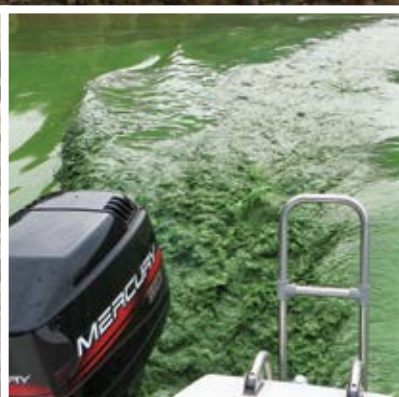


Fosfor Phosphor

aktuální otázky a řešení
aktuelle Fragen und Lösungen

14.–15. 5. 2019, Brno

„Udržitelné hospodaření s fosforem“ registrační číslo projektu KPF-02-107
„Nachhaltige Phosphorbewirtschaftung“ Registrierungsnummer KPF-02-107



EVROPSKÁ UNIE

Interreg 
Rakousko-Česká republika
Evropský fond pro regionální rozvoj



Sborník vznikl v rámci projektu Udržitelné hospodaření s fosforem, registrační číslo projektu KPF-02-107, který je součástí programu Interreg V-A Rakousko-Česká republika.

Das Sammelband wurde im Rahmen des Projekts „Nachhaltige Phosphorbewirtschaftung“ mit der Registrierungsnummer KPF-02-107 verfasst. Das Projekt ist ein Bestandteil des Programms Interreg V-A Österreich-Tschechische Republik.

Odborný garant konference: Česká fosforová platforma, z. s. | www.fosforovaplatforma.cz
Konference se koná pod záštitou ministra zemědělství Miroslava Tomana

Vydavatel: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno
1. vydání, 500 výtisků, 148 stran
Editor: Mgr. Dušan Kosour a kolektiv
Překladatel: PhDr. Iva Kratochvílová
Tisk a grafická úprava: Tiskárna Didot, s. r. o., Brno

Citace sborníku:

KOSOUR, Dušan et al., eds. Fosfor – aktuální otázky a řešení. Brno: Povodí Moravy, 2019. ISBN 978-80-907141-1-3.

KOSOUR, Dušan et al., eds. Phosphor – aktuelle Fragen und Lösungen. Brno: Povodí Moravy, 2019. ISBN 978-80-907141-1-3.

ISBN: 978-80-907141-1-3

Za obsah příspěvků odpovídají autoři.

Elektronická verze sborníku je dostupná na webové adrese fosfor.pmo.cz.

Fosfor Phosphor

aktuální otázky a řešení
aktuelle Fragen und Lösungen

14.–15. 5. 2019, Brno

„Udržitelné hospodaření s fosforem“ registrační číslo projektu KPF-02-107
„Nachhaltige Phosphorbewirtschaftung“ Registrierungsnummer KPF-02-107



EVROPSKÁ UNIE

Interreg 
Rakousko-Česká republika
Evropský fond pro regionální rozvoj



Obsah

Recyklace fosforu – pohled na Evropu.....	5
Česká fosforová platforma	20
Udržitelné využívání fosforu není jen o „15P“, ale o celém výrobním cyklu	24
Chemické srážení fosforu, praxe, možnosti, účinnost.....	28
Znečištění vod fosforem v Horním Rakousku – původ a účinnost opatření	39
Fosfor v Dolním Rakousku – čísla, data, fakta	46
Technologické možnosti znovuvyužití fosforu z čistírenských kalů a jejich odraz v české praxi.....	53
Recyklace fosforu z čistírenských kalů – možnosti optimalizovaného managementu fosforu v Rakousku	63
Rozdílná dostupnost fosforu v konvenčně a ekologicky obhospodařovaných orných půdách	69
Obhospodařování půdys šetrným přístupem k vodním tokům s ohledem na vnos fosforu z pohledu zemědělství.....	83
Formy, výskyt, koloběh a hodnocení obsahu fosforu v půdách	86
Stanovení rozpustnosti fosforu a jeho dostupnosti pro rostliny v různých druhotných materiálech	93
Rybníční sedimenty a nové možnosti recyklace živin a organických látek v zemědělské krajině – příkladová studie rybník Horusický.....	95
Environmentální dopady recyklace fosforu z komunálních odpadních vod	105
Posouzení biologické dostupnosti partikulovaného fosforu v různých složkách životního prostředí	109
Možnosti zvýšené eliminace fosforu, III. stupeň na ČOV Třebíč	112
Aplikace statkových hnojiv jako cenného zdroje fosforu a s tím spojené možnosti snížení ztrát fosforu na orné půdě	115
Revitalizace Brněnské nádrže	124

Inhalt

P-Rückgewinnung – Blick auf Europa.....	5
Tschechische Phosphorplattform	20
Die nachhaltige Phosphornutzung umfasst nicht nur „15P“, sondern den ganzen Produktionszyklus.....	24
Chemische Phosphorfällung, Praxis, Möglichkeiten, Effizienz.....	28
Phosphoreintrag in die Gewässer Oberösterreichs – Herkunft und Maßnahmenwirksamkeiten	39
Phosphor in Niederösterreich – Zahlen, Daten, Fakten	46
Technologische Möglichkeiten der Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm und deren Resonanz in der tschechischen Praxis.....	53
Phosphorrecycling aus Klärschlamm – Möglichkeiten für ein optimiertes Phosphormanagement in Österreich ...	63
Unterschiedliche Verfügbarkeit von Phosphor in konventionell und ökologisch bewirtschafteten Ackerböden	69
Gewässerschonende Bewirtschaftung in Bezug auf Phosphoreintrag aus Sicht der Landwirtschaft.....	83
Formen, Aufkommen, Kreislauf und Bewertung des Phosphorgehalts in Böden.....	86
Ermittlung der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in verschiedenen Sekundärrohstoffen	93
Teichsedimente und neue Möglichkeiten der Wiederverwertung von Nährstoffen und organischen Substanzen in der Agrarlandschaft – Beispielstudie am Horusický-Teich.....	95
Umweltleistung der Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Abwasser	105
Bewertung der Bioverfügbarkeit von partikulärem Phosphor in verschiedenen Umweltbereichen	109
Möglichkeiten der erhöhten Phosphorelimination, III. Stufe der Kläranlage Třebíč.....	112
Einsatz wirtschaftseigener Dünger als wertvolle Phosphorquelle und die damit verbundenen Möglichkeiten zur Verringerung der Phosphorverluste im Ackerland	115
Renaturierung der Brünner Talsperre	124

Recyklace fosforu – pohled na Evropu

Ludwig Hermann

European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) & Proman Consulting; l.hermann@proman.pro

Abstract

Pohled na stav využití fosforu v Evropě je příspěvkem k pochopení postupů, jejich výkonu, omezení a šíření. Postupy jsou posuzovány v kontextu politických, právních a ekonomických rámcových podmínek v Evropě a v evropských zemích. V roce 2014 zařadila Evropská komise do seznamu kritických surovin surový fosfát a v roce 2017 i elementární fosfor (P₄), což signalizuje, že význam této látky hodnotí jako zásadní jak z hlediska bezpečnosti potravin, tak i pro perspektivní technologie v odvětví energetiky a surovin [1]. V prosinci 2015 zveřejnila Evropská komise ve sdělení akční plán „Closing the loop – an EU Action Plan for the Circular Economy“ [2]. Tento plán je výchozím bodem pro řadu regulačních opatření k uzavření koloběhů látek,

o nichž podrobněji pojednáme v článku. Dále osvětlíme také sociální a ekonomické podmínky, příležitosti a překážky pro nové procesy a aplikace a také otázku, kdo by měl nést potenciální vícenáklady na recyklaci P – původci P-toků v odpadních vodách v rámci čištění těchto odpadních vod, nebo uživatelé recyklovaných hnojiv, tedy zemědělci. Ti by však museli vícenáklady refinancovat prostřednictvím cen svých výrobků, čímž by se uzavřel rovněž finanční cyklus.

P-Rückgewinnung – Blick auf Europa

Ludwig Hermann

European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) & Proman Consulting; l.hermann@proman.pro

Kurzfassung

Der Blick auf den Stand der P-Rückgewinnung in Europa ist ein Beitrag zum Verständnis der Verfahren, ihrer Leistungen, Limitierungen und ihrer Verbreitung. Die Verfahren werden im Kontext der politischen, legislativen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Europa und in den europäischen Ländern betrachtet. Die Europäische Kommission hat 2014 Rohphosphat und 2017 auch elementaren Phosphor (P₄) in die Liste der kritischen Rohstoffe aufgenommen und damit signalisiert, dass sie die Bedeutung des Stoffs, sowohl für die Nahrungsmittelsicherheit, als auch für Zukunftstechnologien auf dem Energie- und Rohstoffsektor [1] als essentiell bewertet. Im Dezember 2015 hat die Europäische Kommission den Aktionsplan „Closing the loop – an EU Action Plan for the

Circular Economy“ in einer Kommunikation veröffentlicht [2]. Dieser Plan gibt den Startschuss zu einer Reihe von regulativen Maßnahmen zur Schließung von Stoffkreisläufen, auf die wir im Artikel näher eingehen werden. Darüber hinaus beleuchten wir auch noch die sozialen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die Chancen und Barrieren für neue Verfahren und Anwendungen und die Frage, wer potentielle Mehrkosten des P-Recycling tragen soll – die Verursacher der P-Ströme im Abwasser im Rahmen der Abwasserreinigung oder die Anwender von Recyclingdüngern, also die Landwirte. Letztere müssten aber die Mehrkosten über die Preise für ihre Produkte wieder refinanzieren, womit sich auch der Finanzkreislauf schließt.

European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP)

www.phosphorusplatform.eu
info@phosphorusplatform.eu

Proman Consulting
www.proman.pro, office@proman.pro

Úvod

Jak Andrea Ulrich a Emmanuel Frossard ukázali ve svém článku publikovaném v roce 2015, konečné množství a potenciální nedostatek minerálního fosforu je téma, které lidstvo opakovaně zneklidňuje už od počátku devatenáctého století. Připomeňme první prognózu nedostatku zdrojů od Thomase Roberta Malthuse (1798), bránící dalšímu populačnímu vývoji, a pochybnosti, které vyjádřil Justus von Liebig v 50. letech 19. století nad excesivním dovozem kostí do Anglie, který ostatním zemím nedovolí dostatečné zásobování hnojiv pro zachování úrodnosti půdy [3].

V nedávné době, v roce 2005, Evropská komise financovala první konsorciální výzkumný projekt o recyklaci fosforu „SUSAN – Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery“. Vznikl z iniciativy německého Spolkového institutu pro výzkum a zkoušky materiálů, který se zabývá recyklací fosforu již od počátku 21. století a byl jedním z prvních aktérů v této oblasti. V rámci tohoto projektu bylo v roce 2008 ve firmě ASH DEC Umwelt AG v rakouském Leobenu uvedeno do provozu první evropské pilotní zařízení na recyklaci P [4].

V roce 2009 uveřejnila Dana Cordell ve vědeckém článku nazvaném „The story of phosphorus: Global food security and food for thought“ tezi „Peak Phosphorus“ [5]. Poté se P-recyklace opravdu rozjela v Evropě i ve světě, s početnými studiemi, projekty, laboratorními a pilotními zařízeními a s řadou zařízení na krystalizaci struvitu na BIO-P čistírnách odpadních vod, které však měly obecně nižší roční recyklační kapacitu než pilotní zařízení ASH DEC. Elementární fosfor z více než deseti tisíc tun popela

European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP)

www.phosphorusplatform.eu
info@phosphorusplatform.eu

Proman Consulting
www.proman.pro, office@proman.pro

Einleitung

Wie Andrea Ulrich und Emmanuel Frossard in Ihrem 2015 publizierten Artikel gezeigt haben, ist die Endlichkeit und mögliche Knappheit von mineralischem Phosphor ein Thema, das die Menschheit seit dem frühen 19. Jahrhundert immer wieder umtreibt. Wir erinnern an die erste Prognose der, die weitere Bevölkerungsentwicklung behindernden, knappen Ressourcen von Thomas Robert Malthus (1798) und die von Justus von Liebig in den 1850er Jahren geäußerten Bedenken über Englands exzessiven Import von Knochen, der anderen Ländern keine ausreichende Versorgung mit Düngern zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit erlauben würde [3].

In der jüngeren Vergangenheit wurde 2005 das erste konsortiale Forschungsprojekt zur P-Rückgewinnung von der Europäischen Kommission gefördert: „SUSAN - Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery“. Es entstand aus einer Initiative der deutschen Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, die sich bereits seit Anfang des 21. Jahrhunderts mit Phosphorrückgewinnung beschäftigt hat und damit wohl einer der ersten Akteure auf diesem Gebiet war. Im Rahmen dieses Projekts wurde 2008 die erste europäische Pilotanlage zum P-Recycling in Betrieb genommen, bei der Firma ASH DEC Umwelt AG in Leoben, Österreich [4].

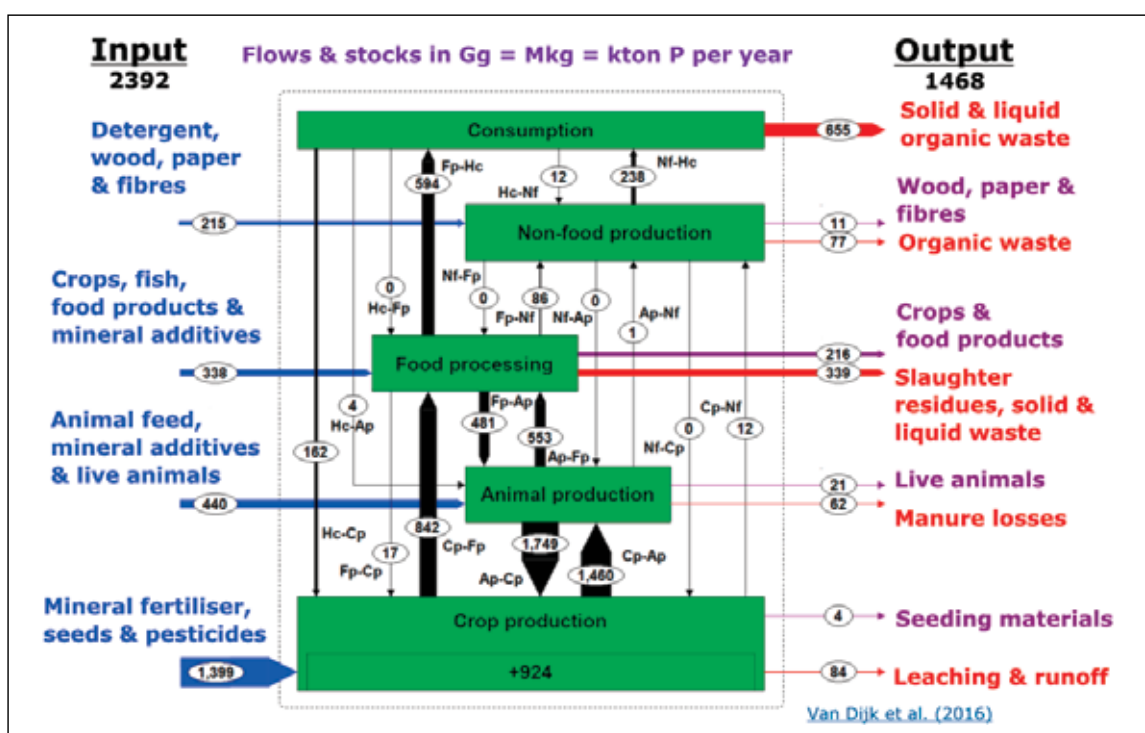
2009 hat Dana Cordell die These vom „Peak Phosphorus“ in einem wissenschaftlichen Artikel unter dem Titel „The story of phosphorus: Global food security and food for thought“ [5] veröffentlicht. Danach kam P-Recycling in Europa und weltweit richtig in Fahrt, mit zahlreichen Studien, Projekten, Labor- und Pilotanlagen und einer Reihe von Anlagen zur Kristallisation von Struvit auf Bio-P Klär-

z čistírenského kalu ročně byl v letech 2010 až 2012 získáván ve firmě Thermphos v Nizozemsku, která však poté musela vyhlásit insolvenční řízení [6]

Toky fosforu v Evropě

Zdaleka největší tok fosforu v Evropě, přibližně 2,30 milionu tun P, pochází ze zemědělství a z velké části se do něj přímo vrací – 1,75 milionu tun P v kejďe a kvasných zbytcích z živočišné výroby a 0,18 milionu tun P s organickou frakcí ze zbytků z potravinářské výroby, domovního odpadu a čistírenských

kalů. Přímá recirkulace nicméně není automaticky ekvivalentem recyklace, protože do půdy se přidává mnohokrát více P, než kolik mohou rostliny, které tam rostou, absorbovat. To vede v oblastech s vysokými stavy hospodářských zvířat k akumulaci P v půdě a ke ztrátám a splachování živin do vod, což může následně vést ke zvýšenému růstu řas a vzniku mrtvých zón. Z grafu rovněž vyplývá, že do systému EU 27 se ročně dostává téměř 2,40 milionu tun P a vypouštěno je přibližně 1,47 milionu tun P, hlavně ve formě odpadů a odpadních vod [7].



Obr. 1. Toky fosforu v EU27 (zdroj: Van Dijk et al, 2016)

Abb. 1. Phosphorflüsse in der EU27 (Quelle: Van Dijk et al, 2016)

anlagen, die aber durchwegs eine geringere jährliche P-Recyclingkapazität hatten, als die ASH DEC Pilotanlage. Elementarer Phosphor aus mehr als zehntausend Tonnen Klärschlamm pro Jahr wurde in den Jahren 2010 bis 2012 bei der Firma Thermphos in den Niederlanden zurückgewonnen, ehe das Unternehmen Insolvenz anmelden musste [6].

Phosphorflüsse in Europa

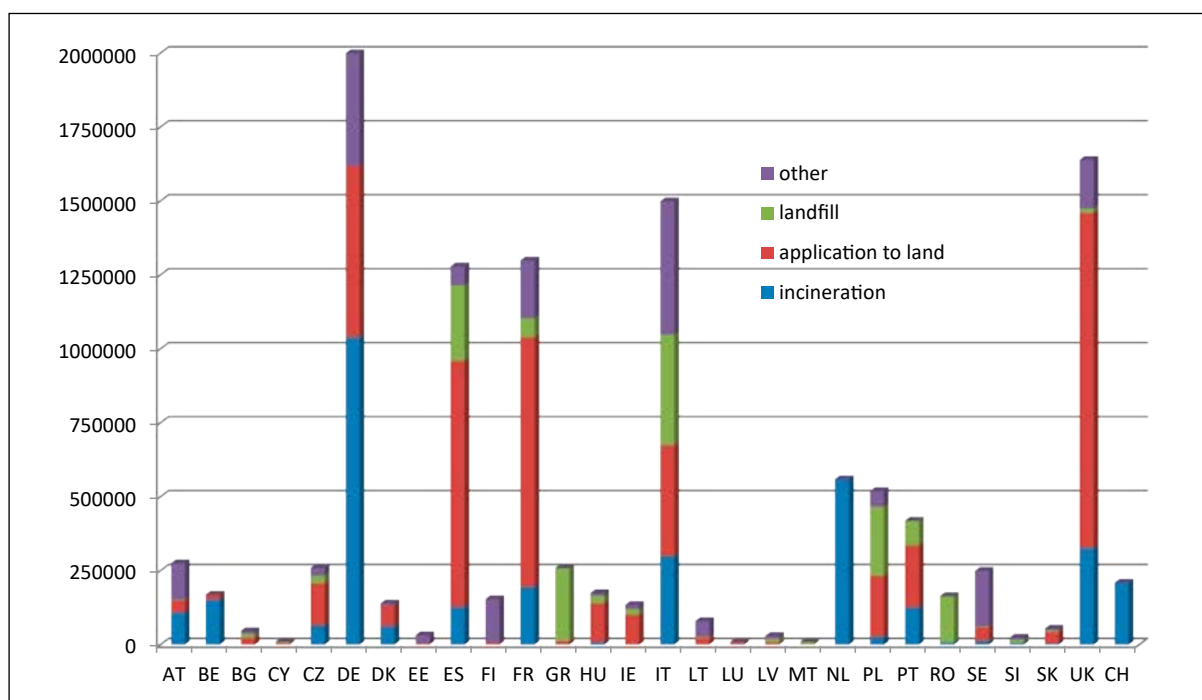
Der weitaus größte Phosphorfluss in Europa, rund 2,30 Millionen Tonnen P, kommt aus der Landwirt-

schaft und wird zu einem großen Teil direkt in die Landwirtschaft zurückgeführt – 1,75 Millionen Tonnen P mit Gülle und Gärrückständen aus der Tierhaltung, sowie 0,18 Millionen Tonnen P mit der organischen Fraktion aus den Rückständen der Nahrungsmittelproduktion, den Haushaltsabfällen und dem Klärschlamm. Die direkte Rückführung ist aber nicht automatisch mit Recycling gleichzusetzen, weil vielfach mehr P in den Boden eingetragen wird, als die dort wachsenden Pflanzen aufnehmen können. Das führt in Regionen mit hohem Viehbestand zur P-Akkumulation im Boden und zu

Procesy – stav techniky

Pohled na Evropu musí zohlednit také recyklaci fosforu v zemědělství při přímém hnojení čistírenskými kalů, což představuje v celé Evropě největší podíl (téměř 40 %) fosforu navraceného do zemědělství z odpadních vod. [8] V jednotlivých členských státech vidíme různé politické strategie, od zvyšování využití v zemědělství (např. v Británii) až po ukončování tohoto způsobu recyklace (např. Německo, Rakousko), přičemž obě strategie jsou v těchto zemích diskutovány jako kontroverzní. Žádné disku-

se o způsobech využití neprobíhají v Nizozemsku a Švýcarsku, kde se 100 % čistírenských kalů spaluje. Ve Švýcarsku je zemědělská aplikace čistírenských kalů od roku 2006 zakázaná [9], v Nizozemsku ji fakticky zakazují nízké limitní hodnoty [10], což je způsobeno především nadměrným regionálním zásobením fosforem z živočišné výroby. Následující graf ukazuje stále vysoký podíl skládkování, které by ovšem nemělo být přípustné vzhledem ke směrnici o skládkách odpadů (1991/31/ES), přijaté již v roce 1999 [11]. V průměru EU se spaluje asi 25 % čistírenských kalů.



Obr. 2. Využití/likvidace čistírenských kalů v zemích EU-27 a Švýcarsku (zdroj: Kabbe, 2016)

Abb. 2. Klärschlammverwertung/-entsorgung in den EU27 und der Schweiz (Quelle Kabbe, 2016)

P-Verlusten und Nährstoffe-inträgen in die Gewässer, die in der Folge zu hohem Algenwachstum und zu toten Zonen führen können. Die Graphik zeigt auch, dass dem System der EU27 jährlich knapp 2,40 Millionen Tonnen P zugeführt werden und dass rund 1,47 Millionen Tonnen P ausgetragen werden, im Wesentlichen in der Form von Abfällen und Abwasser [7].

Verfahren - Stand der Technik

Der Blick auf Europa muss auch die direkte Rückgewinnung von Phosphor über die landwirtschaft-

liche Ausbringung von Klärschlamm berücksichtigen, die europaweit mit knapp 40% den größten Anteil am aus dem Abwasser in die Landwirtschaft zurückgeführten Phosphor hat. [8] Wir sehen in den einzelnen Mitgliedsstaaten unterschiedliche politische Strategien von der Steigerung der landwirtschaftlichen Ausbringung (z.B. UK) bis zum Ausstieg aus dieser Verwertungsschiene (z.B. DE, AT), wobei beide Strategien in den Ländern kontrovers diskutiert werden. Keine Diskussion zu den Verwertungspfaden gibt es in den Niederlanden und der Schweiz, wo 100% des Klärschlammes verbrannt wird. In der Schweiz ist die landwirtschaft-

Je přirozené, že členské státy, které zemědělské využití čistírenských kalů opustily nebo se je chystají opustit, jsou v čele vývoje technologických procesů recyklace fosforu: Německo, Nizozemsko a Švýcarsko. Úspěšné inovace mají i v Dánsku, Finsku a Švédsku, kde politika sice stanovila za cíl zemědělské využití, ale potravinářský průmysl a zemědělci mají velké výhrady k přímé aplikaci čistírenských kalů – dokonce i po úpravě odstraňující organické polutanty a mikroorganismy. Ve Švédsku to vedlo ke zpochybnění dosavadní strategie, kterou má skupina odborníků do konce roku 2019 přeformulovat. Vedle evropských metod vývoje jsou v Evropě nabízeny i technologie z Kanady (Ostara Pearl®) a Japonska (například Kubota, Hitachi Zosen). Proces Pearl® se úspěšně provozuje i v některých evropských zařízeních.

