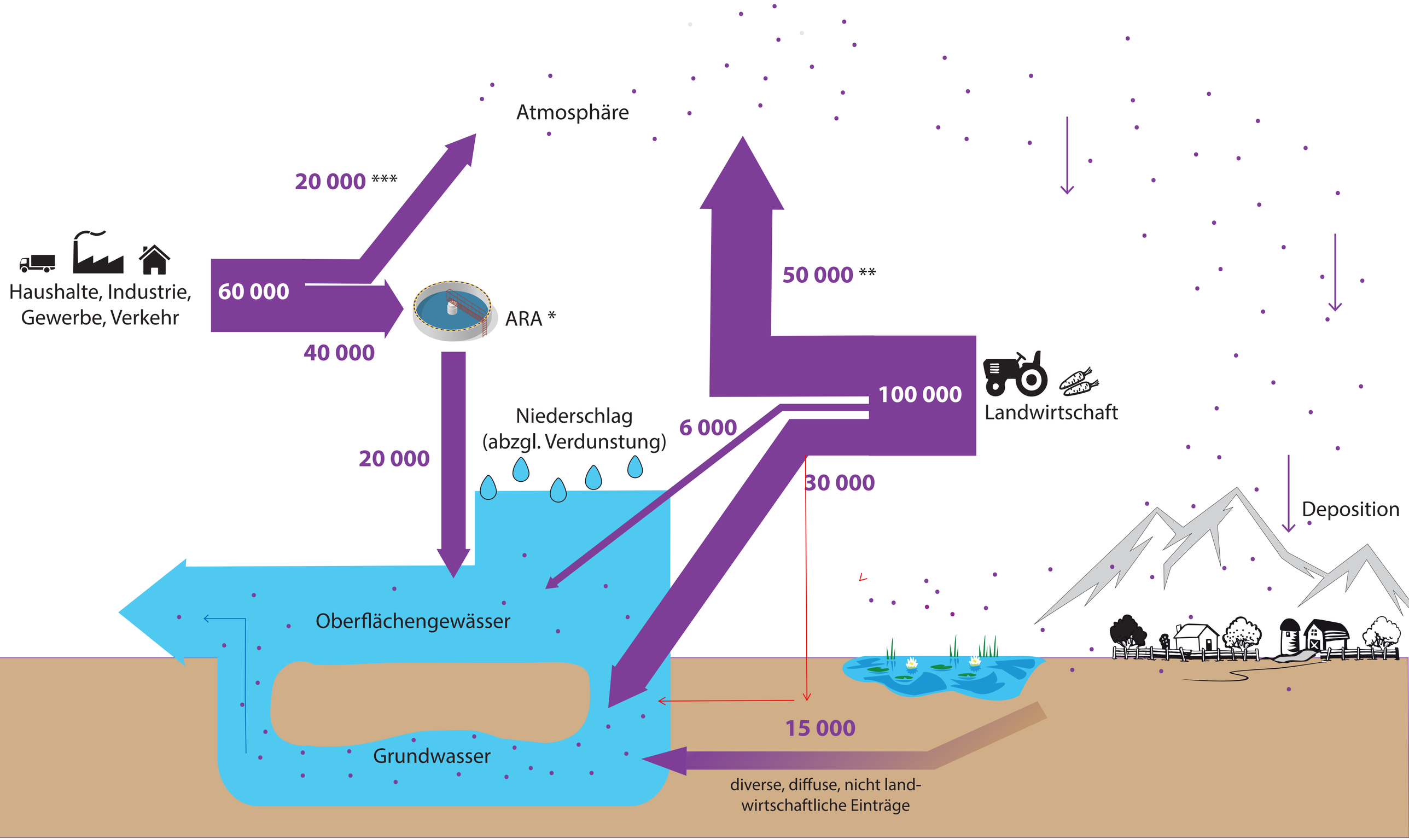
Flüsse der reaktiven Stickstoffverbindungen in t N/a



* In den ARAs entsteht 18 500 t nicht reaktiver Stickstoff (N_2), sowie 1 500 t Lachgas (N_2O).

** Zusammensetzung: 42 000 t Ammoniak und 8 000 t Lachgas

*** Zusammensetzung: 17 000 t Stickoxide und 3 000 t Ammoniak

KVU (AG Saul), Februar 2021

Vol. 15, No. 8, 2020

scnat
académie des sciences naturelles

swiss academies factsheets

academies-suisses.ch

Apports excessifs d'azote et de phosphore nuisent à la biodiversité, aux forêts et aux eaux

En Suisse, des quantités excessives d'azote et de phosphore continuent de parvenir dans l'environnement. Les seuils critiques relatifs aux apports d'azote sont nettement dépassés sur bien des sites. Ce sont surtout les excédents d'azote et de phosphore de l'agriculture et les émissions d'azote du trafic routier qui affectent l'environnement et portent un grave préjudice à la biodiversité, à l'air, à la qualité des milieux aquatiques et de l'eau potable ainsi qu'aux fonctions sylvicoles. De plus, ils catalysent le changement climatique et s'avèrent néfastes à la santé. Les causes et les incidences de ces apports excessifs sont bien documentées sur le plan scientifique depuis des décennies. Pourtant, pratiquement aucun des objectifs de réduction définis par le Conseil fédéral à ce sujet n'a été atteint. Pour enrayer les effets négatifs sur la biodiversité et les services écosystémiques, il importe de s'attaquer aux causes de ces apports massifs. La présente fiche d'information présente à cet égard des actions possibles.

