

DEZERNAT GEWÄSSERGÜTE

Eventbasiertes Phosphor-Monitoring – Pilotstudie

Lea Müller & Marc Pelzer



☞ Phosphor ist ein essentieller Nährstoff für Wasserpflanzen, der in hohen Konzentrationen Gewässer belasten kann. Während Starkregenereignissen kann er in großen Mengen in Fließgewässer eingetragen werden und dort zu kurzfristigen Belastungsspitzen führen. Im herkömmlichen Gewässermonitoring mittels regelmäßiger Stichproben können solche kurzfristigen Einträge nur unzureichend erfasst werden. Um die Gewässerbelastung realitätsnäher zu erfassen, wurde im Jahr 2023 daher ein eventbasiertes Monitoring als Pilotstudie durchgeführt, mit welchem gezielt die auftretenden Spitzen in der Phosphorkonzentration beprobt wurden.

Hintergrund

Nährstoffe stellen im Gewässer die Grundlage für das Wachstum von Wasserpflanzen und Algen dar. Natürlicherweise fungiert dabei der Nährstoff Phosphor in seiner gelösten Form als ortho-Phosphat als limitierender Faktor. Ein Überangebot von ortho-Phosphat im Gewässer kann daher zu einem übermäßigen Wachstum von Wasserpflanzen und Algen führen, welches mit dem sauerstoffzehrenden Abbau von abgestorbener Pflanzenmasse einhergeht. Das kann zu einem Sauerstoffmangel im Gewässer führen. Dieser als Eutrophierung bezeichnete Prozess kann zu einer Abnahme der Biodiversität und zu einer Verschlechterung des ökologischen Zustands des Gewässers führen.

Ein Eintrag von Phosphor in Fließgewässer kann über punktuelle sowie über diffuse Eintragspfade erfolgen. Als Punktquellen zählen insbesondere Kläranlagen, durch die gereinigtes Abwasser in die Gewässer eingeleitet wird. Weitere Punktquellen stellen Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungsanlagen dar, die bei Niederschlag Regenwasser bzw. ein Gemisch aus Schmutz- und Regenwasser aus dem Kanalnetz in Fließgewässer einleiten.

Als diffuse Eintragspfade werden die Einträge aus der Fläche über Erosion, Abschwemmung, Drainagen sowie der Zustrom aus dem Grundwasser und über den Zwischenabfluss und atmosphärische Ablagerungen auf der Gewässeroberfläche betrachtet.

Die Eintragspfade Kläranlagen, Mischwasserentlastung und Regenwassereinleitung werden der Siedlungswasserwirtschaft zugerechnet. Die Eintragspfade Wassererosion, Abschwemmung und Drainagen von landwirtschaftlichen Flächen werden hingegen als landwirtschaftlich bedingte Eintragspfade angesehen.



Abb. 1: Kleines Fließgewässer mit Eutrophierungserscheinung
© HLNUG

Einige der Einträge erfolgen kontinuierlich, wie der Eintrag über den Ablauf von Kläranlagen, andere Einträge treten nur unter bestimmten Bedingungen, z. B. Niederschlag, auf.

Der Zustand der Nährstoffbelastung im Gewässer wird entsprechend der Vorgaben der Oberflächengewässerverordnung und im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) fortlaufend überwacht. Dabei werden 392 repräsentative Messstellen in Hessen in regelmäßigen Abständen beprobt.

Die Phosphoreintragspfade Erosion, Abschwemmung und Drainagen, aber auch der Eintrag über Mischwasserentlastungen können vor allem während Niederschlagsereignissen zu kurzfristigen Anstiegen der Phosphorkonzentration im Gewässer führen. Diese Konzentrationsspitzen können durch die monatlich erfolgende Stichprobenahme nur unzureichend erfasst werden. Zudem sind Rückschlüsse auf die Herkunft der beobachteten Nährstoffbelastung anhand der Stichproben schwierig. Um eintragspfaddifferenzierte Aussagen über die Gewässerbelastung durch Phosphor treffen zu können, wird in Hessen eine Modellrechnung herangezogen. Mit dem Modell MEPhos vom Forschungszentrum Jülich erfolgt dabei eine pfad- und flächendifferenzierte Berechnung der Phosphoreinträge in die Oberflächengewässer (TETZLAFF et al. 2020). Der Berechnung werden die bestverfügbaren Eingangsdaten zugrunde gelegt und die Ergebnisse anhand von Messergebnissen validiert.

