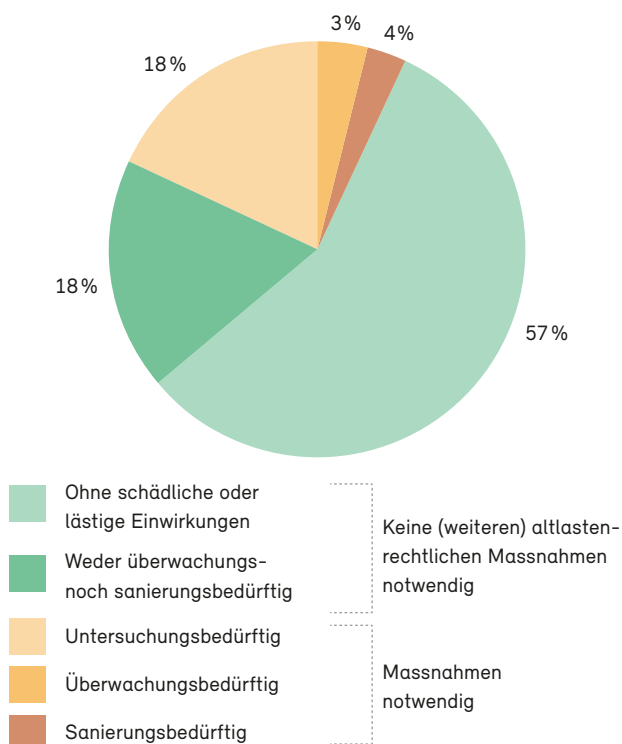
nicht zugenommen, aber auch nicht abgenommen haben [104]. Zwei Drittel der Standorte weist Überschreitungen des Richt- oder Prüfwertes auf.

2.4.5 Weitere lokale und punktuelle Belastungen

In der Schweiz gibt es zahlreiche, räumlich begrenzte Bodenbelastungen, die von Abfällen aus einer klar definierten Quelle stammen. Dazu gehören (meist ehemalige) Industriestandorte, Ablagerungen von Siedlungs-, Gewerbe- und Industrieabfällen (Deponien), Schiessanlagen und Schiessplätze sowie Unfallstandorte (Abbildung 25). Ursache für die bestehende Umweltbeeinträchtigung ist vor allem der sorglose Umgang mit umweltgefährdenden Stoffen und problematischen Abfällen im vergangenen Jahrhundert.

Gestützt auf die systematische Erfassung durch die Fachstellen sämtlicher Kantone und des Bundes existieren landesweit rund 38 000 belastete Standorte (Abbildung 26). Diese bedecken eine Fläche von rund 225 km², was 0,6 % der Landesfläche oder in etwa der Fläche des Kantons Zug entspricht. Über die Hälfte der Standorte liegt in den Bauzonen. Aufgrund bisheriger Erhebungen

Abbildung 27
Status der 38 000 belasteten Standorte gemäss Altlasten-Verordnung.



Quelle: BAFU

Bodenbelastungen auf Schiessständen

In der Schweiz gibt es rund 1500 stillgelegte und rund 2500 in Betrieb stehende Gemeindschiessanlagen. Die Kugelfänge dieser Anlagen enthalten insgesamt mehrere Tausend Tonnen Blei und andere Schwermetalle aus dem Schiessbetrieb [106].

Auf vielen aktiven Schiessanlagen wird immer noch direkt ins Erdreich geschossen. Das Schiessen verursacht heute den grössten Eintrag von Blei in die Umwelt. Wenn schadstoffbelastete Kugelfänge das Grundwasser, oberirdische Gewässer oder den Boden gefährden, müssen Massnahmen zur Beseitigung der Gefahr ergriffen werden.

Durch den Einbau eines künstlichen Kugelfangsystems, das die Geschosse sowie deren Splitter, Stäube und Eluate zurückhält, kann die Bodenbelastung vermieden werden. Immer mehr Anlagen werden mit einem solchen System ausgestattet.

gelten 10 Prozent der belasteten Areale (4000) als Altlasten und stellen ein potenzielles Risiko für Mensch und Umwelt dar (Abbildung 27). Rund 1000 Altlasten wurden bis 2015 bereits saniert.

Anfang 1985 trat in der Schweiz das Umweltschutzgesetz in Kraft. Seither hat der Bund die Vorschriften für den Umgang mit umweltgefährdenden Abfällen und Chemikalien schrittweise verschärft. Die Entstehung von neuen belasteten Betriebsstandorten oder Deponie-Altlasten ist nahezu ausgeschlossen.



2.5 Humusverlust

Abgestorbene Pflanzenteile, tote Tiere und Tierdung werden von Bodenlebewesen als Nahrung verwendet und zu einer mehr oder weniger stabilen organischen Substanz umgebaut, dem Humus. Bei hoher biologischer Aktivität sind die Humusstoffe im Oberboden weitgehend mit den mineralischen Bodenpartikeln verbunden und tragen zur Ausbildung eines dunklen Bodenhorizonts mit lockerer Struktur bei.

Der Humus im Boden beeinflusst direkt oder indirekt die meisten Bodenfunktionen. Er ist Nährstoffquelle für die Pflanzen sowie Speichermedium für Wasser, Schadstoffe und Kohlenstoff. Im Nährstoff-, Wasser- und Kohlenstoffkreislauf spielt der Humus deshalb eine zentrale Rolle. Er begünstigt zudem die Bildung von stabilen Krümeln und trägt damit zum Schutz der Bodenoberfläche vor Erosion bei.

Der Humusgehalt ist nicht nur für die Bodenfruchtbarkeit von herausragender Bedeutung, sondern auch für den Kohlenstoffkreislauf. Böden sind die grössten terrestrischen Kohlenstoffspeicher und übernehmen damit eine wichtige Funktion bei der Fixierung des klimarelevanten Gases Kohlendioxid (CO₂). Den Mooren, die seit Ende der letzten Eiszeit weltweit gewachsen sind, wird beispielsweise eine kühlende Wirkung auf das globale Klima zugeschrieben.

Weltweit ist in Böden mehr Kohlenstoff gespeichert als in der Atmosphäre und in der Vegetation zusammen. Organische Böden (Moorböden) speichern dabei rund ein Drittel des organischen Kohlenstoffs, der in Böden vorkommt – und dies obwohl sie nur drei Prozent der Landoberfläche bedecken [107]. Bereits kleine Abnahmen von organischer Substanz in diesen Böden führen daher zu CO₂-Veränderungen in der Atmosphäre.

Der Mensch hat den Kohlenstoffspeicher Boden stark beeinträchtigt: Bei der Umwandlung von natürlichen Ökosystemen in Agrarökosysteme sind je nach Klimazone 60 % bis 75 % des Bodenkohlenstoffs verloren gegangen [108]. Der Humusgehalt der Schweizer Böden variiert beträchtlich und reicht von fast 100 % (intakte organische Hochmoorböden) bis weit unter 1 % (Rohböden; viele mineralische Ackerböden).

Humusgehalt in mineralischen Landwirtschaftsböden

Der Gehalt an organischer Substanz in den Kulturböden wird massgeblich von der landwirtschaftlichen Aktivität gesteuert (z. B. Art der Bewirtschaftung, Bewirtschaftungsintensität). Bei den genutzten mineralischen Böden zeigt sich, dass Graslandböden hohe und Ackerböden meist tiefe Humusgehalte aufweisen [15, 109]. Wird eine Wiese in einen Acker umgewandelt oder eine Fläche langfristig ackerbaulich genutzt, sinkt der Humusgehalt im Boden, wie Langzeitexperimente gezeigt haben [110, 111].

In mineralischen Ackerböden wurde ein Rückgang des organischen Kohlenstoffs innerhalb der letzten hundert Jahre festgestellt [112]; die Gehalte scheinen sich aber seit den 1990er-Jahren stabilisiert zu haben [15, 113, 114]. Messungen auf Landwirtschaftsbetrieben zeigten allerdings, dass viele Ackerbaubetriebe ohne oder mit geringer Tierhaltung (und damit reduziertem Zugang zu organischen Düngern) negative Humusbilanzen aufweisen [115]. Die Verringerung der organischen Substanz hat zur Folge, dass weniger Kohlenstoff im Boden enthalten ist; ausserdem werden die Böden anfälliger für Erosion, der Bodenwasser- und Nährstoffhaushalt wird beeinträchtigt und die biologische Aktivität nimmt ab. Dies kann langfristig zu einer reduzierten Bodenfruchtbarkeit führen. Insgesamt muss aber festgestellt werden, dass nicht genug Bodeninformationen vorhanden sind, um flächendeckend verlässliche Aussagen zur Entwicklung des Gehalts an organischer Substanz in mineralischen Böden zu machen.

Organische Substanz in Moorböden

Allein seit 1900 sind in der Schweiz 82 % der Moore verschwunden [116]. Vor allem durch den Torfabbau und die nachfolgende energetische Nutzung der organischen Substanz wurden gewaltige Mengen an CO₂ freigesetzt [117]. Mit der anschliessenden landwirtschaftlichen Nutzung der entwässerten organischen Böden wurden infolge der einsetzenden mikrobiellen Zersetzung des Torfs ebenfalls grosse Mengen an CO₂ freigesetzt [118]. Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung dieser Böden führt bis heute zu anhaltenden CO₂-Freisetzungen [15, 119, 120]. Dabei kann Grasland nach neusten Untersuchungen ähnlich hohe Verlustraten aufweisen wie Ackerflächen [121]. Insgesamt haben sich die Treibhausgasemis-

sionen aus genutzten Moorflächen seit Anfang des 20. Jahrhunderts sogar verdoppelt [117]. Diese Erhöhung trat trotz der kleiner werdenden Fläche organischer Böden auf. Sie ist eine Folge der zunehmenden Intensivierung der Landnutzung.

Seit 1850 sind ca. 85 % des ursprünglich vorhandenen Kohlenstoffs in Moorböden verschwunden und haben zum CO₂-Anstieg in der Atmosphäre beigetragen [117]. Bei gleichbleibender Nutzung wird der noch vorhandene Kohlenstoffvorrat in genutzten organischen Böden in rund 185 Jahren vollständig oxidiert sein. Die für das Treibhausgasinventar erhobenen Schätzungen gehen von 0,7 Millionen Tonnen CO₂ aus, die in der Schweiz gegenwärtig pro Jahr aus entwässerten Mooren entweichen [122, 123]. Dies entspricht 14 % der landwirtschaftlichen Emissionen.

Der Torfchwund führt zur Absenkung des Geländes. Seit der ersten Juragewässerkorrektur (1863 bis 1885) wurde beispielsweise im Grossen Moos eine maximale Torfsackung von 2,3 Metern beobachtet [42]. Dies entspricht beinahe der bei der ersten Juragewässerkorrektur vorgenommenen Seespiegelabsenkung von 2,7 Metern. In Böden, die mehrmals pro Jahr durch Bodenbearbeitungs- oder Erntemassnahmen gelockert werden, beträgt der Verlust noch heute bis zu 2 Zentimeter pro Jahr. Im Zuge der Mineralisation des Torfkörpers wurden so seit Beginn der Entwässerung mehrere hundert Tonnen Bodenkohlenstoff je Hektare als CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt. Durch diesen fortschreitenden Boden- und Niveauverlust werden nicht nur die Bodenfruchtbarkeit und die Möglichkeiten zur Bodenbearbeitung (z. B. fehlendes Substrat, Freilegung von Drainagen, Einmischung von Tonlagen und Seekreide) massiv beeinträchtigt, sondern auch das Klima. Bereits mittelfristig werden bei gleich bleibender Bewirtschaftung grosse Flächen ihre uneingeschränkte Nutzungseignung verlieren.

Das Foto am Anfang dieses Kapitels zeigt dies eindrücklich: Die Humusschicht des abgebildeten Ackers im Grossen Moos war ursprünglich mehrere Meter dick. Durch ein tiefes Pflügen wurden die ehemaligen Seeablagerungen (graue Schicht) aufgerissen. Ziel war es, Teile der verbliebenen Torfschicht unter den Grundwasserspiegel und das darunterliegende mineralische Material an die Oberfläche

zu bringen. Der Abbau von Humus konnte durch diese Massnahme zwar gebremst, aber nicht gestoppt werden.

Eine nachhaltige und dennoch ökonomisch interessante intensive Bewirtschaftung von Moorböden, die gleichzeitig deren Kapazität als Kohlenstoffspeicher bewahrt, gibt es nach derzeitigem Stand des Wissens nicht [124]. Alternativnutzungen (z. B. Verwendung von Schilf als Bau- und Dämmstoff oder zur Gas- und Energiegewinnung) oder die Wiedervernässung geeigneter Flächen (inklusive einer Monetarisierung der Ökosystemleistung «Kohlenstoffspeicherung» im Rahmen der Klimapolitik) sind in der Schweiz bislang nicht vertieft diskutiert worden [125].

Auch in den meisten geschützten Böden der Moore von nationaler Bedeutung sinkt der Humusgehalt kontinuierlich, weil der Wasserhaushalt der Feuchtgebiete gestört ist (z. B. durch früher angelegte aber noch immer funktionsfähige Drainagen und Entwässerungsgräben) [127]. Vermeintlich intakte Moore werden so zu CO₂-Quellen.

Klimawandel und Humusvorrat

Prognosen zur Entwicklung des Humusgehalts im Boden unter dem Regime des Klimawandels lassen sich kaum machen, da sich sowohl wärmere Temperaturen als auch vermehrt auftretende Trockenphasen auf verschiedene Komponenten des Kohlenstoffkreislaufs auswirken [128]. Erschwerend kommen in der Schweiz die topographische Gliederung mit einer hohen Standortvielfalt und der grossflächige Landnutzungswandel in der subalpinen Zone hinzu (Vergandung) [129]. Eine Studie mit Waldböden unterschiedlicher Höhenlage deutet – ebenso wie Erwärmungsexperimente an der Waldgrenze – auf erhebliche Kohlenstoffverluste in einem zukünftig wärmeren Klima hin [130, 131]. Basierend auf Daten der Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich auf landwirtschaftlich genutzten Standorten der kantonalen Bodendauerüberwachung wurde die Beziehung zwischen der Jahresmitteltemperatur und dem Humusgehalt von Böden analysiert [132]. Daraus lässt sich ablesen, dass der Humusgehalt um rund ein Viertel abnehmen könnte, wenn im Zürcher Landwirtschaftsgebiet die mittlere Jahrestemperatur um 1 °C steigt. Ein CO₂-Ausstoss von bis zu 26 Gramm pro Kilogramm Boden wäre die Folge. Gleichzeitig würde das Rückhaltevermögen der Böden für Nähr- und Schadstoffe sinken.