1. Viabilité des écosystèmes

La science a identifié des limites planétaires à l'intérieur desquelles les conditions de vie humaine demeurent stables. Si elles sont dépassées, les bases de l'existence humaine sont en péril. **Les limites planétaires sont d'ores et déjà largement dépassées en ce qui concerne la perte de biodiversité, et les charges en azote et en phosphore.**[1, 2]

De même, l'empreinte azote suisse est sensiblement supérieure au niveau tolérable à l'échelle mondiale ; l'empreinte phosphore n'a pas été quantifiée.[3] Par ailleurs, dans de vastes régions de la Suisse, les seuils critiques d'apport d'azote atmosphérique sont dépassés (« critical loads », c'est-à-dire quantités en deçà desquelles, selon les connaissances scientifiques, aucune incidence négative affecte l'environnement) (Fig. 1).

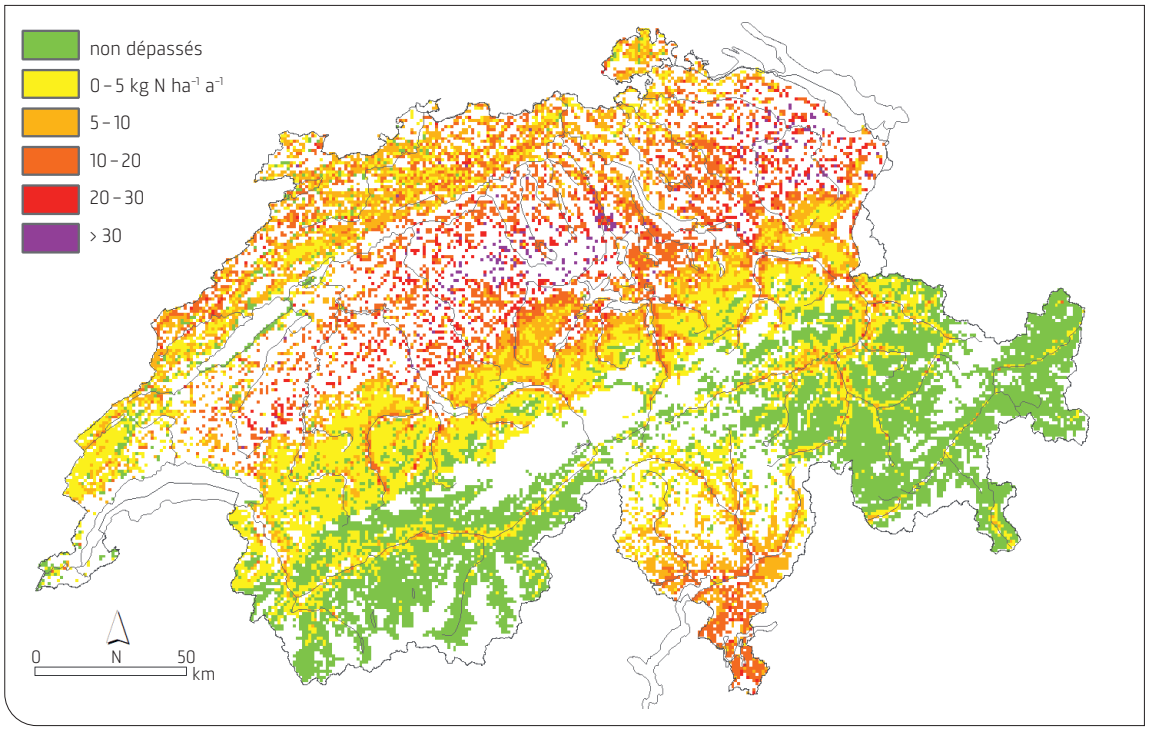


Fig. 1 : Dépassement des seuils critiques d'apport d'azote atmosphérique pour l'année 2015 : les apports d'azote atmosphérique sont excessifs dans les zones jaunes, oranges, rouges et mauves. Source : BAFU (Hrsg.) 2020[4]

2. Objectifs nationaux et internationaux

Les émissions indésirables d'azote parviennent principalement dans l'environnement à l'état gazeux sous forme d'ammoniac, d'oxydes d'azote et de gaz hilarant, ou dissoutes dans l'eau sous forme de nitrate ; le phosphore est lié à des particules solides ou dissous dans l'eau. Par conséquent, les objectifs nationaux et internationaux se réfèrent à différentes formes d'azote et de phosphore.

Avec son rapport Stratégie fédérale de protection de l'air du 11.9.2009, le Conseil fédéral a défini comme objectif une réduction d'environ 40% des émissions d'ammoniac et d'environ 50% des émissions d'oxyde d'azote par rapport à 2005.[5] Depuis les années 1990, des objectifs échelonnés ont été adoptés par le Conseil fédéral pour l'agriculture, en vue de réduire les excédents d'azote et de phosphore[6] et ultérieurement les émissions d'ammoniac. De plus, sur la base du droit en vigueur, les objectifs environnementaux pour l'agriculture portent sur le phosphore (la teneur en oxygène des lacs ne doit être, à aucun moment et à aucune profondeur, inférieure à 4 mg par litre[a]), les émissions d'ammoniac (max. 25 000 t N/an ; –40% par rapport à 2005), les apports d'azote dans l'eau (–50% par rapport à 1985) et le gaz hilarant (–33% jusqu'en 2050 par rapport à 1990). Aucun de ces objectifs environnementaux (à l'exception de ceux définis pour le phosphore dans quelques lacs) et aucun des objectifs échelonnés de la politique agricole n'ont été atteints jusqu'à présent.[7, 8]

Par ailleurs, dans le cadre d'accords internationaux (OSPAR, CIPR), la Suisse s'est engagée à prendre des mesures adéquates en vue de réduire les apports d'azote et de phosphore dans les milieux aquatiques.[9]

a L'apport en phosphore entraîne une croissance accrue d'algues. La dégradation de cette biomasse requiert de l'oxygène et donne lieu à un manque d'oxygène dans les lacs et à des répercussions négatives sur les organismes aquatiques.

