Jodok Guntern / Florian Altermatt / Ole Seehausen / Christian Stamm / Marcel van der Heijden

Auswirkungen übermässiger Stickstoff- und Phosphor-einträge auf die Biodiversität

Résumé → 752 / Riassunto → 752

I.	Einleitung	736
II.	Historische und heutige Nährstoffeinträge und -gehalte	737
1.	Stickstoff	737
2.	Phosphor	738
III.	Wirkungsweise und Auswirkungen von Stickstoffeinträgen	739
IV.	Wirkungsweise und Auswirkungen von Phosphoreinträgen in Gewässer	742
V.	Beurteilung einer Übermässigkeit	743
VI.	Schlussfolgerung	746
	Literaturverzeichnis	748

Zusammenfassung

Übermässige Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Umwelt gehören zusammen mit Änderungen der Land- und Gewässernutzung, der Übernutzung natürlicher Ressourcen, der Umweltverschmutzung, invasiven gebietsfremden Arten und dem Klimawandel zu den Hauptgründen des Biodiversitätsrückgangs. Überschüsse dieser Nährstoffe verändern und reduzieren die Artenzahlen, die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften, Interaktionen zwischen Arten sowie Ökosystemprozesse. Die flächendeckenden Einträge, die heute mehrheitlich aus der Landwirtschaft stammen, vereinheitlichen zudem die Standortbedingungen weiträumig, was den Verlust regionaler Besonderheiten verursacht. Dies alles kann nicht nur zum irreversiblen Verschwinden von Arten und zum Verlust genetischer und funktioneller Diversität führen, sondern beeinträchtigt auch Ökosystemleistungen wie zum Beispiel die Trinkwasserqualität und verschiedene Waldfunktionen. Entsprechend können neben der Biodiversität weitere Schutzgüter wie Wasser-, Boden-, Luftqualität, Treibhausgasbilanz und Gesundheit ebenfalls beeinträchtigt werden. Ursachen und Auswirkungen dieser Einträge sind wissenschaftlich gut belegt.

Der vorliegende Artikel soll einen Einstieg in das Thema bieten. Es werden die Wirkungsweisen übermässiger Stickstoff- und Phosphoreinträge auf die Biodiversität thematisiert, diskutiert, wie sich die Stickstoffdeposition über die Luft und Phosphorgehalte in Seen im Laufe der Zeit verändert haben und wie sich aus naturwissenschaftlicher Sicht beurteilen lässt, ob Einträge und Gehalte von Stickstoff und Phosphor übermässig sind. Schlussendlich werden wirkungsvolle Handlungsansätze im Landwirtschafts- und Ernährungssystem präsentiert.

I. Einleitung

Pflanzen benötigen für Ihr Wachstum Licht, Wasser und Nährstoffe. Oft wird zwischen Hauptnährstoffen (z. B. Stickstoff, Phosphor oder Kalium) und Spurennährstoffen (z. B. Eisen, Mangan oder Kupfer) unterschieden. Dabei limitieren jeweils spezifische Nährstoffe — in Landlebensräumen meist Stickstoff, in Gewässern meist Phosphor — das Pflanzenwachstum. Entsprechend sind für die landwirtschaftliche Produktion Nährstoffe unerlässlich. Im Übermass können Nährstoffe aber unerwünschte Auswirkungen auf verschiedene Schutzgüter wie Wasser-, Boden-, Luftqualität, Treibhausgasbilanz, Gesundheit, Biodiversität und Ökosystemfunktionen haben (Bobbink / Hettelingh, 2011; Sutton et al., 2011; de Witte et al., 2017; BAFU, 2019, 2020; Kiefer et al., 2020). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Auswirkungen und Wirkungsketten von Stickstoff und seinen verschiedenen reaktiven Formen sowie Phosphor unterschiedlich sind. Entsprechend sind auch unterschiedliche Ansätze nötig, um übermässige Einträge und Gehalte dieser Nährstoffe zu reduzieren.

Die Ursachen wie auch Auswirkungen der übermässigen Einträge sind wissenschaftlich seit Jahrzehnten gut dokumentiert (Elser et al., 2007; Bobbink / Hettelingh, 2011; Sutton et al., 2011; Elser / Haygarth, 2021), und die Schweizer Gesetzgebung adressiert die Thematik (BAFU / BLW, 2016). Trotzdem gelangt in der Schweiz nach wie vor zu viel Stickstoff in die Umwelt, und Phosphorgehalte und dadurch mitverursachte Sauerstoffdefizite sind in zahl-

reichen Seen immer noch problematisch (Guntern et al., 2020; Alexander / Seehausen, 2021; BAFU [Hrsg.], 2022).

II. Historische und heutige Nährstoffeinträge und -gehalte

Für die letzten Jahrzehnte sind Messungen, Modellierungen und Stoffflussanalysen für den Stickstoff- und Phosphorhaushalt der Schweiz verfügbar. Diese geben nicht nur Auskunft zur Entwicklung, sondern auch zu den treibenden Kräften. Dank Umweltarchiven wie Gletschern und Seesedimenten können des Weiteren historische Stickstoffdepositionsraten via die Luft (aus Eisbohrkernen [Fig. 1] wie auch Phosphorgehalte in Seen, basierend auf im Sediment eingelagerten Kieselalgen (Fig. 2), rekonstruiert werden. Für die letzten Jahrzehnte ist zudem ein Vergleich mit tatsächlichen Stickstoff-Immissionen wie auch Phosphorkonzentrationen in Gewässern möglich.

Über Jahrhunderte war die Verfügbarkeit von Stickstoff und Phosphor relativ gleichbleibend, und die Nährstoffbilanz der Schweiz war einigermassen ausgeglichen. Erst durch den umfangreichen Abbau und die Nutzung von Guano und dem Haber-Bosch-Verfahren zur Synthese von Ammoniak wurden Phosphor und Stickstoff ab Mitte des 19. Jahrhunderts resp. ab Anfang des 20. Jahrhunderts in grossem Masse verfügbar. Dies führte zu sehr hohen Einträgen von Phosphor und reaktivem Stickstoff, vor allem in der Landwirtschaft. Während die Stickstoffnutzung, und entsprechende Emissionen, seit 1900 praktisch ununterbrochen angestiegen sind, und auf sehr hohem Niveau verharren, erreichten die Phosphoremissionen in den 1960er- bis 1980er-Jahren ihren Höhepunkt (Sutton et al., 2011; BAFU [Hrsg.], 2022).

1. Stickstoff

2018 war in der Schweiz die Landwirtschaft für mehr als die Hälfte der Stickstoffeinträge in die Umwelt und darunter für über 90 Prozent der Ammoniak-Emissionen, die für die Stickstoffdeposition besonders relevant sind, verantwortlich. Zu letzteren trägt die Tierproduktion, angetrieben durch die Nachfrage nach Fleisch und Milchprodukten, 93 Prozent bei (Kupper et al., 2022; Reutimann et al., 2022) (siehe auch Artikel Frank Liebisch). In diesem Kontext ist bemerkenswert, dass global über ein Drittel der Getreideproduktion als Tierfutter verwendet wird (The Economist, 2022). Die Stickstofffracht, welche mit Futtermittelimporten in die Schweiz gelangt, gehört zu den wichtigsten Treibern des Schweizer Stickstoffhaushaltes und hat zwischen 2005 und 2018 um 42 Prozent zugenommen (Reutimann et al., 2022).