Zum Schutz der Oberflächengewässer vor Eutrophierung sind zum einen die Phosphoreinträge aus kommunalen Kläranlagen mit der Umsetzung



Eutrophierung:

Ein Überangebot von Nährstoffen im Gewässer kann zu einem übermäßigen Wachstum von Wasserpflanzen und Algen führen, welches mit dem sauerstoffzehrenden Abbau von abgestorbener Pflanzenmasse einhergeht. Das kann zu einem Sauerstoffmangel im Gewässer führen. Dieser als Eutrophierung bezeichnete Prozess kann zu einer Abnahme der Biodiversität und zu einer Verschlechterung des ökologischen Zustands des Gewässers führen.



MEPhos:

Das Modell MEPhos vom Forschungszentrum Jülich ist Bestandteil des deutschlandweiten Modellverbands AGRUM-DE, mit welchem Nährstoffflüsse vor dem Hintergrund des landwirtschaftlichen Gewässerschutzes berechnet werden können. MEPhos bildet pfad- und flächendifferenziert Phosphoreinträge aus diffusen und punktuellen Quellen in Oberflächengewässern ab. Eine zuletzt erfolgte Modellierung ergab einen mittleren jährlichen Phosphoreintrag in die hessischen Oberflächengewässer von 946 Tonnen, davon stammen 346 Tonnen aus kommunalen Kläranlagen, 211 Tonnen aus Erosion, 194 Tonnen aus Mischwasserentlastungen und 195 Tonnen aus weiteren Eintragspfaden (TETZLAFF et al. 2020).

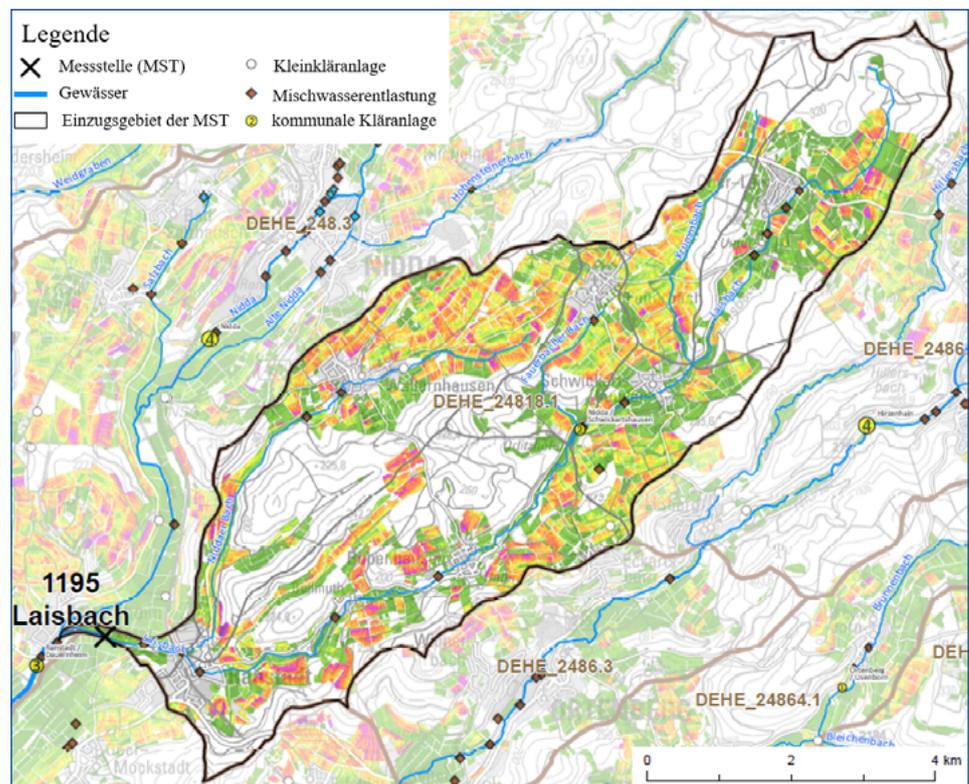
Abb. 2: Einzugsgebiet des Laisbachs mit der Messstelle 1195 (Koordinaten 50.361355, 8.967391); die Erosionsgefährdung der landwirtschaftlichen Flächen wird von grün nach lila zunehmend dargestellt © HLNUG

des WRRL-Maßnahmenprogramms reduziert worden. Zum anderen werden mit der Umsetzung der Düngeverordnung (DüV 2021) Einzugsgebiete oder Teileinzugsgebiete von Gewässern (Oberflächenwasserkörper), die aufgrund landwirtschaftlich bedingter Phosphorbelastungen keinen guten oder sehr guten ökologischen Zustand aufweisen als eutrophierte Gebiete ausgewiesen, in denen bestimmte Regelungen für die Ausbringung von phosphorhaltigen Düngemitteln gelten, wie die Einhaltung von erweiterten Aufbringungsabständen zu Gewässern.