Aus der Waldbodendatenbank der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL lässt sich ableiten, dass eine Verringerung des Jahresniederschlags um 100 mm zu einer Abnahme des Bodenkohlenstoffgehalts um 8 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar führen könnte [133]. Mit den Studien entlang von Höhengradienten lassen sich die Auswirkungen von Temperatur- und Niederschlagswandel allerdings nur schwierig voneinander trennen. Einen Ausweg bieten wiederholte Inventuren des Bodenkohlenstoffgehalts. In den Bayerischen Alpen wurde auf diese Weise über die letzten Jahrzehnte hinweg ein Verlust von 14 % der organischen Substanz im Oberboden unter Wald festgestellt [134]. Die Abnahme wurde primär höheren Durchschnittstemperaturen zugeschrieben.

Die Quantifizierung der Auswirkung des Klimawandels auf den Gehalt an organischer Substanz in Schweizer Böden bleibt eine grosse Herausforderung. Als gesichert gilt, dass sich die Umsetzungsraten (Kohlenstoffeintrag, CO₂-Freisetzung) – und infolgedessen auch die Zusammensetzung und horizontweise Verteilung der organischen Substanz im Boden – unter einem neuen klimatischen Milieu standortspezifisch verändern werden. Die Auswirkung auf den Gesamtvorrat an organischer Substanz bleibt hingegen unklar.

Sanierung defekter Drainagen:

Allen Bodenfunktionen Beachtung schenken

Rund 192 000 ha landwirtschaftlich genutzter Böden gelten als drainiert [126]. Dies entspricht 5 % der Landesfläche bzw. fast einem Fünftel (18 %) der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Häufig sind die bestehenden Anlagen bereits 60 bis 80 Jahre alt, manche gar über 100 Jahre. Sie haben ihr hypothetisches Lebensende längst erreicht. Eine Evaluation zeigt, dass über ein Drittel der Anlagen (68 400 ha) in schlechtem oder unbekanntem Zustand ist. Weil viele Drainagen bald gleichzeitig ans Ende ihrer Lebensdauer kommen, werden allein in den kommenden 10 bis 15 Jahren bis zu 1,7 Milliarden Franken zur Werterhaltung benötigt. Es stellt sich daher die Frage, welche anderen Möglichkeiten für eine zukünftige nachhaltige Nutzung dieser Gebiete unter Berücksichtigung des Boden-, Biodiversitäts- und Klimaschutzes denkbar sind.



2.6 Eutrophierung und Versauerung

Stickstoff ist ein elementarer Baustein aller Lebewesen. Die Pflanzen nehmen ihn über die Wurzeln als Ammonium (NH_4) oder Nitrat (NO_3) auf, um pflanzeigene Eiweisse (Proteine) aufzubauen, die sie für ihr Wachstum und die Fortpflanzung benötigen. Pflanzenverfügbare Stickstoff ist von Natur aus in den meisten Böden Mangelware, weshalb die meisten Pflanzenarten sich an ein geringes Angebot angepasst haben. Der Mensch hat allerdings in den letzten 100 Jahren massiv in den natürlichen Stickstoffkreislauf eingegriffen und die Stickstoffflüsse aufgebläht [135]. Stickstoffverbindungen gelangen in riesigen Mengen als Mineraldünger, Gülle und aus Verbrennungsprozessen direkt oder indirekt über die Luft in die Böden.

Flächendeckende Stickstoffdüngung

Während der natürliche atmosphärische Eintrag von biologisch aktivem Stickstoff in die Böden lediglich 0,5 bis 2 kg pro Hektare und Jahr beträgt, hat sich dieser Wert in den letzten Jahrzehnten vervielfacht. In der Schweiz ge-

langen Jahr für Jahr durchschnittlich 16 kg Stickstoff über die Luft auf eine Hektare Boden (Abbildung 28). Verglichen mit den Düngergaben der Landwirtschaft entspricht dies der ausgebrachten Menge für mittel intensiv genutzte Wiesen. Je nach Standort schwankt die eingetragene

Abbildung 29

Mit zunehmendem Stickstoffeintrag nimmt die Anzahl von Mykorrhiza-Arten an Buchenwurzeln ab [144].

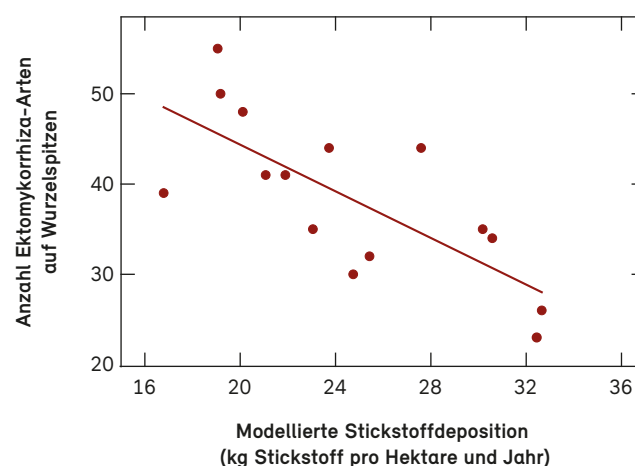
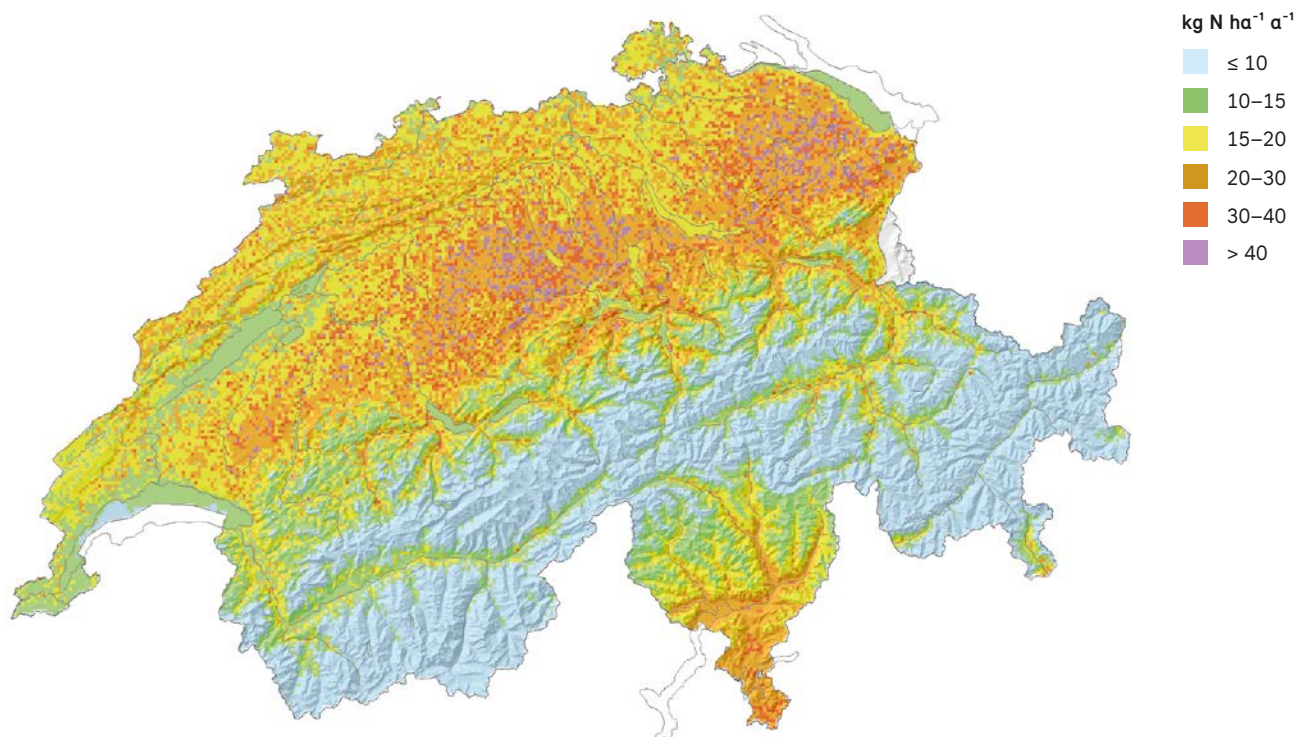


Abbildung 28

Stickstoffeintrag in die Schweizer Böden über die Atmosphäre für das Jahr 2010. Insgesamt gelangen auf diesem Pfad jährlich 66 700 Tonnen Stickstoff in die Böden (1 x 1 km Raster; in kg N pro Hektare und Jahr) [139].



Menge zwischen 3 und über 50 kg. Der durchschnittliche Eintrag in Wälder liegt bei 23 kg, da Bäume mit ihren Kronen die Stickstoffverbindungen regelrecht auskämmen.

Die durch den Menschen verursachten Stickstoffeinträge in den Boden stammen zu rund zwei Dritteln aus der Landwirtschaft (Viehhaltung, Güllelagerung und -ausbringung) und zu einem Drittel aus Verbrennungsprozessen (Verkehr, Industrie und Gewerbe, Haushalte). Die

Tabelle 5

Kritische Eintragswerte von Stickstoff in verschiedene Lebensräume und deren Überschreitungen [139].

Der «kritische Eintragswert» ist jene Menge Stickstoff, die ein empfindliches Ökosystem wie einen Wald, ein Moor oder eine Trockenwiese erträgt, ohne Schaden zu nehmen.

Lebensraum	Kritischer Eintragswert (Kilogramm Stickstoff pro Hektare und Jahr)	Anteil der Fläche mit Überschreitung des kritischen Eintrags- werts an der Gesamt- fläche des Lebens- raums in der Schweiz
Hochmoore	5 – 10	98 %
Flachmoore	10 – 15	76 %
Trockenwiesen	7 – 15	49 %
Wälder	5 – 20	95 %

Erhöhung des Stickstoffangebots (Eutrophierung) ist auf den Äckern erwünscht, in naturnahen und natürlichen Lebensräumen aber schädlich. Einzelne Pflanzenarten können dank der Düngung deutlich schneller wachsen als andere, die überwuchert und beschattet werden und schliesslich aus dem Pflanzenbestand verschwinden [136, 137, 138]. Gleichzeitig steigt der Anteil an stickstoffliebenden Pflanzenarten, die den Nährstoff besser verwerten können als solche, die an eine geringe Stickstoffversorgung angepasst sind, wie dies von Natur aus die Regel ist.

Stickstoffüberschuss in Ökosystemen

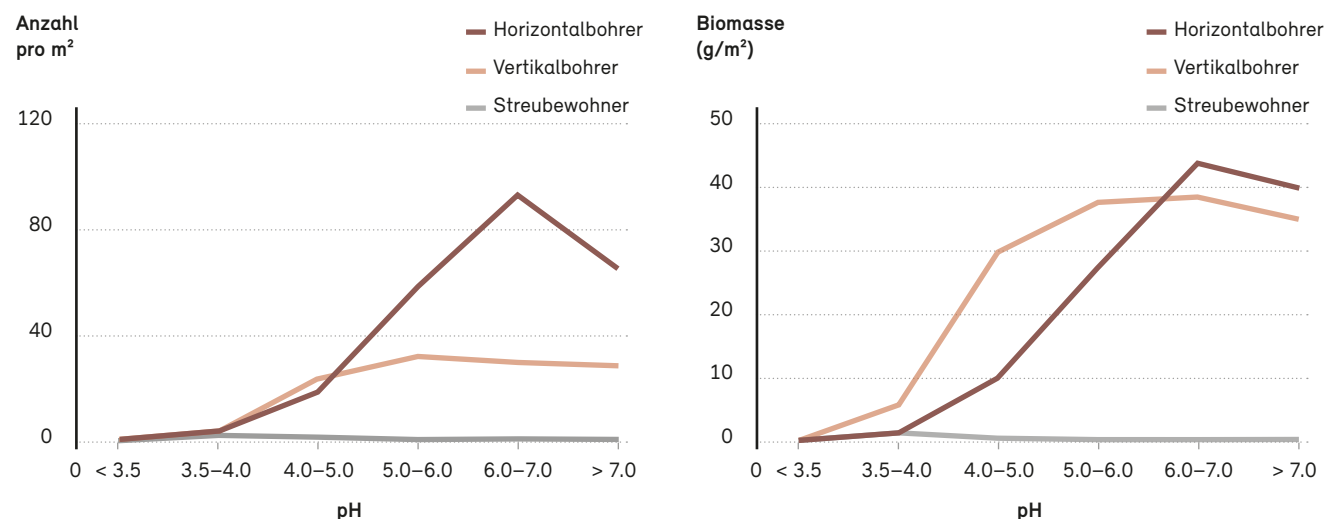
In der Schweiz werden die kritischen Eintragswerte (Critical Loads) für Stickstoff in vielen Lebensräumen zum Teil deutlich überschritten (Tabelle 5). Es muss daher langfristig mit Veränderungen von Struktur und Funktion der Ökosysteme gerechnet werden. Flachmoore verwandeln sich in triviale Hochstaudengesellschaften; Magerwiesen werden zu artenarmem Normgrünland. Der übermässige Stickstoffeintrag wird für den schleichenden und anhaltenden Verlust an Biodiversität in der Schweiz mitverantwortlich gemacht [140, 141].

Neben der Eutrophierung der Böden und der dadurch verursachten Abnahme der Biodiversität auf und im Bo-

Abbildung 30

Anzahl und Biomasse von Regenwürmern in Abhängigkeit des pH-Werts [149].