Die Stickstoffdeposition über die Luft (Immissionen) ging zwar zwischen 1990 und 2015 gemäss Modellierungen dank technischer Massnahmen und einer Reduktion der Nutztierbestände um 28 Prozent zurück (Rihm / Künzle, 2019), es gelangt aber in grossen Teilen des Mittellandes und des Juras heute nach wie vor ein Vielfaches mehr an Stickstoff in die Lebensräume als unter natürlichen Bedingungen. Gleichzeitig nahmen aber in den letzten Jahrzehnten auf vielen Flächen im Berggebiet bzw. im subalpinen Bereich die Stickstoffeinträge durch landwirtschaftliche Düngung zu, weil das Grünland intensiver bewirtschaftet wird (Graf et al., 2014).

Die natürliche Eintragsrate im Schweizer Flachland wird basierend auf Messungen im Schweizer Hochgebirge (Schwikowski, 2016; Fig. 1) und im Norden Europas (Binkley / Högberg, 1997; Akselsson et al., 2010) auf 0,5–5 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr geschätzt. 2015 betrug die durchschnittliche Eintragsrate in der Schweiz 15 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr (Rihm / Künzle, 2019), war also 3–30-mal höher als die natürliche Eintragsrate. In den Schweizer Wäldern lag die durchschnittliche Eintragsrate 2015 gar bei 20 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr (Rihm / Künzle, 2019). Je nach Standort schwankt dieser Wert zwischen 2 und über 65 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr (Rihm / Achermann, 2016).

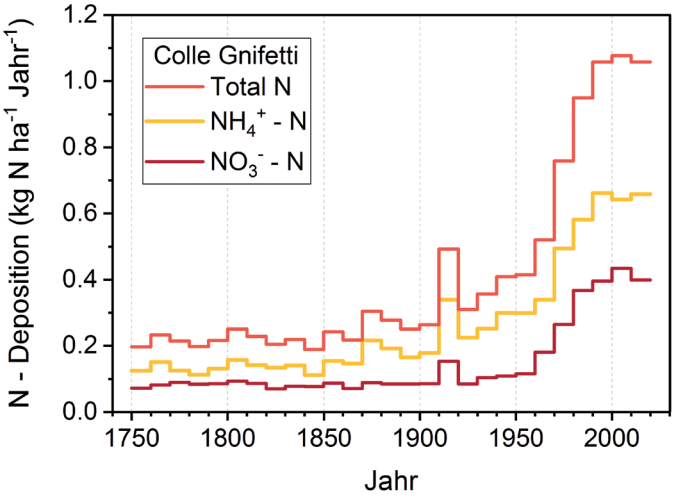

Fig. 1: Die Stickstoffdeposition nahm insbesondere im 20. Jahrhundert stark zu. Zeitreihe der Stickstoffdeposition in den letzten 270 Jahren im Monte-Rosa Massiv. Die Einträge wurden aus einem Eiskern vom Colle Gnifetti in den Schweizer Alpen rekonstruiert und sind als Mittelwerte über zehn Jahre gezeigt. Auf diesem Gletscher bleibt geschätzt nur ca. 25 Prozent des Niederschlages liegen, der Rest wird weggeweht. Deshalb wird die Depositionsrate um ca. einen Faktor vier unterschätzt und ist nicht direkt mit der Depositionsrate im Mittelland vergleichbar.
Grafik: Margit Schwikowski, Anja Eichler.

2. Phosphor

Der Schweizer Phosphorhaushalt wird insbesondere durch die Land- und Abfallwirtschaft beeinflusst. Die Phosphorimporte aus dem Ausland erfolgen zu 90 Prozent über die Landwirtschaft (Futtermittel, Mineraldünger). Exporte erfolgen über die Gewässer, aber in viel geringerem Ausmass als die Importe (Binder et al., 2009). Entsprechend weisen zahlreiche Grün- und Ackerlandflächen heute eine Überversorgung mit Phosphor auf (Flisch / Zimmermann, 2018).

In den Gewässern haben sich die Gesamtphosphorgehalte in zahlreichen Seen der Schweiz im 20. Jahrhundert teilweise mehr als Verzehnfacht und in den 1950er- bis 1980er-Jahren Spitzenwerte erreicht (Fig. 2). Seither sind insbesondere dank Phosphatverbot in Waschmitteln und dem Ausbau der Kläranlagen die Phosphat-Konzentrationen in vielen Seen deutlich gesunken. Doch in mehreren grösseren Seen (z. B. Zugersee, Baldeggersee, Lago di Lugano) und vielen Kleinseen mit umgebender landwirtschaftlicher Nutzung sind die Phosphorgehalte

nach wie vor deutlich höher als die historischen Gehalte, und die Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser sind zu gering (BAFU / BLW, 2016; Binderheim, 2019; BAFU [Hrsg.], 2022), so dass die Reproduktion von einheimischen endemischen Fischen (v. a. Felchen) gestört oder ganz unterbunden ist. In gewissen Seen wie zum Beispiel dem Greifensee nehmen Phosphorgehalte aufgrund von Phosphorrücklösung aus den Sedimenten teilweise temporär auch wieder zu (AWEL [Hrsg.], 2018).

Fig. 2: Rekonstruierte und gemessene Gesamtphosphorgehalte in Seen im Kanton Zürich. Quelle: Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Abteilung Gewässerschutz; Aqua Plus 2001a, 2001b, 2004.

III. Wirkungsweise und Auswirkungen von Stickstoffeinträgen

Die Auswirkungen auf die Biodiversität entstehen in Folge toxischer, eutrophierender[1] und versauernder Wirkung oder einer erhöhten Empfindlichkeit von Pflanzen auf Stress wie z. B. Trockenheit oder Krankheitserreger (Fig. 3). Andere Faktoren wie Landnutzungsänderungen oder Klimawandel können die negativen Effekte verstärken. Wegen den flächendeckenden Stickstoff-Einträgen über die Luft werden die Standortbedingungen, und damit auch die Artgemeinschaften, weiträumig einheitlicher, sie «verarmen». Einige wenige Pflanzenarten verdrängen die zahlreichen anderen Pflanzenarten, die an stickstoffarme Bedingungen angepasst sind (Hautier et al., 2009; Bobbink et al., 2010; Staude et al., 2020). Regionale Besonderheiten gehen dadurch verloren und die Lebensräume werden grossflächig monoton und artenarm. Diese Problematik ist im Mittelland und in Tallagen

1 Anreicherung von Stickstoff oder Phosphor in Lebensräumen mit unerwünschten Auswirkungen auf die Biodiversität und Wasserqualität.

bereits weit fortgeschritten und beschleunigt sich auch in Berggebieten stark (Roth et al., 2013; Graf et al., 2014). Die negativen Auswirkungen auf die Biodiversität sind häufig irreversibel (Sutton et al., 2011; Alexander / Seehausen, 2021).

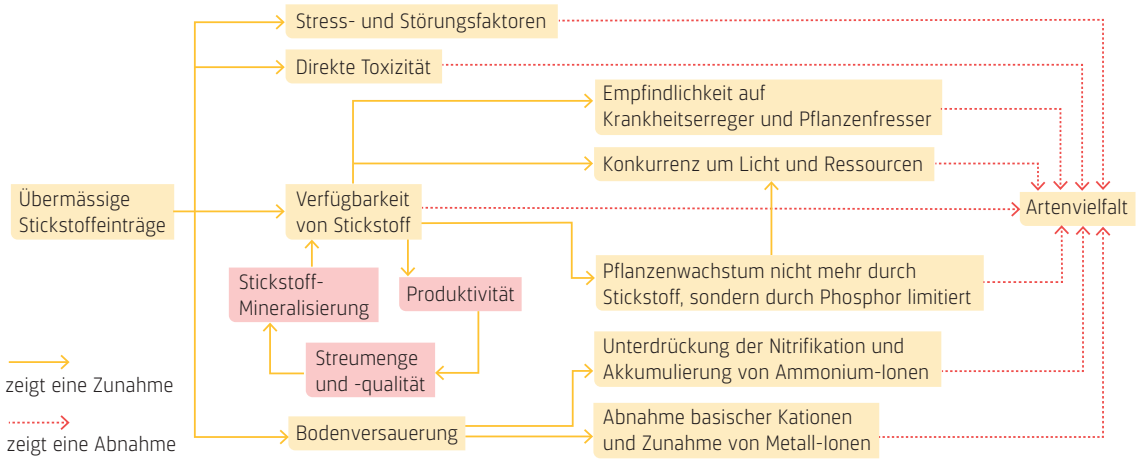

Fig. 3: Auswirkungen übermässiger Stickstoffeinträge auf die terrestrische Artenvielfalt. Angepasst von Dise et al. in: The European Nitrogen Assessment (Sutton et al., 2011); reproduziert mit Genehmigung von Cambridge University Press PLSclear.