Vzhledem k tomu, že počet technologií vytvořených výzkumnými projekty je prakticky nepřehledný, autoři studie z roku 2016, zadané švýcarským Federálním úřadem pro životní prostředí (BAFU),

uspořádali postupy, které mají díky technické zralosti a dalším kritériím vysokou pravděpodobnost úspěšné realizace, podle přístupu a výchozích materiálů, takže lze nabídku obchodovatelných technologií rozdělit v zásadě do pěti skupin. Graf převzatý z této studie poskytuje přehled o cyklech, přístupech a výchozích materiálech technologií, o společných vlastnostech jednotlivých skupin procesů a o produktech, které z nich vycházejí [12]. U produktů je nutné doplnit ještě vysoce čistý dihydrogenfosforečnan amonný (CleanMAP®), který je produkován kyselým štěpením popela (skupina 4). [13] Studie je v současné době revidována a aktualizovaná verze bude k dispozici během roku 2019.

Obr. 3 Přístupy, výchozí materiály, vlastnosti a produkty slibných technologií recyklace P (zdroj: Spörri et al., 2016)

Společnými rysy je, že skupiny 1 a 2 musí bojovat s technologicky podmíněnou nízkou účinností recyklace P, skupina 3 s nízkými koncentracemi P

liche Ausbringung von Klärschlamm seit 2006 verboten [9], in den Niederlanden wird sie durch niedrige Grenzwerte faktisch verhindert [10], was hauptsächlich der regionalen Überversorgung mit P aus der Tierhaltung geschuldet ist. Die nachstehende Graphik zeigt immer noch einen erheblichen Anteil an Deponierung, die als Ergebnis der bereits 1999 erlassenen Landfill Directive (1991/31/EC) eigentlich nicht mehr zulässig sein sollte [11]. Rund 25% des Klärschlammes wird im EU Durchschnitt verbrannt.

Abb. 2 Klärschlammverwertung/-entsorgung in den EU27 und der Schweiz (Quelle Kabbe, 2016)

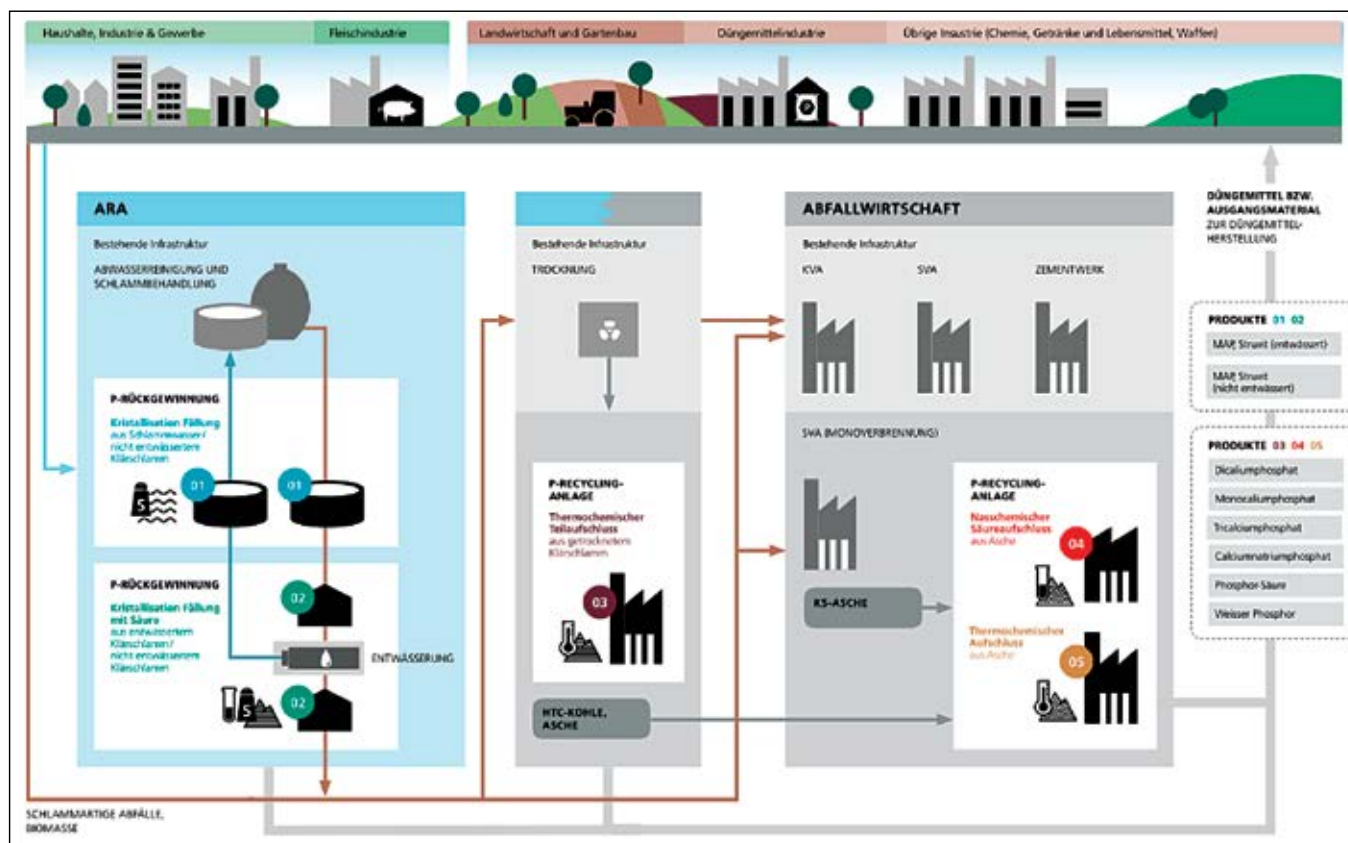
Naturgemäß sind jene Mitgliedstaaten, die aus der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm ausgestiegen sind oder noch aussteigen wollen, führend in der Entwicklung von Verfahren zum technischen Phosphorrecycling: Deutschland, die Niederlande und die Schweiz. Erfolgreiche Entwicklungen gibt es auch in Dänemark, Finnland und Schweden,

wo die Politik zwar die landwirtschaftliche Verwertung als Ziel formuliert hatte, Nahrungsmittelindustrie und Landwirte aber große Vorbehalte gegen die Ausbringung von Klärschlamm haben – auch nach einer Behandlung zur Eliminierung von organischen Schadstoffen und Keimen. Das hat in Schweden zur Infragestellung der bisherigen Strategie geführt, die von einer Expertengruppe bis Jahresende 2019 neu formuliert werden soll. Neben den europäischen Entwicklungen gibt es noch Verfahren aus Kanada (Ostara Pearl®) und Japan (z.B. Kubota, Hitachi Zosen), die in Europa angeboten werden. Das Pearl® Verfahren ist auch in einigen europäischen Anlagen erfolgreich in Betrieb.

Nachdem die Zahl der aus Forschungsprojekten hervorgegangenen Verfahren mittlerweile nahezu unüberschaubar ist, haben die Autoren einer Studie im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Umwelt (BAFU) aus dem Jahr 2016 Verfahren, die aufgrund ihrer technischen Reife und anderer Kriterien eine hohe Wahrscheinlichkeit der erfolgrei-

a nečistotami v produktu, zatímco u skupin 4 a 5 je předpokladem pro vysokou účinností recyklace samostatné spalování výchozích surovin bohatých na P. Probíhají pokusy kompenzovat technologické nevýhody pomocí cílených opatření, což je však vždy spojeno s vyššími investicemi i provozními

náklady. Popel ze spalování odpadů bohatých na P (čistírenské kaly, živočišná moučka) má tu výhodu, že výsledný materiál je nejbližší surovému fosfátu, pokud jde o vlastnosti a koncentraci P, a je proto vhodný pro technologie, které jsou známé z průmyslu hnojiv nebo jsou z nich odvozené.



Obr. 3. Přístupy, výchozí materiály, vlastnosti a produkty slibných technologií recyklace P (zdroj: Spörri et al., 2016)

Abb. 3. Ansatzpunkte, Ausgangsstoffe, Merkmale und Produkte der aussichtsreichen P-Recycling Verfahren (Quelle: Spörri et al., 2016)

chen Umsetzung haben, nach ihren Ansatzpunkten und Ausgangsstoffen organisiert, so dass man das Angebot an marktfähigen Technologien im Wesentlichen in fünf Gruppen einteilen kann. Die aus der Studie entnommene Graphik gibt einen Überblick über die Kreisläufe, sowie die Ansatzpunkte und Ausgangsstoffe für die Verfahren, die gemeinsamen Merkmale der einzelnen Verfahrensgruppen und die Produkte, die dabei herauskommen [12]. Bei den Produkten ist noch hochreines Monoammoniumphosphat (CleanMAP®) zu ergänzen, das mittels Säureaufschluss von Asche (Gruppe 4) produziert wird. [13] Die Studie wird zurzeit überarbeitet und wird im Laufe des Jahres 2019 in der aktualisierten Fassung verfügbar sein.

Abb. 3 Ansatzpunkte, Ausgangsstoffe, Merkmale und Produkte der aussichtsreichen P-Recycling Verfahren (Quelle: Spörri et al., 2016)

Gemeinsame Merkmale sind, dass die Gruppen 1 und 2 verfahrensbedingt mit niedrigen P-Rückgewinnungsraten, die Gruppe 3 mit niedrigen P-Konzentrationen und Verunreinigungen im Produkt zu kämpfen haben während die Gruppen 4 und 5 bei hohen Rückgewinnungsraten die Verbrennung von ausschließlich P-reichen Einsatzstoffen zur Voraussetzung haben. Es wird versucht, die verfahrensbedingten Nachteile mit gezielten Maßnahmen zu kompensieren, was aber regelmä-

Jak je znázorněno na obrázku 2 a v následující tabulce, využívání kalů nemusí být nutně v rozporu s recyklací P. Tak by se dal např. obsah P v kalu snižovat až o 25 % srážením struvitu, struvit pak separoval jako minerální hnojivo a kal se sníženým obsahem P

využíval pro zemědělské účely v citlivých oblastech. Jestliže se účinnost recyklace P významně zvýší předcházejícím štěpením (hydrolyzou nebo kyselinou), může požadavku na uzavírání koloběhu vyhovovat i spalování nebo přidávání kalů v cementárnách.

POPIS SKUPIN TECHNOLOGIÍ		
SKUPINA	PŘÍSTUP	TECHNOLOGIE (neúplné, příklady)
01 krystalizace/srážení	kal před odvodněním	Airprex [®] , Ekobalans [®] , NuReSys [®] , PhosPac [™] , Anphos
	kalová voda	Crystallactor [®] , NuReSys [®] , Ostara Pearl [®] , Struvia [®] , PhosphoGreen [™]
02 kyselý štěpení a krystalizace/srážení	kal před odvodněním	Extraphos [®] (Budenheim Carbonic Acid Process)
	odvodněný kal	Gifhornský postup, Stuttgartský postup
03 termochemické štěpení kalů	sušený kal	Kubota, Mephrec, Pyreg, Eu-PhoRe, Pyrophos, Susteen
04 kyselý štěpení popela	popel z mono-spalování kalů	EcoPhos, Phos4Life [®] (ZAR), LeachPhos, TetraPhos [®] , EasyMining Ash2Phos a CleanMAP [®]
05 termochemické štěpení popela	popel z mono-spalování kalů	AshDec [®] , ICL RecoPhos (P4)

Tabulka 1 Skupiny technologií podle přístupů a společných charakteristik (zdroj: BAFU, 2016, aktualizováno)

ßig mit Mehraufwand und Mehrkosten verbunden ist. Asche aus der Verbrennung von P-reichen Abfällen (Klärschlamm, Tiermehl) hat den Vorteil, dass der Ausgangsstoff dem Rohphosphat hinsichtlich P-Konzentration und Eigenschaften am nächsten kommt und sich daher für Verfahren eignet, die aus der Düngemittelindustrie bekannt bzw. von diesen Verfahren abgeleitet sind.

und den P-reduzierten Schlamm in sensiblen Regionen landwirtschaftlich verwerten. Wird durch eine aufschließende Vorbehandlung (Hydrolyse oder mit Säure) die P-Rückgewinnungsrate deutlich erhöht, dann könnten auch die Mitverbrennung oder die Verbrennung von Schlamm im Zementwerk mit der Forderung nach der Schließung der Kreisläufe kompatibel sein.

Wie die Abbildung 2 und die nachstehende Tabelle zeigt, steht der Pfad der Schlammverwertung nicht notwendigerweise im Konflikt mit der P-Rückgewinnung. So könnte man z.B. mit der Fällung von Struvit den P-Gehalt im Schlamm um bis zu 25% reduzieren, Struvit als Mineraldünger exportieren

Implementace

Mezi četnými metodami je pouze skupina 01 – krystalizace/srážení struvitu (nebo fosforečnanu vápenatého) z již rozpuštěných fosfátových slou-

čenin – v plném provozu na čistírnách odpadních vod. Předpokládá to BIO-P čistírny (eliminace P pomocí bakterií, bez chemických precipitantů), což omezuje rozšíření této metody na méně než 10 % evropských ČOV. Průměrná účinnost recyklace P je

BESCHREIBUNG DER TECHNOLOGIEGRUPPEN		
GRUPPE	ANSATZPUNKT	TECHNOLOGIEN (beispielhaft, unvollständig)
01 Kristallisation / Fällung	KS vor Entwässerung	Airprex [®] , Ekobalans [®] , NuReSys [®] , PhosPaq [™] , Anphos
	Schlammwasser	Crystallactor [®] , NuReSys [®] , Ostara Pearl [®] , Stru-via [®] , PhosphoGreen [™]
02 Säure-Aufschluss und Kristallisation / Fällung	KS vor Entwässerung	Extraphos [®] (Budenheim Carbonic Acid Process)
	Entwässerter KS	Gifhorner Verfahren, Stuttgarter Verfahren
03 Thermochemischer Aufschluss aus KS	Getrockneter KS	Kubota, Mephrec, Pyreg, Eu-PhoRe, Pyrophos, Susteen
04 Säure-Aufschluss aus Asche	Asche aus KS-Monoverbrennung	EcoPhos, Phos4Life [®] (ZAR), LeachPhos, Tetra-Phos [®] , EasyMining Ash2Phos und CleanMAP [®]
05 Thermochemischer Aufschluss aus Asche	Asche aus KS-Monoverbrennung	AshDec [®] , ICL RecoPhos (P4)

Tabelle 1 Technologiegruppen nach Ansatzpunkten und gemeinsamen Prozessmerkmalen (Quelle BAFU, 2016, aktualisiert)

Implementierung

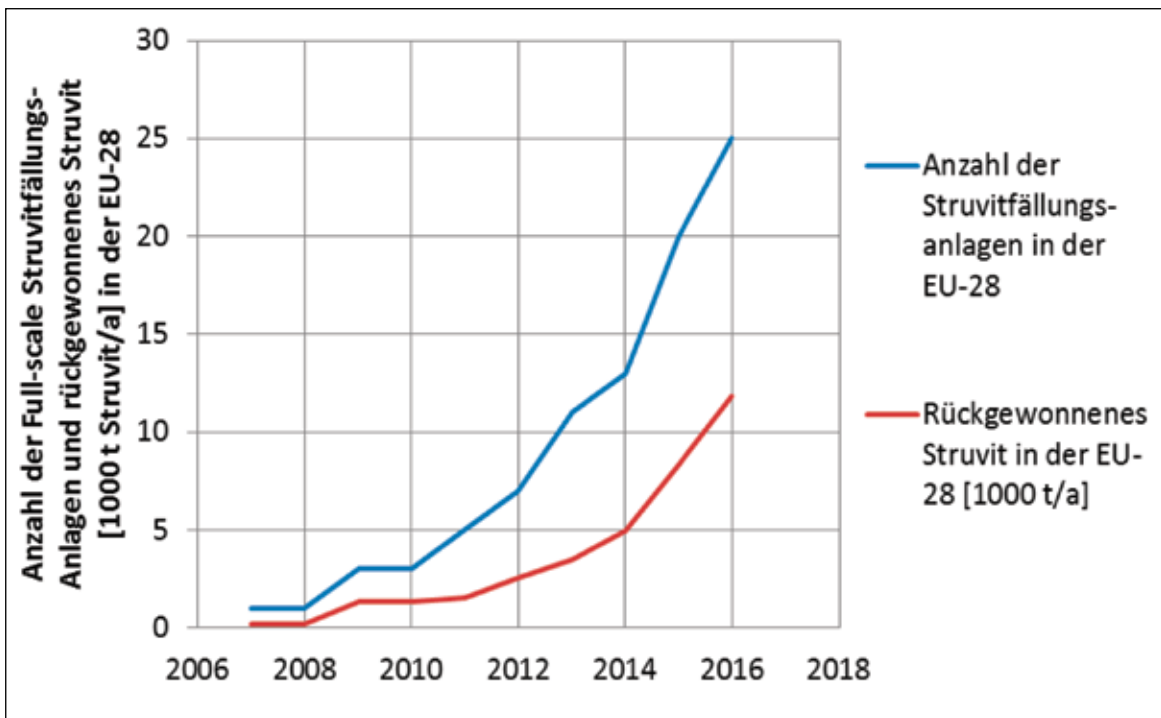
Unter den zahlreichen Verfahren sind nur jene der Gruppe 01 – Kristallisation/Fällung von Struvit (oder Calciumphosphat) aus dem bereits gelösten Phosphatverbindungen – auf Kläranlagen im Vollbetrieb. Das setzt BIO-P Kläranlagen (P-Elimination über Bakterien, ohne chemische Fällmittel) voraus und limitiert damit die Verbreitung auf weniger als 10% der europäischen Kläranlagen. Darüber hinaus liegen die durchschnittlichen P-Rückgewinnungsraten bei nur 5-15%, auch wenn theoretisch höhere Werte erreichbar wären.

Der Grund, warum nur diese Verfahren den Eintritt in den Markt gefunden haben liegt darin, dass sich die Investition über den Umweg geringerer Wartungskosten rechnet und nicht über den Verkauf von Struvit. Das bedeutet, dass bis jetzt nur Verfahren in den Regelbetrieb aufgenommen wurden, deren Hauptziel nicht die Rückgewinnung von Phosphor, sondern die Senkung der Betriebskosten war. Im Jahr 2017 waren auf europäischen Bio-P Kläranlagen bis zu 35 P-Rückgewinnungsanlagen in Betrieb, die Struvit oder Calciumphosphat, teilweise im Versuchsbetrieb, produziert haben. Diese Anlagen gewinnen rund 12.000 Tonnen P pro Jahr zurück, wie auch die nachfolgende Abbildung 3 zeigt.

tu navíc pouze 5-15 %, i když by teoreticky mohly být dosahovány i vyšší hodnoty.

Důvodem, proč se na trh dostaly jen tyto metody, je, že se investice kalkuluje oklikou přes snížení nákladů, a nikoli přes prodej struvitu. To znamená, že do běžného provozu byly doposud zařazeny pou-

ze technologie, jejichž hlavním cílem není zpětné získávání fosforu, ale snížení provozních nákladů. V roce 2017 bylo na evropských BIO-P čistírnách odpadních vod v provozu až 35 zařízení na recyklaci P, která produkují struvit nebo fosforečnan vápenatý (zčásti ve zkušebním provozu). Tato zařízení získávají kolem 12 000 tun P ročně, jak ukazuje graf č. 4.



Obr. 4. Celoročně pracující struvitová zařízení na ČOV v EU28 v roce 2016 (zdroj: Kraus, 2016). Modře počet pracujících zařízení na srážení struvitu, červeně regenerovaný struvit v t/rok

Abb. 4. Ganzjährig operative Struvitanlagen auf Kläranlagen in den EU28 im Jahr 2016 (Quelle: Kraus, 2016)

Zu anderen Verfahren gab und gibt es Pilotanlagen bzw. Anlagen, die im Nebenstrom auf Kläranlagen laufen. Alle Verfahren der Gruppen 2-5 müssen sich aus dem Verkauf der Produkte, i.d.R. Düngemittel, finanzieren und sie erwirtschaften keinen ausreichenden Zusatznutzen, der die Amortisation der Investitionskosten sicherstellt.

Alle Verfahren, auch die der Gruppe 1, können sich nicht über den Verkauf der Produkte finanzieren, weil i) die Produktionskosten meistens über dem Marktpreis der Produkte liegen und ii) die Produkte meist weit unter dem Marktpreisäquivalent für den entsprechenden P-Anteil gehandelt werden. Lediglich die CrystalGreen® genannten Produkte aus dem Pearl® Prozess werden zu Preisen über dem

P-Markt-preis gehandelt – Ostara hat das über eine langjährige, mit hohen und kontinuierlichen Investitionen verbundene, Marketing- und Verkaufsstrategie erreicht.

Die regionale Anschauung zeigt Anlagen im Vollbetrieb bzw. in Planung/Bau in den Niederlanden (10), Deutschland (8), Belgien (5), Dänemark (4), Vereinigtes Königreich (3), Spanien (2) und Frankreich (1) wie die nachstehende Graphik veranschaulicht.

Abb. 5 Ganzjährig operative und in Planung/Bau (gelb/grün) befindliche Anlagen in den EU28 im Jahr 2016 (Quelle: Kabbe, 2016).

Pro další metody existovala a nadále existují pilotní zařízení nebo zařízení pracující na ČOV ve vedlejším proudě. Všechny technologie ve skupinách 2-5 se musí financovat z prodeje produktů, zpravidla hnojiv, a nevytvářejí dostatečnou přidanou hodnotu, která by zajistila amortizaci investičních nákladů.

Všechny procesy včetně skupiny 1 nelze financovat prodejem produktů, protože i) výrobní náklady jsou většinou vyšší než tržní cena produktů a ii) produkty se obvykle obchodují mnohem levněji, než odpovídá tržní ceně za příslušný podíl P. Pouze produkty z procesu Pearl[®], nazývané CrystalGreen[®], se obchodují za ceny nad tržní cenou P – produkt Ostara toho dosáhl dlouhodobou marketingovou a prodejní strategií, spojenou s vysokými průběžnými investicemi.

Regionální pohled ukazuje zařízení v plném provozu, resp. ve fázi plánování či výstavby v Nizozemsku (10), Německu (8), Belgii (5), Dánsku (4), Spojeném království (3), Španělsku (2) a Francii (1), jak ukazuje následující graf.

Obr. 5. Celoročně pracující a plánovaná/budovaná (žlutá/zelená) zařízení v EU28 v roce 2016 (zdroj: Kabbe, 2016).

Abb. 5. Ganzjährig operative und in Planung/Bau (gelb/grün) befindliche Anlagen in den EU28 im Jahr 2016 (Quelle: Kabbe, 2016).