Auswertung von 753 Aufnahmen in 188 Flächen. Regenwürmer spielen eine wichtige Rolle bei der Streuumsetzung und der Bildung stabiler Bodenstrukturen. Gemäss ihrer ökologischen Funktion werden drei Gruppen unterschieden: Streubewohner, Horizontalbohrer und Vertikalbohrer.



den hat der flächendeckende Stickstoffeintrag weitere negative Effekte auf die Ökosysteme und den Boden selbst. Dies gilt vor allem für den Wald [142, 143]: Der Stickstoffeintrag stört die Versorgung mit anderen Makronährstoffen (vor allem Phosphor und je nach Bodenverhältnissen auch Magnesium und Kalium). Zudem schädigt er die Symbiose zwischen Wurzeln und Pilzen im Boden (Mykorrhiza). Denn der Stickstoff reduziert die Artenvielfalt und Biomasse der Mykorrhiza-Pilze (Abbildung 29). Diese reichen mit ihren feinen Fäden in die kleinsten Bodenporen, gelangen dort an Nährstoffe, die für Pflanzenwurzeln unzugänglich sind und geben diese teilweise an die Pflanzen weiter. Die übermässige Stickstoffversorgung vermindert auch die Stabilität des Waldes, weil sich das Wachstum der Feinwurzeln reduziert und die Bäume anfälliger gegenüber Schädlingen, Windwurf und Trockenheit werden.

Versauerung beeinflusst Bodenfunktionen

Eine weitere Folge des Stickstoffeintrags ist die Bodenversauerung. Diese tritt auf, wenn versauernd wirkende Verbindungen zugeführt, saure Kationen (wie Aluminium oder Mangan) mobilisiert oder basische Kationen aus

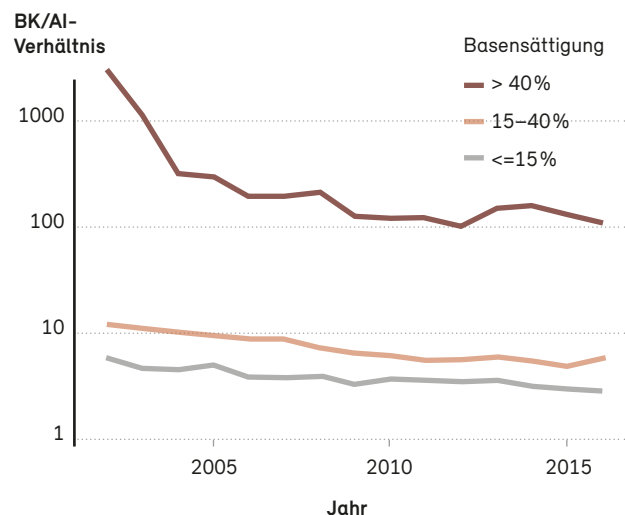
dem Boden mit dem Sickerwasser ausgewaschen werden. Stickstoff ist mittlerweile die Hauptquelle der Versauerung; Schwefel aus der Verbrennung fossiler Energieträger trägt nur noch zu ca. 15 % zu den versauernd wirkenden Einträgen bei [145]. Die Versauerung beeinträchtigt die chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften und damit die natürlichen Bodenfunktionen [146]: Sie reduziert die Verfügbarkeit von Nährstoffen, setzt Aluminium-Ionen frei, die für Pflanzenwurzeln toxisch sind, und verschlechtert die Lebensbedingungen der Bodenorganismen, beispielsweise von den Regenwürmern (Abbildung 30). Damit beeinträchtigt sie auch das Bodengefüge bzw. den Wasser- und Lufthaushalt im Boden. Bei weit fortgeschrittener Bodenversauerung werden Aluminium- und Mangan-Ionen sowie Schwermetalle mobilisiert. Allgemein ist dann die Filterwirkung der Böden für Schadstoffe herabgesetzt und eine Grundwassergefährdung nicht mehr auszuschliessen.

Als Folge des zu hohen Stoffeintrags hat sich die Bodenversauerung im Wald seit den 1950er-Jahren erheblich beschleunigt. Der pH-Wert ist in vielen Waldböden Nord- und Mitteleuropas um bis zu einer pH-Einheit gesunken [147]. Aktuelle chemische Untersuchungen der Bodenlösung von Waldböden in der Schweiz bestätigen die anhaltende Versauerung der Waldböden (Abbildung 31). Allein zwischen 1996 und 2005 wurde eine Abnahme der Basensättigung um 5 % und des pH-Wertes um 0,11 Einheiten beobachtet [146]. In basenarmen Böden konnte kurz nach der Jahrtausendwende eine «Verlangsamung» der Versauerung festgestellt werden [146]. Dennoch hält die Versauerung an [148].

Abbildung 31

Versauerung verschiedener Böden mit unterschiedlicher Basensättigung an 35 Waldstandorten in der Schweiz [150].

Als Indikator für Bodenversauerung wurde das Verhältnis zwischen den basischen Kationen (BK) Kalzium, Magnesium und Kalium zu Aluminium gewählt (BK/Al). Eine Abnahme weist auf eine Versauerung hin.





2.7 Verlust an Bodenbiodiversität

Die meisten Bodenfunktionen werden direkt oder indirekt von Bodenlebewesen gesteuert (vgl. Kap. 1.2). Eine hohe Biodiversität im Boden ist unter anderem die Voraussetzung für eine hohe oberirdische Biodiversität, für einen besseren Abbau von abgestorbenem Pflanzenmaterial, für eine bessere Nährstoffverfügbarkeit und für einen reduzierten Ausstoss von Lachgas aus dem Boden [151]. Bodenorganismen sind massgeblich an der Produktion von Nahrungsmitteln und Holz beteiligt [152].

Die Menge und Vielfalt der Bodenorganismen hängt neben natürlichen Faktoren wie dem Klima, dem Ausgangsgestein und dem Bodentyp vor allem von der Intensität der menschlichen Nutzung ab [153]. Die Bodenbearbeitung beeinflusst die Bodenbiodiversität besonders negativ [154, 155, 156]. Die Bodenlebewesen im Ackerland werden zusätzlich durch Pflanzenschutzmittel, Dünger, Tierarzneimittel, Bodenerosion, Bodenverdichtung und Fruchtfolgen ohne mehrjährige Bodenruhe unter Kunstwiese beeinträchtigt. Darauf deutet auch das unterdurchschnittliche Vorhandensein von Mikroorganismen in Ackerböden: Bodenbiologische Untersuchungen der Nationalen Bodenbeobachtung NABO haben gezeigt, dass Ackerböden eine deutlich tiefere mikrobielle Biomasse und Artenvielfalt aufweisen als Böden von Grünland oder Wäldern [157].

Neben der landwirtschaftlichen Nutzung beeinträchtigen auch flächendeckende Stickstoff- und Schwermetalleinträge (Kapitel 2.6 und 2.4) die Bodenorganismen. Sie können sowohl die mikrobielle Biomasse als auch die Artenzusammensetzung verändern. Es gibt Hinweise darauf, dass die Gehalte an mikrobieller Biomasse in belasteten Böden (Blei, Kupfer oder Nickel) tief sind [158].

Biologischer Landbau und Bodenleben

Weil Bodenorganismen in landwirtschaftlichen Ökosystemen eine Schlüsselrolle spielen, müsste die gezielte Stärkung der Bodenökosysteme ein wichtiges Ziel einer nachhaltigen Landwirtschaft sein. Es gibt bereits Landbausysteme, die auf einen schonenden Umgang mit der Ressource Boden ausgerichtet sind und sich positiv auf das Bodenleben auswirken. So weisen biologisch bewirtschaftete Böden im Vergleich zu nicht-biologischen Ver-

fahren eine um bis zu 40 Prozent erhöhte mikrobielle Biomasse auf [159, 160, 161]. Auch die Zusammensetzung der Mikroorganismengemeinschaft unterscheidet sich deutlich zwischen den Agrarsystemen [162]. Vor allem die Verwendung von Hofdünger (Gülle und Mist) bringt in biologischen Anbausystemen eine deutlich höhere mikrobielle Biomasse und erhöhte Biodiversität hervor als das Ausbringen von Mineraldünger. Hinzu kommt der Verzicht auf chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel [163].

Einfluss des ökologischen Leistungsnachweises

Das Verbot von bestimmten Pestiziden und die Einführung des ökologischen Leistungsnachweises (ausgeglichene Düngerbilanz, angemessener Anteil an Biodiversitätsförderflächen, geregelte Fruchtfolge, geeigneter Bodenschutz, gezielte Auswahl und Anwendung der Pflanzenschutzmittel) als Voraussetzung für den Bezug von Direktzahlungen im Jahr 1992 dürften dazu geführt haben, dass sich viele Populationen von Bodenorganismen (insbesondere Regenwürmer) im Ackerland teilweise erholt haben [164, 165]. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass die im internationalen Vergleich nach wie vor hohe landwirtschaftliche Nutzungsintensität in der Schweiz mit ihrem hohen Input an Düngerstoffen und Pflanzenschutzmitteln sowie die intensive Bodenbearbeitung das Bodenleben vielerorts beeinträchtigt [166].

Noch sind die Bodenbiodiversität und die ökologischen Zusammenhänge im Boden insgesamt schlecht untersucht. Fortschritte auf dem Gebiet der DNS-Sequenzierung (Entschlüsselung des Erbguts) ermöglichen es seit kurzem, die sehr unterschiedlichen mikrobiellen Gemeinschaften zu erfassen [167]. Die Wirkungen von menschlichen Aktivitäten auf die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften im Boden können so in Zukunft besser nachgewiesen werden. Die Nationale Bodenbeobachtung NABO hat die neuen Technologien bereits in ihr Programm aufgenommen [168].



2.8 Terrainveränderungen

Beim Bau von Wohn- und Bürogebäuden, Strassen, Eisenbahnlinien, Industrieanlagen, Gewerbehallen, Ställen und Hochwasserrückhalteräumen, bei Bachrevitalisierungen und Abhumusierungen für neue ökologische Ausgleichsflächen sowie bei der Erweiterung von Deponie- und Kiesabbauflächen fallen jedes Jahr mehrere Millionen Kubikmeter Bodenmaterial an. Die überschüssige Erde wurde bis in die 1990er-Jahre in der Regel in Deponien gebracht oder auf landwirtschaftlich genutzten Flächen «entsorgt» – entweder um Böden «aufzuwerten» oder um Unebenheiten im Gelände aufzufüllen. Viele dieser Terrainveränderungen wurden unsachgemäss durchgeführt und haben geschädigte Böden hinterlassen. Die Folgen sind vielfältig:

- Störung des Bodenaufbaus
- Störung des Stoff- und Gashaushaltes sowie des Filterverhaltens
- Schädigung der Bodenstruktur (v. a. Verdichtung) [169]
- Erhöhung der Schadstoffbelastung
- Eintrag von Fremdmaterial
- Beeinträchtigung der Ertragsfähigkeit [170]

Frühere Terrainveränderungen

Unter Terrainveränderungen versteht man vollständige oder teilweise Veränderungen des Aufbaus von Böden durch Auf- oder Abtrag von Bodenmaterial (z. B. Geländeänderungen, Aufschüttungen, Auffüllungen, Ab- und Aufhumusierungen, Niveauausgleiche, Bodenaufwertungen). Untersuchungen von älteren Terrainveränderungen haben ergeben, dass sich der Zustand der «neuen» Böden meist nicht verbessert hat – im Gegenteil [172]. Schätzungen gehen sogar davon aus, dass kleine Terrainveränderungen vor der Jahrtausendwende in zwei von drei Fällen zu dauerhaften Schäden am Boden geführt haben [173]; häufig war die landwirtschaftliche Nutzungseignung danach schlechter, weil das aufgebraachte Material durch Lagerung, Transport und Befahrung eine schlechte Bodenstruktur aufwies, weil die Auffüllung bei feuchter Witterung vorgenommen wurde oder weil ungeeignete Maschinen oder ungeeignetes Bodenmaterial verwendet wurden. Zudem wurde die Empfindlichkeit frisch angelegter Böden häufig unterschätzt und auf eine mehrjährige schonende Bewirtschaftung zur

Bodenregeneration verzichtet. Der Anteil derart geschädigter Böden ist nicht bekannt; er dürfte mehrere Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche betragen.

Heutige Terrainveränderungen

Infolge der anhaltend hohen Bautätigkeit in der Schweiz fallen weiterhin grosse Mengen an abgetragenen Ober- und Unterboden an: Jährlich stehen vier Millionen Kubikmeter sauberer Oberboden und elf Millionen Kubikmeter sauberer Unterboden für eine Wiederverwendung zur Verfügung [174]. Wie und wo der Grossteil dieses abgetragenen Bodens wieder verwendet oder entsorgt wird, ist weder auf nationaler noch auf kantonaler Ebene genau bekannt.

Allerdings sind die Vorgaben für die Verwertung des Bodens und die Anforderungen an die Qualität des Materials strenger geworden. Spätestens seit dem Inkrafttreten der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) im Jahr 2016 muss der abgetragene Ober- und Unterboden – falls er frei von Schad- und Fremdstoffen ist, keine invasiven gebietsfremden Organismen enthält und sich aufgrund seiner (physikalischen) Eigenschaften für eine Verwertung eignet – möglichst vollständig verwertet werden. Das Ausbringen auf Landwirtschaftsflächen zum alleinigen Zweck der Entsorgung ist nicht gestattet. Terrainveränderungen sind nur noch erlaubt, wenn eine echte Bewirtschaftungserleichterung oder eine Bodenverbesserung notwendig und erfolgversprechend ist. Solche Projekte sind gemäss Raumplanungsgesetz bundesweit bewilligungspflichtig. In den meisten Kantonen wird ab einer bestimmten Fläche ein kantonales Baugesuch verlangt.