Stickstoffüberschüsse verändern Artenzahlen, die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften, Interaktionen zwischen Arten sowie Ökosystemprozesse (Sutton et al., 2011). Dies führt nicht nur zum Verschwinden von Arten und zum Verlust genetischer und funktioneller Diversität, sondern beeinträchtigt auch Ökosystemleistungen. So reduzieren Nitrat-Einträge ins Grundwasser dessen Nutzbarkeit als Trinkwasser stark und können hohe Kosten verursachen. Im Grundwasser wurde von 2007 bis 2014 der Anforderungswert der Gewässerschutzverordnung (max. 25 mg Nitrat/L) für Gewässer zur Trinkwassernutzung an 15–20 Prozent der Messstellen (vorwiegend im Mittelland) überschritten; an 80 Prozent der Messstellen im Mittelland ist er erhöht. In Ackerbaugebieten ist der Nitrat-Wert im Grundwasser an ca. 40 Prozent der Messstellen zu hoch (BAFU, 2019).

Die Critical Loads für die Stickstoffdeposition (Fig. 6) sind auf fast allen Hochmooren, auf rund 90 Prozent der Waldfläche, auf drei Viertel der Flachmoore sowie auf einem Drittel der Trockenwiesen und -weiden der Schweiz überschritten (Rihm / Künzle, 2019). So zeigt auch das Biodiversitätsmonitoring Schweiz, dass die Artenvielfalt verschiedener Organismengruppen in Wiesen und Weiden mit zunehmender Stickstoffdeposition abnimmt (Koordinationsstelle BDM 2011; Roth et al., 2013). Auf Flächen mit abnehmender Deposition und anderweitig günstigen Bedingungen kann sich die Pflanzengemeinschaft teilweise auch wieder erholen (Kammer et al., 2022). Bei verschiedenen Moor- und nährstoffarmen Wiesentypen ist eine Regeneration aber kaum und, wenn überhaupt, erst nach mehreren Jahrzehnten möglich (Delarze et al., 2016).

Übermässige Stickstoffeinträge wirken sich durch Veränderung der Pflanzengemeinschaften, der Vegetationsstruktur und der veränderten Nutzung

(z. B. intensiveres Mahdregime) indirekt negativ auf Insekten und andere Tiere aus (Hautier et al., 2009; Cleland / Harpole, 2010; Bobbink / Hettelingh, 2011; Farrer / Suding, 2016; Nijssen et al., 2017; Pöyry et al., 2017). Für Insekten führt dies in vielen Fällen zu einer Verschlechterung der Lebensraumqualität, wie etwa einem ungeeigneteren Mikroklima (WallisDeVries / van Swaay, 2006; Klop et al., 2015) oder einer Abnahme von Nahrungsangebot und -qualität (Lebeau et al., 2016; Kurze et al., 2018).

Spezialisierte Insektenarten, die auf eine oder wenige Pflanzenarten angewiesen sind, sind durch den Stickstoffeintrag besonders bedroht (Biesmeijer et al., 2006; Sánchez-Bayo / Wyckhuys, 2019). So ist auch für die Schweiz nachgewiesen, dass sowohl Artenreichtum von Schmetterlingen als auch ihre Individuenzahlen, insbesondere von gefährdeten Schmetterlingsarten oder von Zielarten der Umweltziele Landwirtschaft, mit zunehmender Stickstoffdeposition abnehmen (Roth et al., 2021).

Moore sind trotz verfassungsmässigem Schutz auch in den letzten 15–20 Jahren deutlich nährstoffreicher geworden, was zu unerwünschten Veränderungen der typischen Lebensgemeinschaften geführt hat (Bergamini et al., 2019). In Mooren beeinträchtigen übermässige Stickstoffeinträge neben der Biodiversität zusätzlich die Funktion als Kohlenstoffspeicher, wodurch mehr Treibhausgase freigesetzt werden (Sutton et al., 2011). Aber auch Stickstoff-Emissionen aus gedüngten Böden haben in Form von Lachgas eine deutliche Klima-Wirkung. So ist die Klima-Wirkung von Lachgas 298-mal stärker als von CO_2 und Lachgas-Emissionen waren 2020 für 6.7 Prozent des Schweizer Treibhausgaseffektes verantwortlich (BAFU, 2022).

In Wäldern verändern die übermässigen Stickstoffeinträge und die dadurch entstehenden Nährstoffungleichgewichte und die Bodenversauerung Mykorrhiza-Gemeinschaften, stören ihre Symbiose mit Bäumen sowie die Nährstoffversorgung der Bäume (de Witte et al., 2017; Krüger et al., 2020). Sie hemmen die Tiefendurchwurzelung und das Wachstum von Feinwurzeln (Braun et al., 2012) und beeinträchtigen dadurch die Baumvitalität und auf Standorten mit Stickstoffeinträgen über 30 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr auch den Holzzuwachs (de Witte et al., 2018; Etzold et al., 2020). Weiter wurde eine erhöhte Anfälligkeit der Bäume auf Parasiten beobachtet (Braun et al., 2012). Im Zusammenhang mit der Bodenversauerung wird zudem eine höhere Anfälligkeit auf Trockenheit und Windwurf festgestellt (Braun et al., 2003; Mayer et al., 2005). Dies kann die Funktion der Schutzwälder gefährden und ist im Kontext des Klimawandels relevant. Waldböden sorgen des Weiteren für sauberes Trinkwasser. Fortlaufend hohe Stickstoff-Deposition gefährdet diese Filterwirkung (Waldner et al., 2016).

Übermässige Stickstoffeinträge haben auch direkt negative Auswirkungen auf die Gewässer- und Trinkwasserqualität; einige Gewässerorganismen reagieren darauf sehr empfindlich (SRU 2015). Auch wenn sich die Qualität der Oberflächengewässer bezüglich der Nährstoffbelastung im Vergleich zu den 1970–1980er-Jahren stark verbessert hat, treten an Messstellen nach wie vor Überschreitungen der Zielvorgaben für Nitrat auf. Insbesondere trägt die Stickstofffracht, welche die Schweiz über die Flüsse exportiert zu einer Überdüngung der Meere bei (BAFU [Hrsg.], 2022).

IV. Wirkungsweise und Auswirkungen von Phosphoreinträgen in Gewässer

Phosphoreinträge in Gewässer erhöhen die Nährstoffverfügbarkeit und verursachen ein erhöhtes Algenwachstum. Die abgestorbenen Algen werden mikrobiell abgebaut, was zu einem Sauerstoffmangel bis hin zu sauerstofflosen Bedingungen im Tiefenwasser führt, was die meisten Organismen nicht überleben.