Produkte aus Sekundärphosphaten

Wie bereits festgestellt, werden die Produkte in der Regel weit unter dem Marktpreisäquivalent gehandelt. Darüber hinaus werden die Produkte auch zu den niedrigen Preisen nicht nachgefragt, so dass sie in vielen Fällen entweder liegen bleiben oder gratis abgegeben werden. Das liegt zum Teil an den Marktteilnehmern, die von der Qualität und Effizienz der Produkte noch nicht überzeugt sind. Überzeugungsarbeit ist noch zu leisten und muss auch weiter gefördert werden. Einige der Sekundärphosphate könnten sich für die Anwendung in der bio-

Produkty ze sekundárních fosfátů

Jak jsme již uvedli, produkty se zpravidla obchodují výrazně pod ekvivalentní tržní cenou. Navíc není po těchto výrobcích ani za tyto nízké ceny poptávka, takže v mnoha případech buď zůstávají ležet, nebo jsou dodávány zdarma. To částečně způsobují účastníci trhu, kteří dosud nejsou přesvědčeni o kvalitě a účinnosti produktů. Nezbytné jsou tedy přesvědčovací kampaně, které je nutné i nadále finančně podporovat. Některé sekundární fosfáty by se mohly kvalifikovat pro použití v ekologickém zemědělství, ale to také vyžaduje přesvědčování.

V současné době jsou produkty v jednotlivých členských státech jako hnojivo povolené nebo nepovolené podle různých kritérií. Různě je v členských státech upravena také otázka, zda se recykláty ob-



logischen Landwirtschaft qualifizieren, wofür aber ebenfalls noch Überzeugungsarbeit erforderlich ist.

Zurzeit werden die Produkte noch in jedem Mitgliedsstaat nach unterschiedlichen Kriterien als Dünger zugelassen oder auch nicht. Auch die Frage, ob die Rezyklate als Abfall oder als Produkt gehandelt werden, wird in den Mitgliedsstaaten unterschiedlich geregelt. Nährstoffe sollen dort eingesetzt werden, wo Bedarf besteht, vielfach europäische Binnengrenzen überschreitend. Nationale Regelungen stehen einem sinnvollen Einsatz der Produkte häufig im Weg.

chodují jako odpad, nebo jako výrobek. Nutrienty by se měly aplikovat tam, kde je potřeba, a to bez ohledu na evropské vnitřní hranice. Národní předpisy však rozumné aplikaci produktů často brání.

Společenské a politické rámcové podmínky

Podíváme-li se nejprve na společenské rámcové podmínky v Evropě, můžeme konstatovat velký rozdíl mezi povědomím relativně malé skupiny odborníků a společnosti obecně. Živiny a recyklace fosforu nejsou tématem, které společnost zajímá, a zatím nelze říct, že se tak v dohledné době stane.

Nejen ve společnosti obecně, ale ani u přímo dotčených subjektů, např. provozovatelů ČOV, není zatím toto téma přijímáno pozitivně. Na akcích provozovatelů se zdá, že i v Německu existuje citelný odpor vůči novým úkolům spojeným se zaváděním oběhového hospodářství. Nediskutuje se v první řadě o tom, jestli je uzavření koloběhu živin společenským úkolem stejně jako např. samotné čištění

odpadních vod, ale o tom, jak předcházet nákladům potenciálně spojeným s recyklací. Švýcaři a němečtí zákonodárci na tuto otázku odpověděli novými předpisy – recyklace fosforu se tam stává společenským úkolem. Z tohoto hlediska pak potenciálně související náklady ponese společnost. Občané jsou přece také – i když zčásti nedobrovolně – původci znečištění vod živinami. Švédsko jmenovalo skupinu odborníků, která má do konce roku 2019 stanovit strategické principy recyklace P a možných právních předpisů. Rakousko zařadilo cíl recyklace P do plánu odpadového hospodářství a hodlá ho ještě v současném legislativním období zakotvit v zákoně. Dánsko jde poněkud jinou cestou a podporuje recyklaci P zdaněním skládek a zvýšených obsahů nutrienty na výstupech z ČOV, zatímco Finsko se chce stát evropským průkopníkem v oběhovém hospodářství včetně recyklace nutrienty. V jiných členských státech EU na sebe dávají zákonné iniciativy dosud čekat. Sází se na dobrovolnost, což je třeba v Nizozemsku poměrně úspěšné, ale ve většině ostatních zemí příliš nefunguje.

Gesellschaftliche und politische Rahmenbedingungen

Wenn wir zunächst die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen in Europa beleuchten, dann können wir von einer großen Diskrepanz zwischen dem Bewusstsein eines relativ kleinen Kreises von Insidern und der Gesellschaft im Allgemeinen berichten. Nährstoffe und P-Recycling sind keine Themen, die in der Gesellschaft angekommen sind und es zeichnet sich bis jetzt nicht ab, dass sie dort bald ankommen werden.

Nicht nur in der Gesellschaft im Allgemeinen, auch bei den direkt betroffenen, z.B. den Betreibern von Kläranlagen, scheint das Thema noch nicht wirklich positiv aufgenommen zu werden. Auf Veranstaltungen der Betreiber gewinnt man den Eindruck, dass es – auch in Deutschland – fühlbaren Widerstand gegen die neuen Aufgaben gibt, die mit der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft verbunden sind. Es wird nicht primär die Frage diskutiert, ob

die Schließung der Nährstoffkreisläufe eine gesellschaftliche Aufgabe ist, wie die Abwasserreinigung selbst, sondern, wie man die potenziell mit der Kreislaufführung verbundenen Kosten verhindern kann. Schweizer und deutsche Gesetzgeber haben diese Frage mit neuen Verordnungen beantwortet – die Rückgewinnung von Phosphor wird dort zur gesellschaftlichen Aufgabe. Unter diesem Aspekt sind die damit potenziell verbundenen Kosten von der Gesellschaft zu tragen. Die Bürger sind schließlich auch die Verursacher der Belastung der Gewässer mit Nährstoffen, wenn auch zum Teil unfreiwillig. Schweden hat eine Expertengruppe nominiert, die bis Ende 2019 die Grundlagen für eine P-Recyclingstrategie und mögliche gesetzliche Regelungen festlegen wird. Österreich hat ein P-Recyclingziel im Abfallwirtschaftsplan festgeschrieben und will es noch in der laufenden Legislaturperiode gesetzlich verabschieden. Dänemark geht einen etwas anderen Weg und fördert P-Recycling durch Steuern auf Deponien und erhöhte Nährstoffgehalte im Ablauf von Kläranlagen, während Finnland zum

Iniciativy a regulativy Evropské komise

V prosinci 2015 zveřejnila Evropská komise sdělení „Closing the loop – An EU Action Plan for the Circular Economy“ [14], poté co Ellen MacArthur Foundation již v červnu 2015 vyvolala mezi odborníky dost velký rozruch zprávou „Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe“. Komise si stanovila za cíl, aby se Evropa posouvala směrem k oběhovému hospodářství, a chce dosáhnout toho, aby se hodnota výrobků, látek a zdrojů udržovala co nejdéle a v co největší míře a aby se minimalizovaly toky odpadů, v čemž se spatřuje zásadní příspěvek v úsilí o vytvoření konkurenceschopného evropského hospodářství s nízkými emisemi a efektivním využíváním zdrojů. Akční plán zahrnuje revizi řady směrnic a nařízení týkajících se odpadů, odpadních vod a produktů, jejíž značná část již byla zahájena.

První komplexní revize se týká Evropského nařízení o hnojivech (ES 2003/2003), které má poprvé na

evropské úrovni regulovat také organická hnojiva a širokou škálu organických a minerálních recyklovaných hnojiv a tím vytvořit jednotný trh s hnojivy s rovnými podmínkami přístupu pro hnojiva z primárních i sekundárních surovin. Odvahu a předvídatost Evropská komise zdůrazňuje rovněž tím, že s konformitou s novým nařízením o hnojivech by se mělo zavést označení „EC hnojivo“ a koncový odpad z recyklovaných produktů. Nařízení bylo přijato na plenárním zasedání Evropského parlamentu dne 27. března 2019 na základě souhlasu Evropské rady v prosinci 2018. Řada produktů nemohla být do nového nařízení ještě přímo zahrnuta: struvit, produkty na bázi popela a biouhlí. Vypracování jejich charakterizace jako vstupních materiálů (CM-C=Component Material Categories) a zařazení produktových funkcí (PFC=Product Function Categories) bylo zadáno ústavu Joint Research Center (JRC) v Seville, kde se jím zabývá pracovní skupina STRUBIAS. Předběžná závěrečná zpráva je k dispozici, takže se zahrnutím těchto výchozích materiálů do nařízení o hnojivech lze počítat ještě letos.

europäischen Vorreiter in der Kreislaufwirtschaft, einschließlich des Nährstoffrecyclings werden will. Gesetzliche Initiativen in anderen europäischen Mitgliedstaaten lassen noch auf sich warten. Man setzt auf Freiwilligkeit, was in den Niederlanden durchaus erfolgreich ist, in den meisten anderen Ländern aber wenig in Bewegung setzt.

Initiativen und Regulative der europäischen Kommission

Die Europäische Kommission hat im Dezember 2015 die Kommunikation „Closing the loop - An EU Action Plan for the Circular Economy“ [14] veröffentlicht, nachdem bereits im Juni 2015 die Ellen MacArthur Foundation mit dem Report „Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe“ relativ viel Aufsehen bei Insidern hervorgerufen hatte. Die Kommission hat sich für Europa den Übergang zu mehr Kreislaufwirtschaft zum Ziel gesetzt und will erreichen, dass der Wert der Produkte, Stoffe und Ressourcen so lange

und so weit als möglich erhalten wird und dass Abfallströme minimiert werden, worin ein essentieller Beitrag zum Bemühen um eine emissionsarme, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige europäische Wirtschaft gesehen wird. Der Aktionsplan schließt die Revision einer Reihe von Direktiven und Verordnungen im Hinblick auf Abfall, Abwasser und Produkten ein, die zu einem erheblichen Teil bereits in Angriff genommen wurde.

Eine erste umfassende Revision betrifft die Europäische Düngemittelverordnung (Regulation (EC) 2003/2003), die erstmals auch organische Dünger, sowie eine breite Palette organischer und mineralischer Recyclingdünger auf europäischer Ebene regeln und damit einen einheitlichen Binnenmarkt für Dünger mit gleichen Zugangsbedingungen für Primär- und Sekundärrohstoffdünger schaffen soll. Mut und Weitblick unterstreicht die Europäische Kommission auch damit, dass mit der Konformität mit der neuen Düngemittelverordnung die Bezeichnung „EC-Dünger“ und das Abfallende von

Iniciativy Evropské komise vyplývají jednak ze snahy zvýšit inovativnost a konkurenceschopnost evropského hospodářství a podporovat jeho silné stránky, jednak vycházejí ze dvou nejnovějších mezinárodních úmluv přijatých všemi členy OSN: 17 Sustainable Development Goals (SDGs) [15], přijatých Valným shromážděním OSN 25. září 2015, a z Pařížské dohody [16] o omezení globální oteplování výrazně pod 2 °C, podepsané 12. prosince 2015, jež je po ratifikaci kvalifikovanou většinou členských států OSN závazná od 14. listopadu 2016. Dvanáct ze 17 SDG se týká nakládání s přírodními zdroji. Zásadním přínosem ke všem dohodám je oddělení ekonomického růstu od spotřeby zdrojů pod heslem PRODUCE MORE WITH LESS! Tím se uzavírá oblouk k oběhové ekonomice.

Sociální a politické iniciativy zaměřené na uzavření oběhového cyklu fosforu účinně podporují Evropská platforma pro fosfor ESPP a národní platformy v několika zemích a regionech. Tyto platformy jsou zpravidla neziskové spolky, financované svými členy. Členy ESPP jsou státní a regionální orgány

(ministerstva, magistráty, úřady), asociace, firmy i výzkumné organizace a projekty, které využívají síť ESPP k šíření výsledků svých projektů. Hlavním úkolem platformy je dialog se členy a mezi nimi, s ředitelstvími Evropské komise, národními platformami a institucemi i s veřejností. Zásadním přínosem k tomuto dialogu je vypracování společných postojů členů s jejich velmi odlišnými zájmy. U mnoha témat se to daří, což činí z ESPP cenného partnera Evropské komise a Evropského parlamentu při přípravě a vývoji programů a regulativů (www.phosphorusplatform.eu).

Reference

- [1] European Commission, Growth - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, „Critical Raw Materials,“ 2017. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en. [přístup 11 10 2017].
- [2] European Commission, „Circular Economy Strategy - Closing the loop - An EU action plan for

Recyclingproduk-ten festgelegt werden soll. Die Verordnung wurde am 27. März 2019 im Plenum des Europäischen Parlaments verabschiedet, nachdem im Dezember 2018 der Europäische Rat zugestimmt hatte. Eine Reihe von Produkten konnte noch nicht direkt in die neue Verordnung aufgenommen werden: Struvit, Produkte auf Basis von Asche und Biokohle. Ihre Charakterisierung als Eingangsstoffe (CMC=Component Material Categories) und der Produktfunktionen (PFC=Product Function Categories) wurde an das Joint Research Center (JRC) in Sevilla ausgelagert, wo eine STRUBIAS genannte Arbeitsgruppe mit der Erarbeitung befasst wurde. Ihr vorläufiger Endbericht liegt vor, so dass noch im laufenden Jahr mit der Aufnahme dieser Ausgangsstoffe in die Düngemittelverordnung gerechnet werden kann.

Die Initiativen der Europäischen Kommission gehen einerseits auf das Bemühen zurück, die europäische Wirtschaft innovativer und wettbewerbsfähiger zu machen sowie die Stärken der europäischen Wirtschaft zu unterstützen. Andererseits bauen sie

auf den beiden jüngsten und von allen vereinten Nationen beschlossenen, internationalen Vereinbarungen auf: den am 25. September 2015 von der UN Hauptversammlung beschlossenen 17 Sustainable Development Goals (SDGs) [15] und dem am 12. Dezember 2015 unterschriebenen Paris Agreement [16] zur Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich weniger als 2°C, das seit dem 14. November 2016 – nach der Ratifizierung durch eine qualifizierte Mehrheit der UN-Mitgliedsstaaten – verbindlich ist. Unter den 17 SDGs beziehen sich allein 12 auf den Umgang mit natürlichen Ressourcen. Ein wesentlicher Beitrag zu allen Vereinbarungen ist die Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch nach dem Motto: PRODUCE MORE WITH LESS! Damit schließt sich der Bogen zur Circular Economy.

Die gesellschaftlichen und politischen Initiativen zur Schließung des Phosphorkreislaufs werden von der ESPP European Sustainable Phosphorus Platform und von nationalen Plattformen in mehreren Ländern und Regionen tatkräftig unterstützt. Die

the Circular Economy,” 28 06 2016. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm. [přístup 07 01 2017].

[3] A. E. Ulrich und E. Frossard, „On the history of a reoccurring concept: Phosphorus scarcity,” *Science of the Total Environment*, pp. 694-707, 2014.

[4] C. Adam, B. Peplinski, M. Michaelis, G. Kley und F.-G. Simon, „Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery,” *Waste Management*, pp. 1122-1128, 2008.

[5] D. Cordell, J.-O. Drangert und S. White, „The story of phosphorus: Global food security and food for thought,” *Global Environmental Change*, Bd. 19, Nr. 2, p. 292–305, 2009.

[6] W. Schipper, “Phosphorus recycling - technologies and legislation. Update and outlook,” in *Phosphates 2016*, Paris, 2016.

[7] K. C. van Dijk, J. P. Lesschen und O. Oene- ma, „Phosphorus flows and balances of the European Union Member States,” *Science of the Total Environment*, Volume 542, Part B, pp. 1078-1093, 2016.

[8] Joint EU Research Project P-REX 2012-2015, „P-REX,” 05 04 2016. [Online]. Available: www.p-rex.eu.

[9] UMWELT-MATERIALIEN Nr. 181 - Abfall, „Klärschlamm Entsorgung in der Schweiz – Mengen- und Kapazitätserhebung,” BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 2004.

[10] European Communities, „Disposal and recycling routes for sewage sludge, Part 1 – Sludge use acceptance report,” Office for Official Publications of the European Communities, 2001, Luxembourg, 2001.

Plattformen sind in der Regel nicht auf Gewinn ausgerichtete Vereine und werden von den Mitgliedern finanziert. Mitglieder der ESPP sind staatliche und regionale Behörden (Ministerien, Magistrate, Ämter), Verbände, Firmen, Forschungseinrichtungen und Forschungsprojekte, die das Netzwerk der ESPP für die Dissemination der Projektergebnisse nutzen. Ihre Hauptaufgabe ist der Dialog mit und zwischen den Mitgliedern, den Direktionen der Europäischen Kommission, den nationalen Plattformen und Institutionen, sowie der Öffentlichkeit. Ein wesentlicher Beitrag zu diesem Dialog ist die Erarbeitung gemeinsamer Positionen der Mitglieder mit ihren ganz unterschiedlichen Interessen. Das gelingt bei sehr vielen Themen und macht die ESPP zu einem geschätzten Gesprächspartner der Europäischen Kommission und des Europäischen Parlaments bei der Vorbereitung und Entwicklung von Programmen und Regulativen (

www.phosphorusplatform.eu).

Referenzen

[1] European Commission, Growth - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, „Critical Raw Materials,” 2017. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en. [Zugriff am 11 10 2017].

[2] European Commission, „Circular Economy Strategy - Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy,” 28 06 2016. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm. [Zugriff am 07 01 2017].

[3] A. E. Ulrich und E. Frossard, „On the history of a reoccurring concept: Phosphorus scarcity,” *Science of the Total Environment*, pp. 694-707, 2014.

[4] C. Adam, B. Peplinski, M. Michaelis, G. Kley und F.-G. Simon, „Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery,” *Waste Management*, pp. 1122-1128, 2008.

- [11] C. Tsiarta, J. Rodrigo und I. Puig, „Final Implementation Report for the Directive 1999/31/EC on the Landfill of Waste,“ DG Environment, European Commission, Brussels, 2015.
- [12] A. Spörri, I. Erny, R. Hermann und L. Hermann, „Beurteilung von Technologien zur Phosphorrückgewinnung - Ganzheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit von P-Rückgewinnungstechnologien im Schweizer Kontext,“ BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern, 2016.
- [13] Y. Cohen, H. Kirchmann und P. Enfält, „Management of Phosphorus Resources – Historical Perspective, Principal Problems and Sustainable Solutions,“ Sunil Kumar (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/18276, <https://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-ii/>, 2011.
- [14] European Commission, Closing the loop - An EU action plan for a Circular Economy, Bd. COM(2015) 614 final, Brussels: European Commission, 2015.
- [15] United Nations, „Sustainable Development Goals - 17 Goals to Transform our World,“ 25 09 2015. [Online]. Available: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>. [přístup 07 01 2017].
- [16] UNFCCC, Paris Agreement, Paris: UNFCCC, 2015.
- [5] D. Cordell, J.-O. Drangert und S. White, „The story of phosphorus: Global food security and food for thought,“ Global Environmental Change, Bd. 19, Nr. 2, p. 292–305, 2009.
- [6] W. Schipper, „Phosphorus recycling - technologies and legislation. Update and outlook,“ in Phosphates 2016, Paris, 2016.
- [7] K. C. van Dijk, J. P. Lesschen und O. Oenema, „Phosphorus flows and balances of the European Union Member States,“ Science of the Total Environment, Volume 542, Part B, pp. 1078-1093, 2016.
- [8] Joint EU Research Project P-REX 2012-2015, „P-REX,“ 05 04 2016. [Online]. Available: www.p-rex.eu.
- [9] UMWELT-MATERIALIEN Nr. 181 - Abfall, „Klärschlamm Entsorgung in der Schweiz - Mengen- und Kapazitätserhebung,“ BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 2004.
- [10] European Communities, „Disposal and recycling routes for sewage sludge, Part 1 – Sludge use acceptance report,“ Office for Official Publications of the European Communities, 2001, Luxembourg, 2001.
- [11] C. Tsiarta, J. Rodrigo und I. Puig, „Final Implementation Report for the Directive 1999/31/EC on the Landfill of Waste,“ DG Environment, European Commission, Brussels, 2015.
- [12] A. Spörri, I. Erny, R. Hermann und L. Hermann, „Beurteilung von Technologien zur Phosphorrückgewinnung - Ganzheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit von P-Rückgewinnungstechnologien im Schweizer Kontext,“ BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern, 2016.
- [13] Y. Cohen, H. Kirchmann und P. Enfält, „Management of Phosphorus Resources – Historical Perspective, Principal Problems and Sustainable Solutions,“ Sunil Kumar (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/18276, <https://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-ii/>, 2011.
- [14] European Commission, Closing the loop - An EU action plan for a Circular Economy, Bd. COM(2015) 614 final, Brussels: European Commission, 2015.
- [15] United Nations, „Sustainable Development Goals - 17 Goals to Transform our World,“ 25 09 2015. [Online]. Available: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>. [Zugriff am 07 01 2017].
- [16] UNFCCC, Paris Agreement, Paris: UNFCCC, 2015.

Česká fosforová platforma

Jindřich Duras

Povodí Vltavy, státní podnik a Česká fosforová platforma, jindrich.duras@pvl.cz

Česká fosforová platforma (ČFP) byla založena v březnu 2017 jako v té době desátá platforma na světě, zabývající se buď přímo problematikou fosforu, nebo živinami obecně.

Hlavní motivací k založení ČFP bylo velmi neuspokojivé zvládnutí eutrofizace našich vod, tedy procesu, který je na dostupnosti fosforu přímo a těsně závislý. K eutrofizaci vod se nutně váže i otázka čištění odpadních vod, tedy eliminace sloučenin fosforu, ale také otázka emisí fosforu z plošných zdrojů znečištění, tedy ze zemědělství nebo z rybářské produkce.

Pro založení vlastní platformy nám byla inspirací především Evropská fosforová platforma (European Sustainable Phosphorus Platform, ESPP).

Na konferenci ESPP v Berlíně v roce 2015 byli z České republiky pouze dva zástupci a z vystoupení a materiálů tam prezentovaných bylo zřetelně vidět, že fosforovou problematiku v ČR je třeba posunout o velký kus kupředu.

ČFP byla tedy založena se zásadním cílem propojovat, informovat, dávat prostor pro odbornou diskusi i vstupovat do veřejného prostoru a být partnerem pro jednání o zlepšujících opatřeních.

Jak si v otázkách fosforu v ČR stojíme?

Problematika eutrofizace povrchových vod je stále živé a důležité téma. Hlavní příčinou je velmi benevolentní legislativa v této oblasti, která umožňuje

Tschechische Phosphorplattform

Jindřich Duras

Povodí Vltavy, státní podnik a Česká fosforová platforma, jindrich.duras@pvl.cz

Die Tschechische Phosphorplattform (ČFP) wurde im März 2017 gegründet, als damals zehnte Plattform weltweit, die sich entweder mit Phosphor oder mit Nährstoffen im Allgemeinen befasst.

Der Hauptgrund für die Gründung der ČFP waren die sehr unbefriedigenden Regelungen in Bezug auf die Eutrophierung unserer Gewässer, die von der Phosphor-Verfügbarkeit unmittelbar abhängig ist. Die Eutrophierung von Gewässern ist notwendigerweise auch mit der Frage der Abwasserbehandlung, d.h. mit der Elimination von Phosphorverbindungen, sowie mit der Frage der Phosphoremissionen aus großflächigen Eintragsquellen, z. B. aus der Landwirtschaft oder der Fischzucht, eng verbunden.

Die Gründung einer eigenen Plattform war insbesondere von der Europäischen Phosphorplattform (European Sustainable Phosphorus Platform; ESPP) inspiriert. An der ESPP-Konferenz 2015 in

Berlin nahmen nur zwei Vertreter aus der Tschechischen Republik teil, und aus den dort präsentierten Referaten und Unterlagen wurde deutlich, dass in Tschechien ein großer Nachholbedarf in dem Phosphormanagement besteht.

Die ČFP wurde daher mit folgenden Hauptzielen gegründet: vernetzen, informieren, einen Raum für Expertendiskussionen schaffen, im öffentlichen Raum auftreten und als Partner für Verhandlungen über Besserungsmaßnahmen fungieren.

Wie stehen wir in der Tschechischen Republik zu Phosphorfragen?

Die Problematik der Eutrophierung von Oberflächenwässern ist ein stets aktuelles und wichtiges Thema. Die Hauptursache ist die sehr wohlwollende Gesetzgebung in diesem Bereich, die einen unakzeptabel hohen Eintrag von Phosphorverbin-

neúnosné vysoké emise sloučenin fosforu s odpadními vodami do vodního prostředí, takže nevyhnutelné eutrofizační projevy následují. Snižování emisí fosforu jde stále linkou nenávratného odstraňování z čištěné odpadní vody bez recyklace – V ČR zatím neexistuje jediný provoz s recyklací fosforu.