3. Emissions, apports et seuils critiques

Azote

Le cycle de l'azote en Suisse est notamment alimenté par les importations de fourrages et de fertilisants, les émissions d'ammoniac issues de la garde d'animaux de rente ainsi que les émissions d'oxyde d'azote provenant des processus de combustion et les apports d'azote dans les eaux.[10 – 13]

Les polluants atmosphériques azotés, notamment préjudiciables à la santé et à la biodiversité, proviennent en Suisse à 70% de l'agriculture, à 18% des transports, à 9% de l'industrie et de l'artisanat et à 3% des ménages.[7] Deux tiers de l'azote parvenu dans l'environnement est issu d'émissions agricoles d'ammoniac, la production animale stimulée par la demande en viande et en produits laitiers y contribuant à 90% ;[14] environ un tiers provient des émissions d'oxydes d'azote issu des processus de combustion.[15] Le gaz hilarant, puissant gaz à effet de serre,[b] représente une part d'environ 6% des émissions de gaz à effet de serre en Suisse, deux tiers environ provenant de l'agriculture (fertilisation et exploitation des engrais de ferme).[16]

Dans de vastes secteurs du Plateau suisse et du Jura, les milieux sont beaucoup plus affectés par l'azote que dans des conditions naturelles. Selon des mesures effectuées dans les zones alpines suisses[17] et en Europe septentrionale,[18, 19] la charge naturelle est estimée à 0,5 – 5 kg d'azote par hectare

b 1 kg de gaz hilarant correspond à 298 kg d'équivalent CO_2

et par an (Fig. 2). En 2015, la charge moyenne s'élevait en Suisse à 15 kg d'azote par hectare et par an,[20] soit 3 – 30 fois plus que la charge naturelle. Dans les forêts suisses, la charge moyenne atteignait même en 2015 20 kg d'azote par hectare et par an.[20] Cette valeur varie, en fonction du site, entre 2 et plus de 65 kg d'azote par hectare et par an.[21] Ainsi, les seuils critiques d'apport en azote atmosphérique sont largement dépassés dans de vastes régions de la Suisse et dans de multiples milieux (Fig. 1).[c]

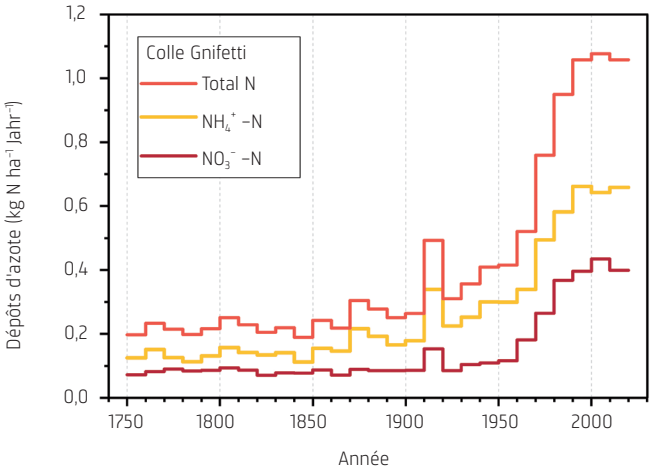


Fig. 2: Même les sites alpins présentent un net accroissement des charges en azote, comme le montre cette série temporelle de dépôt d'azote au cours des 270 dernières années dans le massif du mont Rose. Les apports ont été reconstitués à partir d'une carotte glaciaire du Colle Gnifetti, dans les Alpes suisses, et sont présentés en tant que moyennes sur 10 ans. Sur ce glacier, environ 25% des précipitations subsistent, le reste étant éliminé par le vent. Le taux de dépôt est donc sous-estimé selon un facteur quatre et n'est pas directement comparable avec le taux observé sur le Plateau suisse. De plus, sur les sites alpins, les variations annuelles sont plus marquées qu'en plaine, dans la mesure où le transport atmosphérique et les précipitations fluctuent davantage. Graphique: Margit Schwikowski, Anja Eichler

65% des charges d'azote diffuses[d] dans les eaux de surface et les eaux souterraines proviennent d'activités humaines. Les volumes de nitrate généré portent notamment atteinte à la qualité de l'eau (potable). 38% de l'apport total d'azote dans les eaux provient des cultures céréalières (y compris cultures maraîchères).[22]

Phosphore

En Suisse, la teneur en phosphore est notamment influencée par l'agriculture et la gestion des déchets.[23] Chaque année, environ 16 500 t de phosphore sont importées en Suisse, dont 90% sont utilisées dans l'agriculture (fourrages, fertilisants) (situation en 2015). En revanche, seulement 4000 t sont exportées par an. En ce qui concerne la qualité des eaux et la biodiversité, le problème vient tout particulièrement de la charge annuelle diffuse (environ 900 t) en phosphore dissous, directement disponible pour les plantes, dans les eaux. Les cultures céréalières y contribuent à 22%, les pâturages et l'horticulture à 45% et la forêt à 16%.[22]

4. Incidences des apports excessifs d'azote et de phosphore

Les apports excessifs d'azote et/ou de phosphore dans l'environnement portent préjudice à la qualité des eaux, de l'eau (potable), du sol et de l'air, au bilan des gaz à effet de serre, aux fonctions sylvicoles, à la biodiversité ainsi qu'à la santé.[16, 24 – 28] En Suisse, les charges excessives en azote et en phosphore comptent parmi les principales causes d'appauvrissement de la biodiversité.