Bei vielen Seen gibt es eine sogenannte Zirkulationsphase im Herbst resp. Frühling, in welcher die gesamte Wassersäule im See durchmischt wird, Sauerstoff in die Tiefe eingetragen und Nährstoff- und Sauerstoffkonzentrationen über die Wassersäule ähnlich sind (Fig. 4). In der sogenannten Stagnationsphase im Sommer hingegen ist der See geschichtet, und es findet praktisch kein Austausch von Wasser zwischen dem Oberflächen- und dem Tiefenwasser statt, sodass die Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser nicht kompensiert werden kann.

Grundsätzlich führen Nährstoffeinträge in Gewässern zu einer erhöhten Biomasseproduktion des Phytoplanktons («Algen»). Sinkt dieses organische Material ab, wird es in tiefen Seen mit genügend Sauerstoffvorrat aus der Zirkulationsphase weitgehend im Wasserkörper abgebaut und nur ein geringer Anteil davon gelangt ins Tiefenwasser und in die Sedimente. Bei ungenügenden Sauerstoffgehalten gelangt ein grösserer Anteil bis an den Seegrund und zehrt dort den verbleibenden Sauerstoff auf. Unter diesen anaeroben Bedingungen kommt es am Seegrund zu einer Rücklösung von Phosphor aus den Sedimenten und einer erneuten Nährstoffanreicherung im Tiefenwasser.

Aufgrund dieser Prozesse haben die übermässigen Phosphoreinträge in Seen vor allem in den 1950er- bis 1980er-Jahren (Fig. 2) neben grossen Problemen hinsichtlich der Gewässerqualität zu veränderten Lebensgemeinschaften, zu Algenblüten und Fischsterben, zum Aussterben von endemischen Fischarten und anderen Gewässerorganismen, zum Verlust genetischer Vielfalt und zur Ausbreitung von Generalisten in den Schweizer Seen geführt (Auderset Joye / Schwarzer, 2012; Spaak, 2012; Makri et al., 2019). Viele endemische Fischarten der Schweiz, speziell Arten von Felchen, Saiblingen und Groppen, lebten ausschliesslich im Tiefenwasser der grossen Seen. Diese Arten konnten sich bei Sauerstoffmangel nicht mehr in ihren angestammten Lebensräumen fortpflanzen und starben entweder direkt aus, oder stiegen in flachere Bereiche auf, wo sie mit den dort lebenden Arten hybridisierten, was zu grossen Verlusten von funktioneller Vielfalt führte (Vonlanthen et al., 2012; Alexander et al., 2016; Alexander / Seehausen, 2021).

In zahlreichen Seen sind die Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser auch heute noch in Folge der Phosphoreinträge aus früheren Jahren und der Anreicherung von Phosphor im Sediment zu gering und eine Naturverlaichung der Fische im Tiefenwasser ist deshalb bis heute nicht möglich. Dazu kommt, dass Organismen oft gleichzeitig mehreren Stressoren ausgesetzt sind, die wechselwirken (Rillig et al., 2019). So verschlimmert der Klimawandel mit der damit einhergehenden Erwärmung der Gewässer, veränderten Zirkulationsbedingungen in Seen und Trockenheit die negativen Effekte der übermässigen Stickstoff- und Phosphoreinträge und die diesbezügliche Situation der Seen, der Fliessgewässer und des Grundwassers für Organismen zusätzlich (BAFU, 2019; Kiefer et al., 2020).

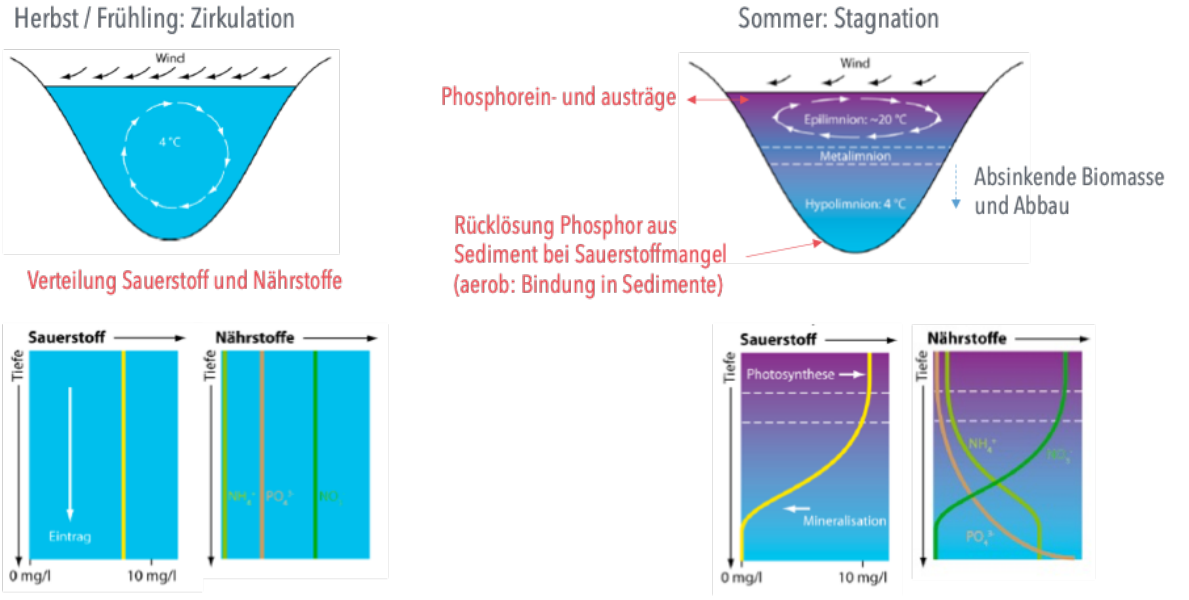

Fig. 4: Durchmischung von Seen und damit einhergehende Verteilung von Sauerstoff und Nährstoffen in der Wassersäule. Angepasst von BAFU, 2016.

V. Beurteilung einer Übermässigkeit

Ab welchem Niveau sind Nährstoffeinträge (Immissionen) und -gehalte übermässig, d. h. ab wann wird ein Schutzgut wie die Umwelt oder die Biodiversität wesentlich beeinträchtigt? Die obenstehend in ihren Grundzügen beschriebenen Wirkungsketten und Auswirkungen bilden die Grundlage für eine Beurteilung.

Für die globale Ebene wurden sogenannte Planetary Boundaries (planetare Grenzen) identifiziert (Fig. 5). Werden sie überschritten, sind die Lebensgrundlagen der Menschheit gefährdet. Die Planetary Boundaries sind hinsichtlich Biodiversitätsverlust, Stickstoff- und Phosphorkreislauf bereits deutlich überschritten (Steffen et al., 2015). Die Grenze für den Phosphorkreislauf ist auf die Vermeidung von grossflächigen, sauerstofflosen Zonen in den Ozeanen sowie die Verhinderung einer weit verbreiteten Eutrophierung von Süßwasserökosystemen ausgerichtet bzw. auf Phosphorflüsse, welche dies verursachen würden. Ebenso zielt die Grenze für den Stickstoffkreislauf darauf ab, eine zusätzliche Eutrophierung aquatischer Ökosysteme zu vermeiden. Da Phosphor- und Stickstoff vor allem über Düngungsmittel in die Umwelt gelangen, können die zwei unabhängig voneinander bestimmten planetary boundaries basierend auf dem typischen Stickstoff-Phosphor-Verhältnis von Pflanzen überprüft werden.

Verschiedene Regionen und Länder haben ihren Fussabdruck hinsichtlich der Planetary Boundaries ermittelt. Der Schweizer Stickstoff-Fussabdruck liegt deutlich über dem global tragbaren Niveau; der Schweizer Phosphor-Fussabdruck ist hingegen nicht quantifiziert (Dao et al., 2015).