Im Jahr 2023 ist durch das HLNUG erprobt worden, ob es mittels einer eventbasierten Probenahme möglich ist, auftretende Spitzen in der Phosphorkonzentration während Starkniederschlagsereignissen zu erfassen, um die Belastungssituation im Gewässer und die Relevanz der einzelnen Eintragspfade besser abzubilden.

Methodik

Als Untersuchungsgebiet wurde der Oberflächenwasserkörper Laisbach ausgewählt. Der Wasserkörper liegt in der Wetterau und ist aktuell als eutrophiertes Gebiet nach der DüV ausgewiesen. Das Einzugsgebiet ist 43,79 km² groß, landwirtschaftlich geprägt und weist eine geringe Besiedlungsdichte auf.



Laut dem hessischen Erosionsatlas 2023 (Boden-Viewer, HLNUG 2024) weisen die Ackerflächen vorwiegend eine mittlere bis extrem hohe Erosionsgefährdung auf.

Der Standort am Gewässer für die eventbasierte Probenahme befindet sich bei Flusskilometer 0,8 zwischen den Ortschaften Dauernheim und Ranstadt (Messstellen-ID 1195).

Oberhalb der Messstelle befinden sich entlang des Laisbachs und dessen Nebengewässern mindestens 16 Punktquellen. Bei Flusskilometer 9,8 befindet sich die Kläranlage Schwickartshausen mit einer Gesamtschmutzfracht von 2200 Einwohnerequivalenten (siehe Marginalspalte). Darüber hinaus gibt es 14 Mischwasserentlastungsanlagen (MWE), eine Kleinkläranlage sowie einige Regenwassereinleitungen (WRRL-Viewer, HLNUG 2024).

Der Laisbach gehört dem Fließgewässertyp 5 (grobmaterialreicher, silikatischer Mittelgebirgsbach) an, für welchen die Oberflächengewässerverordnung in Anlage 7 (OGewV 2016) einen Orientierungswert für den guten ökologischen Zustand für ortho-Phosphat-Phosphor von 0,07 mg/l und für Gesamtphosphor von 0,1 mg/l angibt.

Im aktuellen Bewirtschaftungsplan zur Umsetzung der WRRL 2021–2027 wird der ökologische Zustand des Laisbachs als unbefriedigend bewertet. Der chemische Zustand wird als schlecht bewertet. In Hinblick auf die allgemeinen chemisch-physikalischen Parameter wurden in den Messjahren 2018–2019, die dem aktuellen Bewirtschaftungsplan zugrunde liegen, die Orientierungswerte für ortho-Phosphat-Phosphor und Gesamtphosphor überschritten. Darüber hinaus werden laut den MEPhos Modellergebnissen 42,5 Prozent des Gesamtphosphoreintrags aus landwirtschaftlichen Quellen (Erosion, Abschwemmung und Drainagen) eingetragen (TETZLAFF et al. 2020).

Eventbasierte Probenahme

Eine eventbasierte Beprobung erfolgte bei Niederschlagsereignissen mit einer Niederschlagsmenge von mindestens 10 l/m². SCHWERTMANN et al. (1990), das Umweltbundesamt (UBA, 2020) und die Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft (2022) geben an, dass ab dieser Niederschlagsmenge eine Bodenerosion auftreten kann.

Die Probenahme erfolgte mittels zwei automatischen Probenehmern an der Messstelle 1195 bei Flusskilometer 0,8 und im Ablauf der Kläranlage Schwickartshausen.

Die Probenahme beider Geräte wurde ereignisgesteuert und synchron bei steigendem Wasserstand über einen Schwimmschalter im Gewässer an der Messstelle 1195 automatisch ausgelöst.



Einwohnergleichwerte:

Maß für die Schmutzfracht im Abwasser, bemessen nach angeschlossenen Einwohnern und Gewerbe. Der Einwohnerequivalentwert gibt an, welcher Einwohnerzahl die Belastung entspricht.



Auf Basis von ausgewerteten Niederschlagsereignissen aus der Vergangenheit wurde ein Probenahmezeitraum von zwölf Stunden gewählt, wobei die Probenahme halbstündlich erfolgte.

Im Mittelpunkt der Analytik standen die Konzentrationen der Parameter ortho-Phosphat-Phosphor ($\text{o-PO}_4\text{-P}$) und Gesamtphosphor (P_{ges}).

Außerdem wurden Durchflussmessungen bei unterschiedlichen Wasserständen durchgeführt, um eine Abflusskurve zu erstellen, welche die Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss beschreibt. Anhand der gemessenen Konzentrationen, dem Wasserstand zum Zeitpunkt der Probenahme und der Abflusskurve konnten so Stofffrachten für Phosphor (als P_{ges} und $\text{o-PO}_4\text{-P}$) näherungsweise bestimmt werden.