Les incidences sur la biodiversité résultent d'un effet toxique, eutrophisant[e] et acidifiant ou d'une sensibilité accrue des plantes au stress, comme la sécheresse ou les agents pathogènes (Fig. 3). D'autres facteurs tels que les modifications dans l'utilisation du sol ou le changement climatique peuvent renforcer les effets négatifs. En raison des apports d'azote atmosphérique dans tout le pays, les conditions s'uniformisent sur une grande échelle. Les espèces végétales très répandues évincent par conséquent de nombreuses autres plantes habituées à des conditions pauvres en azote.[29 – 31] Il en va de même des charges excessives de phosphore dans les eaux: les espèces piscicoles endémiques dépérissent et les généralistes se propagent.[32] Il en résulte une disparition des spécificités régionales et un vaste appauvrissement des milieux. Ce problème est déjà très marqué sur le Plateau suisse et à basse altitude et il s'accélère également en montagne.[33, 34] Les incidences négatives sur la biodiversité sont souvent irréversibles.[24, 32]

Les excédents d'azote et de phosphore modifient le nombre d'espèces, la composition des biocénoses, les interactions interspécifiques ainsi que les processus écosystémiques.[24] Il en résulte non seulement la disparition d'espèces et la perte de diversité génétique et fonctionnelle, mais aussi un préjudice porté aux services écosystémiques. Ainsi les charges en nitrate dans les eaux souterraines réduisent considérablement leur utilisation comme eau potable et peuvent occasionner des coûts élevés.

Coûts externes des apports excessifs d'azote et de phosphore

Les émissions d'ammoniac, d'oxydes d'azote, de gaz hilarant et de nitrate occasionnent en Suisse des coûts externes allant de 860 à 4300 millions de francs par an[f]. Les coûts médicaux liés à la pollution de l'air sont les plus élevés. Par ailleurs, les répercussions sur le climat et sur les milieux aquatiques et terrestres, ainsi que la pollution de l'eau potable et la détérioration de la couche d'ozone sont aussi prises en compte. Les émissions de l'agriculture contribuent pour 60 – 70% à ces coûts, soit 516 à 2580 millions de francs par an.

Les coûts d'aération des lacs (apport d'oxygène), occasionnés par les excédents de phosphore d'origine agricole, sont estimés par Avenir Suisse à 275 millions de francs pour l'année

c Charge critique d'azote [kg N ha^{-1} an^{-1}] pour les eaux: 3 – 20; pour les hauts-marais: 5 – 10; pour les bas-marais et les prairies riches en espèces: 10 – 30; pour les forêts de conifères: 5 – 15; pour les forêts de feuillus: 10 – 20.[25]

d Apports dans les eaux ne provenant pas d'eaux usées épurées ou non (stations d'épuration, déversoirs d'eaux pluviales).

e Accumulation d'azote ou de phosphore dans les milieux accompagnée d'effets indésirables sur la biodiversité et la qualité de l'eau.

f Le grand écart s'explique notamment par les incertitudes dans les rapports dose/effet, les coûts de réduction des répercussions ainsi que l'estimation de la part d'azote dans les répercussions.[24]

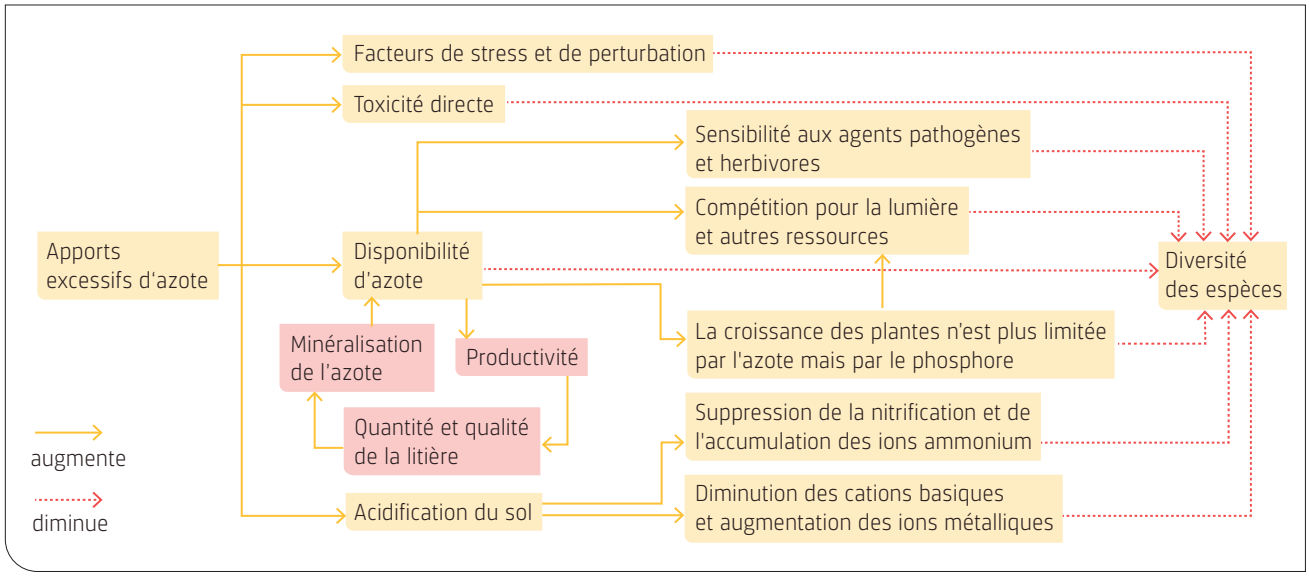


Fig. 3 : Incidences des apports excessifs d'azote sur la diversité des espèces.
Adapté de Dise et al. (2011)[70] in The European Nitrogen Assessment;[24] reproduit avec l'autorisation de Cambridge University Press via PLSclear.