Nicht jede Fläche darf mit fremdem Bodenmaterial verändert werden. Ausserhalb von Bauzonen sind Terrainveränderungen in der Regel nur auf Böden zulässig, die in ihrem Aufbau bereits massgeblich vom Menschen geschädigt oder verändert wurden (z. B. frühere, aber unbefriedigende Rekultivierungen und Terrainveränderungen, degradierte organische Böden, durch Hochwasser, Murgänge oder Hangrutsche geschädigte Böden, mit Schadstoffen belastete Böden). Im Kanton Zürich beispielsweise gilt dies für ca. 15 % der Landwirtschaftsfläche [173]. Auf diesen Flächen können Terrainveränderungen die zonenkonformen Nutzungsmöglichkeiten für die Landwirtschaft erweitern und sogar zur Schaffung neuer

Abbildung 32

Qualität landwirtschaftlicher Bodenrekultivierungen im Kanton Zürich in Prozent der rekultivierten Fläche [176]. Die Qualität der rekultivierten Flächen hat zugenommen. Dies gilt besonders für grössere Flächen über 5000 Quadratmeter.



Fruchtfolgeflächen beitragen [175]. Nicht bewilligungsfähig sind dagegen Aufwertungen von natürlichen, in ihrem Aufbau ungestörten Böden mit standorttypischer Bodenfruchtbarkeit sowie Projekte mit Flächen, auf denen überwiegende Interessen anderer Umweltbereiche (z. B. Naturschutz, Gewässerschutz, Wald) oder des Landschaftsschutzes bestehen.

Die Unterschiede zwischen den Kantonen bei der Bewilligung von Terrainveränderungen sind allerdings gross, und vielfach wird das Erreichen der Zielvorgaben nicht überprüft. Eine der wenigen Untersuchungen zeigt, dass sich die Qualität von Terrainveränderungen in den letzten Jahren verbessert hat (Abbildung 32). Dies gilt vor allem für Projekte, bei denen eine bodenkundliche Baubegleitung verlangt wird. Erfolge gibt es bei jenen Terrainveränderungen, die fachgerecht geplant, mit geeigneter Technik ausgeführt und in der Folge schonend bewirtschaftet wurden [173]. Kleinere Vorhaben werden dagegen immer noch viel zu häufig mangelhaft durchgeführt, wobei auch hier die Tendenz positiv ist [176].

Die Anforderung des Sachplans Fruchtfolgeflächen an die Kantone, ein genügend grosses Kontingent an Fruchtfolgeflächen (ackerfähiges Kulturland) auszuweisen, sowie die Verwertungspflicht von abgetragenem Ober- und Unterboden gemäss VVEA erhöhen den Druck auf die Kantone, Böden zu Fruchtfolgeflächen aufzuwerten [177]. Bodenaufwertungen können zudem über Massnahmen der Strukturverbesserungsverordnung zur Erhaltung und Verbesserung von Struktur und Wasserhaushalt des Bodens unterstützt werden. Es ist daher mit einer Zunahme von entsprechenden Vorhaben zu rechnen.

Mangelnde Eigenverantwortung

Problematisch sind nach wie vor unbewilligte und damit illegale Verwertungen von abgetragenem Boden. So lassen viele Landwirte angefallenes Bodenmaterial in Eigenregie von Baufirmen auf ihre Felder schütten, beispielsweise im Grossen Moos, wo die Fruchtbarkeit der entwässerten organischen Böden vielerorts bedroht ist. Diese illegalen Bodenveränderungen führen oft nicht zu den gewünschten Resultaten.

Bei landwirtschaftlichen Neubauten (z. B. Ausbauten, Freilaufställen, Güllegruben, Lagerplätzen) in der Landwirtschaftszone fallen zum Teil grosse Mengen an Boden an, die auf der Betriebsfläche verwertet werden. Das Erdmaterial wird oft für grosse Böschungen an den neuen Gebäuden verwendet oder auf gewachsenem Boden verteilt, was dem schonenden und haushälterischen Umgang mit der Ressource Boden widerspricht. Für die langfristige Erhaltung intakter Böden als Produktionsgrundlage für die Landwirtschaft ist es unerlässlich, dass die Eigenverantwortung durch den Grundeigentümer und den Bewirtschafter konsequent wahrgenommen wird [173].



3 Bodenschutz

3.1 Gesetzliche Grundlagen

Seit dem Inkrafttreten des Umweltschutzgesetzes (USG; SR 814.01) am 1. Januar 1985 gibt es eine rechtliche Grundlage für den qualitativen Bodenschutz. Das Gesetz bezweckt insbesondere die langfristige Erhaltung der biologischen Vielfalt und der Fruchtbarkeit des Bodens. Die Bodenfunktionen sind zwar nicht explizit erwähnt; «Bodenfruchtbarkeit» ist jedoch untrennbar mit den Funktionen des Bodens verbunden. Dem Schutz der Böden vor chemischen Belastungen (Schadstoffeintrag) und physikalischen Belastungen (z. B. Erosion, Verdichtung) ist ein eigenes Kapitel gewidmet (Artikel 33 bis 35).

Gemäss Artikel 33 USG wird der Schutz der Bodenfruchtbarkeit vor chemischen Bodenbelastungen durch Massnahmen angestrebt, die in den Ausführungsverordnungen zu anderen Bereichen des Umweltschutzes verankert sind (Gewässerschutz, Störfallrecht, Luftreinhaltung, Umgang mit Stoffen, Organismen und Abfällen sowie Lenkungsabgaben). Damit werden all diese Rechtsbereiche neben ihrer Kernaufgabe mit der Wahrnehmung von Bodenschutzanliegen beauftragt [178]. Genügen die vorbeugenden Massnahmen nicht, um die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu gewährleisten, regelt Artikel 34 weitergehende Massnahmen. Werden Menschen, Tiere und Pflanzen gefährdet, so schränken die Kantone die Bodennutzung im erforderlichen Masse ein. Bei bestimmten Nutzungen des Bodens sollen die Bodenbelastungen soweit vermindert werden, dass eine ungefährliche Bewirtschaftung möglich ist. Artikel 35 führt die Richt- und Sanierungswerte ein (siehe Abbildung 33).

Die am 1. Oktober 1998 in Kraft getretene Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö; SR 814.12) regelt die Beobachtung, Überwachung und Beurteilung von Bodenbelastungen. Sie bestimmt zudem vorsorgliche Massnahmen gegen Bodenerosion und Bodenverdichtung und gibt vor, welche Massnahmen beim Umgang mit abgetragenem Boden zu treffen sind. Schliesslich legt sie fest, was auf kantonaler Ebene getan werden muss, wenn in bestimmten Gebieten Bodenbelastungen über den Richt-, Prüf- und Sanierungswerten liegen und damit die Boden-

fruchtbarkeit dort nicht mehr langfristig gewährleistet ist (siehe Abbildung 33).

Auch das Gewässerschutz- und das Landwirtschaftsgesetz enthalten Vorschriften zum qualitativen Bodenschutz. Das Gewässerschutzgesetz (GSchG; SR 814.20) verlangt beispielsweise in Artikel 27, dass Böden so bewirtschaftet werden, dass keine Dünger oder Pflanzenbehandlungsmittel in Gewässer abgeschwemmt werden. Dies impliziert auch Massnahmen gegen Bodenerosion. Das Landwirtschaftsgesetz (LwG; SR 910.1) verlangt für Betriebe, die Direktzahlungen beanspruchen wollen, einen ökologischen Leistungsausweis. Zu diesem gehört ein «geeigneter Bodenschutz» (Artikel 70a Abs. 2 Bst. f LwG). Das Landwirtschaftsgesetz regelt zudem den Umgang mit Produktionsmitteln (Artikel 158 ff). Als Produktionsmittel gelten Stoffe und Organismen, die der landwirtschaftlichen Produktion dienen. Darunter fallen insbesondere Dünger, Pflanzenschutzmittel, Futtermittel und pflanzliches Vermehrungsmaterial (vgl. Art. 158 Abs. 1 LwG).

Bodenschutz als globales Nachhaltigkeitsziel

Die globalen Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Developments Goals, SDGs) sollen bis 2030 von allen UNO-Mitgliedstaaten erreicht werden [181]. Die Staaten sind gleichermassen aufgefordert, die drängenden Herausforderungen der Welt gemeinsam zu lösen. Auch die Schweiz ist aufgefordert, die Ziele national umzusetzen und Anreize zu schaffen, damit nichtstaatliche Akteure vermehrt einen aktiven Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten. In vielen der 17 Ziele der Agenda 2030 wird der Schutz des Bodens direkt oder indirekt berücksichtigt. Alle Formen der Bodenverschlechterung sollen vermindert und gestoppt sowie bereits degradierte Böden wenn möglich wiederhergestellt werden. Um die Ernährungssicherheit zu gewährleisten, ist die Qualität der landwirtschaftlichen Böden zu erhalten oder zu verbessern. Dabei sollen nachhaltige Produktionssysteme gefördert werden, die neben der Nahrungsmittelproduktion auch andere Bodenfunktionen positiv beeinflussen.

Die Altlasten-Verordnung (AltLV, SR 814.680) soll sicherstellen, dass belastete Standorte saniert werden, wenn sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führen oder wenn die konkrete Gefahr besteht, dass solche Einwirkungen entstehen.

Der quantitative Bodenschutz ist vor allem Sache der Raumplanung. Der Zielartikel des Raumplanungsgesetzes (RPG; SR 700) hält fest, dass Bund, Kantone und Gemeinden dafür sorgen, «dass der Boden haushälterisch

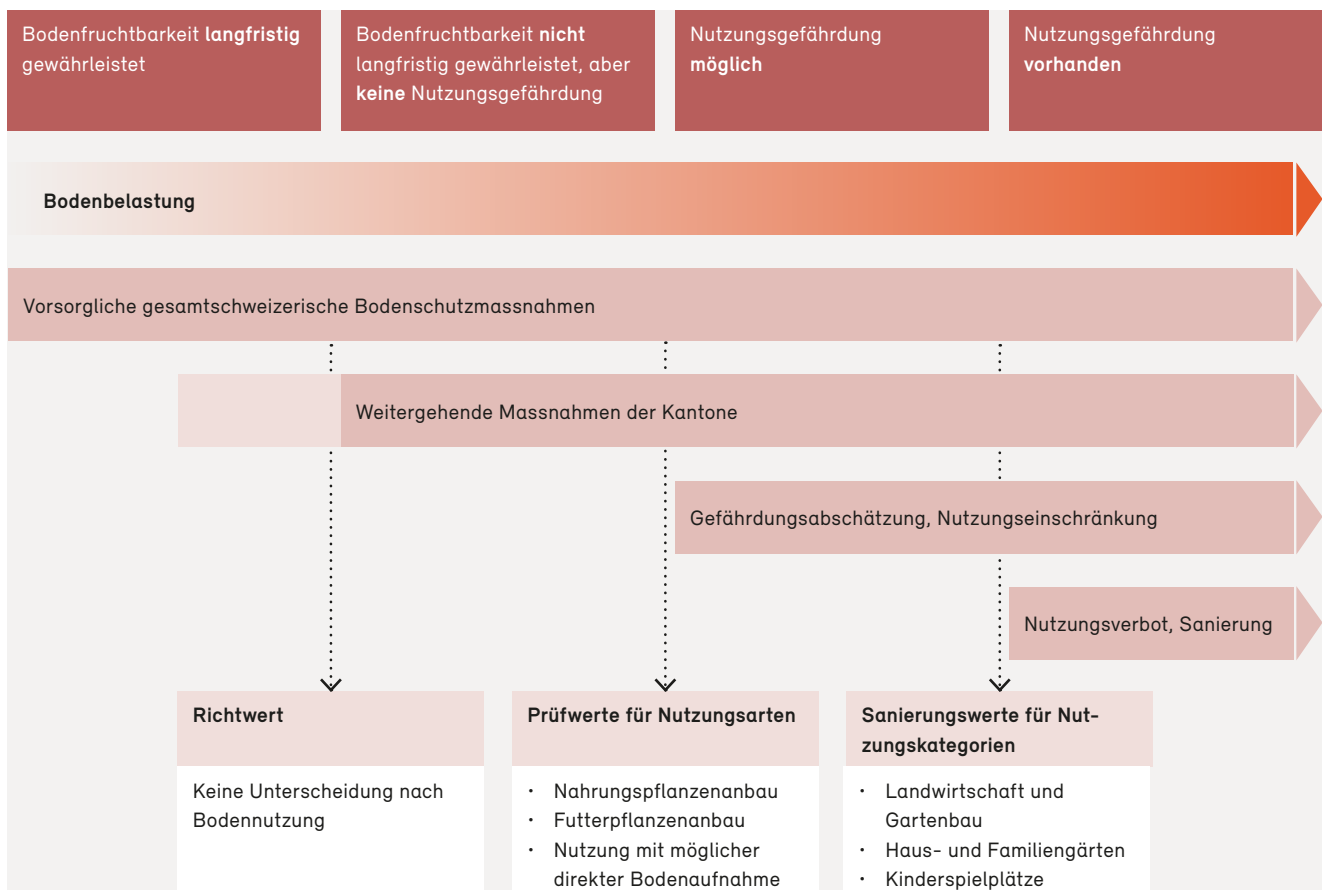
genutzt wird». Dieser Auftrag zielt auf die Eindämmung des Flächenverbrauchs.

Während auf Gesetzesebene eine solide Basis für einen schonenden Umgang mit Boden gegeben ist, zeigen sich im Vollzug oft die Folgen von Konflikten mit der Umsetzung anderer gesetzlicher Vorgaben sowie Vollzugs-mängel. Bei einer Umfrage zu den Vollzugsdefiziten der Umweltschutzgesetzgebung in den Kantonen wurde der Themenbereich Boden am häufigsten genannt [179].

Abbildung 33

Bodenschutzkonzept des Bundes gemäss Umweltschutzgesetz (USG) und Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö) [180].