Niederschlagsdaten wurden von im näheren Umkreis befindlichen Niederschlagsmessstationen herangezogen.

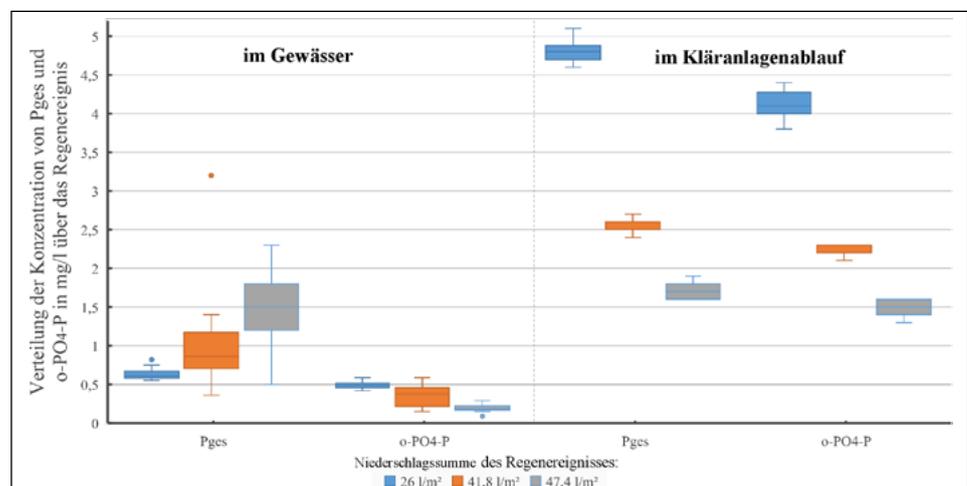
Darüber hinaus wurden im Anschluss von Starkregenereignissen Begehungen von stark erosionsgefährdeten Flächen im Einzugsgebiet sowie Befliegung dieser Flächen mit einer Drohne (DJI Mini 3 Pro) durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Zwischen dem 27. Juli und dem 17. August 2023 konnten am Laisbach drei Starkniederschlagsereignisse (Events) mit Gesamtniederschlagsmengen von 26–47 Litern pro Quadratmeter erfasst werden. Die Niederschlagsintensitäten lagen zwischen 1 l/h und 13,5 l/h.

Die Konzentrationen von P_{ges} und $\text{o-PO}_4\text{-P}$ lagen während der Events dauerhaft über den Orientierungswerten von 0,1 mg/l für P_{ges} und 0,07 mg/l für $\text{o-PO}_4\text{-P}$ (OGewV 2016). Ein Vergleich mit den Hintergrundkonzentrationen, die sich aus den monatlichen Stichproben der Jahre 2017–2022

Abb. 3: Konzentrationen von Gesamtphosphor (P_{ges}) und ortho-Phosphat-Phosphor ($\text{o-PO}_4\text{-P}$) im Gewässer und im Kläranlagenablauf während drei Events mit Niederschlagssummen von 26 l/m², 41,8 l/m² und 47,4 l/m²
© HLNUG



ergeben, zeigt, dass diese für P_{ges} (0,332 mg/l) ebenfalls dauerhaft überschritten wurde. Die Hintergrundkonzentration für $o\text{-PO}_4\text{-P}$ (0,233 mg/l) ist in 64 Prozent der Proben überschritten worden.

Ein Vergleich der gemessenen Konzentrationen im Gewässer zwischen den drei Regenereignissen mit unterschiedlichen Niederschlagssummen zeigt, dass die P_{ges} -Konzentration mit der Niederschlagssumme zunimmt. Sowohl in Hinblick auf die erreichten Maximalkonzentrationen als auch im Mittel über das Event. Anders sieht dies bei der $o\text{-PO}_4\text{-P}$ -Konzentration aus. Hier nehmen die mittleren Konzentrationen der Events mit zunehmender Niederschlagssumme ab (Abbildung 3). Dies deutet auf eine Verdünnung hinsichtlich $o\text{-PO}_4\text{-P}$ im Gewässer bei höheren Niederschlagssummen hin, sowie darauf, dass durch hohen Niederschlag zwar Phosphor eingetragen wird, aber weniger in Form von $o\text{-PO}_4\text{-P}$. Es kann angenommen werden, dass der überwiegende Eintrag von P_{ges} in Form von partikulär gebundenem Phosphor erfolgt, welcher sich aus der Differenz der Konzentrationen von P_{ges} und $o\text{-PO}_4\text{-P}$ ergibt.