2015.[37] Les dépenses supplémentaires liées aux installations d'aération ainsi que d'autres coûts environnementaux ne sont pas pris en compte.

Incidences sur certains milieux, groupes d'espèces et services écosystémiques

Milieux aquatiques et eau potable

Les apports excessifs d'azote ont des incidences négatives directes sur la qualité des milieux aquatiques et de l'eau potable ; certains organismes aquatiques y sont très réactifs.[38] Même si la qualité des eaux de surface s'est considérablement améliorée par rapport aux années 1970 – 1980, des dépassements d'objectifs continuent d'être observés pour le nitrate dans les stations de mesure. **Dans les eaux souterraines, la valeur exigée par l'ordonnance sur la protection des eaux en vue de l'utilisation d'eau potable (max. 25 mg de nitrate/l) a été dépassée de 2007 à 2014 dans 15 – 20% des stations de mesure (principalement sur le Plateau suisse) ; elle est élevée dans 80% des stations de mesure.** Dans les zones céréalières, la teneur en nitrate des eaux souterraines est excessive dans environ 40% des stations de mesure.[26]

Les charges excessives en phosphore dans les lacs, surtout dans les années 1950 à 1980, ont provoqué non seulement de graves problèmes sur le plan de la qualité des eaux, mais aussi des modifications des biocénoses, la disparition d'espèces piscicoles, notamment endémiques, ainsi que d'autres organismes aquatiques.[39 – 42] Depuis lors, les concentrations de phosphate ont sensiblement diminué dans de nombreux lacs, en particulier grâce à l'interdiction du phosphate dans les détergents et le développement des stations d'épuration. Pourtant, dans plusieurs grands lacs et de nombreux petits lacs environnés d'exploitations agricoles, les charges en phosphate demeurent excessives[7] et favorisent la croissance des algues et des changements indésirables de la chaîne alimentaire. De même, les teneurs en oxygène dans les profondeurs de certains lacs sont insuffisantes par suite des apports antérieurs de phosphore et de la concentration de phosphore dans le sédiment ; ou bien elles n'atteignent les exigences quantitatives de l'OEaux que grâce à des systèmes d'aération et de circulation.[7] Cependant, cette lutte contre les symptômes n'a pas permis, jusqu'à présent, de rétablir la reproduction naturelle des poissons en eau profonde dans de nombreux lacs, par manque d'oxygène.

Les effets négatifs d'apports excessifs d'azote et de phosphore ainsi que la situation des lacs et des eaux souterraines pourraient encore s'aggraver par suite du changement climatique, de la sécheresse qui en découle et du réchauffement des eaux.[26, 27]

Sols

Les charges en azote peuvent entraîner une acidification du sol et des effets indésirables dans les milieux.[24] En Suisse, les charges en azote représentent environ 85% des apports acidifiants.[43]

Forêt

Les seuils critiques de dépôt d'azote sont dépassés sur environ 90% de la surface forestière suisse ; c'est tout particulièrement le cas sur le Plateau suisse et au Tessin, sur le versant nord des Alpes ainsi que dans le Jura.[20] Il est difficile de quantifier les incidences des charges en azote dans les forêts,[44] et, pour certains (groupes d')organismes tels que les mycorhizes, les seuils critiques sont très probablement inférieurs à ce que l'on supposait jusqu'à présent.[45] Les apports excessifs d'azote, les déséquilibres qui en résultent dans la chaîne alimentaire et l'acidification du sol modifient les communautés de mycorhizes, perturbent leur symbiose avec les arbres ainsi que l'approvisionnement alimentaire des arbres.[28, 46] Ils empêchent l'enracinement en profondeur et la croissance des racines fines,[47] portent donc atteinte à la vitalité des arbres et à l'accroissement du volume de bois sur les sites où la charge en azote excède 30 kg par hectare et par an.[48, 49] De plus, une plus grande sensibilité des arbres aux parasites a été observée.[47] En corrélation avec l'acidification du sol, on constate également une plus grande sensibilité à la sécheresse et au chablis.[50, 51] **Cette évolution peut mettre en péril la fonction protectrice des forêts et joue**

un rôle essentiel dans le contexte du changement climatique. Les sols forestiers assurent par ailleurs la salubrité de l'eau potable. Cet effet filtre est constamment compromis par les dépôts élevés d'azote.[52]

Prairies, pâturages et marais

Les seuils critiques de charge en azote sont dépassés sur pratiquement tous les hauts-marais, sur trois quarts des bas-marais et sur un tiers des prairies et pâturages secs de Suisse.[20] Le Monitoring de la biodiversité en Suisse révèle que la diversité spécifique des certains groupes d'organismes prairiaux décroît à mesure qu'augmente la charge en azote.[34, 53] Dans les marais, cette situation est préjudiciable à la biodiversité, mais aussi à la fonction de stockage du carbone, ce qui accroît le volume dégagé de gaz à effet de serre.[24] En dépit d'une protection constitutionnelle, les marais se sont sensiblement enrichis en nutriments au cours des 15–20 dernières années, ce qui a généré des modifications indésirables des biocénoses typiques de ces milieux.[54]

Insectes

La concentration d'azote dans les écosystèmes se traduit par une modification des communautés végétales, de la structure végétale et de l'utilisation du sol (régime de fauche plus intensif, p. ex.), ce qui a un impact négatif indirect sur les insectes et d'autres animaux.[25, 29, 55–58] Concernant les insectes, il en résulte, dans bien des cas, une détérioration de leur habitat, telle qu'un microclimat moins approprié,[59, 60] ou une diminution de l'offre alimentaire et de sa qualité.[61, 62]

Les espèces d'insectes spécialisées, tributaires d'une ou de quelques espèces végétales, sont particulièrement menacées par la charge en azote.[63, 64] Elles perdent leur base existentielle par suite de la disparition, provoquée par l'azote, de ces espèces végétales. D'une manière générale, dans les milieux terrestres, la diversité des plantes et des populations d'insectes qui en dépendent décroît à mesure qu'augmente l'apport d'azote.[25, 65, 66]

5. Actions possibles

En vue de réaliser les objectifs fixés par le Conseil fédéral et d'améliorer l'état de la biodiversité ainsi que la qualité des eaux, de l'eau potable, du sol et de l'air, de préserver les fonctions sylvicoles, de réduire la contribution de la Suisse au changement climatique et, en même temps, les risques sanitaires, il convient de diminuer d'urgence et dans une large mesure les excédents et les émissions d'azote et de phosphore.