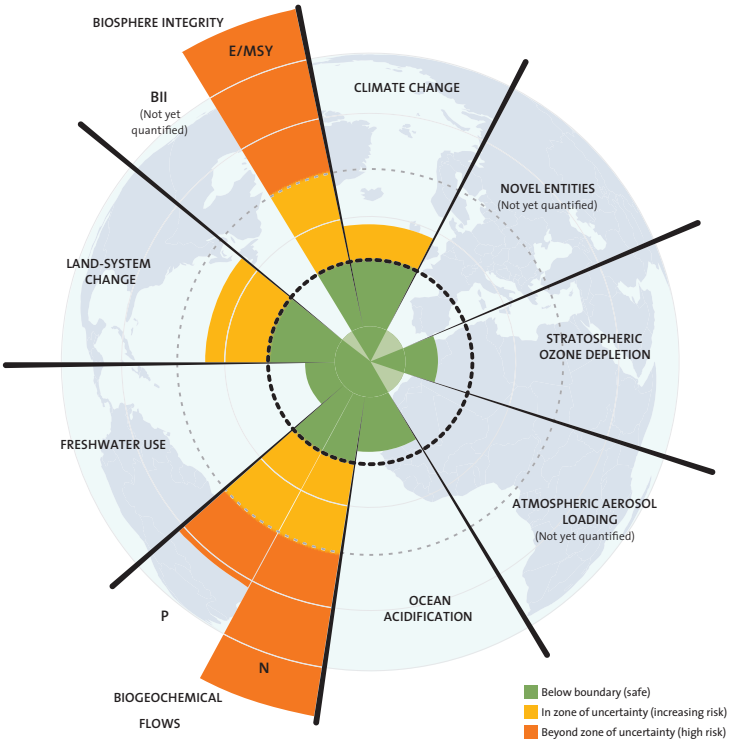

Fig. 5: Die Planetary Boundaries (planetare Grenzen) sind hinsichtlich Biodiversitätsverlust (Biosphere Integrity), den Kreisläufen von Stickstoff (N) und Phosphor (P) bereits deutlich überschritten. Licenced under CC BY 4.0 (Credit: J. Lokrantz / Azote based on Steffen et al., 2015).

Auf der regionalen bis lokalen Ebene sowie für spezifische Lebensräume eignen sich zur Beurteilung einer Übermässigkeit von Stickstoffeinträgen über die Luft (Stickstoffdeposition) die im Rahmen der Konvention über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigung wirkungsorientiert festgelegten Critical Loads[2] (kritische Eintragsraten) und Critical Levels[3] (kritische Konzentrationen). Diese werden etwa alle zehn Jahre basierend auf neuen Erkenntnissen aus der Wissenschaft – unter anderem auch basierend auf Daten vom Biodiversitätsmonitoring Schweiz (Forum Biodiversität Schweiz [Hrsg.], 2022) – angepasst.

Zwar existieren für die Stickstoffdeposition und Ammoniak-Immissionen keine Immissionsgrenzwerte in der Luftreinhalteverordnung (LRV)[4]. Critical Loads und Levels entsprechen allerdings von ihrer Bedeutung her den Immissionsgrenzwerten. Demgemäss zeigt eine Vollzugshilfe des BAFUs, wie eine Übermässigkeit gemäss Art. 2 Abs. 5 LRV beurteilt werden kann (BAFU [Hrsg.], 2020). Die

2 «... eine quantitative Schätzung der Exposition gegenüber einem oder mehreren Schadstoffen, unterhalb deren nach dem heutigen Wissensstand keine signifikanten schädlichen Auswirkungen auf bestimmte empfindliche Teile der Umwelt auftreten.» (BAFU [Hrsg.], 2020).

3 «Schadstoffkonzentrationen in der Atmosphäre, oberhalb deren nach dem heutigen Wissensstand unmittelbare nachteilige Auswirkungen auf Rezeptoren wie Menschen, Pflanzen, Ökosysteme oder Materialien auftreten können» (BAFU [Hrsg.], 2020).

4 SR 814.318.142.1.

Critical Loads sind in weiten Teilen der Schweiz und für zahlreiche Lebensräume überschritten (Fig. 6, Kap. III.).

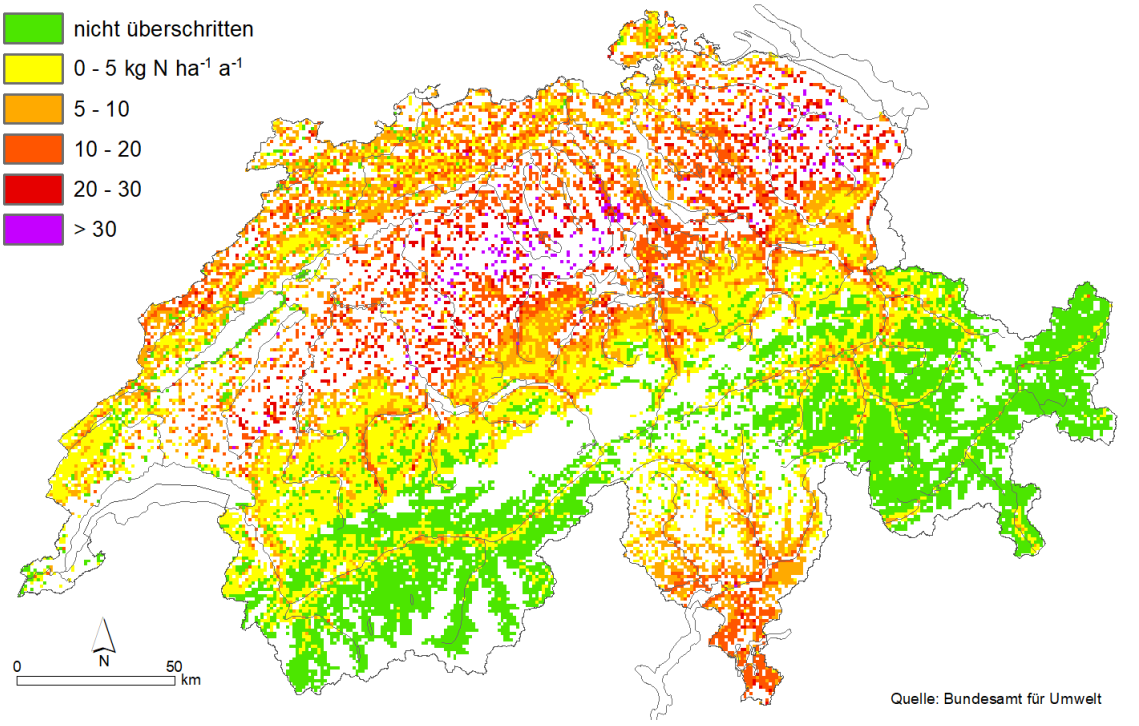

Fig. 6. Überschreitung der Critical Loads für die Stickstoffdeposition aus der Luft für das Jahr 2015: Auf den gelb, orange, rot und violett markierten Flächen sind die Einträge aus der Luft übermässig. Quelle: BAFU (Hrsg.), 2020.

Zur Beurteilung der Situation hinsichtlich Phosphor in Seen haben sich in der Schweiz die Phosphorgesamtgehalte (kantonale oder seenspezifische Zielwerte) sowie die dadurch beeinflusste Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser etabliert (Fig. 7, Kap. IV.) (BAFU [Hrsg.], 2022). Für letztere formuliert die Gewässerschutzverordnung: «Der Sauerstoffgehalt des Wassers darf zu keiner Zeit und in keiner Seetiefe weniger als 4 mg/l O_2 betragen; …». Dieser Wert basiert auf physiologischen Daten zu Fischen und anderen aquatischen Organismen, die bei Sauerstoffmangel sterben bzw. deren Eier sich nicht entwickeln können. Hohe Phosphorgehalte ihrerseits führen in Wechselwirkung mit anderen Faktoren unter anderem zu Algenblüten und, wie beschrieben, zur Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser. Beides ist gesellschaftlich unerwünscht.