Na systémové řešení čeká problematika chovu ryb, protože rybníky, kterých je v ČR kolem 30 tisíc, mohou být na jedné straně významnými místy, kudy fosfor do vodního prostředí vstupuje, ale také místy, kde se fosfor může účinně zadržovat – a dokonce být i recyklován aplikací sedimentů na zemědělskou půdu. To je dosud zcela nedocenená možnost čekající na rozpracování, zejména v rámci jednotlivých mikropovodí.

V posledních letech se ukazuje, že k velmi významným emisím sloučenin fosforu do vod dochází z jednotných stokových sítí měst a obcí za deště. Tehdy voda ze zpevněných ploch propláchne kana-

alizační řad a vnese odlehčením obrovské epizodické vstupy znečištění do recipientu. Řešení se neobejde bez komplexního přístupu k hospodaření s vodou – tedy i např. živinami – ve městech a obcích.

Sektor zemědělství aktuálně zjednodušeně považujeme za méně významný, protože půdy v ČR jsou ve své většině fosforem spíše chudé a ke splachům biologicky dostupného fosforu příliš nedochází. Tato situace se ovšem může změnit s posílením živočišné produkce. Zemědělství ale také utváří naši kulturní krajinu a ovlivňuje odtokové poměry nejen vody, ale také živin. Dostáváme se tak např. k revitalizačním vodním toků a malých vodních nádrží.

Zdá se tedy, že začít s fosforovou platformou u tématu Vody, která propojuje celou krajinu a většinu lidských činností, nebyla špatná volba.

Samostatnými problematikami je samozřejmě zejména zemědělství s velmi vysokým potenciálem

dungen im Abwasser zulässt, was unvermeidliche Eutrophierungserscheinungen in Gewässern zu Folge hat. Eine Beschränkung der Phosphoreinträge bedeutet nach wie vor die unwiederbringliche P-Entfernung aus gereinigtem Abwasser ohne Rückgewinnung – in der Tschechischen Republik gibt es noch keine einzige Anlage für die P-Rückgewinnung.

Auf eine Systemlösung wartet der Fischzuchtbereich, weil die Fischeiche, deren Anzahl in Tschechien etwa 30.000 beträgt, einerseits wichtige Orte sein können, an denen Phosphor in die Gewässer gelangt, andererseits jedoch auch Orte, wo Phosphor effektiv aufgefangen und durch Ausbringung von Sediment auf landwirtschaftliche Flächen sogar recycelt werden kann. Dies ist eine immer noch völlig unterschätzte Möglichkeit, die insbesondere in einzelnen Mikro Einzugsgebieten umgesetzt werden sollte.

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass sehr bedeutende Einträge von Phosphorverbindungen mit Regenwasser aus kommunalen Mischkanalisationen in Gewässer kommen. Bei Regen spült Regenwasser das Kanalnetz durch und bringt riesige

episodische Einträge durch die Entlastung in den Vorfluter. Für die Lösung ist ein umfassendes Wasser- und Nährstoffmanagement in Städten und Gemeinden unerlässlich.

Den Landwirtschaftsbereich halten wir gegenwärtig, vereinfacht gesagt, für weniger bedeutsam, da die Böden in Tschechien überwiegend eher phosphorarm sind, und bioverfügbarer Phosphor kaum abgeschwemmt wird. Diese Situation kann sich jedoch mit einer Zunahme der Tierproduktion ändern. Die Landwirtschaft gestaltet aber auch unsere Kulturlandschaft und beeinflusst die Abflussbedingungen nicht nur von Wasser, sondern auch von Nährstoffen. So kommen wir beispielsweise zur Renaturierung von Fließgewässern und kleinen Wasserspeichern.

Es scheint also, dass es eine gute Wahl ist, die Phosphorplattform mit dem Thema Wasser zu eröffnen, das die gesamte Landschaft und die meisten menschlichen Aktivitäten untereinander verbindet.

Selbständige Themenkreise sind natürlich sowohl die Landwirtschaft mit einem sehr hohen Potenzial an Wiederverwertung von Stoffen als auch die In-

k recyklaci látek, také průmysl – potravinářský i chemický a zejména odpadové hospodářství, protože velký podíl sloučenin fosforu víceméně navždy vypadne z koloběhu ve formě dále nevyužitelného či lépe: nevyužívaného odpadu.

Cíle České fosforové platformy

Česká fosforová platforma si klade za cíl propojit zainteresované segmenty v oblasti udržitelného nakládání s fosforem. Cílem networkingu bude navazování, udržování a rozvíjení kontaktů za účelem výměny informací, posílení spolupráce a zvýšení schopnosti koordinace s níže uvedenými segmenty. Postupně jsou jednotlivé segmenty kontaktovány s cílem vytvořit vyvážené konsorcium názorů ze všech zapojených oblastí.

Česká fosforová platforma chce přispět k soběstačnému a udržitelnému hospodaření s fosforem v rámci České republiky, a to zejména cestou zvýšení účinnosti využívání fosforu v zemědělství

dustrie – hauptsächlich die Lebensmittel- und Chemiesparte sowie insbesondere die Abfallwirtschaft, da ein großer Teil der Phosphorverbindungen mehr oder weniger für immer als ein unverwertbarer oder – besser gesagt – nicht verwerteter Abfall aus dem Kreislauf verschwindet.

Ziele der Tschechischen Phosphorplattform

Die Tschechische Phosphorplattform stellt sich das Ziel, die am Bereich der nachhaltigen Phosphorwirtschaft interessierten Segmente untereinander zu vernetzen. Das Ziel des Netzwerks besteht in der Anbahnung, Pflege und Weiterentwicklung von Kontakten, um Informationen auszutauschen, die Zusammenarbeit zu verstärken und die Koordination der vorgenannten Segmente zu verbessern. Die einzelnen Segmente werden schrittweise kontaktiert, um ein ausgewogenes Meinungskonsortium von allen beteiligten Bereichen zu schaffen.

Die Tschechische Phosphorplattform will zur selbsttragenden und nachhaltigen Phosphorwirtschaft in Tschechien beitragen, insbesondere durch eine Steigerung der Effizienz von Phosphorverwendung in

a v potravinářském průmyslu a podporou recyklace fosforu (a dalších živin) při hospodaření s odpady, včetně čištění komunálních a průmyslových odpadních vod. Jedním z očekávaných přínosů bude i snížení zatížení povrchových vod fosforem a přispění k omezení procesu eutrofizace vod. Za věc zásadní důležitosti považujeme poskytování informací odborné i laické veřejnosti, případně široce pojatou osvětovou činnost.

Česká fosforová platforma má aktuálně své:

webové stránky: <http://fosforovaplatforma.cz/>

facebookový profil: <https://www.facebook.com/fosforovaplatforma/>

i twitter: @CFPlatforma

ČFP také nabízí členství těm, kteří mají zájem problematiku hospodaření s fosforem rozvíjet.

der Landwirtschaft und der Lebensmittelindustrie sowie durch die Unterstützung der Rückgewinnung von Phosphor (und anderen Nährstoffen) in der Abfallwirtschaft einschließlich der kommunalen und industriellen Abwasserreinigung. Einer der erwarteten Vorteile wird im kleineren Phosphoreintrag in Oberflächenwässer und in der Verringerung des Eutrophierungsprozesses bestehen. Von grundlegender Bedeutung ist für uns die Bereitstellung von Informationen für die fachliche und breite Öffentlichkeit sowie eine breit angelegte Bildungsaktivität.

Die Tschechische Phosphorplattform verfügt derzeit über:

Website: <http://fosforovaplatforma.cz/>

Facebook-Profil: <https://www.facebook.com/fosforovaplatforma/>

twitter: @CFPlatforma

Die ČFP bietet ihre Mitgliedschaft allen Personen, die an der Weiterentwicklung zum Thema der Phosphorwirtschaft interessiert sind.



Udržitelné využívání fosforu není jen o „¹⁵P“, ale o celém výrobním cyklu

Pavel Poc

Evropský parlament, místopředseda Výboru pro životní prostředí, veřejné zdraví a bezpečnost potravin,

pavel.poc@europarl.europa.eu

Fosfor, neviditelná součást našeho života, biogenní prvek, na kterém závisí i současná výše zemědělských výnosů a produkce potravin. Jeho vytěžitelná zásoba na Zemi je limitovaná. Hrozba nedostatku fosfátů je dnes natolik vážná, že se v roce 2017 dostaly na unijní seznam kriticky nedostatkových surovin. Hospodaření s fosfáty má značný politický přesah.

V EU je patrně jen jediný fosfátový důl, takže jsme zcela závislí na dovozu. Jakékoliv větší zásoby, které mohou pokrýt naši poptávku, se nacházejí v zemích, u nichž existují pádné obavy o dlouhodobou stabilitu dodávek. Přístup k nim má pouze několik

společností, které jsou propojeny se zahraničními výrobci hnojiv. Fosfor jako strategická surovina se tak stává předmětem a dovolil bych si tvrdit, že mnohdy i rukojmím geopolitických a obchodních her.

Na vlastní kůži jsem to zažil při vyjednávání evropského nařízení o dodávání hnojivých výrobků na evropský trh. Ochrana veřejného zdraví v otázce limitů toxického kadmia byla pro partikulární zájmy některých členských států Radou bohužel odsunuta na druhou kolej. Závislost na dovozu fosfátu se stala jedním z hlavních strašáků proti zavedení přísnějších limitů pro obsah kadmia. Argumentovalo se

Die nachhaltige Phosphornutzung umfasst nicht nur „¹⁵P“, sondern den ganzen Produktionszyklus

Pavel Poc

Evropský parlament, místopředseda Výboru pro životní prostředí, veřejné zdraví a bezpečnost potravin,

pavel.poc@europarl.europa.eu

Phosphor, ein unsichtbarer Teil unseres Lebens, ein biogenes Element, von dem auch die gegenwärtige Höhe der landwirtschaftlichen Erträge und der Nahrungsmittelproduktion abhängt. Seine förderbaren Vorräte auf der Erde sind begrenzt. Die Gefahr des Mangels von Phosphaten ist heute so ernst, dass sie 2017 auf die EU-Liste der kritischen Rohstoffe gelangten. Die Phosphatwirtschaft hat einen bedeutenden politischen Kontext.

In der EU befindet sich wahrscheinlich nur eine einzige Phosphatgrube, sodass wir vom Import völlig abhängig sind. Sämtliche größere Vorräte, die

unsere Nachfrage abdecken können, befinden sich in Ländern, bei denen begründete Befürchtungen um langfristige Stabilität der Lieferungen bestehen. Den Zugang dazu haben nur einige Gesellschaften, die mit ausländischen Düngerproduzenten verbunden sind. Phosphor als strategischer Rohstoff wird dadurch zum Gegenstand und – darf ich wohl sagen – häufig auch zum Geisel geopolitischer und geschäftlicher Spiele.

Hautnah habe ich es bei Verhandlungen zur europäischen Verordnung über Lieferungen von Düngemitteln auf den europäischen Markt erlebt. Der

tím, že by přísnější limity pro obsah kadmia ve fosforečných hnojivech nahrávaly málo znečištěným ruským surovinám v neprospěch suroviny ze země, jako je Maroko. Ve skutečnosti byl na straně země, které se zavedení limitů bránily, vždy nějaký více, či méně zřetelný konflikt zájmů. Například španělská ministryně zemědělství byla bývalou zaměstnankyní světového hnojařského giganta. Polská firma většinou vlastněná státem, nešťastně koupila fosfátový důl v Senegal s horninou silně znečištěnou právě kadmii. Je tedy jasné, že s tenčícími se zásobami fosfátových hornin budou narůstat ceny a s nimi samozřejmě politický tlak. Na druhou stranu, kvalita dováženého produktu bude ale už jen klesat.

Čím déle se problematikou životního prostředí zabývám jako politik, tím víc se mi z pohledu etologa zdá, že s naší společností je něco špatně. Do většiny problémů, které máme, se dostáváme sami, většinou svým sklonem k lenosti a nezodpovědným po-

stojem k životnímu prostředí. Nedostatek fosforu není výjimkou. Místo abychom předešli negativnímu scénáři vyčerpání zásob fosfátů v půdě, kdy nevypěstujeme už vůbec nic, jím dnes v potravinovém produkčním cyklu plýtváme, jako by pro nás nic neznamenal.

Do EU každoročně dovezeme až 6 milionu tun fosfátu a zpracujeme ho energeticky náročnými postupy za produkce množství emisí CO₂. A ročně pak několik tisíc tun vypustíme do vodních toků se všemi negativními důsledky pro naši společnost i přírodní ekosystémy. Debata o udržitelné využívání fosforu tedy nesouvisí jen s prvkem samotným, ale i s plýtváním zdroji, ať už jde o vodu nebo energii.

Nabízí se řešení jak zajistit potřebné hnojivo a snížit naši závislost na dovozu. Toto řešení spočívá v přechodu na oběhové hospodářství. To neznamená zlepšit jen výrobu, ale především zefektivnit využí-

öffentliche Gesundheitsschutz in Bezug auf Grenzwerte für toxisches Kadmium wurde infolge partikulärer Interessen einiger Mitgliedsstaaten vom Rat leider auf ein totes Gleis geschoben. Die Abhängigkeit vom Phosphatimport wurde zu einem der größten Argumente gegen die Einführung von strengeren Grenzwerten für den Kadmiuminhalt. Es wurde damit argumentiert, dass strengere Grenzwerte für den Kadmiuminhalt in phosphorhaltigen Düngern für die weniger belasteten russischen Rohstoffe und zu Ungunsten der Rohstoffe aus Ländern wie Marokko spielen würden. In Wirklichkeit war auf der Seite der Länder, welche die Einführung der Grenzwerte verhinderten, immer ein mehr oder weniger offensichtlicher Interessenkonflikt bemerkbar. So beispielsweise die spanische Landwirtschaftsministerin war ehemalige Mitarbeiterin eines weltweiten Düngergiganten. Eine polnische Firma, mehrheitlich in staatlichem Besitz, hat unglücklicherweise eine Phosphatgrube in Senegal erworben, wo das

Gestein eben mit Kadmium stark belastet ist. Aus dem gesagten geht klar hervor, dass mit schrumpfenden Vorräten phosphathaltiger Gesteine die Preise wachsen werden, und dadurch auch der politische Druck. Andererseits, die Qualität des importierten Produkts kann nur noch abnehmen.

Je länger ich mich mit der Umweltproblematik als Politiker befaße, desto stärker es mir als Ethologen scheint, dass mit unserer Gesellschaft etwas nicht stimmt. Die meisten Probleme, die wir haben, verursachen wir uns selbst, meistens durch unsere Neigung zur Faulheit und unverantwortliche Einstellung zur Umwelt. Der Phosphormangel ist keine Ausnahme. Anstatt das negative Szenario der Erschöpfung von Bodenphosphatvorräten, wonach wir gar keinen Ertrag mehr erzielen werden, vorzubeugen, vergeuden wir sie heute in dem Produktionszyklus der Nahrungsmittel, als ob es für uns gar nichts bedeutete.

vání a minimalizovat odpad. Nutnou podmínkou je samozřejmě recyklace fosforu z použitých produktů, ať už jde o hnojiva, odpadní vody nebo kompost. Disponujeme technologiemi, které to umožňují, a pokud dnes nezainvestujeme do jejich rozvoje a zavádění v průmyslovém měřítku, zítra za vedlejší náklady zaplatíme mnohonásobně. To je i důvod, proč tady dnes jsme, proč existuje Evropská platforma pro udržitelný fosfor, Česká fosforová platforma a Evropská inovační platforma pro udržitelné zemědělství.

V EU máme předpisy, které řeší znečištění vody fosfáty. Jenže ve skutečnosti směrnice o dusičnanech ani směrnice o čištění městských odpadních vod jeho efektivnější využívání nestimulují. Komerční zařízení na recyklaci z odpadních vod jsou rozšíře-

né pouze v několika zemích. Pokud je mi známo, tak pouze Švédsko, Německo a Nizozemsko dnes disponují strategií, legislativou či iniciativou zaměřenou na účinné nakládání s tímto cenným prvkem. V zemědělství má vedle směrnice o dusičnanech, která zlepšila hospodaření se statkovými hnojivy, přispět zejména zavádění agro-environmentálních opatření a podmíněnost v rámci Společné zemědělské politiky. Jde o omezení eroze, lepší obhospodářování půdy, přesné zemědělské technologie, fázové krmění v živočišné výrobě, a tak dále. SZP nyní prochází reformou, která bude dokončena novým Evropským parlamentem. Velký krok vpřed přinese zmiňovaná revize nařízení o hnojivech, kterou jsem vyjednával za Sociální demokraty. Tento předpis mimo jiné zjednoduší používání organických hnojiv na evropském trhu. Nařízení na unijní trh se

Jährlich importieren wir in die EU bis zu 6 Mio. Tonnen Phosphat und verarbeiten es mit energieintensiven Verfahren unter großer CO₂-Emission. Und mehrere tausend Tonnen lassen wir dann in unsere Gewässer ab, mit allen negativen Folgen für unsere Gesellschaft und für natürliche Ökosysteme. Die Debatte über nachhaltige Phosphornutzung hängt also nicht nur mit dem Element selbst zusammen, sondern auch mit der Vergeudung von Ressourcen, sei es Wasser oder Energie.

Es bietet sich eine Lösung, wie erforderliche Dünger bereitgestellt und unsere Abhängigkeit vom Import reduziert werden können. Diese Lösung besteht in dem Übergang zur Kreiswirtschaft. Das bedeutet nicht nur die Herstellung zu verbessern, sondern vor allem die Nutzung effizienter zu gestalten und den Abfall zu minimieren. Eine notwendige Voraussetzung ist selbstverständlich die Phosphor-Rückgewinnung aus Abfallstoffen, seien es Dünger, Abwässer oder Kompost. Wir verfügen über Techniken, die es ermöglichen, und wenn wir heute in ihre Entwicklung und Einführung im industriellen Maßstab nicht investieren, werden wir morgen viel-

mals mehr für die Nebenkosten bezahlen müssen. Das ist auch der Grund, warum wir heute da sind, warum es die Europäische Plattform für nachhaltigen Phosphor, die Tschechische Phosphor-Plattform und die Europäische Innovationsplattform für die nachhaltige Landwirtschaft gibt.

In der EU haben wir Regelungen für die Wasserbelastung mit Phosphaten. In Wirklichkeit wird ihre effizientere Nutzung weder von der Phosphat-Richtlinie noch von der Richtlinie über die Behandlung von kommunalem Abwasser stimuliert. Kommerzielle Anlagen zur Phosphor-Rückgewinnung aus Abwasser sind nur in einigen Ländern verbreitet. Soviel mir bekannt ist, verfügen heute nur Schweden, Deutschland und die Niederlande über eine Strategie, Gesetzgebung oder Initiative zur effizienten Behandlung dieses wertvollen Elementes. In der Landwirtschaft sollen neben der Phosphat-Richtlinie, welche die Behandlung der Wirtschaftsdünger verbessert hat, insbesondere die Einleitung von agro-environmentalen Maßnahmen und die Regelungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik einen Beitrag leisten. Es handelt sich um die

totiž nově bude vztahovat i na živiny z druhotných zdrojů, například právě recyklované fosfáty, a živiny z organických zdrojů. Ty by do budoucna mohly nahradit až 30 % minerálních hnojiv. Ke značným úsporám dochází i díky odpadové legislativě. Například díky směrnici o skládkách, která vyvolala tlak na třídění bioodpadu, bude od 1. dubna v České republice zajištěn jeho svoz po celý rok.

Stále však stojíme před řadou legislativních překážek, které lepšímu využívání fosforu z odpadových

toků brání, a které je potřeba odstraňovat. Do budoucna například budeme muset harmonizovat normy pro bezpečné použití kalů v zemědělství, aby se zvýšila důvěra v jejich užití v celém řetězci. Pokud budu po květnových volbách nadále členem Evropského parlamentu, budu se na této práci intenzivně podílet.

Erosionsbeschränkung, bessere Bodenbearbeitung, genau arbeitende Landwirtschaftstechnik, Phasenfütterung in der Viehzucht etc. Die Gemeinsame Agrarpolitik macht zurzeit eine Reform durch, die von dem neuen Europäischen Parlament verabschiedet werden soll. Einen großen Fortschritt wird die bereits erwähnte Änderung der Dünger-Verordnung bringen, die ich als Vertreter der Sozialdemokraten verhandelt habe. Diese Regelung wird unter anderem die Anwendung von organischen Düngern auf dem europäischen Markt vereinfachen. Die neue Verordnung für den europäischen Markt wird sich nämlich auch auf Nährstoffe aus Sekundärquellen beziehen, beispielsweise eben auf die rezyklierten Phosphate, sowie auf Nährstoffe aus organischen Quellen. Die könnten künftig bis zu 30 % der Mineraldünger ersetzen. Zu erheblichen

Ersparnissen kommt es auch dank dem Abfallrecht. So beispielsweise dank der Richtlinie über Abfalldeponien, die einen Druck auf die Trennung des Biomülls entwickelt hat, wird ab dem 1. April seine Abfuhr in Tschechien ganzjährig gesichert werden.

Nach wie vor gibt es allerdings zahlreiche rechtliche Hindernisse, die eine bessere Verwertung von aus Abwasser eliminiertem Phosphor verhindern. Künftig müssen wir beispielsweise Normen für sichere Klärschlammanwendung in der Landwirtschaft harmonisieren, um das Vertrauen in ihre Nutzung in der gesamten Kette zu entwickeln. Wenn ich nach den Wahlen im Mai weiter Mitglied des Europäischen Parlaments bin, werde ich mich an dieser Arbeit intensiv beteiligen.

Chemické srážení fosforu, praxe, možnosti, účinnost

Jan Foller

ADCHEM, foller@adchem.cz

Úvod

Podle posledního vývoje v oblasti naší vodohospodářské legislativy lze usuzovat, že vedení MŽP ČR úplně rezignovalo na prosazení již dříve (10/2015), ohlašovaných a naznačených změn limitů zpoplatnění vypouštění znečištění do povrchových vod a tolik potřebných motivačních prvků v naší legislativě. Opět zřejmě budou odsunuty nové a již i provozovateli a majiteli ČOV očekávané změny poplatků a současně platných limitních koncentračních a bilančních hodnot sledovaných parametrů znečištění, které byly stanoveny v devadesátých letech minulého století a stále se podle nich postupuje. Dále tedy nemá zodpovědný investor ani projektant k dispozici argumenty, které by vytvořily potřebný ekonomický prostor pro obhajobu inovací zastaralých technologických linek a tolik potřebných investic do moder-

nizace stávajících čistíren odpadních vod, dále jen ČOV a výstavby jen takových nových staveb, které by zajistily dosažení účinné ochrany recipientu před negativním dopadem vypouštění zbytečně vysokých koncentrací nutrientů, především fosforu, tedy staveb s využitím „BAT“, v pravém slova smyslu. Je-li to pravda, tak je potom situace o to horší, že ke změně tohoto stanoviska zodpovědných orgánů nestačilo ani sucho let 2017 a 2018 a z něho plynoucí problémy na řadě českých, ale hlavně jihomoravských řek a potoků. O každoročních burcujících zprávách v letních měsících o eutrofizaci vodních nádrží a toků ani nemluvě. Přitom je právě řešení dosažení nízkých odtokových koncentrací fosforu z ČOV, bez ohledu na jejich kapacitu, dávno vyřešeným technologickým problémem a v řadě případů je již v ČR dostatečně provozně ověřeno. Nepotvrzuje se ani obava z výrazného zvýšení provozních nákladů na

Chemische Phosphorfällung, Praxis, Möglichkeiten, Effizienz

Jan Foller

ADCHEM, foller@adchem.cz

Einleitung

Aus der letzten Entwicklung im Bereich unserer wasserwirtschaftlichen Gesetzgebung kann man schließen, dass die Leitung des tschechischen Umweltministeriums auf die Durchsetzung der bereits früher (10/2015) angekündigten und angedeuteten Grenzwerte für die Vergebührung des Schmutzstoffeintrags in die Oberflächengewässer und der so erforderlichen Motivierungselemente in unserem Regelwerk völlig resigniert. Neue und seitens Betreiber und Besitzer von Abwasserkläranlagen (nachstehend nur KA) bereits erwartete Änderungen der Gebühren und einschlägigen Konzentrations- und Bilanzgrenzwerte der überwachten Verschmutzungsparameter, die in den 1990er Jahren festgelegt wurden und fortan gelten, werden vermutlich wieder aufgeschoben. Verantwortungsbewussten Bauherren und Planern stehen deshalb kaum Argu-

mente zur Verfügung, um einen notwendigen ökonomischen Spielraum für die Durchsetzung der Innovation von überholten Verfahrenstechniken und für die notwendigen Investitionen in den Ausbau bestehender KA zu schaffen, sowie für den Neubau von ausschließlich solchen Anlagen, die einen wirksamen Schutz des Vorfluters gegen negative Folgen des Eintrags von unnötig hohen Nährstoffkonzentrationen, insbesondere von Phosphor, garantieren würden, also Anlagen mit echtem „BAT“. Sollte es wahr sein, ist die Lage umso schlimmer, wenn weder die Trockenheit 2017 und 2018 noch die daraus folgenden Probleme an zahlreichen böhmischen und vor allem südmährischen Gewässern die zuständigen Behörden zu einer Änderung dieser Einstellung nicht bringen konnten. Ganz zu schweigen von allsommerlichen dramatischen Berichten über Eutrophierung von Stauanlagen und Fließgewässern. Dabei ist das Erreichen von niedrigen Abfluss-

čištění komunálních odpadních vod, způsobeného doplněním ČOV a tyto technologie.