Pour y parvenir, il est indispensable d'optimiser les cycles de l'azote et du phosphore au moyen d'une combinaison de mesures (encadré). Ces mesures devraient si possible s'attaquer à la source. Les approches globales et suprasectorielles sont les plus adaptées : elles permettront de réaliser des réductions d'émissions tendanciellement plus élevées et plus efficaces et d'exploiter des synergies. De plus, elles permettront d'éviter le transfert des problèmes, d'une forme d'azote à une autre, par exemple, ou de la Suisse vers l'étranger.[24, 67] A cet égard, le succès dépendra en grande partie de la coopération entre les acteurs au niveau national et cantonal, ainsi qu'entre les praticiens, les autorités et les scientifiques. Le soutien technique et, le cas échéant, financier des personnes concernées sera tout aussi important dans la mise en œuvre des mesures.

Encadré : Actions possibles pour réduire les apports excessifs d'azote et de phosphore[24, 38, 68, 69]

→ **Sauvegarde des milieux précieux :** Prévention d'apports supplémentaires d'azote et de phosphore dans des zones intactes encore peu affectées.

→ **Consommation :** Promotion d'une part plus élevée des protéines végétales par rapport aux protéines animales dans l'alimentation, d'un comportement plus soucieux de l'environnement ainsi que d'une réduction des pertes de nourriture.

→ **Intensité de la production :** Adaptation de l'intensité de la production agricole au potentiel et à la tolérance écologique du site. Orientation du cheptel et des races d'animaux en fonction de la base fourragère régionale et réduction de l'emploi et de l'importation d'aliments concentrés ; réduction de l'emploi et de l'importation de fertilisants azotés et phosphorés dans la culture et le fourrage.

→ **Production de calories végétales :** Accroissement de la part de calories végétales par rapport aux calories animales dans la production de calories en Suisse.

→ **Subventions :** Abolition ou réforme des subventions favorisant directement ou indirectement les excédents et les émissions d'azote et de phosphore, telles que les subventions encourageant un nombre élevé d'animaux de rente.

→ **Mesures organisationnelles et techniques dans l'agriculture :** Réduction des excédents et des émissions d'azote et de phosphore par des mesures organisationnelles et techniques dans l'agriculture, telles que la diffusion des pratiques réduisant la lixiviation de l'azote et du phosphore.

→ **Transports, industrie, artisanat :** Réduction des émissions par des mesures organisationnelles et techniques.

6. Conclusion

Les causes et l'ampleur des apports excessifs d'azote et de phosphore en Suisse sont bien connues. Leurs incidences négatives sur la biodiversité, la qualité des eaux, de l'eau potable, du sol et de l'air, ainsi que les fonctions sylvicoles, le climat et la santé ont été largement documentées par les scientifiques. Le degré actuel des connaissances permet de bien étayer les mesures qui s'imposent. Les données scientifiques montrent que la réalisation des objectifs fixés à l'échelle nationale et internationale et la prévention de coûts externes élevés requièrent une intervention rapide des acteurs au niveau national et cantonal. Afin de clarifier les mesures à prendre et les corrections à effectuer, il faut définir des indicateurs transparents et des objectifs mesurables et contraignants, dont la réalisation fera l'objet de contrôles réguliers.

ODD: objectifs de développement durable de l'ONU

Par cette publication, l'Académie suisse des sciences naturelles fournit une contribution aux ODD 2, 3, 6, 11, 12, 13, 14:
«Eliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable», «Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge», «Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau», «Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables», «Etablir des modes de consommation et de production durables», «Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions», «Conserver et exploiter de manière durable les océans et les mers aux fins du développement durable» et «Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable».

› sustainabledevelopment.un.org
› eda.admin.ch/agenda2030/fr/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html

1 – 70 Une version de la présente fiche, avec les références bibliographiques, est disponible à l'adresse suivante: biodiversite.scnat.ch/publications/factsheets

MENTIONS LÉGALES

EDITRICE ET CONTACT
Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) • Forum Biodiversité Suisse • Maison des Académies • Laupenstrasse 7 • Case postale • 3001 Berne • Suisse • +41 31 306 93 40 • biodiversity@scnat.ch • biodiversite.ch

Jodok Guntern, collaborateur scientifique du Forum Biodiversité: jodok.guntern@scnat.ch

Prof. Dr. Florian Altermatt, président du Forum Biodiversité: florian.altermatt@eawag.ch

PROPOSITION DE CITATION
Guntern J et al. (2020) Apports excessifs d'azote et de phosphore nuisent à la biodiversité, aux forêts et aux eaux. Swiss Academies Factsheet 15 (8)

AUTEURES ET AUTEURS
Jodok Guntern (Forum Biodiversité Suisse, SCNAT) • Anja Eichler (PSI) • Frank Hagedorn (WSL) • Loïc Pellissier (EPF Zurich, WSL) • Margit Schwikowski (PSI) • Ole Seehausen (Université de Berne, Eawag) • Christian Stamm (Eawag) • Marcel van der Heijden (Agroscope, Université de Zurich) • Peter Waldner (WSL) • Ivo Widmer (Forum Biodiversité Suisse, SCNAT) • Florian Altermatt (Université de Zurich, Eawag)