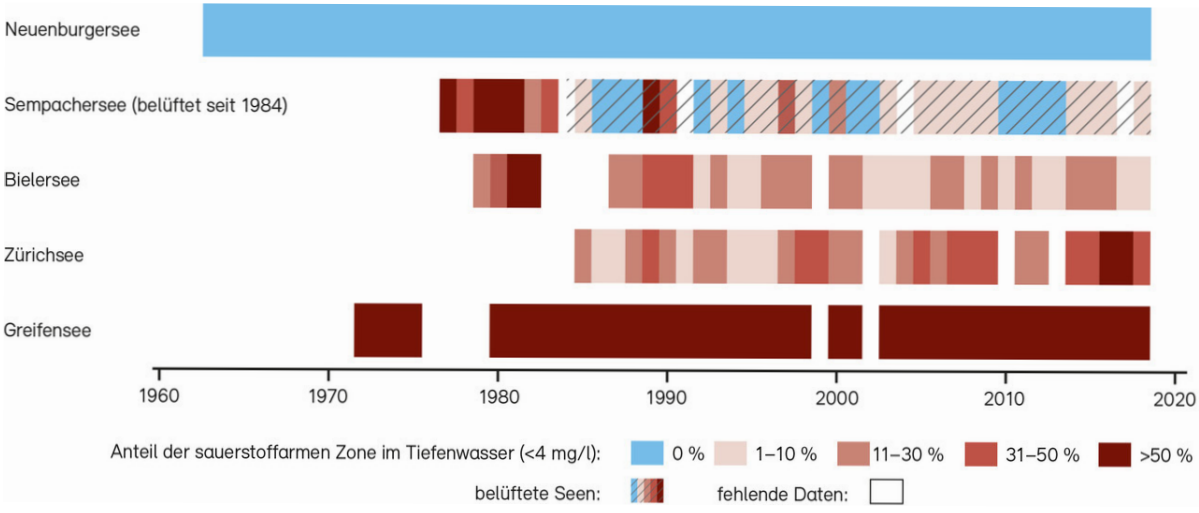

Fig. 7: Entwicklung des Anteils sauerstoffarmer Zonen in verschiedenen Schweizer Seen. Quelle: BAFU (Hrsg.), 2022.

VI. Schlussfolgerung

Übermässige Einträge von Stickstoff und/oder Phosphor in die Umwelt beeinträchtigen Gewässer-, (Trink-)Wasser-, Boden- und Luftqualität, Treibhausgasbilanz, Waldfunktionen, Biodiversität sowie die menschliche Gesundheit. In der Schweiz gehören übermässige Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Umwelt zu den Hauptgefährdungsursachen für die Biodiversität.

Die Ursachen und das Ausmass der übermässigen Stickstoff- und Phosphoreinträge in der Schweiz sind gut bekannt und die negativen Auswirkungen auf die verschiedenen Schutzgüter wissenschaftlich umfassend belegt.

Die übermässigen Einträge wurden in den letzten Jahrzehnten zwar teilweise reduziert, im Falle von Phosphor sehr deutlich, es besteht aber nach wie vor grosser Handlungsbedarf. Der aktuelle Stand des Wissens zeigt, welche grundsätzlichen Handlungsansätze (Kasten) wirkungsvoll sind.

Die wissenschaftlichen Daten zeigen zudem, dass für das Erreichen national und international gesetzter Ziele und die Vermeidung hoher externer Kosten ein rasches Handeln der Akteure auf nationaler und kantonaler Ebene wichtig ist. Damit deutlich wird, welche Massnahmen erfolgreich und wo weitere Kurskorrekturen nötig sind, müssen transparent erhobene Indikatoren und messbare, verbindliche Ziele gesetzt werden, deren Erreichung regelmässig überprüft wird.

Handlungsansätze im Landwirtschafts- und Ernährungssystem zur Reduktion der übermässigen Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Umwelt (Sutton et al., 2011; Tilman / Clark, 2014; SRU, 2015; Schmidt et al., 2017; Schweizerischer Bundesrat, 2019; Gubler et al., 2020).

Für Erfolge ist es unumgänglich, die Stickstoff- und Phosphorkreisläufe mittels einer Kombination von Massnahmen zu optimieren und vor allem die Einträge in die Umwelt zu reduzieren. Dafür muss ein geeigneter Mix aus ordnungspolitischen, ökonomischen und kommunikativen Instrumenten eingesetzt werden, und Massnahmen sollten möglichst an der Quelle ansetzen. Gesamtheitliche, umweltbereichs- und sektorübergreifende Ansätze sind am besten geeignet: Damit lassen sich tendenziell höhere und effizientere Emissionsreduktionen erreichen und Synergien nutzen. Zudem lässt sich so die Verlagerung von Problemen, z. B. von einer Stickstoffform zur anderen oder vom In- ins Ausland, vermeiden.

Erhaltung wertvoller Biodiversitätsgebiete: Vermeidung von neuen, zusätzlichen Stickstoff- und Phosphor-Einträgen in intakte, noch wenig belastete Gebiete. Umsetzung von Pufferzonen um Moore und von Gewässerräumen. Überwachung der Sauerstoffversorgung im Tiefenwasser grosser Seen;
Produktionsintensität: Anpassung der landwirtschaftlichen Produktionsintensität an das Potenzial und die ökologische Tragfähigkeit des Standortes. Tierbestände und -rassen an der regionalen Futterbasis des Grünlandes ausrichten sowie Einsatz und Import von Kraftfutter verringern; Einsatz und Import von Stickstoff- und Phosphordünger im Pflanzen- und Futterbau reduzieren;
Konsum: Förderung eines höheren Anteils pflanzlicher im Vergleich zu tierischen Proteinen in der menschlichen Ernährung bzw. Reduktion tierischer Produkte in der Ernährung, um die Ressourcen effizienter einzusetzen, eines suffizienten sowie umweltbewussten Konsumverhaltens sowie Reduktion von Nahrungsmittelverlusten;
Pflanzliche Kalorienproduktion: Steigerung des Anteils pflanzlicher im Vergleich zu tierischen Kalorien an der Kalorienproduktion in der Schweiz;
Subventionen: Abschaffung oder Umgestaltung von Subventionen, welche direkt oder indirekt Stickstoff- und Phosphorüberschüsse sowie -emissionen verursachen, wie z. B. Subventionen, welche hohe Nutztierbestände fördern;
Organisatorische und technische Massnahmen in der Landwirtschaft: Verringerung von Stickstoff- und Phosphorüberschüssen sowie -emissionen durch organisatorische und technische Massnahmen in der Landwirtschaft wie z. B. Verbreitung von Praktiken, welche die Stickstoff- und Phosphor-Auswaschung vermindern.