Die Konzentrationen im Kläranlagenablauf sind grundsätzlich höher als im Gewässer, insbesondere bei geringeren Niederschlagssummen. Im Kläranlagenablauf nehmen jedoch sowohl die Konzentration von P_{ges} als auch von $o\text{-PO}_4\text{-P}$ mit zunehmender Niederschlagssumme im Mittel der Events ab. Dies ist ein Hinweis darauf, dass der hohe Eintrag von partikulär gebundenem Phosphor während der Events nicht aus dem Kläranlagenablauf stammt.

Eine Betrachtung der Stofffrachten ermöglicht sowohl einen Blick auf die tatsächlich vorliegenden Stoffmengen im Gewässer, bereinigt um Verdünnungseffekte durch größere Wassermengen, als auch eine Abschätzung der Gesamtstofffrachten während des Niederschlagsereignisses (Abbildung 4).

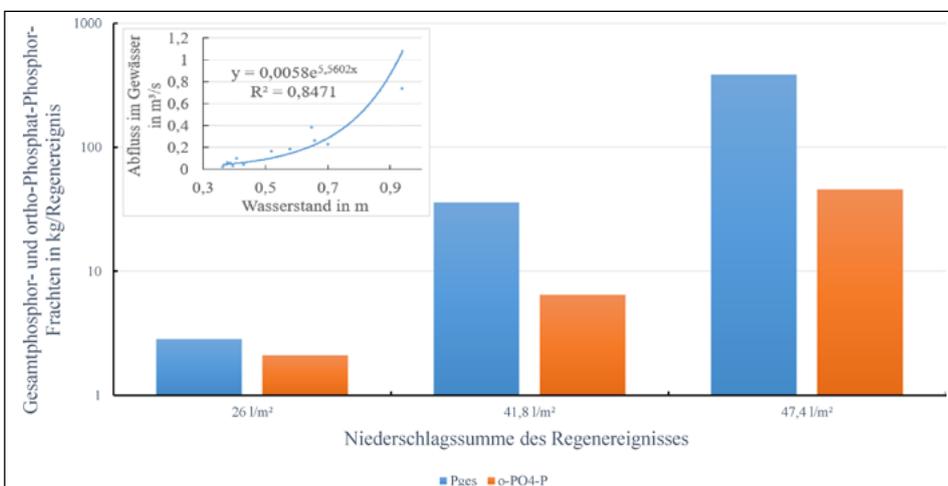
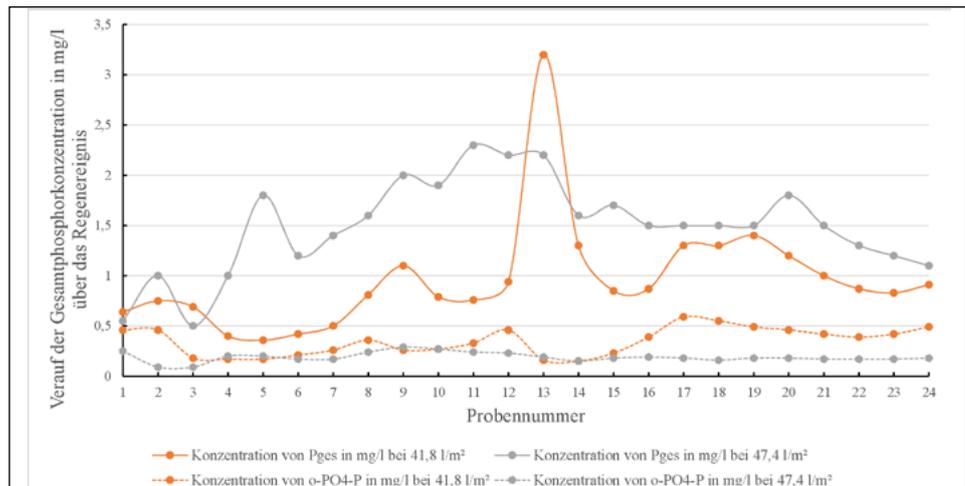


Abb. 4: Gesamtstofffrachten von P_{ges} und $o\text{-PO}_4\text{-P}$ der einzelnen Events im Gewässer; links oben: aufgenommene Abflusskurve, auf deren Basis die Frachten berechnet wurden.
© HLNUG

Abb. 5: Gegenüberstellung des Verlaufes der Konzentrationen von Gesamtphosphor (P_{ges}) und ortho-Phosphat-Phosphor ($o\text{-PO}_4\text{-P}$) im Gewässer der beiden Events mit über 40 l/m^2 Niederschlag.
© HLNUG



Es zeigt sich, dass die Frachten beider Parameter mit der Niederschlagssumme zunehmen, d. h. obwohl die Konzentration von $o\text{-PO}_4\text{-P}$ durch die Verdünnung abnimmt, liegt neben dem Eintrag von partikulärem Phosphor auch ein erhöhter Eintrag und somit eine erhöhte Fracht von $o\text{-PO}_4\text{-P}$ vor. Wobei die Stofffracht von P_{ges} mit der Niederschlagssumme deutlich stärker zunimmt als die von $o\text{-PO}_4\text{-P}$.