TRADUCTION
Henri-Daniel Wibaut

RELECTURE
Danièle Martinoli (Forum Biodiversité Suisse, SCNAT), Edward Mitchell (Université de Neuchâtel)

RÉDACTION
Daniela Pauli (Forum Biodiversité Suisse, SCNAT) • Marcel Falk (SCNAT)

ILLUSTRATIONS
Monika Rohner

MISE EN PAGE
Olivia Zwygart (SCNAT)

ISSN (print): 2297–1602
ISSN (online): 2297–1610

DOI: 10.5281/zenodo.4269643

Cradle to Cradle™-factsheet certifiée et climatiquement neutre par Vögeli AG à Langnau.

Bibliographie

1 Rockström J, Steffen WL, Noone K, Persson A, Chapin III FS (2009) **A safe operating space for humanity.** Nature 461: 472–475.

2 Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al (2015) **Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet.** Science 347: 1259855.

3 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).

4 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.

5 Schweizerischer Bundesrat (2009) **Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen des Bundes.**

6 Herzog F, Prasuhn V, Spiess E, Richner W (2008) **Environmental cross-compliance mitigates nitrogen and phosphorus pollution from Swiss agriculture.** Environmental Science and Policy 11: 655–668.

7 BAFU, BLW (2016) **Umweltziele Landwirtschaft.** Statusbericht 2016.

8 Schweizerischer Bundesrat (2020) **Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolotik ab 2022 (AP22+).**

9 BAFU (2014) **Grundlagenpapier zur Stickstoffproblematik Luft, Boden, Wasser, Biodiversität und Klima.**

10 Heldstab J, Leippert F, Biedermann R, Schwank O (2013) **Stickstoffflüsse in der Schweiz 2020.** Stoffflussanalyse und Entwicklungen.

11 Heldstab J, Reutimann J, Biedermann R, Leu D (2010) **Stickstoffflüsse in der Schweiz Stoffflussanalyse für das Jahr 2005.**

12 Herzog F, Richner W (2005) **Evaluation der Ökomassnahmen – Bereich Stickstoff und Phosphor.**

13 Reutimann J, Heldstab J, Leippert F (2013) **Stickstoff in der Land- & Ernährungswirtschaft: Stickstoffflüsse, Verluste und Reduktionspotentiale.**

14 Kupper T, Bonjour C, Achermann B, Rihm B, Zaucker F, Menzi H (2013) **Ammoniakemissionen in der Schweiz 1990–2010 und Prognose bis 2020**.

15 EKL (2014) **Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge.** Abklärungen der EKL zur Beurteilung der Übermässigkeit.

16 BAFU (2020) **Kenngrössen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2018.**

17 Schwikowski M (2016) **40 Jahre Eiskernforschung auf dem Colle Gnifetti.** GeoPanorma 26–29.

18 Akselsson C, Belyazid S, Hellsten S, Klarqvist M, Pihl-Karlsson G, Karlsson PE, 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.

19 Binkley D, Högberg P (1997) **Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests?** Forest Ecology and Management 92: 119–152.

20 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.**

21 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).

22 Hürdler J, Spiess E, Prasuhn V (2015) **Diffuse Nährstoffeinträge in Gewässer.** Aqua & Gas 66–78.

23 Binder CR, de Baan L, Wittmer D (2009) **Phosphorflüsse der Schweiz. Stand Risiken und Handlungsoptionen.**

24 Sutton MA, Howard CM, Eirsman JW, Billen G, Bleeker A, Grennfelt P, van Grinsven H, Grizzetti B (2011) **The European nitrogen assessment: sources, effects and policy perspectives.**

25 Bobbink R, Hettelingh J-P (2011) **Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships.** Proceedings of an expert workshop, Noordwijkerhout, 23-25 June 2010. UNECE Coordination Centre for Effects, pp 23-25.

26 26. BAFU (2019) Z**ustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz.** Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. Umwelt-Zustand Nr 1901 138.

27 Kiefer I, Steinsberger T, Wüest A, Müller B (2020) **Sauerstoffzehrung in Seen.** Aqua & Gas 7/8: 62–70.

28 de Witte LC, Rosenstock NP, van der Linde S, Braun S (2017) **Nitrogen deposition changes ectomycorrhizal communities in Swiss beech forests.** Science of the Total Environment 605: 1083–1096.

29 Hautier Y, Niklaus P, Hector A (2009) **Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication.** Science 324: 636–638.

30 Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erisman JW, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, De Vries W (2010) **Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis.** Ecological Applications 20: 30–59.

31 Staude IR, Waller DM, Bernhardt-Römermann M, 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.

32 Alexander TJ, Vonlanthen P, Seehausen O (2016) **Does eutrophication-driven evolution change aquatic ecosystems?** Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 372: 20160041.

33 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.

34 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.

35 Dümmler P, Roten N (2018) **Eine Agrarpolitik mit Zukunft.** Avenir Suisse.

36 Schweizerischer Bundesrat (2016) **Antwort des Bundesrates vom 17. August 2016 auf die Interpellation 16.3512.**

37 Dümmler P, Anthamatten J (2020) **Weiterhin wachsende Kosten der Landwirtschaft. Avenir Suisse.**

38 SRU (2015) **Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem.** Sondergutachten.

39 Makri S, Lami A, Lods-Crozet B, Loizeau JL (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.

40 Vonlanthen P, Bittner D, Hudson a G, Young K a, Müller R, Lundsgaard-Hansen B, Roy D, Di Piazza S, Largiadèr CR, Seehausen O (2012) **Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations.** Nature 482: 357–62.