Literaturverzeichnis

— Akselsson C. / Belyazid S. / Hellsten S. / Klarqvist M. / Pihl-Karlsson G. / Karlsson P. E. / Lundin L., 2010, Assessing the risk of N leaching from forest soils across a steep N deposition gradient in Sweden, Environmental Pollution 158:3588–3595.
— Alexander T. J. / Seehausen O., 2021, Diversity, distribution and community composition of fish in perialpine lakes – «Projet Lac» synthesis report, Page Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, EAWAG.
— Alexander T. J. / Vonlanthen P. / Seehausen O., 2016, Does eutrophication-driven evolution change aquatic ecosystems? Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 372:20160041.
— Aqua Plus, 2001a, Entwicklung des Gesamtphosphors im Pfäffikersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen.
— Aqua Plus, 2001b, Entwicklung des Gesamtphosphors im Türlersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen.
— Aqua Plus, 2004, Entwicklung des Gesamtphosphors im Greifensee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen.
— Auderset Joye D. / Schwarzer A., 2012, Rote Liste Armleuchteralgen. Gefährdete Arten der Schweiz, Stand 2010, Umwelt-Vollzug Nr. 1213, BAFU, Université de Geneve – LEBA, Bern und Genf.
— AWEL (Hrsg.), 2018, Wasser und Gewässer 2018. Gesamtbericht, Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Abteilung Gewässerschutz.
— BAFU, 2016, Wie funktioniert ein See? Zur Limnologie von Seen, Bundesamt für Umwelt, Bern.
— BAFU, 2019, Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016, Umwelt-Zustand Nr. 1901:138, Bundesamt für Umwelt (BAFU).
— BAFU, 2020, Kenngrössen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2018, Bundesamt für Umwelt (BAFU).
— BAFU, 2022, Kenngrössen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2020.
— BAFU (Hrsg.), 2020, Übermässigkeit von Stickstoff-Einträgen und Ammoniak-Immissionen. Bewertung anhand von Critical Loads und Critical Levels insbesondere im Hinblick auf einen kantonalen Massnahmenplan Luftreinhaltung, Umwelt-Vollzug Nr. 2003, Bundesamt für Umwelt (BAFU).
— BAFU (Hrsg.), 2022, Gewässer in der Schweiz. Zustand und Massnahmen, Umwelt-Zustand Nr. 2207, Bundesamt für Umwelt, Bern.
— BAFU/BLW, 2016, Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016, Umwelt-Wissen Nr. 1633, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
— Bergamini A. et al., 2019, Zustand und Entwicklung der Biotope von nationaler Bedeutung: Resultate 2011–2017 der Wirkungskontrolle Biotopschutz Schweiz, WSL.
— Biesmeijer J. C. et al., 2006, Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands, Science 313:351–354.
— Binder C. R. / de Baan L. / Wittmer D., 2009, Phosphorflüsse der Schweiz. Stand Risiken und Handlungsoptionen, Umwelt Wissen Nr. 0928, Bundesamt für Umwelt, Bern.
— Binderheim E., 2019, Wie steht es um die Schweizer Kleinseen, Aqua & Gas 6:60–65.

— Binkley D. / Högberg P., 1997, Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests?, Forest Ecology and Management 92:119–152.
— Bobbink R. et al., 2010, Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis, Ecological Applications 20:30–59.
— Bobbink R. / Hettelingh J.-P., 2011, Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships, Pages 23–25, Proceedings of an expert workshop, Noordwijkerhout, 23–25 June 2010, UNECE Coordination Centre for Effects.
— Braun S. / Rihm B. / Flückiger W., 2012, Stickstoffeinträge in den Schweizer Wald: Ausmass und Auswirkungen, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 163:355–362.
— Braun S. / Schindler C. / Volz R. / Flückiger W., 2003, Forest damages by the storm «Lothar» in permanent observation plots in Switzerland: The significance of soil acidification and nitrogen deposition, Water, Air, and Soil Pollution 142:327–340.
— Cleland E. E. / Harpole W. S., 2010, Nitrogen enrichment and plant communities, Annals of the New York Academy of Sciences 1195:46–61.
— Dao H. / Peduzzi P. / Chatenoux B. / De Bono A. / Schwarzer S. / Friot D., 2015, Environmental Limits and Swiss Footprints Based on Planetary Boundaries, A study commissioned by the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), UNEP/GRID-Geneva & University of Geneva, Geneva, Switzerland.
— de Witte L. C. / Braun S. / Hopf S., 2018, Zu viel Stickstoff im Wald, Wald und Holz, 29–31.
— de Witte L. C. / Rosenstock N. P. / van der Linde S. / Braun S., 2017, Nitrogen deposition changes ectomycorrhizal communities in Swiss beech forests, Science of the Total Environment 605:1083–1096.
— Delarze R. / Eggenberg S. / Steiger P. / Bergamini A. / Fivaz F. / Gonseth Y. / Guntern J. / Hofer G. / Sager L. / Stucki P., 2016, Rote Liste der Lebensräume der Schweiz, Aktualisierte Kurzfassung zum Technischen Bericht 2013 im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern.
— Elser J. / Haygarth P. M., 2021, Phosphorus. Past and Future, Oxford University Press.
— Elser J. J. / Bracken M. E. S. / Cleland E. E. / Gruner D. S. / Harpole W. S. / Hillebrand H. / Ngai J. T. / Seabloom E. W. / Shurin J. B. / Smith J. E., 2007, Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems, Ecology Letters 10:1135–1142.
— Etzold S. et al., 2020, Nitrogen deposition is the most important environmental driver of growth of pure, even-aged and managed European forests, Forest Ecology and Management 458.
— Farrer E. C. / Suding K. N., 2016, Teasing apart plant community responses to N enrichment: the roles of resource limitation, competition and soil microbes, Ecology letters 19:1287–1296.
— Flisch R. / Zimmermann M., 2018, Phosphor in der Umwelt, Agrarbericht 2018.
— Forum Biodiversität Schweiz (Hrsg.), 2022, 20 Jahre Biodiversitätsmonitoring Schweiz BDM, Sonderheft zu HOTSPOT 46.
— Graf R. / Müller M. / Korner P. / Jenny M. / Jenni L., 2014, 20% loss of unimproved farmland in 22 years in the Engadin, Swiss Alps. Agriculture, Ecosystems & Environment 185:48–58.

— Gubler L. / Ismail S. / Seidl I., 2020, Biodiversitätsschädigende Subventionen in der Schweiz, Swiss Academies Factsheets 15:1–16.
— Guntern J. / Eichler A. / Hagedorn F. / Pellissier L. / Schwikowski M. / Seehausen O. / Stamm C. / van der Heijden M. G. A. / Waldner P. / Altermatt F., 2020, Übermässige Stickstoff- und Phosphoreinträge schädigen Biodiversität Wald und Gewässer, Swiss Academies Factsheet 15:1–8.
— Hautier Y. / Niklaus P. / Hector A., 2009, Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication, Science 324:636–638.
— Kammer P. M. / Rihm B. / Schöb C., 2022, Decreasing nitrogen deposition rates: Good news for oligotrophic grassland species?, Basic and Applied Ecology 63:125–138.
— Kiefer I. / Steinsberger T. / Wüest A. / Müller B., 2020, Sauerstoffzehrung in Seen, Aqua & Gas 7/8:62–70.
— Klop E. / Omon B. / WallisDeVries M. F., 2015, Impact of nitrogen deposition on larval habitats: the case of the Wall Brown butterfly Lasiommata megera, Journal of Insect Conservation 19:393–402.
— Koordinationsstelle BDM, 2011, Stickstoffeintrag aus der Luft verändert Vielfalt, BDM-FACTS 3:1–4.
— Krüger I. / Sanders T. / Potocic N. / Ukonmaanaho L. / Rautio P., 2020, Increased evidence of nutrient imbalances in forest trees across Europe, ICP Forests Brief No. 4. Programme Co-ordinating Centre of ICP Forests, Thünen Institute of Forest Ecosystems.
— Kupper T. / Häni C. / Bretscher D. / Zaucker F., 2022, Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020.
— Kurze S. / Heinken T. / Fartmann T., 2018, Nitrogen enrichment in host plants increases the mortality of common Lepidoptera species, Oecologia 188:1227–1237.
— Lebeau J. / Wesselingh R. A. / Van Dyck H., 2016, Floral resource limitation severely reduces butterfly survival, condition and flight activity in simplified agricultural landscapes, Oecologia 180:421–427.
— Makri S. / Lami A. / Lods-Crozet B. / Loizeau J. L., 2019, Reconstruction of trophic state shifts over the past 90 years in a eutrophicated lake in western Switzerland, inferred from the sedimentary record of photosynthetic pigments, Journal of Paleolimnology 61:129–145.
— Mayer P. / Brang P. / Dobbertin M. / Hallenbarter D. / Renaud J.-P. / Walthert L. / Zimmermann S., 2005, Forest storm damage is more frequent on acidic soils, Annals of Forest Science 62:303.
— Nijssen M. E. / WallisDeVries M. F. / Siepel H., 2017, Pathways for the effects of increased nitrogen deposition on fauna, Biological Conservation 212:423–431.
— Pöyry J. / Carvalheiro L. G. / Heikkinen R. K. / Kühn I. / Kuussaari M. / Schweiger O. / Valtonen A. / van Bodegom P. M. / Franzén M., 2017, The effects of soil eutrophication propagate to higher trophic levels, Global Ecology and Biogeography 26:18–30.
— Reutimann J. / Ehrler A. / Schäppi B., 2022, Aktualisierung Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2018, Bericht, Bundesamt für Landwirtschaft.
— 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), BUWAL Environmental Series 275.