Neben der Erfassung von niederschlagsbedingten Belastungen sind Rückschlüsse auf die Herkunft der Einträge grundsätzlich schwierig, da niederschlagsabhängige Eintragsprozesse oft parallel auftreten und sich gegenseitig überlagern (FUCHS et al. 2022). Nach TATE et al. (1999) machen solche niederschlagsbedingten Einträge aber einen großen Anteil der jährlichen Frachten im Gewässer aus. Dies wird im Rahmen dieser Studie auch an den Mittelwerten der Gesamtphosphorkonzentrationen der Events gegenüber den monatlichen Stichproben deutlich, welche um das Zwei- bis Vierfache erhöht sind.

In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass bei den Regenereignissen mit über 40 l/m^2 Niederschlag parallele Verläufe der Konzentrationen von P_{ges} und $o\text{-PO}_4\text{-P}$, aber auch nichtparallele Verläufe vorliegen.

Während eine hohe P_{ges} -Konzentration ohne Zusammenhang mit einer hohen $o\text{-PO}_4\text{-P}$ -Konzentration auf erosive Einträge (z. B. von Ackerflächen) hindeutet, deutet ein positiver Zusammenhang zwischen den Konzentrationen von P_{ges} und $o\text{-PO}_4\text{-P}$ typischerweise auf häusliche Abwässer hin, welche bei Starkregen ungereinigt mit Niederschlagswasser vermischt werden und über Mischwasserentlastungen ins Gewässer gelangen können (ALLION et al. 2021, FUCHS et al. 2017, FUCHS et al. 2018, FUCHS et al. 2022, GEBEL et al. 2021, MEYER 2021). Anhand der Kurvenverläufe in Abbildung 5 ist davon auszugehen, dass während der dargestellten Niederschlagsereignisse, neben erosiven Einträgen, auch Mischwasserentlastungen erfolgt sind.



Phosphor-Einträge in den Laisbach:

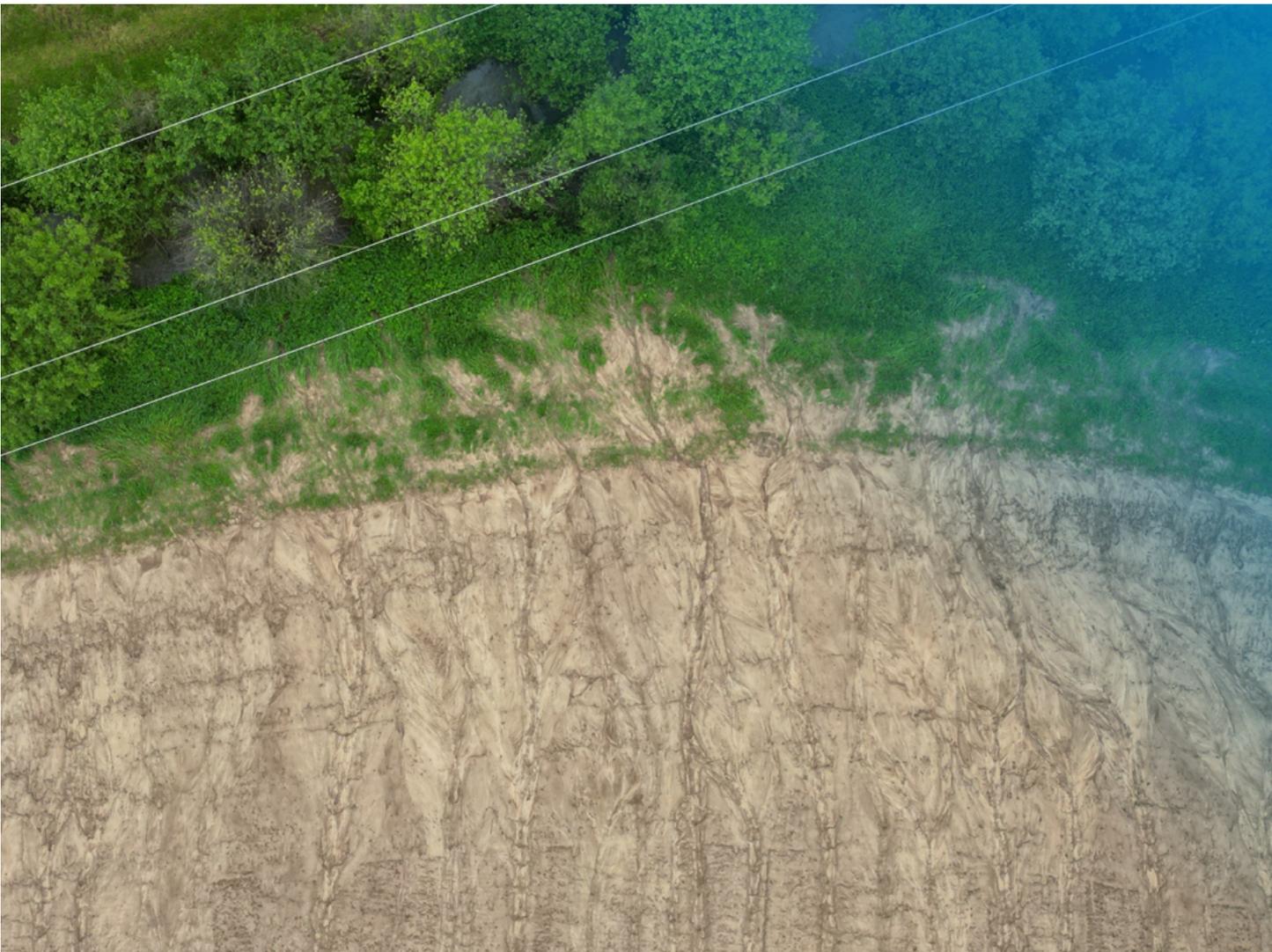
Das Modell MEPhos berechnet für den Laisbach einen mittleren jährlichen Phosphoreintrag von 2,26 Tonnen, davon stammen 0,9 Tonnen aus Erosion, 0,82 Tonnen aus der kommunalen Kläranlage und 0,23 Tonnen aus Mischwasserentlastungen und 0,32 Tonnen aus weiteren Eintragspfaden (TETZLAFF et al. 2020).