Situace na stokové síti a možnosti eliminace fosforu na komunálních ČOV

V nadpise tohoto odstavce záměrně hovoříme o eliminaci fosforu, a ne přímo o chemickém srážení, protože je stále ještě nutné počítat v odůvodněných případech i s technologicky řízenou, zvýšenou akumulací ortofosforečnanů do biomasy, která může značně snížit potřebu dodatečně dávkovaného chemického srážedla, tedy solí železa nebo hliníku. Garantovatelné dosažení velmi nízkých odtokových hodnot fosforu pouze biologickým postupem, je však hlavně u menších ČOV málo pravděpodobné a v každém případě jeho realizace na každé ČOV představuje poměrně významný zásah do technologické linky, přičemž je do značné míry výsledný efekt ovlivněn hlavně kvalitou přitékající surové odpadní vody a typem kanalizace. S řešeními, využívajícími dávkování externího substrátu, například kyseliny octové, do anaerobní sekce biologického

stupně ČOV, která je nezbytná u takové technologické linky, nebudeme tedy v tomto textu počítat.

Pro účinnou eliminaci fosforu z odpadních vod chemickým srážením má, kromě jiného významný vliv i způsob, kterým jsou komunální odpadní vody na ČOV dopravovány. Způsob stokování má totiž vliv na koncentraci splaškových vod obecně, jejich chemické složení a reaktivitu, teplotu, pH a oxidačně redukční potenciál (ORP), který významně ovlivňuje například srážení fosforu železitými solemi. Je to dáno tím, že splaškové vody podléhají již během dopravy v závislosti na konkrétních podmínkách samovolným rozkladným reakcím. Na účinnost srážení má mnohdy provedení kanalizace větší vliv než vlastní technologické řešení ČOV a dávka srážedla. Naopak důsledky nedomyšleného způsobu odvádění splaškových odpadních vod ve spojení se snahou o dosažení maximálních účinností odstranění fosforu vysokými dávkami srážedla při klasickém simultánním použití mohou být takové, že se „zablokuje“ částečně nebo úplně i vlastní funkce biologického stupně ČOV, jak ukážeme dále. Platí

konzentrationen von Phosphor, ungeachtet der KAKapazität, eine längst gelöste und in zahlreichen Fällen auch in Tschechien hinreichend betrieblich erprobte technische Aufgabe. Auch Befürchtungen vor einer erheblichen Betriebskostenerhöhung in Kommunkläranlagen infolge des Ausbaus mit der genannten Technik haben sich nicht bestätigt.

Situation am Abwassernetz und Möglichkeiten der Phosphorelimination an kommunalen KA

In dem Titel dieses Abschnitts sprechen wir absichtlich über Phosphorelimination, und nicht direkt über chemische Fällung, weil es nach wie vor notwendig ist, in begründeten Fällen auch mit einer technologisch gesteuerten, erhöhten Speicherung von Orthophosphat in der Biomasse zu rechnen, die den Verbrauch von nachträglich dosierten chemischen Fällungsmitteln, d.h. Eisen- oder Aluminiumsalzen, erheblich reduzieren kann. Das garantierbare Erreichen von sehr niedrigen Phosphor-Abflusswerten nur mit biologischen Verfahren ist jedoch – besonders bei kleineren KA –

wenig wahrscheinlich, und die Umsetzung an jeder KA würde jedenfalls einen relativ wesentlichen Eingriff in die technologische Linie darstellen, wobei das Endeffekt schließlich von der Qualität des zufließenden rohen Abwassers und vom Kanalisationsstyp weitgehend beeinflusst wird. Verfahren mit Dosierung eines externen Substrats, z.B. Essigsäure, in den anaeroben Bereich der biologischen Reinigungsstufe, die bei einer solchen technologischen Linie unerlässlich ist, bleiben in diesem Text deshalb unberücksichtigt.

Für eine wirksame Phosphorelimination aus Abwasser durch chemische Fällung ist u.a. auch die Zuleitungsweise von Kommunalabwasser zur KA relevant. Der Kanalisationsstyp beeinflusst nämlich die allgemeine Konzentration von Abwasser, dessen chemische Zusammensetzung und Reaktionsfähigkeit, Temperatur, pH-Wert und Redoxpotenzial (ORP), das beispielsweise die Phosphorfällung mit Eisensalzen wesentlich beeinflusst. Abwasser unterliegt nämlich bereits während der Zuleitung spontanen Zersetzungsreaktionen in Abhängigkeit

z praxe zkušenost, že čím je menší lokalita a tím i kapacita navržené ČOV, tím důkladněji musí být při návrhu metody odstraňování fosforu zohledněna technologická konfigurace vlastní ČOV ve vazbě na stokovou síť. Významnou roli hraje i množství balastních nebo srážkových vod v kanalizaci.

V následující tabulce jsou pro ilustraci uvedeny teoretické – vypočtené a reálné koncentrace znečištění splaškových odpadních vod na přítoku ČOV v závislosti na způsobu stokování.

Orientační chemické složení splaškových vod podle zdroje – typu kanalizace (mg/l)					
Zdroj	CHSK	BSK ₅	N _{Celk.}	N-NH ₄	P _{Celk.}
Hodnoty dle ČSN 756401*	800	400	73,3	47,7	16,7
Hodnoty dle ČSN 756401 (malé obce)*	1330	667	122,2	79,4	27,8
Hodnoty dle ČSN 756401 (průměr velké ČOV)*	937	469	85,9	55,9	19,5
Jednotná kanalizace (velká města)**	535	244	54,1	37,9	8,0
Oddílná kanalizace (gravitační provedení)**	984	446	142,5	88,6	14,4
Oddílná kanalizace (tlaková, vakuová)**	1142	547	114,3	91,0	14,0

*Teoretické hodnoty zatížení dle normy, přepočtené na reálnou produkci odpadních vod

**Průměrné hodnoty zatížení, vypočtené z více podobných zdrojů

von den jeweiligen Bedingungen. Die Ausführung der Kanalisation hat häufig einen größeren Einfluss auf die Effizienz der Fällung als die eigentliche KA-Technik und die Dosierung des Fällungsmittels. Ein unpassender Kanalisationstyp in Verbindung mit Bestrebungen, höchstmögliche Wirksamkeit der Phosphorelimination durch eine hohe Fällungsmitteldosierung bei dem klassischen Simultanverfahren zu erreichen, kann zur Teil- oder vollständigen „Blockierung“ der eigentlichen Funktion der biologischen Reinigungsstufe führen, wie unten gezeigt wird. Es gilt folgende praxisbezogene Erfahrung: Je

kleiner die Siedlung und dadurch die KA-Bemessungskapazität, desto konsequenter muss die technologische Konfiguration der eigentlichen KA in Bezug auf das Abwassernetz bei dem Entwurf des Phosphoreliminationsverfahrens berücksichtigt werden. Eine wichtige Rolle spielt auch die Menge von Ballast- und Niederschlagswasser in der Kanalisation.

In der folgenden Tabelle sind zur Illustration theoretische/berechnete und reale Konzentrationen der Verunreinigung von häuslichen Abwässern am

Überschlägige chemische Zusammensetzung von häuslichen Abwässern nach Eintragsquelle – Kanalisationstyp (mg/l)					
Eintragsquelle	CSB	BSB ₅	N _{ges.}	N-NH ₄	P _{ges.}
Normwerte nach ČSN 756401*	800	400	73,3	47,7	16,7
Normwerte nach ČSN 756401 (kleine Siedlungen)*	1330	667	122,2	79,4	27,8
Normwerte nach ČSN 756401 (Durchschnitt große KA)*	937	469	85,9	55,9	19,5
Mischkanalisation (große Städte)**	535	244	54,1	37,9	8,0
Trennkanalisation (Gravitationsleitung)**	984	446	142,5	88,6	14,4
Trennkanalisation (Druck-, Vakuumentleitung)**	1142	547	114,3	91,0	14,0

*Theoretische Normbelastungswerte, umgerechnet auf reales Abwasseraufkommen

**Mittlere Belastungswerte, errechnet aus mehreren ähnlichen Quellen

Výše uvedená tabulka ukazuje na příkladech přibližné koncentrační rozpětí důležitých složek splaškové odpadní vody. Hodnoty pro celkový fosfor, celkový a amoniakální dusík mají v závislosti na konkrétním řešení technologické linky ČOV klíčový dopad na dosažitelnou odtokovou koncentraci fosforu. U fosforu je patrný významný rozdíl mezi „normovanou“ koncentrací a zaznamenanými skutečnými výsledky. Je to dáno tím, že produkce fosforu je objektivně nižší než současně používaná hodnota 2,5 g/EO/den, jak uvádí norma. Realitě se spíše blíží dříve používaná hodnota asi 1,8 g/EO/den.

Problematika eliminace fosforu z odpadních vod z fyzikálně-chemického hlediska

Jak bylo výše uvedeno, provedení technologické linky, a především způsob dávkování srážedla a homogenizace reakční směsi mícháním při zahájení

procesu srážení se zásadním způsobem projevuje na výsledku procesu. Důležitou roli zde může hrát použití statických míchadel.

Význam použitého způsobu míchání statickým míchadlem vynikne v okamžiku, když si přiblížíme obecně problematiku reakční kinetiky srážecích chemických reakcí, které lze předpokládat při realizaci chemické eliminace fosforu z biologicky vyčištěných odpadních vod v „třetím stupni čistíren odpadních vod“. V principu se jedná o kontinuálně probíhající aplikaci malých množství vysoce koncentrovaných roztoků „srážedla“, v ČR nejčastěji koncentrovaného roztoku síranu nebo chloridu železitého (cca 41,0 %), do velkých objemů upravených vod v poměru cca 1,0 : 5.10⁻⁵. Použitá koncentrace solí má svoje technologické i ekonomické důvody.

KA-Zulauf in Abhängigkeit vom Kanalisationstyp gezeigt. Die obige Tabelle zeigt auf Beispielen annähernde Konzentrationsbereiche wichtiger Bestandteile von häuslichen Abwässern. Die Werte von Gesamtphosphor, Gesamt- und Ammoniakalstickstoff beeinflussen in Abhängigkeit von der jeweiligen Gestaltung der technologischen Linie auf entscheidende Weise die erreichbare Phosphorkonzentration am Abfluss. Bei Phosphor besteht ein erheblicher Unterschied zwischen der „normkonformen“ Konzentration und den erfassten tatsächlichen Ergebnissen, weil die Phosphorproduktion objektiv kleiner ist als der zurzeit angewendete Normwert von 2,5 g/EGW.d. Realitätsnah ist eher der früher angewendete Wert von ca. 1,8 g/EGW.d.

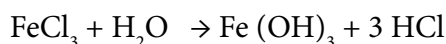
Problematik der Phosphorelimination aus Abwasser unter dem physikalisch-chemischen Gesichtspunkt

Wie oben angeführt, die Ausführung der technologischen Linie und insbesondere die Art der Fällungsmitteldosierung und Homogenisierung des Reaktionsgemischs durch Umrühren am Anfang des Fällungsprozesses wirken sich wesentlich in dem Prozessergebnis aus. Eine wichtige Rolle kann hier der Einsatz von statischen Rührwerken spielen.

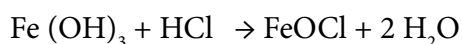
Die Bedeutung des Umrührens mit statischen Rührwerken hebt sich hervor, wenn wir die allgemeine Problematik der Reaktionskinetik in chemischen Fällungsreaktionen darstellen, die bei der Umsetzung der chemischen Phosphorelimination aus biologisch gereinigten Abwässern in der „Tertiärstufe“ anzunehmen sind. Im Prinzip handelt es sich um eine kontinuierliche Anwendung kleiner Mengen von hochkonzentrierten Lösungen des „Fällungsmittels“, in Tschechien meistens einer konzentrierten Lösung von Eisensulfat oder -chlorid (ca. 41,0 %), in großen Wasservolumen im Verhältnis ca. 1,0 : 5.10⁻⁵. Die angewendete Salzkonzentration hat ihre technologischen und ökonomischen Gründe.

Unter dem physikalisch-chemischen Gesichtspunkt handelt es sich um einen verhältnismäßig komplexen Vorgang mit einer Reihe sich konkurrierenden chemischen Reaktionen, kompliziert im Laufe der Zeit durch Veränderungen der Reaktionsbedingungen und der Reaktionskinetik. Zum Zeitpunkt des Kontakts der Tropfen einer Eisensalzlösung mit Abwasser entstehen durch Hydrolyse hypothetisch unlösliches Eisenhydroxid und freie Säure. Diesen Vorgang illustriert beispielsweise die Hydrolyse von FeCl₃:

Z fyzikálně-chemického hlediska se jedná o poměrně složitý proces daný řadou konkurenčních chemických reakcí, komplikovaný v čase změnou reakčních podmínek a reakční kinetikou těchto reakcí. V okamžiku kontaktu kapek roztoku železité soli s odpadní vodou vzniká vlivem hydrolyzy, hypoteticky nerozpustný hydroxid železitý a volná kyselina. Proces například ilustruje hydrolyza FeCl_3 :



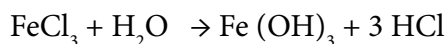
Vznikající sol, zárodek krystalů hydroxidu je kolloidní velikosti. Uvolněná kyselina však v blízkém okolí podporuje vlivem lokálně nižší hodnoty pH disociaci hydroxidu železa na povrchu krystalků za vzniku povrchové vrstvy FeOCl :



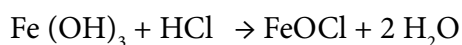
Povrchová vrstva FeOCl potom umožňuje vznik iontových komplexů a takto vzniklý iontový komplex, vlivem povrchového náboje potom komplikuje

je další růst krystalů sraženiny až do separovatelné velikosti. Jsou-li přítomny částice ortofosforečnanu, vzniká ortofosforečnan železitý, který je asi desetkrát méně rozpustný než hydroxid železitý. I v tomto případě lze předpokládat podobné jevy na povrchu zárodečných krystalků. Vznik ortofosforečnanu železitého je o to složitější, že anion ortofosfátu je v závislosti na pH v různých disociačních stupních, a navíc v různých molekulárních formách (dimery a podobně). Pokud v daném místě nejsou k dispozici další malé shluky molekul třeba ortofosforečnanu železitého, rostou přednostně krystaly hydroxidu železitého.

Při samovolné krystalizaci je klíčovým faktorem rychlost růstu krystalizačních zárodků – micel, okolo kterých krystaly rostou. Pokud je rychlost tvorby zárodků vyšší než rychlost růstu krystalů, vzniká větší množství malých krystalů. To je cílem první fáze srážení a použití statických míchadel tuto funkci plní v optimální míře. Druhou fází procesu srážení je růst krystalů do separovatelné velikosti.



Das entstandene Sol besteht aus Hydroxidkristallkeimen von kolloider Größe. Die ausgeschiedene Säure unterstützt jedoch in ihrer nahen Umgebung durch lokal niedrigere pH-Werte die Dissoziation von Eisenhydroxid auf der Kristalloberfläche unter Entstehung einer Oberflächenschicht von FeOCl :



Die Oberflächenschicht von FeOCl ermöglicht dann die Entstehung von Ionenkomplexen, und der auf diese Weise entstandene Ionenkomplex kompliziert dann mithilfe der Oberflächenladung weiteres Wachstum der kristallinen Ausfällung bis hin zu einer abtrennbaren Größe. Wenn dabei Orthophosphatpartikel anwesend sind, entsteht Eisenorthophosphat, der etwa zehnmal weniger löslich als Eisenhydroxid ist. Auch in diesem Fall kann man ähnliche Phänomene auf der Oberfläche der Kristallkeime annehmen. Die Entstehung von Eisenorthophosphat ist umso komplexer, dass Orthophosphatanione in Abhängigkeit vom pH-Wert in

verschiedenen Dissoziationsstufen und außerdem diversen Molekularformen (Dimere u.Ä.) aufkommen. Wenn an der jeweiligen Stelle keine anderen kleinen Molekülglomerate etwa von Eisenorthophosphat anfallen, wachsen vorzugsweise Eisenhydroxidkristalle.

Der Schlüsselfaktor der spontanen Kristallisation ist die Wachstumsgeschwindigkeit der Keime – Mizellen –, an denen die Kristalle wachsen. Ist die Keimwachstumsgeschwindigkeit höher als die Kristallwachstumsgeschwindigkeit, entstehen viele kleine Kristalle. Das ist das Ziel der ersten Fällungsphase, und der Einsatz von statischen Rührwerken erfüllt diese Aufgabe im optimalen Maße. Die zweite Fällungsphase ist das Kristallwachstum zu einer abtrennbaren Größe.

Die Konzentration von unlöslichen Salzen in einer Lösung wird im Allgemeinen von dem Löslichkeitsprodukt gesteuert. In Betracht der konkurrierenden Fällungsreaktionen handelt es sich in ähnlichen Fällen auch bei Eisen um ein „bedingtes Löslichkeitsprodukt“, und die daraus resultierenden Gleichge-

Koncentrace nerozpustných solí v roztoku je obecně řízena součinem rozpustnosti. S ohledem na přítomnost konkurenčních srážecích reakcí se v podobných případech i v případě železa, jedná o „podmíněný součin rozpustnosti“ a jím dané výsledné rovnovážné koncentrace solí v roztoku jsou vždy vyšší než teoretické (tabelované po přepočtu na hodnotu iontové síly roztoku: $I = 0$).

Podmínkou krystalizace obecně je existence přesyceného roztoku. V reálném prostředí odpadní vody a při hodnotách pH kolem 7,0 jsou při zajištění homogenity prostředí – mícháním, podmínky „přesycenosti“ roztoků obou hlavních konkurenčních sloučenin železa zajištěny. V případě ustálení rovnováhy se však růst krystalů zastavuje. Produktem jsou potom malé, stabilní shluky různých molekul a rozpustnost takových krystalů je potom vyšší než čistých krystalů jednotlivých sloučenin. To má potom za následek vyšší odtokové koncentrace fosforu i po odděleném srážení. Z tohoto důvodu musí následovat fáze pomalého míchání, která narušuje

rovnováhy a umožňuje požadovaný růst – zrání krystalů.

Vliv způsobu aplikace srážedla na konečný efekt eliminace fosforu

Chemické srážení fosforu může být realizováno různými způsoby. Z praktických důvodů bude dále uvažováno s použitím síranu železitého, jako zatím nejčastěji používaného srážedla následujícími způsoby:

předsrážení – dávkování na přítoku vod na ČOV, za předsrážení můžeme také považovat aplikaci železitých solí k potlačení zápachu na stokové síti

simultánní srážení – dávkování srážedla na různých místech do biologické linky (nátok do aktivace, aktivace v různých místech, před nátok do dosazovacích nádrží), sem patří také aplikace hlinitých nebo směsných solí Al + Fe na potlačení některých typů vláknitého bytění kalu

wichtskonzentrationen der Salze in der Lösung sind immer höher als die theoretischen (tabelliert nach Umrechnung auf Ionenstärke der Lösung: $I = 0$).

Eine allgemeine Bedingung der Kristallisation ist das Bestehen einer übersättigten Lösung. Im realen Abwassermilieu und bei pH-Werten um 7,0 sind – unter ausreichender Homogenität des Milieus durch Umrühren – die Bedingungen für eine „Übersättigung“ der beiden wichtigsten konkurrierenden Eisenverbindungen gesichert. Wenn das Gleichgewicht erreicht wird, kommt das Kristallwachstum zum Erliegen. Das Produkt sind dann kleine, stabile Aggregate verschiedener Molekülen, und die Löslichkeit solcher Kristalle ist dann höher als bei reinen Kristallen einzelner Verbindungen. Das hat dann höhere Abflusskonzentrationen von Phosphor auch nach der getrennten Fällung zu Folge. Aus diesem Grund muss eine Phase des langsamen Umrührens folgen, welche das Gleichgewicht stört und das erwünschte Wachstum – Kristallreifung – ermöglicht.

Einfluss der Anwendungsweise des Fällungsmittels an das Endeffekt der Phosphorelimination

Die chemische Phosphorfällung kann auf verschiedene Weise umgesetzt werden. Aus praktischen Gründen werden im Weiteren folgende Anwendungen von Eisensulfat als dem bisher am häufigsten genutzten Fällungsmittel betrachtet:

- Vorfällung – Dosierung am Zulauf der KA, als Vorfällung kann auch die Anwendung von Eisensalzen zur Geruchsreduzierung im Abwassernetz betrachtet werden
- Simultanfällung – Fällungsmitteldosierung an verschiedenen Stellen der biologischen Linie (Zulauf in die Belebung, Belebung an verschiedenen Stellen, vor dem Zulauf in Nachklärbecken), hierher gehört auch die Anwendung von Aluminium- oder Al-Fe-Mischsalzen zur Reduktion einiger Typen der Faden-Schlammquellung
- klassische getrennte Fällung in der Tertiärstufe der KA
- Fällung nach der biologischen Abwasserreinigung mit dem NRBF- oder DSFP-Verfahren

klasické oddělené srážení v terciárním stupni ČOV srážení po biologickém vyčištění odpadních vod metodou NRBF nebo DSFP

Každá z uvedených technologií má svoje technologické limity, které jsou ovlivněny v různé míře také řešenou vstupní koncentrací celkového fosforu na přítoku k ČOV a vlastním provedením technologické linky ČOV z hlediska uvažovaného zatížení kalu a celkové doby kontaktu odpadních vod s aktivovaným kalem.

Předsrážení. Předsrážení fosforu před vlastním biologickým čištěním splaškových odpadních vod je nejméně používanou technologií a málokdy se využívá, jako jediný způsob řešení na dané ČOV. Odtokové koncentrace fosforu jsou závislé na použitém srážedle a délce kontaktu srážedla s odpadní

vodou před nátokem do ČOV. Čím kratší je tento čas, tím nižší efekt můžeme očekávat. V případě řešení vysokých koncentrací fosforu vysokými dávkami srážedla může dojít až k zablokování celkové funkce ČOV uvolněnou kyselinou. Toto nehrozí v případě použití hydroxidů železa (vodárenských kalů), ale i zde je účinnost ovlivněna způsobem aplikace.