Die Beurteilung von Standorten erfolgt anhand der gesetzlich festgelegten Schadstoffwerte. Wird an einem bestimmten Ort ein Richtwert überschritten oder steigen die Konzentrationen stark an, ist die Fruchtbarkeit dieses Bodens langfristig nicht mehr gewährleistet. Hier ist erhöhte Aufmerksamkeit angesagt; die Ursachen der Bodenbelastung müssen abgeklärt werden. Wenn der Schadstoffgehalt über dem Prüfwert liegt, muss geklärt werden, ob oder wie der belastete Boden weiterhin genutzt werden kann, ohne Mensch und Umwelt zu gefährden. Wird der Sanierungswert überschritten, verordnet der Kanton Massnahmen, die vom Verbot gewisser Nutzungen bis zur Sanierung der betroffenen Böden reichen.



3.2 Ziele, Massnahmen und Defizite

Bund und Kantone setzen sich in vielen Bereichen für den Bodenschutz ein. Gemeinsam mit der Bau-, der Land- und der Waldwirtschaft haben sie entsprechende Instrumente entwickelt und Bodenschutzmassnahmen getroffen. Dadurch konnte der negative Einfluss einzelner Bodenbelastungen in der Schweiz in den letzten Jahren und Jahrzehnten gebremst werden (z. B. Bodenschutz auf Baustellen).

Bodenversiegelung

Ziele: Das Raumplanungsgesetz verlangt von Bund, Kantonen und Gemeinden, dass der Boden haushälterisch genutzt wird. Sie sind dazu verpflichtet, den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen wie den Boden zu unterstützen.

Massnahmen: Um den Bodenverlust zu bremsen, wurde das Raumplanungsgesetz revidiert (in Kraft seit Mai 2014). Die Kantone haben den verbindlichen Auftrag, ihre kantonalen Richtpläne anzupassen, um Bauzonen zu reduzieren und bestehende Baulandreserven besser zu nutzen.

Defizite: In der Schweiz fehlt ein integrales Konzept zum nachhaltigen Umgang mit dem Boden. Insbesondere verfügen nur wenige Kantone über genaue Informationen zur Bodenqualität (z. B. Bodenkarten). Diese sind für raumplanerische Entscheide und die Nutzungsplanung wichtig.

Bodenerosion

Ziele: Die Umweltziele Landwirtschaft, die aus den bestehenden rechtlichen Grundlagen abgeleitet wurden, geben folgende Ziele vor [182]: «1. Keine Richtwertüberschreitungen für Erosion und Verhinderung der Talwegerosion auf Ackerflächen. 2. Keine Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit durch Erosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. 3. Keine Beeinträchtigung der Gewässer und naturnaher Lebensräume durch abgeschwemmtes Bodenmaterial aus landwirtschaftlich genutzten Flächen.»

Massnahmen: Mit der Agrarpolitik 2014–2017 wurden bedeutende Neuerungen eingeführt bzw. bestehende Vorgaben präzisiert. So soll ab 2017 die Kontrolle von

Erosionsereignissen gezielt und risikobasiert erfolgen. 2017 wurden zudem Ressourceneffizienzbeiträge für die schonende Bodenbearbeitung eingeführt. Das Ressourcenprogramm des BLW führt ebenfalls zu einer nachhaltigeren Nutzung des Bodens [64]. Mit der Erosionsrisikokarte und der Vollzugshilfe Landwirtschaft (Modul Bodenschutz) [32] liegen mittlerweile gute Grundlagen für den Vollzug vor.

Defizite: Die bisherigen Regelungen beim Ökologischen Leistungsnachweis wurden bisher nicht immer und überall konsequent vollzogen und umgesetzt. Die Wirkung der neuen Regelung bleibt abzuwarten.

Bodenverdichtung

Ziele: Das Allgemeine Umweltziel, das aus den bestehenden rechtlichen Grundlagen abgeleitet wurde, gibt folgende Ziele vor [182]: «Keine Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenverdichtung.» Das Umweltziel Landwirtschaft präzisiert: «Vermeidung dauerhafter Verdichtungen landwirtschaftlicher Böden.»

Massnahmen: Nach der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) sind die Kantone dazu verpflichtet, diejenigen Gebiete zu überwachen, in denen die Fruchtbarkeit des Bodens gefährdet ist. Für die Beurteilung der Intensität von Bodenverdichtungen existieren in der Verordnung allerdings keine Richt- oder Grenzwerte (im Gegensatz zu den chemischen Belastungen oder der Erosion). Mit der «Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen» existieren konkrete Vorschläge für Richt- und Massnahmenwerte sowie Empfehlungen zu den Messmethoden [183].

Verschiedene Vollzugshilfen und Forschungsprojekte liefern den Akteuren und Behörden wichtige Informationen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen oder zur Regeneration der Bodenstruktur [32, 61, 184, 185]. Mithilfe des Simulationsmodells «Terranimo®» kann das Bodenverdichtungsrisiko beim Einsatz von landwirtschaftlichen Fahrzeugen berechnet werden [32].

Die Waldpolitik 2020 fordert, dass in den Programmvereinbarungen zwischen Bund und Kantonen die bodenschonende Waldbewirtschaftung berücksichtigt wird. Grundlagen bilden die Fahrspurtypisierung und techni-

sche sowie organisatorische Massnahmen zur Verbesserung des Bodenschutzes.

Für Baustellen ist heute in rechtlich verbindlichen Bestimmungen festgehalten, wie der Umgang mit Boden auf Baustellen zu erfolgen hat, damit insbesondere Bodenverdichtungen vermieden werden können. Zudem wird bei Baustellen, die der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) unterstehen, heute meistens eine bodenkundliche Baubegleitung gefordert.

Defizite: Obwohl Bodenverdichtung infolge landwirtschaftlicher Nutzung im Zusammenhang mit dem ökologischen Leistungsnachweis in der Direktzahlungsverordnung oder in der Strukturverbesserungsverordnung direkt oder indirekt erwähnt wird, existiert kein operables System für den Vollzug. Eine Lücke besteht darin, dass keine gesetzlich festgelegten Richtwerte zur Beurteilung von Bodenverdichtungen vorhanden sind. Inwieweit die oben genannten Massnahmen und Instrumente eine Verringerung des Verdichtungsrisikos in der Schweiz zur Folge haben, muss erst noch überprüft werden.

Der Vollzug des Bodenschutzes im Wald liegt in der Verantwortung der Kantone und ist unterschiedlich weit fortgeschritten. Die Sensibilisierung aller beteiligten Akteure muss weiterhin stark gefördert werden.

Bei kleinen Baustellen wird meist keine formalisierte Prüfung der Umweltauswirkungen durchgeführt, und Massnahmen für den Bodenschutz werden oft vernachlässigt.

Schadstoffeintrag

Ziele: Der Schadstoffeintrag in die Böden ist Gegenstand einer Vielzahl von Regelungen in verschiedenen Verordnungen. Das Allgemeine Umweltziel, das aus den bestehenden rechtlichen Grundlagen abgeleitet wurde, gibt folgende Ziele vor [182]: «Keine Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit und der Gesundheit durch anorganische oder organische Schadstoffe.» Dieses Ziel gilt explizit auch für die Landwirtschaft. Das Umweltziel Landwirtschaft fordert zudem: «Der Eintrag einzelner Schadstoffe aus der Landwirtschaft in Böden ist kleiner als deren Austrag und Abbau.»

Die Schweiz hat sich im Rahmen des 2016 revidierten Protokolls der UNO-Wirtschaftskommission für Europa (UNECE) über Schwermetalle dazu verpflichtet, ihre Schwermetall-Emissionen und die Luftbelastung durch Feinstaub weiter zu verringern. Dies wirkt sich positiv auf die Bodenqualität aus.

Massnahmen: Es gibt Anstrengungen, den Einsatz von mineralischem Phosphordünger so weit wie möglich auf den effektiven Bedarf zu reduzieren und den nationalen Phosphorkreislauf mit Hilfe von Recyclingmassnahmen zu schliessen [64]. Der Bundesrat hat zudem 2017 den Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln verabschiedet. Der Aktionsplan legt messbare Ziele und konkrete Massnahmen fest.

Bei der Nutzung von Familiengärten empfehlen die Kantone, möglichst biologisch zu gärtnern und keine Asche einzusetzen.

Weit fortgeschritten sind die Massnahmen rund um die Altlastenproblematik: Bis etwa 2040 sind voraussichtlich sämtliche Altlasten dekontaminiert oder gesichert.

Defizite: Die Vielzahl von Regelungen zum Schadstoffeintrag in die Böden ist wenig übersichtlich und erschwert damit den Vollzug. Vollzugsdefizite gibt es bei Kupfer, Zink und Antibiotika in Hofdüngern, Schadstofffrachten entlang von Strassen und bei der Belastung der Böden mit Pflanzenschutzmitteln.

Humusverlust

Ziele: Es gibt kein explizites Ziel zum Humusgehalt von Böden.

Massnahmen: Die Direktzahlungsverordnung (DZV) verlangt, dass bei den obligatorischen Bodenuntersuchungen auf Ackerflächen zusätzlich der Gehalt an organischer Substanz ermittelt werden muss, um Veränderungen des Humusgehalts feststellen zu können (Anhang 1 DZV). Für Bewirtschafter steht eine Beurteilungs- und Entscheidungshilfe zur Vermeidung von Verlusten von organischer Bodensubstanz infolge landwirtschaftlicher Nutzung zur Verfügung (www.humusbilanz.ch).

Die 2016 vom Bundesrat gesprochenen Mittel für Sofortmassnahmen zur Sanierung der Biotope von nationaler Bedeutung haben unter anderem zum Ziel, alte, aber immer noch wirkungsvolle Drainagen und Entwässerungsgräben aus den geschützten Mooren von nationaler Bedeutung zu entfernen. Dies fördert die Akkumulation von organischer Substanz in den Mooren.

Im Rahmen der Klimapolitik wurden bislang keine Massnahmen beschlossen, die den Humusgehalt der Böden betreffen. Die Vernehmlassungsvorlage des CO₂-Gesetzes für die Zeit nach 2020 sieht jedoch vor, dass derartige Massnahmen zur Erreichung der Klimaziele in anderen Erlassen definiert werden können.

Defizite: Die Klimaziele des Bundes wurden nicht auf den Landnutzungssektor übertragen. Die Rolle des Landnutzungssektors in der Klimapolitik ist unklar.

Die Landwirtschaftspolitik hat die finanziellen Anreize (z. B. Direktzahlungen, Anforderungen des Ökologischen Leistungsnachweises) noch nicht bezüglich der Erhaltung der organischen Bodensubstanz überprüft.

Obwohl drainierte, intensiv genutzte Moorböden an Qualität verlieren, keinen Beitrag zur Biodiversitätserhaltung leisten und starke CO₂-Quellen sind, existieren keine spezifischen Richtlinien für die Bewirtschaftung dieser Böden. Dies wäre wichtig, denn ein Grossteil der Drainagen in der Schweiz hat das Ende seiner Lebensdauer erreicht [186]. In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, die künftige Nutzung dieser Böden zu überdenken. Es stellt sich die Frage, wie eine nachhaltige Nutzung von Moorböden aussehen könnte und ob ein Teil der Drainagen stillgelegt werden kann, um anderen Bodenfunktionen Vorrang zu geben.

Eutrophierung und Versauerung

Ziele: Das Allgemeine Umweltziel, das aus den bestehenden rechtlichen Grundlagen abgeleitet wurde, gibt folgende Ziele vor [182]: «1. Vorsorgliche Begrenzung der Emissionen so weit, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. 2. Keine übermässigen Immissionen, das heisst keine Überschreitung von Belastungsgrenzen wie Immissionsgrenzwerte, Critical Loads, Critical Levels und <Air Quality Guidelines>.

Verschärfte Emissionsbegrenzungen, falls trotz vorsorglicher Emissionsbegrenzung übermässige Immissionen verursacht werden.»

Das Umweltziel Landwirtschaft präzisiert: «Die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft betragen maximal 25 000 Tonnen N/Jahr.»

Massnahmen: Die Erreichung des allgemeinen Umweltziels hängt vor allem von der Landwirtschaft ab. Verschiedene Massnahmen der Agrarpolitik 2014–2017 wirken sich positiv auf die Zielerreichung aus [64]. Dazu gehören vor allem die Aufhebung der allgemeinen Tierbeiträge und die Einführung von Ressourceneffizienzbeiträgen für emissionsarme Ausbringstechniken.

Defizite: Seit 2005 haben die Ammoniak-Emissionen nicht mehr abgenommen [64]. Bei der Stickstoffeffizienz bestehen nach wie vor Möglichkeiten zur Verbesserung [187]. Von Bedeutung sind dabei Steuerungen des Nährstoffinputs, Zuchtfortschritte, Optimierungen bei der Fütterung und Futterverwertung der Nutztiere sowie beim Düngermanagement.

Bodenbiodiversität

Ziele: Die Strategie Biodiversität Schweiz des Bundesrates gibt folgendes Oberziel vor: Die Biodiversität ist reichhaltig und gegenüber Veränderungen reaktionsfähig. Die Biodiversität und ihre Ökosystemleistungen sind langfristig zu erhalten [188].

Massnahmen: Umweltfreundliche Landbausysteme werden mit Beiträgen gefördert. Weiterbildungsprogramme für Landnutzer und Kommunikationsstrategien verbessern das Verständnis für die Biodiversität.

Defizite: Die Auswirkungen der verschiedenen Bodennutzungen auf die Bodenbiodiversität sind weitgehend unbekannt. Gleichzeitig sind viele Landnutzer mit alternativen Bodennutzungen überfordert. In der Tierhaltung ist der Antibiotikaverbrauch noch immer zu hoch. Zu hoch ist auch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Weitgehend unbekannt sind die Belastungen der Lebensgemeinschaften im Boden durch gebietsfremde invasive Organismen. Die Verbreitung solcher Organismen wird durch

den Gartenbau (Import von Topfpflanzen) und durch Bodenverschiebungen erleichtert.