Bei den Begehungen von erosionsgefährdeten Flächen im Einzugsgebiet des Laisbachs konnten insbesondere auf Ackerflächen, die frisch bearbeitet waren oder mit Kulturen mit großem Reihenabstand bestellt waren, Erosionsrillen und Verschlammungskrusten festgestellt werden. Es konnten sowohl erosive Bodenabträge festgestellt werden, die auf breiten Grünflächen zwischen Acker und Gewässer sedimentiert sind, d.h. sich abgesetzt haben, als auch Bodenmaterial, dass über schmale Pufferstreifen hinweg in das Gewässer eingetragen wurde (Abbildung 6).

Bei niedrigen Niederschlagsintensitäten sedimentiert erodiertes Bodenmaterial zum Teil bereits auf angrenzenden Flächen und gelangt nicht bis in das Gewässer (FUCHS et al. 2017, FUCHS et al. 2018). Hier können begrünte Pufferstreifen entlang von Gewässern einen wirksamen Schutz für die Gewässer darstellen. Die Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses wird dort gebremst und mobilisiertes Feinmaterial kann vor einem Übertritt in das Gewässer sedimentieren.

Abb. 4: Deutliche Bodenerosion auf einer Fläche mit einer frisch eingesäten Ackerfrucht; das erodierte Bodenmaterial gelangt über den Grünstreifen bis in das Gewässer.

© HLNUG



Mit zunehmender Niederschlagsintensität nimmt die Schutzwirkung jedoch ab, beziehungsweise die erforderliche Breite des Pufferstreifens zu. VORMEIER et al. (2023) empfehlen daher für eine effektive Schutzwirkung eine durchgängige Breite für begrünte Pufferstreifen entlang der Gewässer von 18 m.



Fazit

Mittels der eventbasierten Probenahme konnte festgestellt werden, dass während Starkniederschlagsereignissen die Gesamtposphorkonzentration deutlich stärker ansteigt als die ortho-Phosphat-Phosphorkonzentration, d.h. vor allem partikulär gebundener Phosphor eingetragen wird. Dabei waren die beobachteten Einträge von Gesamtposphor bei höherer Niederschlagssumme größer.

Eine eventbasierte Probenahme in Kombination mit Einzelprobenahmen ermöglicht es, die tatsächliche Belastungssituation in einem Fließgewässer realitätsnäher zu erfassen. Vor allem in einem kleinen Einzugsgebiet, wie dem Laisbach, ändern sich die Wasserstände und Konzentrationen sehr schnell (ROBERTSON & ROERISH 1999). Durch eine ereignisgesteuerte, automatisierte Probenahme können die Kenntnisse über die vorliegende Belastungssituation erheblich verbessert werden. Mögliche Anwendungsbereiche einer eventbasierten Beprobung können das Monitoring von diffusen und kurzzeitig auftretenden Einträgen sein, beispielsweise im Zusammenhang mit der Überprüfung der Wirksamkeit der Regelungen der Düngeverordnung in eutrophierten Gebieten. Zudem können Kenntnisse über die niederschlagsbedingte Eintragungssituation in einem kleinen Gewässer, wie dem Laisbach, zur Kalibrierung und Verbesserung von Modellberechnungen beitragen.