Simultánní srážení. Simultánní srážení fosforu je zatím i přes zjevné nevýhody, nejčastěji používanou technologií. Pro většinu případů může tento způsob aplikace stačit, nepožadujeme-li vyšší účinnosti a pokud nekalkulujeme příliš s náklady za srážedlo. Tento způsob aplikace má totiž nejvyšší nároky na dávky použitých solí. Při řešení vyšších koncentrací fosforu a při požadavku na vyšší účinnost procesu však hrozí nejprve omezení nebo až blokování nitrifikace a v krajním případě dále i zhoršení od-

Jedes der genannten Verfahren hat seine technologischen Grenzen, die in verschiedenem Maße auch von der Gesamtphosphor-Einlaufkonzentration am KA-Zulauf und von der eigentlichen Ausführung der technologischen Linie der KA in Bezug auf die betrachtete Schlammbelastung und die Gesamtkontaktzeit zwischen Abwasser und Belebtschlamm gegeben sind.

Vorfällung. Die Phosphor-Vorfällung vor der eigentlichen biologischen Reinigung von häuslichen Abwässern ist das am wenigsten genutzte Verfahren und wird nur selten als die einzige Lösung in der jeweiligen KA genutzt. Die Phosphor-Abflusskonzentrationen sind von dem angewendeten Fällungsmittel und der Kontaktzeit des Fällungsmittels mit Abwasser vor dem Einlauf in die KA abhängig. Je kürzer diese Zeit, desto kleinerer Effekt ist zu erwarten. Wenn hohe Phosphor-Konzentrationen mit einer hohen Fällungsmitteldosierung behandelt werden sollen, kann die ausgeschiedene Säure die gesamte Funktion der KA blockieren. Bei der Anwendung von Eisenhydroxiden (Klärschlamm) droht diese Gefahr zwar nicht, auch hier wird die

Effizienz jedoch von der Anwendungsart beeinflusst.

Simultanfällung. Die Phosphor-Simultanfällung ist trotz ihrer offensichtlichen Nachteile das bisher häufigste Verfahren. Für die meisten Fälle kann diese Verfahrensart genügen, wenn keine höhere Effizienz erfordert und die Kosten der Fällungsmittel nicht zu streng kalkuliert werden. Dieses Verfahren stellt nämlich die höchsten Ansprüche auf die Dosierung der angewendeten Salze. Bei höheren Phosphor-Konzentrationen und Ansprüchen auf eine höhere Wirksamkeit des Verfahrens droht zuerst eine Beschränkung bis Blockierung der Nitrifikation und im Extremfall weiter auch eine Beschränkung der BSB5-Entfernung. Wichtig ist der SNK4,5-Wert von Abwasser. Eine Teilbeschränkung der bezeichneten nachteiligen Auswirkungen kann durch die Fällungsmitteldosierung vor dem Einlauf in das Nachklärbecken erreicht werden. Den Verfahrenseffekt beeinflusst es allerdings nur in einem beschränkten Maße, weil bei diesem Verfahren so gut wie alle negativen Einflüsse zur Geltung kommen: Schlammkonzentration, Nebenreaktionen,

straňování BSK5. Důležitá je hodnota KNK4,5 odpadní vody. Částečného omezení naznačených negativních vlivů lze dosáhnout dávkováním srážedla před nátok na dosazovací nádrže. Na efekt procesu to však má pouze omezený vliv, protože se při tomto způsobu aplikace projevují prakticky všechny negativní vlivy: koncentrace kalu, bočné reakce, komplexotvorné reakce, nedostatečná koagulace a podobně.

Oddělené srážení v biologicky vyčištěné odpadní vodě. Tento způsob aplikace je základním předpokladem pro dosažení garantovatelných odtokových koncentrací celkového fosforu pod asi 0,5 mg/l. Konečný efekt je závislý prakticky pouze na správnosti provedení a dimenzování reaktoru, a hlavně na způsobu separace vzniklého chemického kalu. V závislosti na požadovaném účinku můžeme volit technologie od prosté gravitační separace, přes

flotaci až po membránovou separaci nebo pískovou filtraci. Tato metoda je také základním předpokladem pro nejnižší spotřebu srážedla.

Technologie NRBF a DSFP. Tyto technologické koncepce jsou kompromisním řešením, které je navrženo při maximálním využití poznatků z výše popsané fyzikálně-chemické teorie procesu a s ohledem na maximální využití stávajících technologických linek ČOV. Základem je vždy oddělené srážení fosforu v biologicky vyčištěné odpadní vodě s následnou separací produkovaného chemického kalu různými metodami, přes vločkový mrak aktivovaného kalu v dosazovacích nádržích. V celkové bilanci se jedná o nejúspornější metodu z hlediska spotřeby chemikálií, ale bez zvláštní separace chemického kalu, který se stává součástí produkovaného přebytečného kalu. Popis obou uvedených metod byl již dříve autorem tohoto textu publikován.

komplexbildende Reaktionen, unzureichende Koagulation u.Ä.

Getrennte Fällung in biologisch gereinigtem Abwasser. Diese Verfahrensart ist die grundlegende Voraussetzung, um garantierbare Abflusskonzentrationen von Gesamtphosphor unter ca. 0,5 mg/l zu erreichen. Der Endeffekt ist praktisch nur von der richtigen Ausführung und Auslegung des Reaktors abhängig, und vor allem von der Abtrennungsweise des entstandenen chemischen Schlammes. In Abhängigkeit von der erwünschten Effizienz können Technologien von einer einfachen Gravitationsabtrennung über Flotation bis hin zur Membran- oder Sandfiltration eingesetzt werden. Diese Methode ist auch die Grundbedingung für den niedrigsten Fällungsmittelverbrauch.

NRBF- und DSFP-Verfahren. Diese technologischen Konzepte sind Kompromisslösungen, die mit der maximalen Einbeziehung der Kenntnisse über obige physikalisch-chemische Verfahrenstheorie und unter Berücksichtigung der bestmöglichen Nutzung der technologischen Linien in bestehen-

den KA entworfen wurden. Ihre Basis stellt immer die getrennte Phosphorfällung in biologisch gereinigtem Abwasser dar, mit der nachfolgenden Abtrennung des Anfallenden chemischen Schlammes mit diversen Verfahren, über ein Flockenfilter des Belebtschlammes im Nachklärbecken. In der Gesamtbilanz handelt es sich um das wirtschaftlichste Verfahren in Bezug auf den Chemikalienaufwand, ohne separate Abtrennung des chemischen Schlammes, der zu einem Teil des anfallenden Überschussschlammes wird. Eine Beschreibung der beiden Verfahren wurde bereits vom Verfasser des Referats publiziert.

Fazit

Obwohl die Grenzwerte für die Vergebüherung des eingetragenen Phosphors nicht aktualisiert werden, wie in der Einleitung erwähnt wird, ist offensichtlich, dass die steigenden Chemikalienpreise schließlich die Betreiber zur Suche nach Einsparungen der Betriebskosten führen werden. Bei Neubauten oder Ausbauten älterer KA sollten keine anderen als sparsamen Verfahren von den Aufsichtsbehörden

Závěr

Přes to, že nejsou aktualizovány limity zpoplatnění vypouštěného fosforu, jak je uvedeno v úvodu tohoto textu je zřejmé, že stoupající ceny chemikálií povedou nakonec provozovatele k hledání úspor na provozních nákladech. V případě nových staveb nebo rekonstrukcí starších ČOV by jiné, než úsporné technologie neměly být kolaudujícími orgány

povolovány a v projektech ani aplikovány. S ohledem na opakující se období extrémního sucha by k tomu měl vést i legitimní požadavek správců toků na zvýšenou ochranu povrchových vod před eutrofizací. V následující tabulce jsou na závěr uvedeny orientační garantovatelné a v konkrétních případech dosahované výsledky chemického srážení fosforu železitými solemi.

Orientační hodnoty dosažitelných koncentrací v mg/l fosforu – chemickým srážením		
Technologie	Garance	Praxe
Předsrážení	Obecně není (0,5 – 1,0) *	0,15 – 1,2
Simultánní srážení	0,8 – 2,5	0,5 – 2,8
Oddělené srážení	Pod 0,5 (0,2) **	0,2 – 0,5
NRBF nebo DSFP	Pod 0,5	0,15 – 0,45

* Hodnota dosažitelná při řízené aplikaci vodárenských železitých kalů

**Tuto hodnotu lze garantovat pouze při použití membrán nebo pískové filtrace

genehmigt und in Projekten angewendet werden. Angesichts der sich wiederholenden extremen Trockenperioden sollte auch die legitime Forderung der Gewässerverwalter auf einen erhöhten Schutz der Oberflächengewässer vor der Eutrophierung

dazu führen. In der nachstehenden Tabelle sind abschließend Richtwerte der garantiebaren und in konkreten Fällen erreichten Ergebnisse der chemischen Phosphorfällung mit Eisensalzen gezeigt.

Richtwerte der erreichbaren Konzentration in mg/l Phosphor – chemische Fällung		
Technologie	Garantie	Praxis
Vorfällung	im allgemeinen keine (0,5 – 1,0) *	0,15 – 1,2
Simultanfällung	0,8 – 2,5	0,5 – 2,8
Getrennte Fällung	unter 0,5 (0,2) **	0,2 – 0,5
NRBF oder DSFP	unter 0,5	0,15 – 0,45

* Erreichbarer Wert bei der gesteuerten Anwendung von eisenhaltigen Klärschlammern

**Dieser Wert kann nur bei dem Einsatz von Membran- oder Sandfiltration garantiert werden.

K uvedené tabulce by ještě patřily dosažené ekonomické výsledky z jednotlivých v textu uvažovaných zařízení, dané především potřebným molárním poměrem železa k odstraněnému fosforu. Vzhledem k rozdílným cenám za chemikálie na straně jedné a použitým množstvím případných odpadních železitých kalů na straně druhé by tato informace nebyla přesná a mohla by vést k zavádějícím závěrům. Jedno je však jisté: Aplikací odděleného srážení nebo technologií NRBF a DSFP lze uspořít, podle dosažených výsledků na sledovaných ČOV přibližně 35 – 55 % běžných dávek srážedla (přepočteno na železo), které by bylo nezbytné aplikovat při simultánním srážení.

Literatura

[1] Foller, Jelínek, Eyer: Fyzikálně chemické hranice srážení fosforu ve vztahu k nařízení vlády č. 61/2003, Boskovice: Řešení extrémních požadavků

na čištění odpadních vod, sborník z konference, únor 2005

[2] Foller, Jelínek, Tomenendálová: Požadavek přísných koncentrací Ncelk. a Pcelk. na odtoku z ČOV nemusí zákonitě znamenat zvýšení investic nebo provozních nákladů, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Sborník z konference, únor 2009

[3] Foller: Technologické možnosti dosahování nízkých koncentrací fosforu na odtoku z ČOV, Brno: Cyanobakterie 2010, Sborník z konference, červen 2010.

[4] Látal, Foller: Navrhování reaktorů pro účinné srážení fosforu, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Sborník z konference, únor 2011

Die angeführte Tabelle könnte noch mit erreichten Wirtschaftsergebnissen der im Referat erwähnten Anlagen ergänzt werden, die vor allem durch das erforderliche Molverhältnis zwischen Eisen und dem eliminierten Phosphor bedingt sind. Infolge unterschiedlicher Preise für Chemikalien einerseits und der angewendeten Menge etwaiger eisenhaltiger Klärschlämme andererseits würde diese Information jedoch nicht genau und deshalb irreführend sein. Eines ist allerdings sicher: Durch die getrennte Fällung und das NRBF- oder DSFP-Verfahren kann man anhand der erreichten Ergebnisse der betrachteten KA ca. 35 bis 55 % der üblichen Fällungsmitteldosen (Umrechnung auf Eisen) gegenüber der Simultanfällung einsparen.

Literaturverzeichnis

[1] Foller, Jelínek, Eyer: Fyzikálně chemické hranice srážení fosforu ve vztahu k nařízení vlády č. 61/2003, Boskovice: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, sborník z konference, Februar 2005

[2] Foller, Jelínek, Tomenendálová: Požadavek přísných koncentrací Ncelk. a Pcelk. na odtoku z ČOV nemusí zákonitě znamenat zvýšení investic nebo provozních nákladů, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Konferenzband, Februar 2009

- [5] Foller, Jelínek, Eyer: NRBF systém a III. stupeň čistíren odpadních vod, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Sborník z konference, únor 2011
- [6] Foller, Jedličková, Linhartová, Jílek, Paulenka: Vliv technologických odpadních vod z úpravy pitné vody na provoz kanalizace a ČOV, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Sborník z konference, únor 2013
- [7] Foller, Eyer: Třetí stupeň čištění s lamelovým usazovákem, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Sborník z konference, únor 2015
- [8] Foller, Eyer, Tůna: Třetí stupeň čištění – možná úsporná technická řešení, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Sborník z konference, únor 2017

-
- [3] Foller: Technologické možnosti dosahování nízkých koncentrací fosforu na odtoku z ČOV, Brno: Cyanobakterie 2010, Konferenzband, Juni 2010
- [4] Látal, Foller: Navrhování reaktorů pro účinné srážení fosforu, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Konferenzband, Februar 2011
- [5] Foller, Jelínek, Eyer: NRBF systém a III. stupeň čistíren odpadních vod, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Konferenzband, Februar 2011
- [6] Foller, Jedličková, Linhartová, Jílek, Paulenka: Vliv technologických odpadních vod z úpravy pitné vody na provoz kanalizace a ČOV, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Konferenzband, Februar 2013
- [7] Foller, Eyer: Třetí stupeň čištění s lamelovým usazovákem, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Konferenzband, Februar 2015
- [8] Foller, Eyer, Tůna: Třetí stupeň čištění – možná úsporná technická řešení, Blansko: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, Konferenzband, Februar 2017

Znečištění vod fosforem v Horním Rakousku – původ a účinnost opatření

zkrácená verze

Matthias Zessner¹, Max Kuderna², Oliver Gabriel³, Christine Weinberger² und Eva Strenge¹

¹TU Wien, ²wpa beratende ingenieure, ³uba Wien

Podmínky

Rakouský vodohospodářský plán podle Rámcové směrnice EU o vodách (WFD) připisuje klíčový význam v analýze rizik nesplnění cíle pro vodní toky pro

obsah nutrientů - fosfor a dusík. V Horním Rakousku jsou v současné době překročeny typově specifické orientační hodnoty (normy kvality životního prostředí) pro živiny v téměř 30 % vodních toků (obrázek 1).

Legende

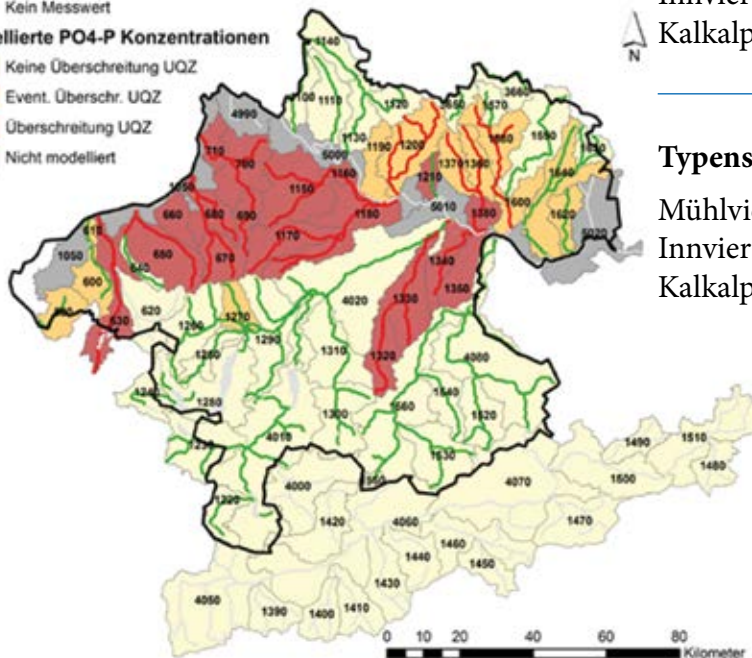
politische Grenze 1100 Teileinzugsgebiet ID
Seeflächen

Beobachtete PO₄-P Konzentrationen

Keine Überschreitung UQZ
Überschreitung UQZ
Kein Messwert

Modellierte PO₄-P Konzentrationen

Keine Überschreitung UQZ
Event. Übersch. UQZ
Überschreitung UQZ
Nicht modelliert



Typově specifické orientační hodnoty PO₄-P:

region Mühlviertel: 0,08-0,10 mg/l
Innviertel, Traun-Ennsplatte: 0,05 mg/l
Kalkalpen, Kalkvoralpen: 0,015-0,04 mg/l

Typenspezifische Richtwerte für PO₄-P:

Mühlviertel: 0,08-0,10 mg/l
Innviertel, Traun-Ennsplatte: 0,05 mg/l
Kalkalpen, Kalkvoralpen: 0,015-0,04 mg/l

Obr. 1. Překročení normy kvality životního prostředí (typově specifické hodnoty) pro PO₄-P v Horním Rakousku; výsledky sledování a modelování.

Abb 1. Überschreitungen der Umweltqualitätsnorm (typenspezifische Richtwerte) für PO₄-P in Oberösterreich; Monitoring- und Modellergebnisse.

Phosphoreintrag in die Gewässer Oberösterreichs – Herkunft und Maßnahmenwirksamkeiten

Kurzfassung

Matthias Zessner¹, Max Kuderna², Oliver Gabriel³, Christine Weinberger² und Eva Strenge¹

¹TU Wien, ²wpa beratende ingenieure, ³uba Wien

Hintergrund

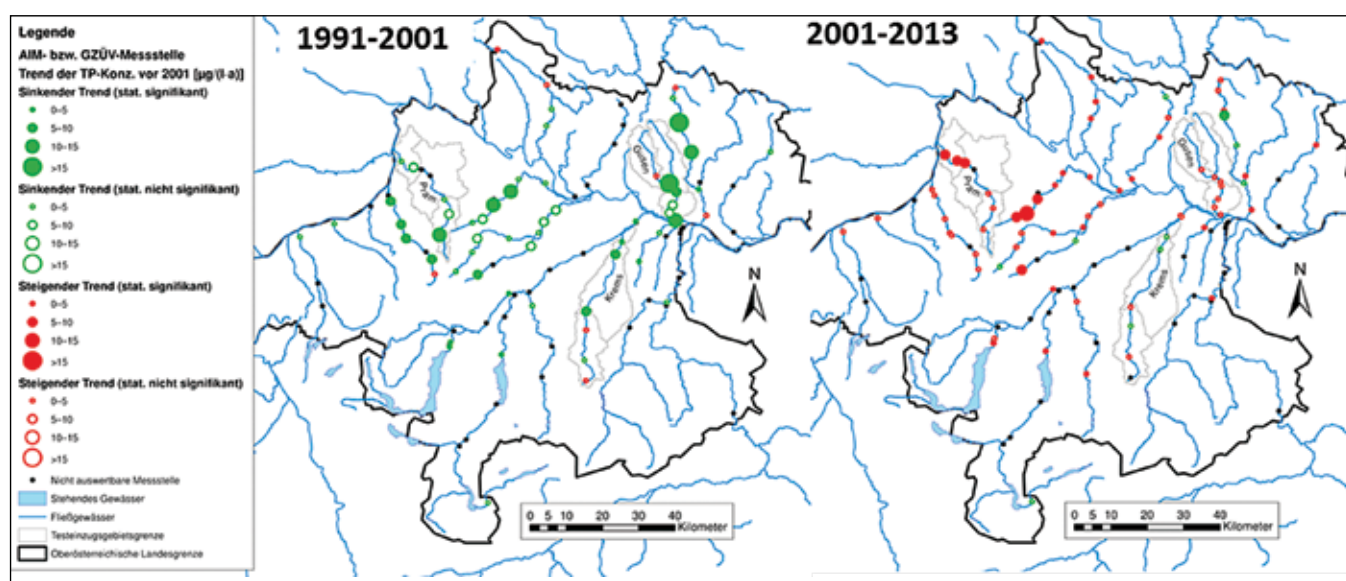
Der Österreichische Gewässerbewirtschaftungsplan nach EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) weist den Nährstoffen Phosphor und Stickstoff bei der Risikoanalyse einer Zielverfehlung für Fließgewäs

ser eine relevante Bedeutung zu. In Oberösterreich werden derzeit in knapp 30 % der Fließgewässer die typenspezifischen Richtwerte (Umweltqualitätsnormen) für Nährstoffe überschritten (Abbildung 1).

Fosforečnanový fosfor při tom hraje důležitější roli než dusičnanový dusík. Kromě důležitosti nutrienu pro lokální vody je nutné zohledňovat také jejich dopady při dálkovém transportu Dunajem na problém eutrofizace delty Dunaje a Černého moře. Zde je však nutné hledat řešení v kontextu všech zúčastněných států.

V Horním Rakousku se objevují problémy se zvýšeným obsahem fosforu ve vodách, přestože v posledních desetiletích bylo zavedeno čištění odpadních

vod s důkladným odstraňováním fosforu a také v zemědělství již více než 20 let existují právní předpisy a podpůrné programy pro environmentálně šetrné hospodaření. Lze prokázat, že v období 1991–2001 se díky realizaci rozsáhlé eliminace fosforu při čištění odpadních vod výrazně snížilo zatížení fosforem v hornorakouských vodách. V období 2001–2013 se však tento klesající trend již neprojevuje. V řadě hornorakouských toků naopak dochází k opětovnému zvyšování koncentrací celkového fosforu (obr. 2). Podrobná analýza příčin pro dotčené toky uka-



Obr. 2. Trendy koncentrace celkového fosforu v Horním Rakousku v letech 1991-2001 (vlevo) a 2001-2013 (vpravo), analýza trendů.
Abb. 2. Konzentrationstrends für Gesamtphosphor in Oberösterreich 1991-2001 (links), und 2001-2013 (rechts), Trendanalyse.

Dabei spielt Phosphat-Phosphor gegenüber Nitrat-Stickstoff die übergeordnete Rolle. Neben der Bedeutung für die lokalen Gewässer ist bei den Nährstoffen auch deren Bedeutung über den Ferntransport über die Donau für Eutrophierungsproblem des Donaudeltas und des Schwarzen Meeres zu beachten. Lösungen hier sind jedoch im Kontext aller beteiligten Staaten zu suchen.

