



Dokumentation

Phosphat-Austrag im Grünland

Phosphat-Austrag im Grünland

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 164/24

Abschluss der Arbeit: 04.12.2024

Fachbereich: WD 5: Wirtschaft, Energie und Umwelt

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzugeben und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Stellungnahme des Julius Kühn-Instituts (JKI)	5

1. Einleitung

In Gewässern – sowohl in Fließgewässern als auch in Seen – wird eine erhöhte Konzentration des Pflanzennährstoffs Phosphor festgestellt. Dies führt in Oberflächengewässern zu einer Eutrophierung¹ und damit zu einer Wasserpflanzendüngung sowie einer Massenentwicklung von Algen. Es hat zudem auch Auswirkungen auf die Zusammensetzung aller Lebewesen im Gewässer (Biodiversität) und auf den Sauerstoffgehalt im Wasser. Vor diesem Hintergrund werden verschiedene Ursachen des veränderten Landschaftswasserhaushalts diskutiert.

Faktoren, die ganz allgemein den Landschaftswasserhaushalt beeinflussen, sind die drei Komponenten Niederschlag, Verdunstung und Abfluss. Letztere umfasst auch den Wasserabfluss in das Grundwasser und aus dem Grundwasser.

Als Ursache der Eutrophierung durch Phosphor in Gewässern wird insbesondere die Rolle der Landwirtschaft erforscht. In der vorliegenden Arbeit wird der Frage nachgegangen, in welchem Ausmaß Dauergrünland und damit Gebiete, auf denen ständig Pflanzen wachsen, einen Erosionsschutz und einen Schutz der Gewässerökosysteme darstellen.

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie² benennt als Stoffe, die zur Eutrophierung von Gewässern beitragen, „insbesondere Nitrate und Phosphate“. Phosphat (Salz der Phosphorsäure H_3PO_4) ist neben Nitrat auch ein bedeutender Pflanzennährstoff³ und für das Pflanzenwachstum essenziell. In der Landwirtschaft wird Phosphat den Böden durch Dünger zugeführt.⁴ Danach wird Phosphor von den Pflanzen aus dem im Wasser gelösten Phosphat aus dem Boden aufgenommen.

Um die Phosphat-Einträge aus anderen urbanen Quellen zu reduzieren, wurde Phosphat in Waschmitteln durch phosphatfreie Substanzen ersetzt und in großen Kläranlagen aus dem

1 Der Begriff ‘eutroph‘ stammt aus dem Griechischen (eu trophos) und bedeutet ‘gut ernährt‘. Eutrophierung, 17.05.2024, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/eutrophierung#eutrophierung-was bedeutet-das>.

2 ANHANG VIII, „Nichterschöpfendes Verzeichnis der wichtigsten Schadstoffe“, unter Punkt 11 der Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpoltik, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0060&qid=1730271507810>.

3 <https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Erstmals-weltweiter-Phosphorverlust-durch-Bodenerosion-quantifiziert.html>.

4 Vgl. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/phosphor.html>. Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft zwischen Knappheit und Überschuss, Dachverband Agrarforschung e.V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages Wissenschaftliche Tagung des Dachverbandes Agrarforschung (DAF) e.V. am 10.10.2019 in der Vertretung des Landes Hessen beim Bund, Berlin, https://www.agrarforschung.de/fileadmin/download/2020/agrarspectrum_52_200320.pdf.

Abwasser gefiltert. Sowohl die Landwirtschaft als auch Kläranlagen werden als wesentliche Phosphat-Eintragsfaktoren diskutiert.⁵

Dem Grünlandzentrum Niedersachsen/Bremen e.V. zufolge umfasst Grünland Wiesen und Weiden. Wird Grünland seit mindestens fünf Jahren nicht als Acker genutzt, wird es als Dauergrünland bezeichnet. Zudem heißt es dort:

„Grünland ist ökologisch wertvoll und trägt zum Klimaschutz bei. Über die Hälfte aller in Deutschland beobachteten Arten finden sich auf Grünlandflächen. Außerdem wird durch den hohen Humusgehalt Kohlendioxid gebunden, das sonst als Treibhausgas zur Klimaerwärmung beiträgt. Ferner verbessert die ganzjährige Vegetationsdecke die Wasserspeicherkapazität des Bodens und reduziert die Gefahr von Austrocknung und Starkregenfolgen.“⁶

Es wird zwischen „intensiv“ und „extensiv“ genutztem Grünland unterschieden. Ersteres „wird regelmäßig gemäht oder beweidet und häufig mit Düngemitteln behandelt“, letzteres „wird seltener gemäht und weniger oder gar nicht gedüngt.“⁷

2. Stellungnahme des Julius Kühn-Instituts (JKI)

Das Julius Kühn-Institut (JKI) wurde um eine kurzfristige Stellungnahme gebeten, um zu prüfen, ob die Aussage, dass Phosphat-Austragungen von Grünlandflächen in das Grundwasser ausgeschlossen werden können, wissenschaftlich belegt ist. Das JKI nahm hierzu wie folgt Stellung:

„Die in der Anfrage angesprochenen Themengebiete werden durch den komplexen Landschaftswasserhaushalt beeinflusst. Wichtige Komponenten des Landschaftswasserhaushaltes sind der Niederschlag, die Verdunstung und der Abfluss, der auch den Wasserabfluss in den Grundwasserkörper sowie den Wasserabfluss aus dem Grundwasserkörper beinhaltet. Wohlrab et al. (1992) geben einen guten Überblick über die Komponenten des Landschaftswasserhaushaltes.

Vereinfacht dargestellt bedeutet dies: Niederschlag, der nicht verdunstet, versickert (vertikal) oder fließt ab (überwiegend lateral). Sickerung und Abfluss werden durch anthropogene [durch menschliche Einwirkung verursachte] Bodennutzung stark beeinflusst. Die Sickerleistung/Infiltationsrate eines Bodens bestimmt, ab welcher Niederschlagsintensität Oberflächenabfluss einsetzt. Die Infiltrationsfähigkeit eines Standortes wird wesentlich durch die Größe und Verteilung der Mikro- und Makroporen bestimmt. In Makroporen (Regenwurmröhren, Wurzelgängen oder Bodenrissen) kann sich Sickerwasser spannungsfrei [d. h. Zug- und Druckkräfte gleichen sich aus] abwärts bewegen. Im Allgemeinen werden unter Wald sehr hohe bis mittlere Infiltationsraten beobachtet und mittlere Raten auf intensiv genutztem Grünland. Auf Ackerland sind sehr geringe bis sehr hohe Raten möglich, je nach Bearbeitungszustand (Wohlrab et al., 1992). Neben

5 Bur, Anna (2022), Studie zur Ermittlung der Eintragspfade und -mengen von Phosphat aus der Landwirtschaft in dem Einzugsgebiet Theel und III – Schlussbericht, https://www.researchgate.net/publication/357582320_Studie_zur_Ermittlung_der_Eintragspfade_und_-mengen_von_Phosphat_aus_der_Landwirtschaft_in_dem_Einzugsgebiet_Theel_und_Ill_-_Schlussbericht.

6 <https://www.gruenlandzentrum.org/was-ist-eigentlich-gruenland/>.

7 <https://www.gruenlandzentrum.org/was-ist-eigentlich-gruenland/>.

den Bewirtschaftungsfaktoren wirkt sich auch die Bodenart auf die Infiltrationsraten aus, so werden unter gleicher Bewirtschaftung auf Sandböden höhere Sickerwerte auftreten als auf Lehmböden. Zu Grundwasserneubildung kommt es, wenn Sickerung unterhalb der durchwurzelten Bodenzone stattfindet.