Terrainveränderungen

Ziele: Die Pflicht zur Verwertung von abgetragenem Bodenmaterial ist seit 2016 in der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) rechtlich verankert. Damit eine solche Verwertungspflicht nicht zu einem Zielkonflikt führt, soll die «Aufwertung» oder «Verbesserung» von Böden primär auf bereits anthropogen veränderten Böden erfolgen. Natürlich gewachsene, ungestörte Böden mit standorttypischer Bodenfruchtbarkeit sind vor Terrainveränderungen zu schützen.

Massnahmen: Bei UVP-pflichtigen Baustellen wird meistens eine bodenkundliche Baubegleitung gefordert. Diese ist verantwortlich für die Einhaltung der bodenschutzrechtlichen Bestimmungen sowie der projektspezifischen Auflagen aus dem jeweiligen Bewilligungsverfahren. Dadurch werden die Bodenschutzziele auf grossen Baustellen und damit auch an den Verwertungsorten in aller Regel gut erreicht.

Defizite: Der Ausdruck Bodenaufwertung wird zuweilen immer noch als Begründung missbraucht, um unverschmutztes Bodenmaterial auf natürlich flachgründigen Böden günstig zu entsorgen. Terrainveränderungen und Bodenaufwertungen werden zudem oft in Verfahren genehmigt, in denen keine formalisierte Prüfung der Umweltauswirkungen vorgenommen werden. Obwohl entsprechende Informationen und Vollzugshilfen verfügbar sind, gehen wirksame Massnahmen für den Bodenschutz häufig vergessen, weil die betroffenen Akteure bezüglich der möglichen negativen Auswirkungen von Terrainveränderungen auf die ökologischen Bodenfunktionen nicht genügend sensibilisiert sind. Erschwerend kommt hinzu, dass Informationen zu Lage und Ausdehnung geeigneter Standorte für Aufwertungen von anthropogen degradierten Böden vielerorts fehlen.

3.3 Notwendige Bodeninformationen

In der Schweiz besteht ein grosser und vielfältiger Bedarf an detaillierten, flächendeckenden und einheitlichen Bodeninformationen. In Fachkreisen besteht ein Konsens darüber, dass die existierenden Grundlagen und Instrumente den Herausforderungen und Ansprüchen zum nachhaltigen Umgang mit der Ressource Boden nicht genügen [189]. Punktdaten sowie modellierte Bodendaten allein genügen den Ansprüchen der meisten Nutzergruppen nicht.

Der Bund hat bereits erste Massnahme beschlossen, um die riesigen Lücken im Bereich Bodeninformationen zu schliessen: National- und Ständerat haben 2014 bzw. 2015 den Aufbau eines nationalen Bodenkompetenzentrums in Auftrag gegeben. Dieses soll sowohl quantitative als auch qualitative Bodeninformationen verwalten und Standards zur Datenerhebung und zur Interpretation verbindlich festsetzen und aktualisieren. Wann der operative Betrieb dieses Kompetenzzentrums aufgenommen werden kann, ist allerdings noch unklar.

Seit 2017 liegt zudem ein realisier- und finanzierbares Konzept für ein flächendeckendes Bodeninformationssystem vor [190]. Die Schaffung eines solchen Bodeninformationssystems würde grundsätzlich die Planungs- und Entscheidungsgrundlagen verbessern und für zahlreiche Anwendungen eine den aktuellen Erfordernissen angepasste Datengrundlage liefern (siehe Kasten).

Eine flächendeckende Datenbeschaffung ist arbeitsintensiv und benötigt gut ausgebildete und erfahrene Bodenfachleute. Diesem offensichtlichen Bedarf an fachkundigen Bodenkundlern steht in jüngerer Zeit allerdings eine Entwicklung gegenüber, die zu strukturellen und personellen Lücken führt oder schon geführt hat [189]. Es bedarf grosser Anstrengungen, um diesem drohenden Wissensverlust mittels vermehrter Investitionen in die Aus- und Weiterbildung entgegenzuwirken.

Der Nutzen von Bodeninformationen und Bodenkarten [190]

- Mit Hilfe flächendeckender und einheitlich erhobener Bodendaten könnte parzellenscharf und nachvollziehbar beurteilt werden, welche Böden die Anforderungen an Fruchtfolgeflächen erfüllen und wie sich deren Ertragsfähigkeit künftig entwickelt. Einzonungen besonders fruchtbarer Böden würden dadurch verringert und allfällige Kompensationsmassnahmen aufgrund einer gesicherten Datenlage erfolgen.
- Durch eine flächendeckende Bestimmung von Bodenfunktionen wären die Leistungen des Bodens (z. B. Trinkwasserreinigung) bekannt und könnten im Rahmen von Planungsverfahren (Umzonungen, Umweltverträglichkeitsprüfungen) und zur Gefahrenprävention (Hochwasserschutz, Schutz vor Hangrutschungen, Klimaschutz) explizit berücksichtigt werden.
- Stünden Informationen zur Beschaffenheit des Bodens zur Verfügung, könnten Anstrengungen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit in Bau-, Land- und Forstwirtschaft zielgerichtet erfolgen. Detaillierte Kenntnisse über die Böden würden beispielsweise dazu beitragen, das Erosionsrisiko durch standortgerechte Kulturen, Düngung und Bodenbearbeitung zu minimieren; weil verdichtungsempfindliche Böden ausgewiesen würden, könnten mit Bodenkarten Bodenverdichtungen und Ertragsausfälle vermieden werden.
- Im Hinblick auf die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit unter veränderten Klimabedingungen könnten bei Bedarf gezielte Massnahmen (Pflanzenwahl, Bodenbearbeitung, Humusaufbau) initiiert werden.
- Flächendeckende Bodendaten würden die Erstellung und Publikation von Themenkarten zu ausgewählten Boden-Aspekten ermöglichen, was zu einer Sensibilisierung zum Thema Bodenschutz beitragen würde.



4 Fazit

Boden ist eine nicht erneuerbare Ressource. Seine begrenzte Verfügbarkeit wird in der Schweiz immer stärker spürbar. Dennoch fehlen systematisch und flächendeckend erhobene Informationen zum Zustand des Bodens und zum Ausmass und zur Entwicklung der Bodengefahren. Der vorliegende Bericht muss sich deshalb auf fragmentierte Einzelinformationen stützen.

Aufgrund der vorliegenden Analyse der Bodenbedrohungen muss davon ausgegangen werden, dass trotz verschiedener Massnahmen zum Bodenschutz (z. B. Luftreinhaltung, schonendere Bodenbearbeitung in der Land-, Wald- und Bauwirtschaft) nicht alle Bodenfunktionen dauerhaft sichergestellt sind. Die Leistungen des Bodens dürften vielerorts nur noch eingeschränkt verfügbar sein.

Angesichts des Klimawandels könnte sich die Situation ohne Verstärkung des Bodenschutzes in Zukunft verschärfen: Es wird angenommen, dass wichtige Bodenfunktionen durch den Klimawandel zusätzlich beeinträchtigt werden [191]. Bezüglich Art und Ausmass der Beeinträchtigung existieren aber noch viele Wissenslücken. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass beispielsweise die vermehrt auftretenden Starkniederschläge das Erosionsrisiko erhöhen werden. Die erhöhte Bodenfeuchtigkeit im Winterhalbjahr [192] lässt vermuten, dass die Bodenverdichtung als Bodenbedrohung auch in Zukunft zumindest bestehen bleibt.

Auch gesellschaftliche und politische Entwicklungen können den Druck auf den Boden erhöhen, weil sie einen grossen Einfluss darauf haben, was mit welchen Produktionstechniken in der Schweiz produziert wird. Dies beeinflusst das Ausmass des Bodenverbrauchs und der Bodenbelastung. Für den Bodenschutz ergeben sich folgende zentrale Herausforderungen:

- Systematische und flächendeckende Erhebung und Bereitstellung von Bodeninformationen und Bodendaten
- Stärkung des Vollzugs bestehender Gesetze
- Einbezug der Bodenfunktionen in bodenrelevante Entscheide (integrale Sichtweise auf den Boden)

- Abstimmung von bodenrelevanten politischen und rechtlichen Instrumenten und Prozessen bezüglich Bodenschutz, Land- und Waldwirtschaft sowie Raumplanung
- Sensibilisierung, Ausbildung und Beratung der Akteure
- Förderung der nachhaltigen und standortangepassten Bodennutzung
- Verstärkung von präventiven Massnahmen
- Anpassung der Nutzung an den Klimawandel

Ein absoluter Schutz der Böden und ihrer Funktionen ist weder möglich noch sinnvoll. In Anbetracht der zentralen Rolle des Bodens für unser Wohlergehen muss es aber das Minimalziel sein, die Böden auf eine Weise zu nutzen und zu schützen, die mit ihrer Funktion als Lebensgrundlage langfristig vereinbar ist.

Benötigt wird ein kluges Ressourcenmanagement. Das BAFU ist deshalb daran, zusammen mit Partnern aus Bund und Kantonen einen Entwurf für eine Bodenstrategie zu erarbeiten. Diese soll Wege aufzeigen, wie sich die Herausforderungen bei der Raumplanung, der Landwirtschaft und beim Umweltschutz gemeinsam angehen lassen und wie die Erhaltung oder Wiederherstellung der Bodenfunktionen bestmöglich in die verschiedenen Nutzungen integriert werden kann.

Zur Umsetzung des Bodenschutzes ist ein integrales Management der Ressource Boden notwendig. Erst die Berücksichtigung aller Bodenfunktionen in den bodenrelevanten Entscheiden ermöglicht die geforderte, zweckmässige und haushälterische Nutzung des Bodens und den Erhalt seiner vielfältigen Leistungen. Eine solche gesamtfunktionale Betrachtung erlaubt es, qualitative und quantitative Aspekte in den Entscheiden über die Bodennutzung oder den Bodenverbrauch zu verknüpfen.

Literatur

- [1] Nkonya E., Mirzaev A., von Braun J. (Hrsg.) (2016): Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development. Springer-Verlag, Berlin.
- [2] Montgomery D. (2010): Dreck – Warum unsere Zivilisation den Boden unter den Füßen verliert. Stoffgeschichten, Band 6. Oekom Verlag, München.
- [3] Nationales Forschungsprogramm NFP 68, BAFU, BLW, ARE (2015): Bodenschätze. Publikation zum Internationalen Jahr des Bodens 2015.
- [4] Torsvik V., Øvreås L., Thingstad T.F. (2002): Viewpoint: prokaryotic diversity – magnitude, dynamics, and controlling factors. *Science* 296, 1064 – 1066.
- [5] Abu-Hashim M. (2011): Impact of land-use and land-management on the water infiltration capacity of soils on a catchment scale. Dissertationen aus dem Julius Kühn-Institut.
- [6] Heinrich Böll Stiftung, Institute for Advanced Sustainability Studies (Hrsg.) (2015): Soil Atlas. Facts and figures about earth, land and field.
- [7] BFS (Hrsg.) (2015): Die Bodennutzung in der Schweiz. Auswertungen und Analysen. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- [8] Borer F., Knecht M. (2014): Bodenkartierung Schweiz. Entwicklung und Ausblick. Hrsg.: Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz.
- [9] www.nabodat.ch > Service > Bodenkartierungskatalog
- [10] Grob U., Ruef A., Zihlmann U., Klauser L., Keller A. (2015): Agroscope Bodendatenarchiv. Bodendaten aus Bodenkartierungen 1953–1996. Agroscope Science Nr. 14.
- [11] www.nabodat.ch
- [12] Rehbein K., Grob U., Klauser L., Keller A. (2016): Nationales Bodeninformationssystem NABODAT – Datenmodell Version 1.4. Agroscope, Servicestelle NABODAT, Zürich.
- [13] www.bafu.admin.ch > Geodatenmodelle
- [14] Desaulles A., Dahinden R. (2000): Nationales Boden-Beobachtungsnetz. Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren. Schriftenreihe Umwelt Nr. 320, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- [15] Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R. G., Keller A. (2015): Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. Umwelt-Zustand Nr. 1507. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [16] Meuli R.G., Schwab P. (2011): NABO-Bodenproben aus dem Z9-Indikator Messnetz des Biodiversitätsmonitorings der Schweiz – Ergebnisse der Pilotuntersuchung. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Zürich.
- [17] www.nabo.ch > Monitoring
- [18] Siehe www.nabodat.ch
- [19] Schweizerischer Bundesrat (2016): Sicherung landwirtschaftlichen Kulturlandes. Bericht der GPK-N vom 20. November 2015. Stellungnahme des Bundesrates vom 6. April 2016.
- [20] Keller A. (2013): National Soil Information Systems to Support Spatial Planning Procedures. *disP – The Planning Review* 49, 68 – 71.
- [21] Knecht M., Lüscher C., Borer F. (2017): Bedürfnisabklärungen Bodeninformationen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- [22] BFS (2016): Umwelt. Taschenstatistik 2016. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.