41 Spaak P (2012) **Wie Nährstoffe Gewässer verändern.** EAWAG News 72: 4–7.

42 Auderset Joye D, Schwarzer A (2012) **Rote Liste Armleuchteralgen.** Gefährdete Arten der Schweiz. Stand 2010.

43 Augustin S, Achermann B (2012) **Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz: Entwicklung, aktueller Stand und Bewertung.** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 163: 323–330.

44 Thimonier A, Kosonen Z, Braun S, Rihm B, Schleppi P, Schmitt M, Seitler E, Waldner P, Thöni L (2019) **Total deposition of nitrogen in Swiss forests: Comparison of assessment methods and evaluation of changes over two decades.** Atmospheric Environment 198: 335–350.

45 van der Linde S, Suz LM, Orme CDL, et al (2018) **Environment and host as large-scale controls of ectomycorrhizal fungi.** Nature 558: 243–248.

46 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.

47 Braun S, Rihm B, Flückiger W (2012) **Stickstoffeinträge in den Schweizer Wald: Ausmass und Auswirkungen.** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 163: 355–362.

48 Etzold S, Ferretti M, Reinds GJ, 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: 117762.

49 de Witte LC, Braun S, Hopf S (2018) **Zu viel Stickstoff im Wald. Wald und Holz 29–31.**

50 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.

51 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.

52 Waldner P, Braun S, Kurz D, Thimonier A (2016) **Nährstoffflüsse im Wald mit Fokus auf Stickstoff und basische Kationen**. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P (eds) Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bundesamt für Umwelt (BAFU); Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Haupt-Verlag, 61–745.

53 Koordinationsstelle BDM (2011) **Stickstoffeintrag aus der Luft verändert Vielfalt.** BDM-FACTS 3: 1–4.

54 Bergamini A, Ginzler C, Schmidt BR, Bedolla A, Boch S, Ecker K, Graf U, Küchler H, Küchler M, Dosch O, Holderegger R (2019) **Zustand und Entwicklung der Biotope von nationaler Bedeutung: Resultate 2011–2017 der Wirkungskontrolle Biotopschutz Schweiz.**

55 Pöyry J, Carvalheiro LG, Heikkinen RK, Kühn I, Kuussaari M, Schweiger O, Valtonen A, van Bodegom PM, Franzén M (2017) **The effects of soil eutrophication propagate to higher trophic levels.** Global Ecology and Biogeography 26: 18–30.

56 Nijssen ME, WallisDeVries MF, Siepel H (2017) **Pathways for the effects of increased nitrogen deposition on fauna.** Biological Conservation 212: 423–431.

57 Farrer EC, Suding KN (2016) **Teasing apart plant community responses to N enrichment: the roles of resource limitation, competition and soil microbes.** Ecology letters 19: 1287–1296.

58 Cleland EE, Harpole WS (2010) **Nitrogen enrichment and plant communities.** Annals of the New York Academy of Sciences 1195: 46–61.

59 WallisDeVries MF, van Swaay CAM (2006) **Global warming and excess nitrogen may induce butterfly decline by micro-climatic cooling.** Global Change Biology 12: 1620–1626.

60 Klop E, Omon B, WallisDeVries MF (2015) **Impact of nitrogen deposition on larval habitats: the case of the Wall Brown butterfly Lasiommata megera.** Journal of Insect Conservation 19: 393–402.

61 Kurze S, Heinken T, Fartmann T (2018) **Nitrogen enrichment in host plants increases the mortality of common Lepi-doptera species.** Oecologia 188: 1227–1237.

62 Lebeau J, Wesselingh RA, Van Dyck H (2016) **Floral resource limitation severely reduces butterfly survival, condition and flight activity in simplified agricultural landscapes.** Oecologia 180: 421–427.

63 Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG (2019) **Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers.** Biological Conservation 232: 8–27.

64 Biesmeijer JC, Roberts SPM, Reemer M, Ohlemüller R, Edwards M, Peeters T, Schaffers a P, Potts SG, Kleukers R, Thomas CD, Settele J, Kunin WE (2006) **Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands.** Science 313: 351–354.

65 Stevens CJ, Duprè C, Dorland E, Gaudnik C, Gowing DJG, Bleeker A, Diekmann M, Alard D, Bobbink R, Fowler D, Corcket E, Mountford JO, Vandvik V, Aarrestad PA, Muller S, Dise NB (2010) **Nitrogen deposition threatens species richness of grasslands across Europe.** Environmental Pollution 158: 2940–2945.

66 Öckinger E, Hammarstedt O, Nilsson SG, Smith HG (2006) **The relationship between local extinctions of grassland butterflies and increased soil nitrogen levels.** Biological Conservation 128: 564–573.

67 Schmidt A, Mann S, Mack G (2017) I**nstrumente Evaluation Stickstoff (IES).** Schlussbericht.

68 Gubler L, Ismail S, Seidl I (2020) **Biodiversitätsschädigende Subventionen in der Schweiz.** Swiss Academies Factsheet 15 (7)

69 Tilman D, Clark M (2014) **Global diets link environmental sustainability and human health.** Nature 515: 518–522.

70 7Dise NB, Ashmore M, Belyazid S, Bleeker A, Bobbink R, de Vries W, Erisman JW, Spranger T, Stevens CJ, van den Berg L (2011) **Nitrogen as a threat to European terrestrial biodiversity.** In Sutton MA, Howard CM, Eirsman JW, Billen G, Bleeker A, Grennfelt P, van Grinsven H, Grizzetti B (eds) (2011) The European nitrogen assessment: sources, effects and policy perspectives. Cambridge University Press.