Der Wurzeltieflgang von Wild- und Kulturpflanzen ist artspezifisch genetisch festgelegt. Von der Form des Wurzelsystems (Pfahlwurzel, Büschelwurzel, Flachwurzler, Tiefwurzler) hängt die tatsächliche Durchwurzelung entscheidend ab (Aid Infodienst Ernährung, Landwirtschaft Verbraucherschutz, 2016). Jedoch ist bei guter Wasser- und Nährstoffversorgung damit zu rechnen, dass sich bis zu 90 % der Wurzeltrockenmasse im Oberboden (0 bis 30 cm) befindet. Die Durchwurzelbarkeit eines Bodens kann z. B. durch verfestigte Bänke^[8] oder Horizonte^[9], Reduktionshorizonte oder Bodenhorizonte mit schroffem Wechsel der chemischen Eigenschaften begrenzt sein (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Unter Erosion versteht man die Verlagerung von Bodenpartikeln. Man unterscheidet Wind- und Wassererosion. Bodenerosion ist ein Prozess, der sich in drei Teilprozesse gliedern lässt: (I) Bodenpartikel werden abgelöst, (II) Bodenpartikel werden transportiert, (III) Bodenpartikel werden deponiert. Wassererosion ist die Verlagerung von Bodenpartikeln durch oberflächlich abfließendes Wasser. Der Verlagerung gehen sogenannte Splash-Effekte voraus, durch die Bodenverschlämungen entstehen, die die Infiltrationsraten verringern. Wesentliche Faktoren, die das Auftreten von Wassererosionsprozessen beeinflussen, sind das Relief (Hangneigung und Hanglänge), der Niederschlag (Häufigkeit, Intensität und Verteilung), der Boden (Körnung und Infiltrationsrate) und die Landnutzung (Bodenbedeckungsgrad, Fruchtfolge, Bodenbearbeitung). Vor allem die Bodenbedeckung reduziert die kinetische Energie, mit der Regentropfen auf den Boden auftreffen, und damit das Auftreten von Splash-Erosion (Zerstörung von Bodenaggregaten durch Regentropfen). Der Transport von suspendierten Bodenkörnern (Wassererosion) wird vom Verhältnis zwischen der geschwindigkeitsbedingten turbulenten Aufwärtskomponente im fließenden Medium und der Sinkgeschwindigkeit der Körner in diesem Medium bestimmt (Hartge & Horn, 1999). Für die kleineren Bodenkörner findet eine Wiederablagerung erst statt, wenn die Turbulenz nachlässt, d. h. wenn der gesamte fließende Körper hinreichend langsamer wird. Dieses Verhalten erklärt das schichtweise Auftreten von schluffähnlichen^[10] Sedimenten und ihre Verteilung in den Bereichen geringer Geschwindigkeiten, wie z. B. auf Überflutungsflächen (Hartge & Horn, 1999).

Im Boden steigt der P-Gehalt^[11] i. d. R. von der Sand- zur Tonfraktion und mit dem Humusgehalt an. In Oberböden ist der P-Gehalt zusätzlich durch die Vegetationsrückstände und durch Düngung angereichert (Schachtschabel et al., 1998). Phosphor liegt in Böden überwiegend in fester

8 Als Bankung bezeichnet man in den Geowissenschaften eine Gliederung einer Gesteinsabfolge durch sog. Schichtfugen. Die einzelnen Bänke können dabei unterschiedliche Dicken aufweisen.

9 Horizonte oder Bodenhorizonte sind in den Geowissenschaften Bereiche des Bodens, die sich als Ergebnis der Bodenbildung ausgeformt haben und können aus mehreren Schichten bestehen.

10 Mineralische Bestandteile des Bodens werden ihrer Korngröße nach geordnet. Dabei hat der sog. Schluff eine Korngröße von 0,063 mm bis 0,002 mm und ist damit feiner als Sand (2 mm bis 0,063 mm).