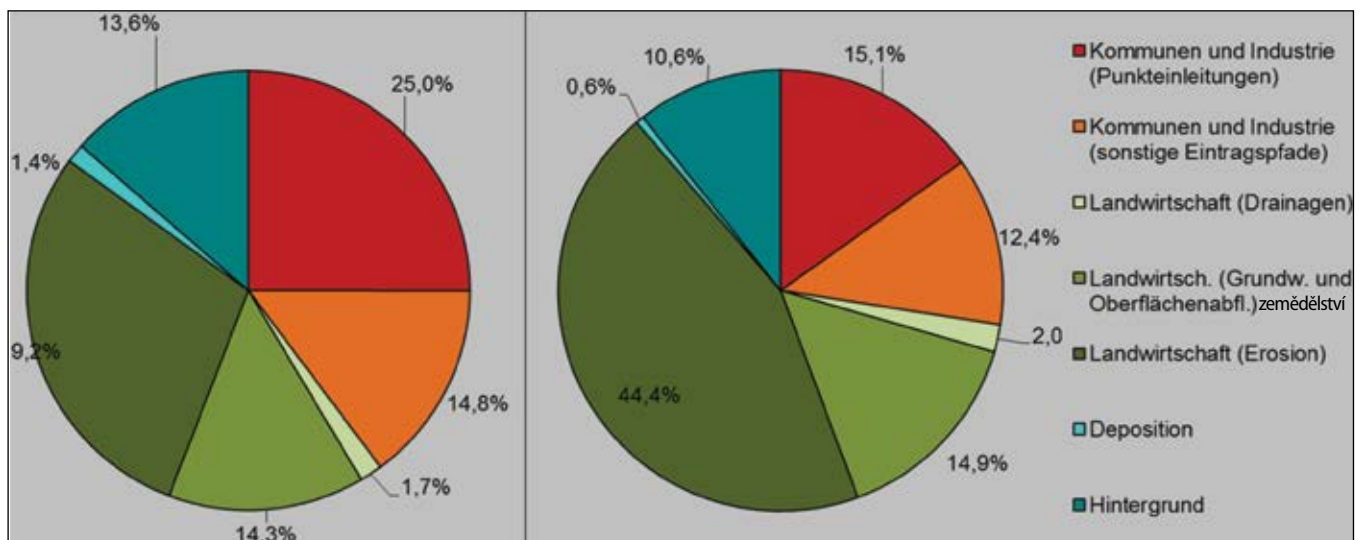
Die Probleme mit erhöhter Phosphorbelastung der Gewässer in Oberösterreich treten auf, obwohl in den letzten Jahrzehnten eine Abwasserreinigung mit weitgehender Phosphorentfernung umgesetzt wurde und auch in der Landwirtschaft schon über 20 Jahre rechtliche Vorgaben und Förderprogram-

me für eine umweltschonende Bewirtschaftung bestehen. Es kann gezeigt werden, dass im Zeitraum 1991 bis 2001 die Phosphorbelastungen der oberösterreichischen Gewässer durch Implementierung einer weitgehenden Phosphorentfernung in der Abwasserreinigung deutlich abgenommen haben. Im Zeitraum 2001-2013 ist dieser abnehmende Trend nicht mehr zu beobachten. Im Gegenteil kommt es in einer Reihe von Oberösterreichischen Gewässer wieder zu einem Anstieg der Gesamtphosphorkonzentrationen (Abbildung 2). Eine detaillierte Ursachenanalyse für die betroffenen Gewässer zeigt, dass die Emissionen aus der Abwasserreinigung seit 2001 weiter geringfügig zurückgegangen sind und auch eine Umsetzung von Maßnahmen im Zuge ös-

zuje, že emise z čištění odpadních vod od roku 2001 nadále mírně klesají a že realizace opatření obsažených v rakouském programu Argraumweltprogramm ÖPUL byla schopna emise do jisté míry snížit. Toto snížení je však více než kompenzováno zvyšováním emisí v důsledku častějšího pěstování plodin podporujících erozi, jako je kukuřice a sója, takže celková koncentrace v některých vodách významně narůstá.

Zdroje a cesty znečištění fosforem

Při použití modelu emise živin MONERIS na úrovni dílčích povodí lze prokázat, že v emisích živin v Horním Rakousku dnes jednoznačně dominují difuzní zdroje a cesty. Téměř 50 % znečištění fosforem ve vodních tocích Horního Rakouska, na nichž hrozí nesplnění ekologického cíle, tak pochází z eroze zemědělské půdy (obr. 3 vpravo). Podíl emisí z ČOV je v těchto vodách již nízký, v průměru



Obr. 3. Zdroje emisí fosforu, všechny hornorakouské vody (vlevo) a všechny hornorakouské vody překračující normu environmentální kvality (vpravo); výsledky modelování emisí. Legenda shora dolů: obce a průmysl (bodové zdroje), obce a průmysl (další vstupy), zemědělství (odvodnění), zemědělství (podpovrchový a povrchový odtok), zemědělství (eroze), depozice, pozadí

Abb. 3. Quellen von Phosphoremissionen, alle Oberösterreichische Gewässer (links) und alle Oberösterreichischen Gewässer mit Überschreitung der Umweltqualitätsnorm (rechts); Ergebnisse der Emissionsmodellierung.

terreichischen Argraumweltprogrammes ÖPUL die Emissionen in gewissem Umfang mindern konnte. Diese Emissionsreduktion wird jedoch durch eine Emissionszunahme auf Grund einer Zunahme des Anbaues von erosionsanfälligen Kulturen wie Mais und Soja überkompensiert, sodass insgesamt die Gewässerkonzentration in einigen Gewässern stark signifikant steigt.

Quellen und Pfade der Phosphorbelastung

Mit Hilfe der Anwendung des Nährstoffemissionsmodelles MONERIS auf der Ebene von Teileinzugsgebieten kann gezeigt werden, dass diffuse Quellen und Pfade heute die Nährstoffemissionen

in Oberösterreich deutlich dominieren. Demnach kommen knapp 50 % der Phosphoreinträge in den durch Zielverfehlung gefährdeten Gewässern Oberösterreichs aus der Erosion von landwirtschaftlichen Flächen (Abbildung 3, rechts). Der Beitrag der Emissionen über Kläranlagenabläufe ist in diesen Gewässern derzeit mit im Mittel etwa 15 % schon gering. Die diffusen Emissionen aus Kommunen über Mischwasserentlastung, Regenkanälen oder nicht kanalisiert Gebieten, die Einträge aus der Landwirtschaft über das Grundwasser bzw. die Hintergrundbelastung liegen etwa in einer ähnlichen Größenordnung. Betrachtet man die Phosphoreinträge in alle Gewässer Oberösterreichs nimmt die relative Bedeutung der Kläranlagenabläufe zu.

činí asi jen 15 %. Difuzní emise z komunální jednotné a dešťové kanalizace nebo z neodkanalizovaných oblastí a znečištění ze zemědělství přes podzemní vodu nebo ze zatíženého pozadí jsou řádově přibližně stejně vysoké. Pokud uvažujeme zdroje fosforu pro všechny vody Horního Rakouska, zvyšuje se relativní význam procesů v ČOV. Přesto i zde dominuje znečištění ze zemědělství, což zdůrazňuje význam této zdrojové oblasti i pro dálkový transport a pro ochranu Černého moře.

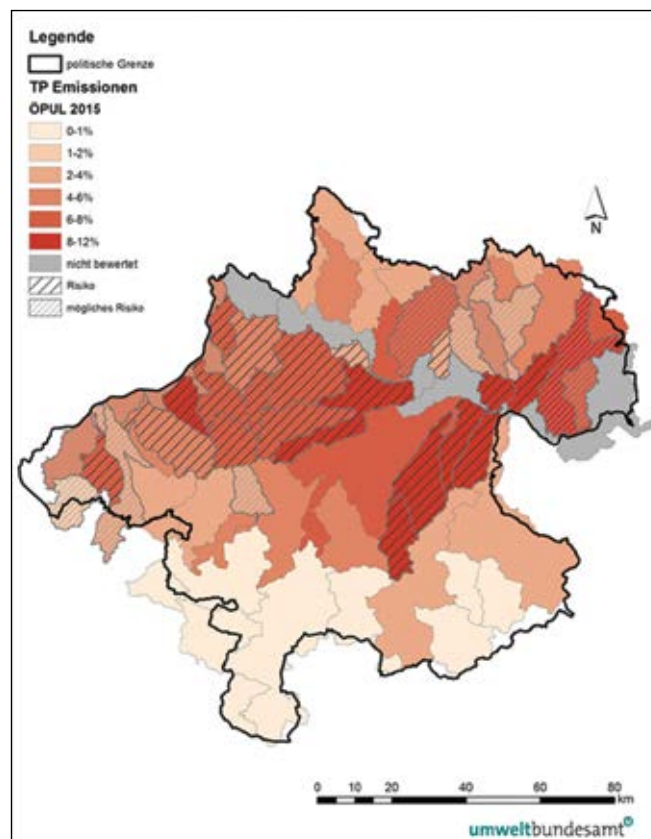
Účinnost opatření

Řada opatření v programu ÖPUL se zaměřuje na snížení odnosů půdy, jako např. „Ozeleňování orné půdy – pěstování meziplodin“, „Mulčování a přímý výsev“ nebo „Biologické hospodaření“. Díky účasti na opatřeních ÖPUL v Horním Rakousku se v průměru povodí snížil odnos půdy z povodí asi o 17 %. Znečištění fosforem, které činí v hornorakouských vodních tocích (bez Dunaje) cca 650 t ročně, se tak snižuje asi o 5 %. Při pohledu na prostorové roz-

Obr. 4. Procentní snížení celkových emisí TP v hornorakouských povodích vlivem ÖPUL 2015; výsledky modelování emisí.

Abb. 4. Prozentuelle Minderung der TP Gesamtemissionen in oberösterreichischen Einzugsgebieten durch ÖPUL 2015; Ergebnisse der Emissionsmodellierung.

ložení procentuálního snížení celkových emisí fosforu v povodích Horního Rakouska se ukazuje poměrně heterogenní obraz. Nejvyšší efektivitu ÖPUL lze identifikovat pro oblasti Traun-Enns Platte nebo Innviertel se snížením o 8 až 12 %. Jsou to současně



Trozděm dominieren auch hier die Einträge aus der Landwirtschaft, was die Bedeutung dieses Herkunftsbereiches auch für eine Ferntransport und den Schutz des Schwarzen Meeres unterstreicht.

Maßnahmenwirksamkeiten

Eine Reihe von Maßnahmen des ÖPUL Programmes adressieren eine Verringerung des Bodenabtrages wie z.B. „Begrünung von Ackerflächen – Zwischenfruchtanbau“, „Mulch und Direktsaat“ oder „Biologische Wirtschaftsweise“. Im Durchschnitt der Einzugsgebiete wird durch die Teilnahme an den ÖPUL Maßnahmen in Oberösterreich eine Reduktion des Bodenabtrags um ca. 17% erreicht. Die Phosphoreinträge, welche in Oberösterreichs Fließgewässer (ohne Einträge in die Donau) ca. 650 t P pro Jahr betragen, werden dadurch um ca. 5 % ge-

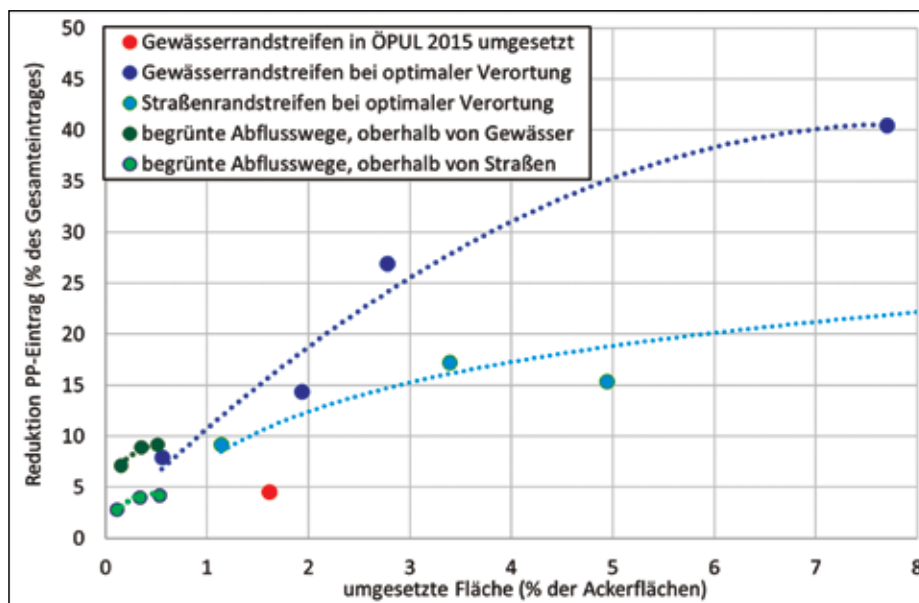
senkt. Betrachtet man die räumliche Verteilung der prozentualen Minderungen der Gesamtposphor Emissionen in den Einzugsgebieten von Oberösterreich zeigt sich ein relativ heterogenes Bild. Mit Minderungen von 8-12% lassen sich die höchsten Wirksamkeiten von ÖPUL für die Traun-Enns Platte oder das Innviertel ausweisen. Dabei handelt es sich auch um Gebiete bei denen eine Zielverfehlung im Bereich des Phosphors gegeben ist. Geringe Minderungen von 2-4% finden sich dagegen in anderen Einzugsgebieten, bei denen es ebenfalls zu Zielverfehlungen kommt (Abbildung 4). Vielfach sind Minderungen der Gewässerbelastung in diesem Ausmaß jedoch nicht ausreichend, um in Zukunft mit einem Erreichen der Zielwerte für Phosphor rechnen zu können.

Innerhalb eines Einzugsgebietes ist die Herkunft

oblasti, kde hrozí nesplnění cílů v oblasti fosforu. Naproti tomu v jiných povodí, kde také hrozí nesplnění cílů, dochází jen k malému snížení o 2–4 % (obr. 4). V mnoha případech není redukce znečištění taková, aby se dalo v budoucnosti pro fosfor počítat s dosažením cílových hodnot.

V rámci povodí není rovnoměrně rozložen původ erozního fosforu. K přísunu fosforu nejvíce přispívají strmé plochy orné půdy v blízkosti toků, zejména pokud se zde pěstují plodiny podporující erozi. Obvykle je asi 20 % orné půdy v povodí zdrojem přibližně 80 % erozního fosforu. Tyto plochy mo-

hou být pomocí rastrového transportního modelu PhosFate identifikovány v rámci povodí jako hot-spoty. Pokud se nyní hledají vysoce účinná a (ekonomicky) efektivní opatření pro omezení erozních vstupů, rozhodující význam má jejich lokalizace na plochách hotspotů a na dominantních tocích. Na obr. 5 je zobrazena účinnost (osa y), požadavek na plochu (osa x) a plošná efektivita (strmost grafu) různých dalších opatření ke snížení transportu fosforu z orné půdy do vodních útvarů za předpokladu cílené lokalizace ve srovnání s opatřeními, která jsou v současné době prováděna v rámci programu ÖPUL bez cílené lokalizace. Je vidět, že pro-



Obr. 5. Porovnání efektivnosti a plošných požadavků opatření implementovaných v ÖPUL 2015 Ochrana povrchových vod a půdy ležící ladem (se situací srovnatelnou s břehovými pásy) s cílenými opatřeními; Výsledky modelu z PhosFate.

Abb. 5. Vergleich der Wirksamkeit und des Flächenbedarfes der in ÖPUL 2015 umgesetzten Maßnahmen Oberflächengewässerschutz und Brache (mit einer den Gewässerrandstreifen vergleichbaren Lage) mit gezielt verorteten Maßnahmen; Modellergebnisse aus PhosFate.

von erosiven Phosphoreinträge nicht gleichmäßig verteilt. Steile Ackerflächen in Gewässernähe tragen überproportional zu den Phosphoreinträgen bei, vor allem wenn dort erosionsfördernde Kulturen angebaut werden. Üblicherweise liefern in einem Einzugsgebiet ca. 20 % der Ackerflächen etwa 80 % des erosiven Phosphoreintrages. Diese Flächen können mit Hilfe des rasterbasierten Transportmodells PhosFate innerhalb eines Einzugsgebietes als Hotspot ausgewiesen werden. Wenn nun Maßnahmen gesucht werden, mit denen erosive

Einträge mit hoher Effektivität und hoher (Kosten-) Effizienz reduziert werden können, ist deren Verortung im Bereich von Hotspotflächen und dominanten Fließwegen von entscheidender Bedeutung. In Abbildung 5 sind die Effektivität (y-Achse), der Flächenbedarf (x-Achse) und die Flächeneffizienz (Steigung im Diagramm) unterschiedlicher weitergehender Maßnahmen zur Reduktion des Phosphortransportes aus Ackerflächen in die Gewässer unter Annahme einer gezielten Verortung im Vergleich zu Maßnahmen, die derzeit im Rahmen

střednictvím cílené lokalizace opatření, jako jsou ozeleněné odtokové trasy a okrajové pásy kolem vodních toků nebo cest, lze dosáhnout výrazně vyšší účinnosti a tím při stejných nárocích na plochu i mnohem vyšší ekonomické efektivity, než je tomu v současné době u opatření ÖPUL na ochranu povrchových vod (břehové pásy) a půdy ležící ladem se stejnou polohou a účinností jako břehové pásy (červený bod v grafu). Navíc při komplexním provádění těchto opatření existuje zřetelný potenciál pro zvýšení účinnosti při snižování emisí.

Závěry

Ačkoli dosavadní přístupy v rámci Programu rozvoje venkova, respektive v něm zařazeném programu ÖPUL, významně přispěly k redukci znečištění povrchových vod fosforem, jejich účinek v mnoha

případech nedostačuje k dosažení požadovaného stavu vod, takže je nutné vytvářet nové možnosti pro návrh a realizaci dalších opatření. Dosavadní provedené výzkumy ukazují, že nebude stačit zvýšit míru účasti na již vyzkoušených opatřeních, přestože by se měla kvůli svým dopadům v zásadě nadále podporovat. Tato opatření zahrnují ozelenování orné půdy (formou meziplodin nebo stálezelených systémů), mulčování a přímé výsevy a okrajové pásy kolem vodních toků, nepřímo také ekologické zemědělství.

Vzhledem k tomu, že ozelenování, mulčování a přímý výsev nemohou vyrovnat dopady častějšího pěstování plodin podporujících erozi (např. kukuřice, sója), je třeba přijmout opatření, kterými se omezí jejich pěstování. Taková opatření by se ve stávajícím systému snadno administrovala, bez problémů

von ÖPUL ohne gezielte Verortung umgesetzt werden, dargestellt. Es ist ersichtlich, dass durch eine gezielte Verortung von Maßnahmen wie begrünte Abflusswege, Gewässer- oder Straßenrandstreifen eine deutlich höhere Effizienz und damit bei gleichem Flächenbedarf auch eine deutlich höhere Effektivität erreicht werden kann, als es derzeit über in ÖPUL umbesetzten Maßnahmen zum Oberflächengewässerschutz (Gewässerrandstreifen) und Brachflächen, mit Lage und Wirksamkeit wie Gewässerrandstreifen, geschieht (roter Punkt im Diagramm). Zudem ist bei umfassender Umsetzung dieser Maßnahmen noch ein deutliches Potential zu einer gesteigerten Effektivität bei der Emissionsreduktion gegeben.

Schlussfolgerungen

Da die bisherigen Ansätze im Programm zur ländlichen Entwicklung bzw. dem darin eingebetteten ÖPUL zwar einen wichtigen Beitrag leisteten, um Phosphoreinträge in Oberflächengewässer zu vermindern, deren Wirkung aber in sehr vielen Fäl-

len nicht ausreicht um den erwünschten Gewässerzustand zu erreichen, ist es erforderlich neue, zusätzliche Möglichkeiten für die Gestaltung und Umsetzung von Maßnahmen zu schaffen. Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass es nicht genügen wird, die Teilnahmequoten an bereits erprobten Maßnahmen zu erhöhen, auch wenn diese auf Grund ihrer Wirkung prinzipiell weiter gefördert werden sollten. Zu diesen Maßnahmen zählen die Begrünung von Ackerflächen (als Zwischenbegrünung oder System Immergrün), die Mulch- und Direktsaat und die Gewässerrandstreifen, indirekt auch die biologische Wirtschaftsweise.

Da Begrünung, Mulch- und Direktsaat die Auswirkung des vermehrten Anbaus erosionsfördernder Kulturen im Ackerbau nicht wettmachen können, sind Maßnahmen erforderlich, mit der ein Verzicht auf erosionsfördernde Kulturen (z.B. Mais, Soja) erreicht wird. Die Maßnahmen wären im bestehenden System einfach administrierbar, technisch problemlos umsetzbar und ohne nennenswerten Zusatzaufwand kontrollierbar. Sie haben darüber hinaus ein

technicky realizovala a kontrolovala bez významných dalších nákladů. Kromě toho mají i velký potenciál dalších účinků ve srovnání se současným obsahem programů.

Opatření s nejvyšším stupněm efektivity, zejména trvalé ozelenění odtokových oblastí, také zpravidla představují nejsilnější zásahy do způsobu hospodaření, a proto se musí v každém případě cíleně prostorově lokalizovat. Již existující opatření „pobřežních pásů“ sice v zásadě odpovídá tomuto přístupu, ukazuje se však, že tomu, aby se dostavil očekávaný efekt, brání dvě okolnosti. Za prvé není lokalizace opatření dostatečně přesná. Mnohé oblasti by moh-

ly být vynechány, aniž by se snížil dopad opatření, a naopak v nich nejsou zahrnuty významné odtokové oblasti. Za druhé je příliš nízká míra účasti.

Tomu lze čelit pouze integrálním přístupem, který kombinuje definici technických požadavků s místními znalostmi a specifickým lokálním poradenstvím. V takovém integrálním přístupu by sice mohla opatření ÖPUL nadále zaujímat důležité postavení, nový program by však ÖPUL výrazně přesahoval a musel by se realizovat formou místních projektů zahrnujících zemědělce, zainteresované strany (obec, vodohospodářská inspekce, ...), poradenství i vědeckou a technickou podporu.

großes Potenzial für eine zusätzliche Wirkung im Vergleich zu den derzeitigen Programminhalten.

Maßnahmen mit der höchsten Wirksamkeit, insbesondere die dauerhafte Begrünung von Abflussbereichen, stellen in der Regel auch den stärksten Eingriff in die Bewirtschaftung dar und müssen daher jedenfalls gezielt im Raum platziert werden. Die schon bestehende Maßnahme „Gewässerrandstreifen“ verfolgt zwar im Prinzip diesen Ansatz, allerdings haben sich zwei Dinge gezeigt, die verhindern, dass sich die erhoffte Wirkung entfaltet. Zum einen ist die Treffsicherheit der richtigen Lokalisierung der Maßnahme ungünstig. Viele Flächenanteile könnten ausgespart werden, ohne die Maßnahmenwirkung zu verringern, dafür sind we-

sentliche Abflussbereiche nicht erfasst. Zum anderen ist die Teilnahmequote zu gering.

Dem kann nur begegnet werden, indem ein integraler Ansatz verfolgt wird, der die Definition von technischen Anforderungen mit Vor-Ort-Kenntnissen und lokal vorhandenem Wissen sowie einem ortsspezifischen Beratungsansatz kombiniert. In einem integralen Ansatz könnten zwar ÖPUL Maßnahmen einen wichtigen Platz einnehmen, er würde aber über ÖPUL deutlich hinausgehen und müsste als lokales Projekt unter Einbindung von Landwirten, Stakeholdern (Gemeinde, Gewässeraufsicht, ...), Beratung und wissenschaftlich technischer Begleitung erfolgen.

Fosfor v Dolním Rakousku – čísla, data, fakta

Dietmar Moser

Úřad dolnorakouské zemské vlády, odbor vodního hospodářství

Omezení fosforu v povrchových vodách

V Rakousku je limitními hodnotami omezen fosfor v povrchových vodách ve formě PO₄-P; v ČR to je celkový fosfor.

Limity v Rakousku stanoví koncentrace, při kterých lze očekávat, že jde stále ještě o velmi dobrý stav, resp. dobrý ekologický stav; hodnoty musí být dodrženy jako 90 percentil (např. pokud jsou 2 měření ze 12 vyšší, hodnota je překročena).

Limity byly nastaveny v závislosti na

- bioregionu (podhůří Alp – východní nížiny a pahorkatiny atd.)
- velikosti řeky (povodí < 10 až > 1000 km²) a
- nadmořské výšce (< 200 až > 1600 m n.m.)

Podle umístění řeky tak může koncentrace PO₄-P <7 až 70 µg/l znamenat **velmi dobrý stav** a > 15 až 200 µg/l **střední stav**.

Naproti tomu v ČR platí limity pro celkový fosfor s hodnotami 20 až 50 µg/l pro velmi dobrý a 50 až 150 µg/l pro dobrý stav – v závislosti na typu vod (X-1-1-1 až X 4-2-2); limity platí v průměru:

		X-1-1-1 až X-1-2-3	X-2-1-1	X-2-1-2	X-2-1-3	X-2-2-1	X-2-2-2	X-2-2-3	X-3-1-1	X-3-1-2	X-3-1-3	X-3-2-1	X-3-2-2	X-4-1-1 až X-4-2-2
Ukazatel	Stav													
celkový fosfor (µg/l)	VD/D	50	35	35	35	35	35	35	25	25	25	25	25	20
	D/S	150	100	150	150	100	150	150	70	100	150	70	100	50

Phosphor in Niederösterreich – Zahlen, Daten, Fakten

Dietmar Moser

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung

Phosphorbegrenzungen in Oberflächengewässer

In Österreich ist Phosphor in Oberflächengewässern in Form von PO₄-P mit Grenzwerten versehen; in Tschechien der Gesamtposphor.