Literatur

- ALLION, K., GEBEL, M., UHLIG, M., HALBFASS, S., BÜRGER, S., KIEMLE, L., FUCHS, S. (2021): Use of Monitoring Approaches to Verify the Predictive Accuracy of the Modeling of Particle-Bound Solid Inputs to Surface Waters. In: *Water* 13 (24), S. 3649.
- Boden-Viewer, HLNUG (2024): Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie – Boden Viewer: <https://bodenviewer.hessen.de/mapapps/resources/apps/bodenviewer/index.html?lang=de>, aufgerufen am 14.08.2024
- Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft (2022): Bodenerosion vermeiden – Biodiversität stärken. Wenn die Produktionsgrundlage schwindet, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Fachzentrum Landwirtschaft, DLG kompakt Nr. 2/2022, Frankfurt 2022.
- DÜV (2021): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die zuletzt durch Artikel 97 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist.
- FUCHS, S., WEBER, T., WANDER, R., TOSHOVSKI, S., KITTLAUS, S., REID, L. (2017): Effizienz von Maßnahmen zur Reduktion von Stoffeinträgen. Endbericht. 1. Aufl. 1 Band. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (TEXTE, 05/2017).
- FUCHS, S., ROTHVOSS, S., TOSHOVSKI, S. (2018): Ubiquitäre Schadstoffe – Eintragsinventare, Umweltverhalten und Eintragsmodellierung. Abschlussbericht (Forschungskennzahl 3714 21 200 0), 2018 (52/2018).
- FUCHS et al. (2022): Stephan Fuchs, Katharina Brecht (Karlsruher Institut für Technologie (KIT) / Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) / Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft, Karlsruhe), Michael Gebel, Stephan Bürger, Mario Uhlig, Stefan Halbfaß (VisDat geodatentechnologie GmbH, Dresden): Abschlussbericht Phosphoreinträge in die Gewässer bundesweit modellieren, Neue Ansätze und aktualisierte Ergebnisse von MoRE-DE, Herausgeber Umweltbundesamt, Texte 142/2022, Dessau-Roßlau, September 2022.
- FUCHS, S., GEBEL, M., ALLION, K., PLAMBECK, N.O., ULLRICH, A. (2021): Deutschlandweite hochaufgelöste Modellierung von Sedimenttransfers in die Oberflächengewässer zur Ableitung partikelgebundener Phosphoreinträge. In: *KW – Korrespondenz Wasserwirtschaft* 14 (7), 2021, S. 413-417.

- Hessisches Wassergesetz (2023): Hessisches Wassergesetz (HWG), § 23 Gewässerrandstreifen, zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 28. Juni 2023, Hessen, 2023.
- MEYER, A. (2021): Präsentation zum Online-Monitoring zur Erfassung der Herkunft und Dynamik von Stoffströmen in kleinen Flusseinzugsgebieten, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2021.
- OGEWV (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV), vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873).
- ROBERTSON, D.M., ROERISH, E. D. (1999): Influence of various water quality sampling strategies on load estimates for small streams. *Water Resources Research*, 35 (12), 1999, S. 3747-3759.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W., KAINZ, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen, 2. Aufl., Stuttgart - Ulmer, 1990.
- TATE, K.W., DAHLGREN, R.A., SINGER, M.J., ALLEN-DIAZ, B. (1999): Timing, frequency of sampling affect accuracy of water-quality monitoring. *California Agriculture*, 53 (6), 1999, S. 44-48.
- TETZLAFF, B., TA, P., ZANG, C., MICHAELIS, B., ZACHARIAS, M. (2020): Modellierung des Phosphor-Eintrags aus diffusen und punktuellen Quellen in die Oberflächengewässer Hessens, HLNUG, Oktober 2020.
- UBA (2020): Umweltbundesamt: Einträge von Nähr- und Schadstoffen in die Oberflächengewässer, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/eintraege-von-naehr-schadstoffen-in-die#nahrstofffrachten-sinken>, zuletzt abgerufen am 07.09.2024
- VORMEIER, P., LIEBMANN, L., WEISNER, O., LIESS, M. (2023): Width of vegetated buffer strips to protect aquatic life from pesticide effects, In: *Water Research*, 231, 2023.
- WRRL-Viewer, HLNUG (2024): <https://wrrl.hessen.de/mapapps/resources/apps/wrrl/index.html?lang=de>, aufgerufen am 14.09.2024.