— Rihm B. / Künzle T., 2019, Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland – Technical Report on the Update of Critical Loads and Exceedance, including the years 1990, 2000, 2005 and 2010.
— Rillig M. C. / Ryo M. / Lehmann A. / Aguilar-Trigueros C. A. / Buchert S. / Wulf A. / Iwasaki A. / Roy J. / Yang G., 2019, The role of multiple global change factors in driving soil functions and microbial biodiversity, Science 366:886–890.
— Roth T. / Kohli L. / Rihm B. / Achermann B., 2013, Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland, Agriculture, Ecosystems & Environment 178:121–126.
— Roth T. / Kohli L. / Rihm B. / Meier R. / Amrhein V., 2021, Negative effects of nitrogen deposition on Swiss butterflies, Conservation Biology 35:1766–1776.
— Sánchez-Bayo F. / Wyckhuys K. A. G., 2019, Worldwide decline of the entomofauna: A review of its driver, Biological Conservation 232:8–27.
— Schmidt A. / Mann S. / Mack G., 2017, Instrumente Evaluation Stickstoff (IES), Schlussbericht, Agroscope.
— Schweizerischer Bundesrat, 2019, Umwelt Schweiz 2018, Bericht des Bundesrates.
— Schwikowski M., 2016, 40 Jahre Eiskernforschung auf dem Colle Gnifetti, GeoPanorma:26–29.
— Spaak P., 2012, Wie Nährstoffe Gewässer verändern, EAWAG News 72:4–7.
— SRU, 2015, Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem, Sondergutachten.
— Staude I. R. et al., 2020, Replacements of small-by large-ranged species scale up to diversity loss in Europe's temperate forest biome, Nature Ecology and Evolution 4:802–808, Springer US.
— Steffen W. et al., 2015, Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet, Science 347:1259855.
— Sutton M. A. / Howard C. M. / Eirsman J. W. / Billen G. / Bleeker A. / Grennfelt P. / van Grinsven H. / Grizzetti B., 2011, The European nitrogen assessment: sources, effects and policy perspectives, Cambridge University Press.
— The Economist, 2022, Most of the world's grain is not eaten by humans, The Economist, available from https://www.economist.com/graphic-detail/2022/06/23/most-of-the-worlds-grain-is-not-eaten-by-humans.
— Tilman D. / Clark M., 2014, Global diets link environmental sustainability and human health, Nature 515:518–522, Nature Publishing Group.
— Vonlanthen P. / Bittner D. / Hudson A. G. / Young K. A. / Müller R. / Lundsgaard-Hansen B. / Roy D. / Di Piazza S. / Largiadèr C. R. / Seehausen O., 2012, Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations, Nature 482:357–362.
— Waldner P. / Braun S. / Kurz D. / Thimonier A., 2016, Nährstoffflüsse im Wald mit Fokus auf Stickstoff und basische Kationen, Pages 61–745, in: Pluess A. R. / Augustin S. / Brang P. (editors): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien, Bundesamt für Umwelt (BAFU); Eidg. Forschungsanstalt WSL, Haupt-Verlag.
— WallisDeVries M. F. / van Swaay C. A. M., 2006, Global warming and excess nitrogen may induce butterfly decline by microclimatic cooling, Global Change Biology 12:1620–1626.

Résumé

Les apports excessifs d'azote et de phosphore dans l'environnement comptent parmi les principales causes d'appauvrissement de la biodiversité, parallèlement aux modifications de l'utilisation du sol et des eaux, à la surexploitation des ressources naturelles, à la pollution, aux espèces exotiques envahissantes et au changement climatique. Les excédents de ces éléments nutritifs modifient et réduisent le nombre des espèces, la composition des biocénoses, les interactions interspécifiques ainsi que les processus écosystémiques. En outre, les apports généralisés provenant aujourd'hui principalement de l'agriculture uniformisent les conditions à une large échelle, ce qui entraîne la perte des particularités régionales. Il peut en résulter non seulement la disparition irréversible d'espèces ainsi que la perte de diversité génétique et fonctionnelle, mais aussi un préjudice porté aux services écosystémiques, tels que la qualité de l'eau potable et diverses fonctions sylvicoles. Outre la biodiversité, cela peut également toucher d'autres biens à protéger, comme la qualité de l'eau, du sol et de l'air, le bilan des gaz à effet de serre ou encore la santé. Les causes et les incidences de ces charges excessives sont bien documentées sur le plan scientifique. Le présent article propose une introduction à cette thématique. Nous examinerons quel impact les apports excessifs d'azote et de phosphore ont sur la biodiversité, de quelle manière les dépôts d'azote atmosphérique et les teneurs en phosphore dans les lacs ont évolué au fil du temps, et comment évaluer scientifiquement si les charges et les teneurs constatées sont excessives. Pour terminer, nous présenterons des possibilités d'action efficaces dans le système agricole et alimentaire.

Riassunto

L'eccessiva immissione di azoto e fosforo nell'ambiente, insieme ai cambiamenti nell'utilizzo del suolo e delle acque, all'eccessivo sfruttamento delle risorse naturali, all'inquinamento, alle specie alloctone invasive e ai cambiamenti climatici, sono tra le principali cause della riduzione della biodiversità. Gli eccessi di questi nutrienti alterano e riducono il numero di specie, la composizione delle biocenosi, le interazioni tra le specie e i processi dell'ecosistema. Inoltre, le immissioni diffuse che oggi provengono principalmente dall'agricoltura, uniformano le caratteristiche dei luoghi su ampia scala, causando la perdita delle peculiarità regionali. Tutto ciò può portare non solo alla scomparsa irreversibile di specie e alla perdita di diversità genetica e funzionale, ma compromette anche i servizi ecosistemici come la qualità dell'acqua potabile e varie funzioni forestali. Di conseguenza, oltre alla biodiversità, possono essere deteriorati anche altri beni protetti come la qualità delle acque, del suolo, dell'aria e pure il bilancio dei gas a effetto serra e la salute. Le cause e gli effetti di questi apporti sono scientificamente ben documentati. Questo articolo intende fornire un'introduzione all'argomento. Sono illustrati gli effetti di un eccessivo apporto di azoto e fosforo sulla biodiversità ed è discusso come le deposizioni atmosferiche di azoto e le concentrazioni di fosforo nei laghi siano cambiati negli anni e come si può valutare da un punto di vista scientifico se gli apporti e i livelli di azoto e fosforo sono eccessivi. Infine, vengono presentate delle linee di azione efficaci per il sistema agricolo e alimentare.