11 Im Folgenden wird P als Abkürzung für das Salz Phosphat verwendet.

Form vor, während in der Bodenlösung der P-Anteil meist nur 0,1 % des Gesamt-P ausmacht. Gebundenes Phosphat findet sich entweder in anorganischen Salzen (Phosphate), an Oberflächen von Sorbenten^[12] gebunden, in organischen Verbindungen oder in Bodenorganismen (Schachtschabel et al., 1998). Alle festen Formen sind über die Bodenlösung durch spezifische Prozesse, wie

z. B. Mineralisierung, Immobilisierung, Auswaschung, Fällung, Lösung, Sorption, Desorption, usw. miteinander verbunden (Schachtschabel et al., 1998). In ungedüngten Böden liegt die P-Konzentration der Bodenlösung im Bereich von 0,001 bis 0,1 mg l⁻¹. In gedüngten Ap-Horizonten^[13] (Bearbeitungshorizont des Bodens, i. d. R. bis 30 cm Tiefe) zwischen 0,1 bis 5,0 mg l⁻¹. Unmittelbar unterhalb des Ap-Horizonts ist die P-Konzentration oft noch deutlich höher als darunter, da P in größeren Poren oder durch Tiertätigkeit verlagert wird. Darunter sinkt sie dann deutlich ab (meist < 0,1 mg l⁻¹). Stark P bindende Böden haben geringere P-Konzentrationen der Bodenlösung als schwach bindende (Schachtschabel et al., 1998).

1. Phosphateintrag in Grundwasser

Ob es zu P-Einträgen in Grundwasserkörpern kommt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab und kann nicht pauschal verneint werden. Zum einen von Faktoren, auf die Landwirtinnen und Landwirte keinen unmittelbaren Einfluss haben, wie z. B. die Bodenart, die Höhe des Grundwasserspiegels, Menge, Intensität sowie Zeitpunkt von Niederschlägen. Zum anderen von Bewirtschaftungsfaktoren, wie z. B. Fruchtfolgen, Kulturarten, Bodenbearbeitung und Düngung.

Vor allem, wenn es auf grundwassernahen Standorten mit einer hohen Infiltrationskapazität (Grobporen, Wurzeln, Bodenkörnung) und langjähriger P-Düngung zu Sickerungsprozessen kommt, kann P auch unterhalb des Wurzelraumes und ins Grundwasser verlagert werden (Holman et al., 2008; Holman et al., 2010; McDowell et al., 2015; Dupas et al., 2017; Lizarralde et al., 2023). Auch wenn der Anteil der P-Verluste durch Sickerung allgemein als gering im Vergleich zu den Verlusten durch Oberflächenabfluss angesehen wird, so kann es doch auch auf diesem Wege zu P-Austrägen kommen. So konnten z. B. größere P-Verluste aus Drainagerohren aus Ton beobachtet werden (Zimmer et al., 2016; Siebers et al., 2023), aus Makroporen-Drainage-Netzwerken (Simard et al., 2000; Monaghan et al., 2016) oder aus Böden mit geringen Sorptionseigenschaften (Kjaergaard et al., 2012).

2. Belastung von Gewässerökosystemen durch Grünlandflächen

Trotz der Ausführung zu Punkt 1 herrscht Einigkeit darüber, dass P-Einträge aus der Landwirtschaft in angrenzende Ökosysteme zu einem großen Anteil durch Oberflächenabfluss und Erosionsprozesse stattfinden. Böden ohne oder mit nur wenig Bodenbedeckung weisen ein erhöhtes Risiko auf, von Erosionsprozessen betroffen zu sein. Durch die ganzjährige Bodenbedeckung und

12 Sorption bezeichnet eine selektive Aufnahme von Stoffen durch andere Stoffe. Als „Sorbent“ wird der Stoff bezeichnet, an oder in den gelagert/gebunden wird.

13 "Ap-Horizont, p=Pflug (Ackerkrume) sehr humushaltig, leicht steinig, biogen durchmischt", Quelle: Umweltbundesamt (2010), Die Böden Deutschlands - Sehen, Erkunden, Verstehen, S. 24, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4161.pdf>.

Durchwurzelung von Grünlandflächen finden Oberflächenabfluss und Erosion im Allgemeinen in geringerem Ausmaß als auf Ackerflächen statt.