-
- [23] BFS (Hrsg.) (2013): Die Bodennutzung in der Schweiz. Resultate der Arealstatistik. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- [24] Bundesamt für Statistik BFS, Arealstatistik
- [25] ARE (2016): Monitoring Bauen ausserhalb Bauzonen – Standbericht 2016. Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- [26] Arbeitsgruppe Bodenerosion Nordwestschweiz (undatiert): Erosion – eine schleichende Gefahr. Merkblatt Bodenerosion.
- [27] Alder S. et al. (2013): Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Gewässeranschlusskarte der Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2) im 2×2-Meter-Raster. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW).
- [28] FAO, ITPS (2015): Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy. www.fao.org/3/a-i5199e.pdf. Kapitel 6.1.2
- [29] Mosimann T. et al. (1990): Bodenerosion im Schweizerischen Mittelland. Ausmass und Gegenmassnahmen. Bericht 51 des Nationalen Forschungsprogrammes «Nutzung des Bodens in der Schweiz», Liebefeld-Bern, 262 S.
- [30] Prasuhn V., Fischler M. (undatiert): Wie viel Erde geht verloren? Hrsg.: Agridea. Merkblatt Erosion.
- [31] z. B.: Mosimann T., Rüttimann M. (1999): Bodenerosion selber abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Ackerbaugebiete des zentralen Mittellandes. Aarau, Bern, Luzern und Solothurn, 36 S.
- [32] BAFU, BLW (2013): Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Umwelt-Vollzug Nr. 1313, Bern.
- [33] <https://map.geo.admin.ch> > Erosionsrisiko
- [34] Prasuhn V. et al. (2011): Die hoch aufgelöste Erosionsrisikokarte ERK2 als Hilfsmittel für den Vollzug. Bulletin BGS 32, 75 – 80.
- [35] Prasuhn V. (2012): On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. Soil & Tillage Research 120, 137 – 146.
- [36] BLW und BAFU (Hrsg.) (2010): Erosion – Risiken beschränken. Merkblätter-Set.
- [37] Gisler S., Liniger H., Prasuhn V. (2010): Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2×2-Meter-Raster (ERK2). Hrsg.: Universität Bern und Agroscope. Im Auftrag des BLW.
- [38] Schaub D. (1989): Die Bodenerosion im Lössgebiet des Hochrheintales (Möhliner Feld/Schweiz) als Faktor des Landschaftshaushaltes und der Landwirtschaft. Physiogeographica 13, 227 S.
- [39] Ogermann P. et al. (2003): Ergebnisse langjähriger Bodenerosionskartierungen im Schweizer Tafeljura. Landnutzung und Landentwicklung 44/4, 151 – 160.
- [40] Alewell C., Egli M., Meusburger K. (2015): An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. Journal of Soils and Sediments 15, 1383 – 1399.
- [41] Prasuhn V. (2010): Zeitliche Variabilität von Bodenerosion – Analyse von 10 Jahren Erosionsschadenskartierungen im Schweizer Mittelland. Die Bodenkultur 61 (2), 47 – 57.
- [42] Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern (2017): Bodenbericht 2017.
- [43] Schmidt S., Alewell C., Panagos P., Meusburger K. (2016): Regionalization of monthly rainfall erosivity patterns in Switzerland. Hydrology and Earth System Sciences 20, 4359 – 4373.

-
- [44] Mosimann T. (2015): Erd-reich. Eine Reise durch die Böden des Kantons Basel-Landschaft und seiner Nachbargebiete. Verlag des Kantons Basel-Landschaft, Liestal.
- [45] Graf F. et al. (2014): Soil stability and natural hazards – from knowledge to action. NRP 68.
- [46] BAFU (2015): Rutschungen. Faktenblätter Gefahrenprozesse. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [47] BAFU (Hrsg.) (2016): Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Umwelt-Vollzug Nr. 1608. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [48] Pohl M., Alig D., Körner C., Rixen C. (2009): Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant and Soil* 324, 91 – 102.
- [49] Mösch D. (2014): Bodenmessnetz Nordwestschweiz: das erste Messjahr. Umwelt Aargau.
- [50] Arbeitsgruppe Landwirtschaftlicher Bodenschutz Nordwestschweiz und LU (2005): Bodenverdichtung – der Unterboden macht dicht. Merkblatt.
- [51] Agridea (2014): Bodenverdichtung vermeiden. Merkblatt.
- [52] Weisskopf P. et al. (1988): Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden. Bericht Nr. 20, NFP-22 «Boden».
- [53] Zentralschweizer Umweltdirektorenkonferenz (2013): Gemeinsame Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone (KABO-ZCH). Erfassung von Bodenverdichtung. Beprobungsrunde 2010.
- [54] www.umweltbundesamt.de > Themen > Boden > Bodenbelastungen > Verdichtung
- [55] Mosimann T. (2013): Erosionsmonitoring im Kanton Basel-Landschaft 1982 – 2012. Hrsg.: Amt für Umweltschutz und Energie (AUE), Liestal.
- [56] Frey B., Lüscher P. (2008): Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. Bodenmikroorganismen wirken als Zeiger für stark verdichtete Fahrspuren. *LWF aktuell* 67, 5 – 7.
- [57] Nemestothy N. (2015): Bedeutung der Bodenverdichtung für Ertrag und Nachhaltigkeit. BFW-Praxisinformation 39: Unser Boden. S. 8 – 13.
- [58] Hartmann M., Niklaus P.A., Zimmermann S., Schmutz S., Kremer J., Abarenkov K., Lüscher P., Widmer F., Frey B. (2014): Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. *The ISME Journal* 8, 226 – 244.
- [59] Lüscher P., Frutig F., Thees O. (2016): Physikalischer Bodenschutz im Wald. Waldbewirtschaftung im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Erhaltung der physikalischen Bodeneigenschaften. Umwelt-Wissen Nr. 1607. Bundesamt für Umwelt, Bern
- [60] Brändli U.-B. (Red.) (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004 – 2006. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [61] BAFU (Hrsg.), Bellini E. (2015): Boden und Bauen. Stand der Technik und Praktiken. Umwelt-Wissen Nr. 1508. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [62] Bono R., von Albertini N., Clément J.-P., Klaus G., Vogt M. (2014): Bodenkundliche Baubegleitung: der Schweizer Weg. In: Bodenschutz 01/14, 6 – 12.
- [63] BAFU (Hrsg.), Bellini E. (2015): Boden und Bauen. Stand der Technik und Praktiken. Umwelt-Wissen Nr. 1508. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [64] BAFU, BLW (2016): Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Umwelt-Wissen Nr. 1633. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [65] CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Hrsg.: C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, Occc. Zürich.

-
- [66] z. B.: Kanton Wallis (2007): Überwachung der Bodenqualität im Wallis. Dienststelle für Umweltschutz DUS, Sion.
- [67] Gubler A., Keller A., Wächter D., Bucheli T. (2016): Organische Schadstoffe in Böden: Übersicht und Handlungsbedarf. Faktenblatt. NABO und Agroscope (Hrsg.).
- [68] Keller T., Desaulles A. (2001): Böden der Schweiz. Schadstoffgehalte und Orientierungswerte (1990 – 1996). Umwelt-Materialien Nr. 139. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Bern.
- [69] BAFU (2016): NABEL – Luftbelastung 2015. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Umwelt-Zustand Nr. 1624. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [70] Thöni L., Seitler E., Schnyder E., Ehrenmann J. (2013): Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990 – 2010. Umwelt-Zustand Nr. 1328. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [71] Gubler A., Wächter D., Blum F., Bucheli T.D. (2015): Remarkably constant PAH concentrations in Swiss soils over the last 30 years. *Environmental Science: Processes & Impacts* 17, 1816 – 1828.
- [72] Bogdal C., Niggeler N., Glüge J., Diefenbacher P., Wächter D., Hungerbühler K. (2017): Temporal trends of chlorinated paraffins and polychlorinated biphenyls in Swiss soils. *Environmental Pollution* 220, 891 – 899.
- [73] Bundesamt für Gesundheit (2006): 20 Jahre seit dem Reaktorunfall von Tschernobyl. Die Auswirkungen auf die Schweiz.
- [74] www.bag.admin.ch/themen/strahlung/12267/12274/?lang=de (Abgerufen am 12.1.2017)
- [75] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.) (1992): Bodenverschmutzung durch den Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 185.
- [76] Kanton Zürich (1997): PAK und Schwermetalle in Böden entlang stark befahrener Strassen. *Umweltpraxis* 11, 27 – 29.
- [77] Hitz C. (1994): Schwermetallbelastung an Eisenbahnlinien und Strassen im zürcherischen Furttal. Diplomarbeit durchgeführt am Geographischen Institut der Universität Zürich und bei der Fachstelle für Bodenschutz des Kantons Zürich.
- [78] Colenco-Holinger AG (2000): Schadstoffe in Böden aus dem Strassenrandbereich (Strassenabrand). Kanton Basel-Landschaft und Aargau. Synthesebericht.
- [79] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.) (1992): Bodenverschmutzung durch den Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 185.
- [80] Kanton Aargau (2009): KABO AG. Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau. Hrsg.: Departement Bau, Verkehr und Umwelt.
- [81] Kanton St.Gallen (2014): Kantonale Bodenüberwachung – ein zuverlässiges Frühwarnsystem. *UmweltFacts* 1/2014.
- [82] Reutimann J. (2006): Kupfer- und Zink-Einträge durch Rindvieh- und Schweinefutter in landwirtschaftliche Systeme. Semesterarbeit. ETH Zürich.
- [83] Hammesfahr U., Heuer H., Manzke B., Smalla K., Thiele-Bruhn S. (2008): Impact of the antibiotic sulfadiazine and pig manure on the microbial community structure in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1583 – 1591.
- [84] Jechalke S. et al. (2014): Fate and effects of veterinary antibiotics in soil. *Trends in Microbiology* 22(9), 536 – 45.
- [85] Binh C.T., Heuer H., Kaupenjohann M., Smalla K. (2008): Piggery manure used for soil fertilization is a reservoir for transferable antibiotic resistance plasmids. *FEMS Microbiology Ecology* 66, 25 – 37.

-
- [86] Bigalke M., Rehmus A., Keller A. (2016): Belastung mineralisch gedüngter Böden mit Schadelementen (Arsen, Blei, Cadmium, Uran). Studie im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft, Bern.
- [87] Utermann J., Fuchs M. (2008): Uranium in German soils. In: De Kok L., Schnug E. (Hrsg.): Load and Fate of fertilizerderived Uranium. Backhuys Publishers, Leiden. S. 33 – 47.
- [88] Gisler A., Schwab L. (2015): Marktkampagne Dünger 2011/2012. Kennzeichnung und Schwermetalle. Hrsg.: Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- [89] BFS (2014): Die Stickstoff- und Phosphorbilanz der Schweizer Landwirtschaft. BFS Aktuell, Land- und Forstwirtschaft. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- [90] BLW (2014). Agrarbericht. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- [91] Doppler T. et al. (2017): Hohe PSM-Belastung in Schweizer Bächen. Aqua & Gas Nr. 4, 46 – 56.
- [92] Schmutz D. (2010): Statusbericht zur Belastung der Baselbieter Böden mit Organochlorpestiziden. Amt für Umweltschutz und Energie AUE, Liestal.
- [93] Kanton Aargau (2009): KABO AG. Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau. Hrsg.: Departement Bau, Verkehr und Umwelt.
- [94] Kanton St.Gallen (2009): Schadstoffe in Böden – eine unendliche Geschichte. Umwelt Facts 1/2009.
- [95] Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (2014): Der Rebbergboden. Boden des Jahres 2014. Faktenblatt.
- [96] Schudel P. (2009): Langfristige Überwachung der Schadstoffanreicherung in Landwirtschafts-, Siedlungs- und Waldböden. Bodenüberwachung im Kanton Basel-Landschaft. Dritt- und Viertbeprobung (1995 – 2008).
- [97] BABU GmbH Büro für Altlasten, Boden und Umwelt (2008): Vermutlich belastete Siedlungsgebiete. Kontrolluntersuchungen ausgewählter Standorte. Bericht. Umwelt und Energie Kanton Luzern.
- [98] Kanton Freiburg (2012): Freiburgerisches Bodenbeobachtungsnetz FRIBO. Bericht 2004 – 2011. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Resultate der städtischen Böden. Koordinationsgruppe für den Bodenschutz KGBö.
- [99] Pfenninger N. (2011): Schadstoffuntersuchung in ausgewählten Familiengartenarealen im Kanton Schaffhausen. Interkantonales Labor Schaffhausen.
- [100] Direktion der öffentlichen Bauten Zürich, Fachstelle Bodenschutz (1992): Der Einsatz von Hilfsstoffen in Winterthurer Pünten und Hausgärten.
- [101] Muntwyler T. (2012): Bodenbelastung in Familiengärten hält sich in Grenzen. Umwelt Aargau 56, 9 – 11.
- [102] Zentralschweizer Umweltdirektionen (2013): Den Blattsalat lieber ohne Blei. Bodenbelastung in Familiengärten wurde vertieft untersucht. news umwelt-zentral-schweiz.ch 3, S. 4.
- [103] Kanton Zürich (undatiert): Belasteter Gartenboden – was nun. Fachstelle Bodenschutz, Zürich.
- [104] Kanton Zürich (2011): Klärschlammasbringflächen im Kanton Zürich. 10-Jahres-Bilanz der Bodenüberwachung. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- [105] Jordi B. (2015): Altlastenbearbeitung auf Kurs. Stand der Untersuchung, Überwachung und Sanierung. Umwelt-Zustand Nr. 1516. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [106] Lepke T., Dillon S., Wermeille C. (2016): VASA-Abgeltungen bei Schiessanlagen. Mitteilung des BAFU als Vollzugsbehörde. 2. aktualisierte Ausgabe; Erstausgabe 2006. Umwelt-Vollzug Nr. 0634. Bundesamt für Umwelt, Bern.