Der Oberflächenabfluss von Grünlandflächen tritt i. d. R. bei Starkregenniederschlägen auf, wenn die Infiltrationskapazität überschritten wird (Schärer et al., 2007; Adams et al., 2022). Vor allem wenn auf Grünlandflächen z. B. Grasnarbenschäden und Bodenverdichtungen (durch landwirtschaftliche Maschinen oder durch Trittschäden von Weidetieren) auftreten, kann es zudem auch zu Erosionsprozessen kommen.

Die P-Belastung von Gewässersystemen durch Grünlandflächen ist nicht vernachlässigbar (Bilotta et al., 2008). Die mehrfach in einem Jahr durchgeführte organische oder anorganische Düngung auf Grünlandflächen erhöht zudem zusätzlich das Risiko eines P-Austrages bei nachfolgenden Starkregenereignissen. Folgt auf die Ausbringung ein Starkregenereignis (überwiegend zwischen Mai und September zu erwarten), kann es auch ohne größere Bodenverluste zu P-Verlagerungen durch Oberflächenabfluss in angrenzende Ökosysteme kommen (Heathwaite et al., 1998; Hahn et al., 2012; O'Rourke et al., 2022). Zudem weisen viele Grünlandflächen hohe bis sehr hohe P-Konzentrationen im Boden auf, die auch ohne zusätzliche Düngung zu hohen P-Konzentrationen im Oberflächenabfluss führen können (Schärer et al., 2007).

[...].

Die oben aufgeführten Sachverhalte finden in der aktuellen Düngeverordnung (DüV) (BMEL, 2020) [...] Berücksichtigung.

[...].

Phosphatverlagerungen ins Grundwasser können im komplexen Landschaftswasserhaushalt nicht ausgeschlossen werden. Zudem tragen auch Grünlandflächen zur Belastung von Gewässerökosystemen bei. [...].“¹⁴

Zu den obigen Ausführungen verweist das JKI in seiner Stellungnahme auf die folgenden Literaturstellen:

- Adams, R., D.G. Doody, A. Anderson, O. Fenton, P. Tuohy, P. Vadas, 2022: Evaluating scenarios to reduce phosphorus transport in surface waters from slurry applications in temperate grasslands. *Hydrological Sciences Journal* **67** (8), 1216–1227, [DOI:10.1080/02626667.2022.2072221](https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2072221).
- Ad-hoc-AG Boden, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Aid Infodienst Ernährung, Landwirtschaft Verbraucherschutz (Ed.), 2016: Gute fachliche Praxis - Bodenfruchtbarkeit. Vol.: **1585**. Bonn, aid infodienst.