-
- [107] Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. (Hrsg.) (2008): Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen.
- [108] Lal R. (2004): Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304, 1623 – 1627.
- [109] Kanton Zürich (2007): Bedeutung und Entwicklung des Humusgehaltes in Böden: Einfluss von Standort, Bewirtschaftung und Klimawandel. Amt für Landschaft und Natur, Zürich.
- [110] Oberholzer H.-R., Leifeld J., Mayer J. (2014): Changes in soil carbon and crop yield over 60 years in the Zurich Organic Fertilization Experiment, following land-use change from grassland to cropland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 696 – 704.
- [111] Leifeld J., Reiser R., Oberholzer H.-R. (2009): Consequences of Conventional versus Organic farming on Soil Carbon: Results from a 27-Year Field Experiment. *Agronomy Journal* 101, 1204 – 1218.
- [112] Canton de Vaud (2014): Indicateurs de développement durable. Matière organique et activité biologique dans les sols agricoles. Bureau pEaudSol.
- [113] Kanton Freiburg (2012): Freiburgisches Bodenbeobachtungsnetz FRIBO. Bericht 2004 – 2011. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Resultate der landwirtschaftlichen Böden. Koordinationsgruppe für den Bodenschutz KGBö.
- [114] Schudel P. (2009): Langfristige Überwachung der Schadstoffanreicherung in Landwirtschafts-, Siedlungs- und Waldböden. Bodenüberwachung im Kanton Basel-Landschaft. Dritt- und Viertbeprobung (1995 – 2008).
- [115] BLW (2014): Agrarbericht. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- [116] Lachat T. et al. (2010): Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900 – Ist die Talsohle erreicht? Bristol-Stiftung, Zürich. Haupt Verlag, Bern.
- [117] Wüst-Galley C., Leifeld J. (2017): Entwicklung der Kohlenstoffvorräte und Treibhausgasemissionen der Moorböden. In: Stuber M., Müller M., Bürgi M. (Eds.): Vom «eroberten Land» zum Renaturierungsprojekt – Geschichte der Feuchtgebiete in der Schweiz seit 1700. Haupt Verlag, Bern.
- [118] BUWAL (Hrsg.) (2002): Moore und Moorschutz in der Schweiz. Bern.
- [119] Leifeld J., Müller M., Fuhrer J. (2011): Peatland subsidence and carbon loss from drained temperate fens. *Soil Use and Management* 27, 170 – 176.
- [120] Paul S., Alewell Ch., Leifeld J. (2017): Greenhouse gas emissions from organic soils of different land use. Endbericht zum Projekt «Klimarelevanz von Mooren». Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern.
- [121] Tiemeyer B. et al. (2016): High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology*, 22, 4134 – 4149.
- [122] Robledo Abad C., Bretscher D., Leifeld J. (2016): Land- und Forstwirtschaft und andere Landnutzung. *Swiss Academies Reports* 11, 181 – 185.
- [123] FOEN (2017): Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2015. Submission of April 2017 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment, Bern. www.climate reporting.ch.
- [124] www.nfp68.ch > Newsletter vom 5. April 2017: Projekt «Moorböden» abgeschlossen.
- [125] Paul S., Schellenberger A. (2015): Organische Böden, Klima und der Kohlenstoffmarkt. *Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz Bulletin* 36, 57 – 69.

- [126] Béguin J., Smola S. (2010): Stand der Drainagen in der Schweiz. Bilanz der Umfrage 2008. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- [127] Klaus G. (Red.) (2007): Zustand und Entwicklung der Moore in der Schweiz. Ergebnisse der Erfolgskontrolle Moorschutz. Umwelt-Zustand Nr. 0730. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [128] Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattlinger A., Hagedorn F. (in Vorbereitung): NFP68 Teilsynthese «Boden und Umwelt». Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Böden.
- [129] Manusch C., Bugmann H., Wolf A. (2014): The impact of climate change and its uncertainty on carbon storage in Switzerland. *Regional Environmental Change* 14, 1437.
- [130] Hagedorn F., Moeri A., Walthert L., Zimmermann S. (2010): Kohlenstoff in Schweizer Waldböden – bei Klimaerwärmung eine potenzielle CO₂-Quelle. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 161, 530 – 535.
- [131] Streit K., Hagedorn F., Hiltbrunner D., Portmann M., Saurer M., Buchmann N., Wild B., Richter A., Wipf S., Siegwolf R.T.W. (2014): Soil warming alters microbial substrate use in alpine soils. *Global Change Biology* 20, 1327 – 1338.
- [132] Kanton Zürich (2007): Bedeutung und Entwicklung des Humusgehaltes in Böden: Einfluss von Standort, Bewirtschaftung und Klimawandel. Amt für Landschaft und Natur, Zürich.
- [133] Gosheva S., Walthert L., Niklaus P.A., Zimmermann S., Gimmi U., Hagedorn F. (2017): Reconstruction of Historic Forest Cover Changes Indicates Minor Effects on Carbon Stocks in Swiss Forest Soils. *Ecosystems*. doi:10.1007/s10021-017-0129-9
- [134] Prietzel J., Zimmermann L., Schubert A., Christophel D. (2016): Organic matter losses in German Alps forest soils since the 1970s most likely caused by warming. *Nature Geoscience* 13, 543 – 548.
- [135] BAFU (2014): Stickstoff – Segen und Problem. *Magazin Umwelt* 2/2014. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [136] Hautier Y., Niklaus P. A., Hector A. (2009): Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. *Science* 324, 636 – 638.
- [137] Roth T. et al. (2013): Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 178, 121 – 126.
- [138] Kohli L. (2011): Stickstoffeintrag aus der Luft verändert Vielfalt. *BDM-Facts* Nr. 3. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [139] Rihm B., Achermann B. (2016): Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Federal Office for the Environment, Bern. *Environmental studies* no. 1642. 78 p.
- [140] Bornand C., Gyga A., Juillerat P., Jutzi M., Möhl A., Rometsch S., Sager L., Santiago H., Eggenberg S. (2016): Rote Liste Gefässpflanzen. Gefährdete Arten der Schweiz. *Umwelt-Vollzug* Nr. 1621. Bundesamt für Umwelt, Bern, und Info Flora, Genf.
- [141] Fischer M. et al. (2015): Zustand der Biodiversität in der Schweiz 2014. Hrsg.: Forum Biodiversität Schweiz et al., Bern.
- [142] Braun S., Rihm B., Flückiger W. (2012): Stickstoffeinträge in den Schweizer Wald: Ausmass und Auswirkungen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 163 (9), 355 – 362.
- [143] Flückiger W., Braun S. et al. (2011): Auswirkung erhöhter Stickstoffbelastung auf die Stabilität des Waldes. Synthesebericht im Auftrag des BAFU. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch.

- [144] De Witte L., Rosenstock N. P., van der Linde S., Braun S. (2017): Nitrogen deposition changes ectomycorrhizal communities in Swiss beech forests and thereby hampers nutrient uptake. Manuskript.
- [145] Augustin S., Achermann B. (2012): Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz: Entwicklung, aktueller Stand und Bewertung. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 163 (9), 323 – 330.
- [146] Braun S., Flückiger W. (2012): Bodenversauerung in den Flächen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 163 (9), 374 – 382.
- [147] Blume H.-P. et al. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Springer Spektrum.
- [148] Rigling A., Schaffer H.P. (Eds.) (2015): Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- [149] Braun S., Flückiger W. (2013): Wie geht es unserem Wald? 29 Jahre Walddauerbeobachtung. Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU. Ergebnisse von 1984 bis 2012. Bericht 4. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch.
- [150] Braun S. (2017): Bodenlösungsbericht. In Bearbeitung.
- [151] Wagg C., Bender F., Widmer F., van der Heijden M. (2014): Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. Proceedings of the National Academy of Sciences 111 (14), 5266 – 5270.
- [152] Bender S.F., van der Heijden, M.G.A. (2015): Soil biota enhance agricultural sustainability by improving crop yield, nutrient uptake and reducing nitrogen leaching losses. Journal of Applied Ecology 52, 228 – 239.
- [153] Oehl F., Laczko E., Bogenrieder A., Stahr K., Bösch R., van der Heijden M., Sieverding E. (2010): Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. Soil Biology and Biochemistry 42, 724 – 738.
- [154] Gadermaier F., Berner A., Fliessbach A., Friedel J. K., Mäder P. (2012): Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. Renewable Agriculture and Food Systems 27, 1 – 13.
- [155] Säle V., Aguilera P., Laczko E., Mäder P., Berner A., Zihlmann U., van der Heijden M. G. A., Oehl F. (2015): Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Biology and Biochemistry 84, 38 – 52.
- [156] Kuntz M., Berner A., Gattinger A., Scholberg J. M., Mäder P., Pfiffner L. (2013): Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming. Pedobiologia 56, 251 – 260.
- [157] Hug A.-S., Gubler A., Widmer F., Frey B., Oberholzer H., Meuli R.G. (2015): NABObio12_13. Ergebnisse der Pilotphase 2012 und 2013. Agroscope Science Nr. 22, Mai 2015.
- [158] Oberholzer H.-R., Scheid S. (2007): Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Umwelt-Wissen Nr. 0723. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [159] Esperschütz J., Gattinger A., Mäder P., Schloter M., Fliessbach A. (2007): Response of soil microbial biomass and community structures to conventional and organic farming systems under identical crop rotations. FEMS Microbiology Ecology 61, 26 – 37.
- [160] Widmer F., Rasche F., Hartmann M., Fliessbach A. (2006): Community structures and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment. Applied Soil Ecology 33, 294 – 307.

-
- [161] Fliessbach A., Oberholzer H.-R., Gunst L., Mäder P. (2007): Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118, 273 – 284.
- [162] Hartmann M., Frey B., Mayer J., Mader P., Widmer F. (2015): Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal* 9, 1177 – 1194.
- [163] Mäder P., Peng S., Fliessbach A. (2002): Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln auf Bodenmikroorganismen. *VBB-Bulletin* 6, 6 – 7.
- [164] Fliessbach A., Mäder P., Mayer J., Oehl F., Pfiffner L., Hartmann M., Widmer F. (2015): Welche landwirtschaftlichen Anbausysteme fördern das Bodenleben? *Hotspot* 32, 8 – 9.
- [165] Jossi W., Zihlmann U., Dubois D., Pfiffner L. (2007): DOK-Versuch: Anbausystem-Effekte auf die Regenwürmer. *Agrarforschung* 14, 66 – 71.
- [166] Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2016): Faktenblatt zur Ernährungssicherheit. Nr. 3: Produktionsintensität und -potenzial.
- [167] Frey B., Widmer F., Hartmann M. (2015): Grossflächige Untersuchungen der Bodenbiodiversität sind endlich realisierbar. *Hotspot* 32, 16 – 17.
- [168] Hug A.-S., Widmer F., Frey B., Oberholzer H., Campos-Herrera R., Meuli R.G. (2015): Wie geht es den Böden in der Schweiz? Biologische Untersuchungen der Nationalen Bodenbeobachtung NABO. *Hotspot* 32, 18 – 19.
- [169] Schreiber P. (1997): Geländeauffüllungen: Probleme mit der Qualität der geschütteten Böden. *Zürcher UmweltPraxis* Nr. 13, 67 – 70.
- [170] Okopnik F. (2005): Terrainveränderungen mit Aushubmaterial – mehr Natur oder Schaden? *Umwelt Aargau* 30, 11 – 14.
- [171] Kanton Bern (2017): Merkblatt Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung ausserhalb Bauzonen.
- [172] Kanton Zürich (2003): Qualität von Geländeauffüllungen. Fachstelle Bodenschutz, Zürich.
- [173] Kanton Zürich (Hrsg.) (undatiert): Terrainveränderungen in der Landwirtschaftszone. Merkblatt. Fachstelle Bodenschutz, Zürich.
- [174] Fry P., Liechti K. (2009): Wiederverwendung von abgetragenem, sauberem Boden in der Landwirtschaft. Erarbeitung der Grundlagen für die Entwicklung eines akteurorientierten Lösungsansatzes. Abschlussbericht. Wissensmanagement Umwelt GmbH.
- [175] Kanton Bern (2017): Merkblatt Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung ausserhalb Bauzonen.
- [176] Etterlin F., Gsponer R. (2015): Rekultivierte Böden nützen der Landwirtschaft. *Zürcher UmweltPraxis* Nr. 82, 13 – 16.
- [177] Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2006): Sachplan Fruchtfolgeflächen FFF: Vollzugshilfe.
- [178] Hepperle E., Stoll T. (2006): Ressourcenplan Boden. Ein Konzept zum planerisch-nachhaltigen Umgang mit Bodenqualität. *Umwelt-Wissen* Nr. 0633. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- [179] Interface (2013): Stärkung des Vollzugs im Umweltbereich. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Abteilung Recht.
- [180] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2001): Erläuterungen zur Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo).
- [181] www.eda.admin.ch/post2015/de/home.html (Abgerufen am 16.5.2017)
- [182] BAFU, BLW (2008): Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. *Umwelt-Wissen* Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[183] Buchter B., Häusler S. (2009): Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Kantonale Bodenschutzfachstellen (Hrsg.).

[184] Kantone AG, AI, BE, BL, FR, GE, GR, JU, LU, NE, SG, SO, SZ, TG, UR, VD, VS, ZG, ZH und Fürstentum Liechtenstein (2004): Freizeitveranstaltungen auf der «Grünen Wiese». Merkblatt.

[185] Arbeitsgruppe Landwirtschaftlicher Bodenschutz Nordwestschweiz und LU (2005): Bodenverdichtung – der Unterboden macht dicht. Merkblatt.

[186] Béguin J., Smola S. (2010): Stand der Drainagen in der Schweiz. Bilanz der Umfrage 2008. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.

[187] Schweizerischer Bundesrat (2016): Natürliche Lebensgrundlagen und ressourceneffiziente Produktion. Aktualisierung der Ziele. Bericht in Erfüllung des Postulats 13.4284 Bertschy vom 13. Dezember 2013.

[188] Schweizerischer Bundesrat (2012): Strategie Biodiversität Schweiz vom 25. April 2012 des Bundesrates, am 24. Juli 2012 im Bundesblatt publiziert.

[189] Knecht M., Lüscher C., Borer F. (2017): Bedürfnisabklärungen Bodeninformationen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

[190] BHP – Brugger und Partner AG (2017): Konzept für ein flächendeckendes Bodeninformationssystem. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

[191] Schweizerische Eidgenossenschaft (2014): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014 – 2019. Bundesamt für Umwelt (Hrsg.), Bern.

[192] CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Hrsg.: C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, OcCC. Zürich.

Weblinks

Bundesamt für Umwelt BAFU

www.bafu.admin.ch > Boden

Bundesamt für Landwirtschaft BLW

www.blw.admin.ch > Nachhaltige Produktion > Boden

Bundesamt für Raumentwicklung ARE

www.are.admin.ch > Themen > Landwirtschaftsland

Bundesamt für Statistik BFS

www.bfs.admin.ch > Statistik finden > Raum, Umwelt > Bodennutzung, -bedeckung

Kantonale Fachstellen für Bodenschutz

www.kvu.ch > Adressen > Boden

Agroscope

www.agroscope.admin.ch > Themen > Boden

Nationale Bodenbeobachtung NABO

www.nabo.ch

Nationales Bodeninformationssystem NABODAT

www.nabodat.ch

Nationales Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68)

www.nfp68.ch

Publikumsbroschüre «Bodenschätze» zu den Bodenfunktionen

www.nfp68.ch > Publikationen

Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz

www.soil.ch