- Bilotta, G.S., R.E. Brazier, P.M. Haygarth, C.J.A. Macleod, P. Butler, S. Granger, T. Krueger, J. Freer, J. Quinton, 2008: Rethinking the contribution of drained and undrained grasslands to sediment-related water quality problems. *Journal of Environmental Quality* **37** (3), 906–914, [DOI:10.2134/jeq2007.0457](https://doi.org/10.2134/jeq2007.0457).
- BMEL, 2017: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kulturstoffen und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen: Düngeverordnung (DüV).
- Dupas, R., P.-E. Mellander, C. Gascuel-Odoux, O. Fovet, E.B. McAleer, N.T. McDonald, M. Shore, P. Jordan, 2017: The role of mobilisation and delivery processes on contrasting dissolved nitrogen and phosphorus exports in groundwater fed catchments. *The Science of the total environment* **599-600**, 1275–1287, [DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.05.091](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.091).
- Hahn, C., V. Prasuhn, C. Stamm, R. Schulin, 2012: Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **153**, 65–74, [DOI:10.1016/j.agee.2012.03.009](https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.009).
- Hartge, K.H., R. Horn, 1999: *Einführung in die Bodenphysik*. Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag.
- Heathwaite, A.L., P. Griffiths, R.J. Parkinson, 1998: Nitrogen and phosphorus in runoff from grassland with buffer strips following application of fertilizers and manures. *Soil Use and Management* **14** (3), 142–148, [DOI:10.1111/j.1475-2743.1998.tb00140.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1998.tb00140.x).
- Holman, I.P., N.J.K. Howden, P. Bellamy, N. Willby, M.J. Whelan, M. Rivas-Casado, 2010: An assessment of the risk to surface water ecosystems of groundwater P in the UK and Ireland. *The Science of the total environment* **408** (8), 1847–1857, [DOI:10.1016/j.scitotenv.2009.11.026](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.026).
- Holman, I.P., M.J. Whelan, N.J.K. Howden, P.H. Bellamy, N.J. Willby, M. Rivas-Casado, P. McConvey, 2008: Phosphorus in groundwater—an overlooked contributor to eutrophication? *Hydrological Processes* **22** (26), 5121–5127, [DOI:10.1002/hyp.7198](https://doi.org/10.1002/hyp.7198).
- Kjaergaard, C., L. Heiberg, H.S. Jensen, H.C.B. Hansen, 2012: Phosphorus mobilization in re-wetted peat and sand at variable flow rate and redox regimes. *Geoderma* **173-174**, 311–321, [DOI:10.1016/j.geoderma.2011.12.029](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.029).
- Lizarralde, C.A., R. McDowell, L. Condron, J. Brown, 2023: The potential for phosphorus loss to groundwater from soils irrigated with dairy factory wastewater. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **66** (3), 189–207, [DOI:10.1080/00288233.2022.2037091](https://doi.org/10.1080/00288233.2022.2037091).
- McDowell, R.W., N. Cox, C.J. Daughney, D. Wheeler, M. Moreau, 2015: A National Assessment of the Potential Linkage between Soil, and Surface and Groundwater Concentrations of Phosphorus. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **51** (4), 992–1002, [DOI:10.1111/1752-1688.12337](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12337).

- Monaghan, R.M., L.C. Smith, R.W. Muirhead, 2016: Pathways of contaminant transfers to water from an artificially-drained soil under intensive grazing by dairy cows. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **220**, 76–88, [DOI:10.1016/j.agee.2015.12.024](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.024).
- O'Rourke, S.M., R.H. Foy, C.J. Watson, A. Gordon, S. Higgins, P.A. Vadas, 2022: Effect of increasing the time between slurry application and first rainfall event on phosphorus concentrations in runoff. *Soil Use and Management* **38** (1), 611–621, [DOI:10.1111/sum.12732](https://doi.org/10.1111/sum.12732).
- Schachtschabel, P., H.P. Blume, G. Brämmmer, K.H. Hartge, U. Schwertmann, 1998: Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag.
- Schärer, M., C. Stamm, T. Vollmer, E. Frossard, A. Oberson, H. Flühler, S. Sinaj, 2007: Reducing phosphorus losses from over-fertilized grassland soils proves difficult in the short term. *Soil Use and Management* **23** (s1), 154–164, [DOI:10.1111/j.1475-2743.2007.00114.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00114.x).
- Siebers, N., J. Kruse, Y. Jia, B. Lennartz, S. Koch, 2023: Loss of subsurface particulate and truly dissolved phosphorus during various flow conditions along a tile drain-ditch-brook continuum. *The Science of the total environment* **866**, 161439, [DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.161439](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161439).
- Simard, R.R., S. Beauchemin, P.M. Haygarth, 2000: Potential for Preferential Pathways of Phosphorus Transport. *Journal of Environmental Quality* **29** (1), 97–105, [DOI:10.2134/jeq2000.00472425002900010012x](https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900010012x).
- Wohlrab, B., H. Ernstberger, A. Meuser, V. Sokollek, 1992: Landschaftswasserhaushalt: Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderung durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. Hamburg, Berlin, Paul Parey.
- Zimmer, D., P. Kahle, C. Baum, 2016: Loss of soil phosphorus by tile drains during storm events. *Agricultural Water Management* **167**, 21–28, [DOI:10.1016/j.agwat.2015.12.017](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.017).