Die Grenzwerte in AT zeigen die Konzentrationen an, bei denen erwartet werden kann, dass der sehr gute bzw. gute Zustand noch auftritt; die Werte sind als 90 Perzentil einzuhalten (liegen von z.B. 12 Messungen 2 darüber, ist der Wert überschritten).

Festgelegt wurden die Begrenzungen in Abhängigkeit von

- Bioregion (Alpenvorland – östliche Flach- und Hügelländer etc.)
- Größe des Flusses (EZG < 10 bis > 1.000 km²) und
- Höhenlage (< 200 bis > 1.600 m ü.A)

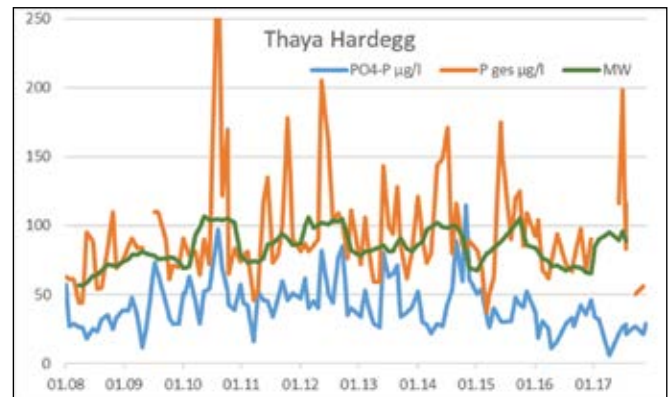
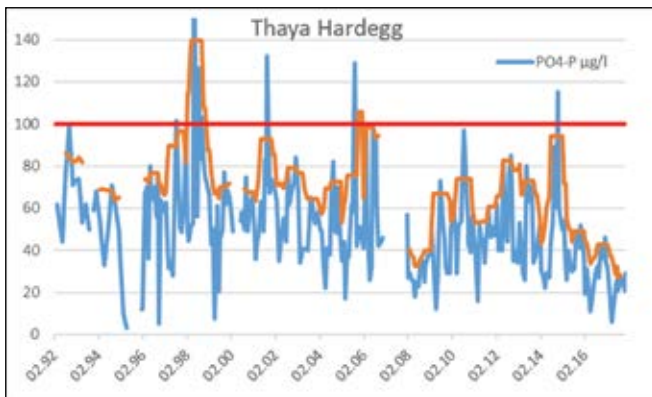
Je nach Lage des Flusses kann somit eine PO₄-P Konzentration von < 7 bis 70 µg/l einen sehr guten und > 15 bis 200 µg/l einen mäßigen Zustand anzeigen.

In Tschechien gibt es demgegenüber Begrenzungen für Gesamtposphor mit Werten von 20 bis 50 µg/l für sehr gut und 50 bis 150 µg/l für gut – je nach Gewässer (X-1-1-1 bis X 4-2-2); die Begrenzungen gelten im Mittel:

		X-1-1-1 bis X-1-2-3	X-2-1-1	X-2-1-2	X-2-1-3	X-2-2-1	X-2-2-2	X-2-2-3	X-3-1-1	X-3-1-2	X-3-1-3	X-3-2-1	X-3-2-2	X-4-1-1 bis X-4-2-2
Ukazatel	Stav													
Ges.-P (µg/l)	SG/G	50	35	35	35	35	35	35	25	25	25	25	25	20
	G/M	150	100	150	150	100	150	150	70	100	150	70	100	50

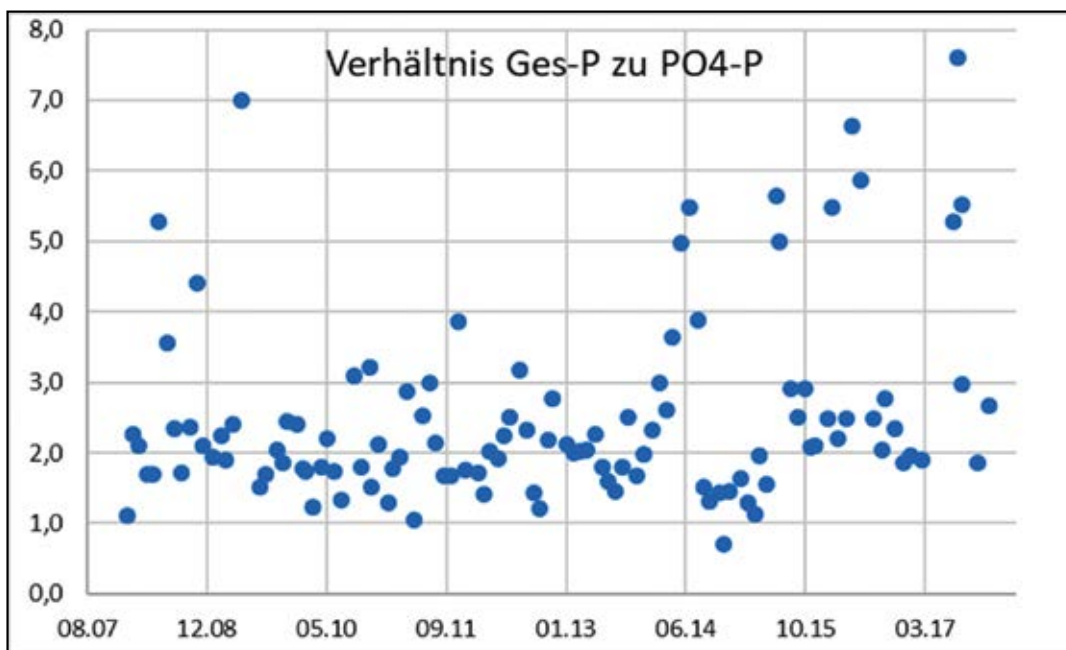
Rozdíl lze ukázat na příkladu Dyje:

Am Beispiel Thaya soll der Unterschied gezeigt werden:



Obr. 1. Koncentrace PO4-P a Pcelk. v Dyji u Hardeggu s 90 percentilem a limitní hodnotou

Abb. 1. PO4-P und Ges.-P Konzentration in der Thaya bei Hardegg mit 90 Perzentil und Grenzwert



Obr. 2. Poměr Pcelk. a PO4-P v Dyji u Hardeggu

Abb. 2. Verhältnis P-Ges und PO4-P in der Thaya bei Hardegg

Oba parametry tedy nejsou navzájem přímo srovnatelné.

Die beiden Parameter sind also nicht direkt miteinander vergleichbar.

Eliminace fosforu v čistírnách odpadních vod

Emise

Požadavky na eliminaci P v komunálních ČOV jsou stanoveny v 1. vyhlášce o komunálních odpadních vodách (AEV).

Bez ohledu na ředění musí čistírny nad 1.000 EO dodržovat v ročním průměru limit 2,0 mg/l Pcelk. (odpovídá přibližně 1,5 mg PO₄-P/l).

Od 5.000 EO je – také bez ohledu na ředění – předepsána limitní hodnota 1,0 mg/l celkového fosforu (cca 0,7 mg/l PO₄-P).

Od 10.000 EO je pro ČOV v povodí vodní nádrže předepsána limitní hodnota 0,5 mg/l Pcelk.

Mezní hodnoty je třeba dodržovat v ročním průměru.

Imise

V Rakousku se při stanovení limitů pro ČOV provádí analýza imisí.

Pokud lze např. pro fosfor předpokládat, že je ohroženo dosažení dobrého stavu, při povolování se uloží přísnější limitní hodnoty, než předepisují emisní vyhlášky (většinou 0,5 mg/l pro ČOV nad 1.000 EO a 1,0 pro ČOV od 500 do 1.000 EO).

Rozložení zatížení

Dolní Rakousko má sice mnoho (více než 5.000) malých a nejmenších ČOV, většina odpadních vod (94 %) je však čištěna ve 185 ČOV nad 2.000 EO (práh směrnice o komunálních odpadních vodách 91/271). 88 % odpadních vod přitéká do ČOV nad 5.000 EO; zde se tedy musí fosfor redukovat na hodnotu 1,0 mg/l Pcelk. Další 9 % připadá na ČOV mezi 1.000 a 5.000 EO, kde musí být v průměru dodržen roční emisní limit 2,0 mg/l. Celkově tak rakouská legislativa nařizuje odstraňovat fosfor z 97 % odpadních vod (bez ohledu na zpřísnění na straně imisí):

Phosphorelimination in Kläranlagen

Emissionen

Die Anforderungen an die P-Elimination von kommunalen Kläranlagen sind in der 1. AEV kommunales Abwasser (Allgemeine Abwasseremissionsverordnung) festgelegt.

Unabhängig von der Verdünnung müssen Kläranlagen ab 1.000 EW einen Grenzwert von 2,0 mg/l Ges.-P im Jahresmittel (entspricht etwa 1,5 mg PO₄-P/l) einhalten.

Ab 5.000 EW ist – ebenfalls unabhängig von der Verdünnung – ein Grenzwert von 1,0 mg/l Gesamt-Phosphor (ca. 0,7 mg/l PO₄-P) vorzuschreiben.

Ab 10.000 EW ist für Kläranlagen im Einzugsgebiet eines Sees ein Grenzwert von 0,5 mg/l Ges.-P vorzusehen.

Die Grenzwerte sind im Jahresmittel einzuhalten.

Immissionen

In AT wird bei der Festlegung der Begrenzungen von Kläranlagen eine Immissionsbetrachtung durchgeführt.

Lässt diese – z.B. – beim Phosphor erwarten, dass die Einleitung den guten Zustand gefährdet, werden bei der Bewilligung strengere Grenzwerte als in den Emissionsverordnungen festgelegt vorgeschrieben (meist 0,5 mg/l bei Anlagen ab 1.000 EW und 1,0 bei Anlagen zwischen 500 und 1.000 EW).

Frachtverteilung

Niederösterreich verfügt zwar über eine Fülle von Klein und Kleinstkläranlagen (mehr als 5.000); der Großteil des Abwassers (94 %) wird aber in den 185 Kläranlagen ab 2.000 EW (Schwelle der kommunalen Abwasserrichtlinie 91/271) gereinigt. 88 % des Abwassers fließt in Kläranlagen über 5.000 EW; hier muss der Phosphor daher auf 1,0 mg/l Ges.-P reduziert werden. Weitere 9 % gelangen in

Kategorie ČOV	Počet		? EO	Kapacita
> 5.000 PE	112	2,2%	3.762.289	88,4%
1.001 - 5.000	136	2,7%	350.840	8,2%
Celkem srážení P	248	5%	4.113.129	97%
101-1.000	279	5,5%	87.567	2,1%
< 10	4.527	89,6%	56.208	1,3%
Celkem D. Rakousko	5.054	100%	4.256.904	100%

Tab 1. Počet ČOV v Dolním Rakousku a množství zde čištěných odpadních vod

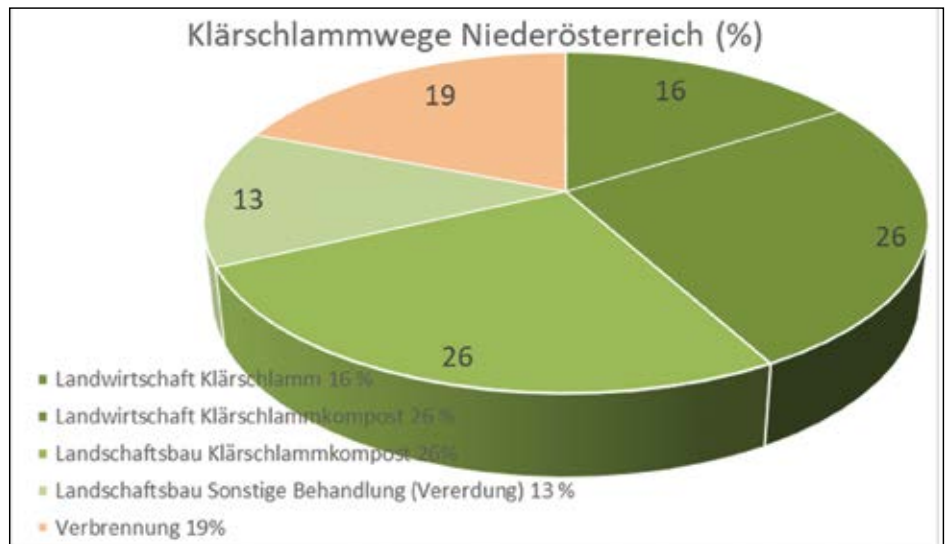
Naměřené míry eliminace fosforu v dolnorakouských ČOV (nad 2.000 EO)

Celkový přítok: 1.250 t P/a
 Celkový odtok: 120 t P/a
 Účinnost: 90 %

Obr. 4. Využití čistírenských kalů v Dolním Rakousku

Legenda shora dolů: kaly v zemědělství; kompostované kaly v zemědělství; kompostované kaly pro terénní úpravy; jinak zpracované kaly pro terénní úpravy; spalování

Abb. 4. Klärschlammwege Niederösterreich



Kläranlagen zwischen 1.000 und 5.000 EW, wo ein Emissionsgrenzwert von 2,0 mg/l im Jahresmittel einzuhalten ist. In Summe wird so durch die österreichische Gesetzgebung in 97 % des Abwassers Phosphor entfernt (ohne Berücksichtigung immisionsseitiger Verschärfungen):

WWTP category	Anzahl		? PE	Kapazität
> 5.000 PE	112	2,2%	3.762.289	88,4%
1.001 - 5.000	136	2,7%	350.840	8,2%
Summe P-Fällung	248	5%	4.113.129	97%
101-1.000	279	5,5%	87.567	2,1%
< 10	4.527	89,6%	56.208	1,3%
Summe NOe	5.054	100%	4.256.904	100%

Tab 1. Anzahl der Kläranlagen in Niederösterreich und dort behandelte Abwasseranfall

3. Fosfor v čistírenských kalech

V Dolním Rakousku ročně vzniká při srážení fosforu přibližně 45.000 tun (suš.) čistírenských kalů s 1.000 t fosforu. To odpovídá přibližně jedné pětině fosfátu aplikovaného v Dolním Rakousku v minerálních hnojivech.

V současné době se více než 80 % komunálních čistírenských kalů v Dolním Rakousku využívá jako zdroj živin, téměř polovina z toho v zemědělství.

Gemessene Eliminationsraten niederösterreichischer Kläranlagen (ab 2.000 EW)

Gesamtzulauf: 1.250 t P/a
 Gesamtablauf: 120 t P/a
 Wirkungsgrad: 90 %

3. Phosphor im Klärschlamm

Durch die Phosphorfällung fallen in Niederösterreich jährlich ca. 45.000 t Klärschlamm (TS) mit 1.000 t Phosphor pro Jahr an. Dies entspricht rund einem Fünftel der in Niederösterreich mit Mineraldünger in Verkehr gebrachten Phosphat-Menge.

Aktuell werden mehr als 80 % der kommunalen Klärschlämme in NÖ als Nährstoffträger genutzt, knapp die Hälfte davon in der Landwirtschaft.

Toto využití je umožněno na základě dolnorakouského zákona o ochraně půd a dolnorakouské vyhlášky o čistírenských kalech a dále vyhlášky o kompostu. Tyto právní předpisy podléhají zásadě předběžné opatrnosti, a proto mají mnohem přísnější limity, než vyžaduje právo EU (Směrnice 86/278/EHS o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství):

Na tomto místě je nutné zmínit, že v Rakousku existují také spolkové země, v nichž je využití kalů z ČOV v zemědělství zakázáno nebo se v současnosti obecně uplatňovaná přímá recyklace přehodnocuje.

4. Fosfor ve vodách

V rámci přípravných prací na 2. Národním vodohospodářském plánu z roku 2015 bylo pomocí modelování (STOBIMO) celostátně vypočteno znečištění vodních toků $\text{NO}_3\text{-N}$ a P. Jako vstupní cesty byly uvažovány

- bodové zdroje (komunální a průmyslové)
- splachy (rozpuštěné látky v povrchovém odtoku)
- eroze (pevné částice v povrchovém odtoku)
- zpevněné urbánní plochy (odlehčovací kanalizace apod.)
- drenáže
- podzemní voda
- atmosférická depozice

Grenzwerte	Zn	Cu	Cr	Pb	Ni	Cd	Hg
EU RL 86/278/EWG	2500 - 4000	1000 - 1750	-	750 - 1200	300 - 400	20 - 40	16 - 25
NÖ KSV	1500	300	70	100	60	2,00	2,00
KS NÖ Median	650	211	34	31	23	0,92	0,53
KS NÖ 90-Perzentil	882	309	55	47	34	1,34	1,32

Tab 3. Koncentrace těžkých kovů v čistírenských kalech - mezní hodnoty a naměřené hodnoty

Tab 3. Schwermetallkonzentrationen im Klärschlamm – Grenzwerte und Messwerte

Die Verwertung erfolgt auf der Grundlage des NÖ Bodenschutzgesetzes und der NÖ Klärschlammverordnung sowie auf Basis der Kompostverordnung. Diese gesetzlichen Vorgaben sind dem Vorsorgeprinzip verpflichtet und weisen daher deutlich strengere Begrenzungen auf als nach EU-Recht erforderlich (Richtlinie 86/278/EWG über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft):

Nicht unerwähnt werden soll an dieser Stelle, dass es auch in Österreich Bundesländer gibt, in denen die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

verboten ist bzw. generell die derzeit praktizierte Direktverwertung überdacht wird.

4. Phosphor im Gewässer

Im Rahmen der Vorarbeiten zum 2.NGP 2015 wurden mittels Modellierung (STOBIMO) die $\text{NO}_3\text{-N}$ und P-Belastung von Fließgewässern flächendeckend berechnet. Als Eintragspfade berücksichtigt wurden dabei

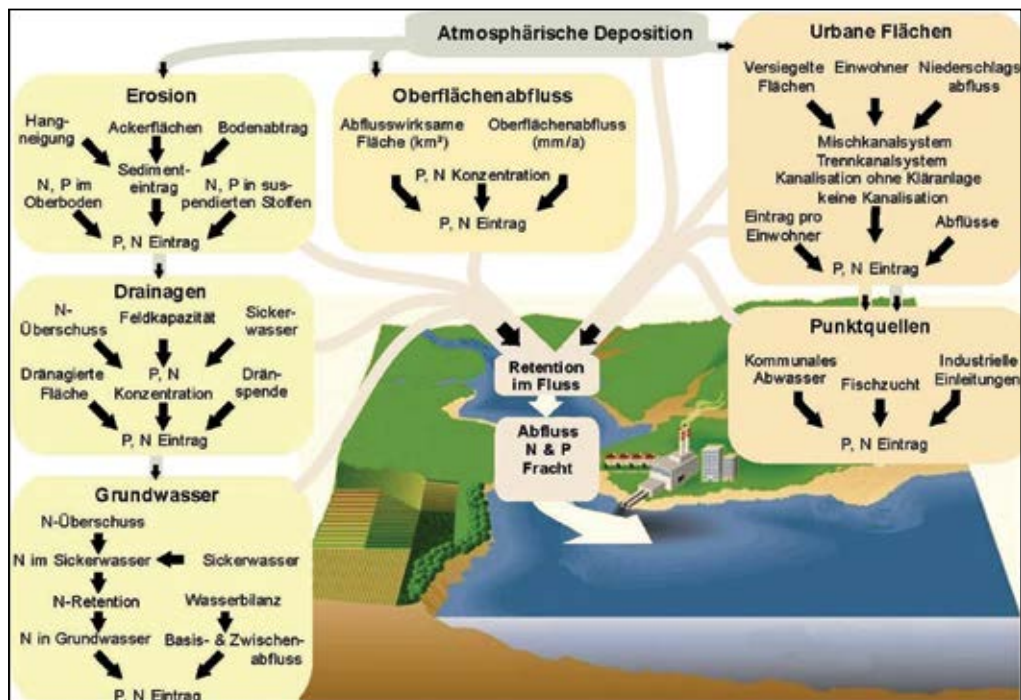
- Punktquellen (kommunal und industriell)
- Abschwemmungen (gelöster Eintrag über den

Podle těchto odhadů se v Dolním Rakousku dostává do vodních toků ročně 900 t fosforu – z toho podíl komunálních ČOV činí výše uvedených 120 t.

Dipl.-Ing. Dr. Dietmar Moser

Úřad dolnorakouské zemské vlády
odbor vodního hospodářství
Landhausplatz 1
A – 3109 St. Pölten
tel.: +43/2742/9005 - 14633
e-mail: dietmar.moser@noel.gv.at

Obr. 4. Vstupní cesty dusíku a fosforu do povrchových vod
Abb. 4. Eintragspfade für Stickstoff und Phosphor
in Oberflächengewässer



- Oberflächenabfluß
- Erosion (partikelgebundener Eintrag über den Oberflächenabfluß)
- Versiegelte, urbane Flächen (MW-Entlastungen etc.)
- Dränagen
- Grundwasser
- Atmosphärische Deposition

Nach diesen Abschätzungen gelangen in Niederösterreich etwa 900 t Phosphor pro Jahr in Fließgewässer – der Anteil der kommunalen Kläranlagen daran liegt bei den vorhin genannten 120 t.

Dipl.-Ing. Dr. Dietmar Moser

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung
Abteilung Wasserwirtschaft
Landhausplatz 1
A – 3109 St. Pölten
Tel.: +43/2742/9005 - 14633
Email: dietmar.moser@noel.gv.at



Technologické možnosti znovuvyužití fosforu z čistírenských kalů a jejich odraz v české praxi

Šárka Václavková, Michal Šyc

Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., vaclavkova@icpf.cas.cz

Souhrn

Komunální odpadní vody a kaly z jejich čištění obsahují významné množství fosforu. Vzhledem ke zvyšující se spotřebě fosforu především pro výrobu hnojiv a omezeným světovým zásobám apatitu jsou stále aktuálnější snahy o znovuzískávání fosforu z odpadních zdrojů jako je odpadní voda a čistírenský kal. Příspěvek nastíní základní principy, možnosti i úskalí vyvíjených i provozovaných technologií pro znovuzískávání fosforu z těchto odpadů. Příspěvek dále nastíní odraz technologického i legislativního vývoje v okolních státech v české praxi.

Úvod

Čistírenský kal, hlavní odpad z čištění odpadních vod reflektuje svým složením vrůstající rozmani-

tost znečištění odpadních vod a rostoucí nároky na kvalitu přečištěných vod z čistíren. V komunálním čistírenském kalu je tak zachycována řada nutrientů, jako jsou dusík, uhlík a zejména fosfor, což je prvek nezbytný pro zdravý růst rostlin i člověka. Primárním zdrojem fosforu pro zemědělské využití je fosfátová ruda apatit, jejíž významnější ložiska se v Evropě nenacházejí, a proto je fosfor zařazený na seznamu kritických komodit EU. Většina fosforu pro výrobu fosforečných hnojiv se dováží z Maroka, Sýrie nebo Číny. Dle dostupných dat mohou čistírenské kaly pokrýt asi čtvrtinu roční spotřeby fosforu pro zemědělství. Kromě nutrientů je ale v kalech zachycována i řada kontaminantů včetně patogenních mikroorganismů, zbytků léčiv, produktů denní péče (kosmetika, drogerie) a toxických kovů, které se do komunálních čistírenských kalů dostávají spolu s dočišťovanými průmyslovými odpadními vo-

Technologische Möglichkeiten der Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm und deren Resonanz in der tschechischen Praxis

Šárka Václavková, Michal Šyc

Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., vaclavkova@icpf.cas.cz

Resümee

Kommunalabwasser und -klärschlämme enthalten eine bedeutende Phosphormenge. Angesichts des wachsenden Phosphorverbrauchs insbesondere für die Düngerproduktion und der begrenzten weltweiten Apatit-Vorräte sind die Bemühungen um Phosphorrückgewinnung aus Abfallquellen wie Abwasser und Klärschlamm immer dringender. Der Beitrag präsentiert grundlegende Prinzipien, Möglichkeiten und Fallstricke von entwickelten und betriebenen Verfahren zur P-Rückgewinnung aus diesen Abfällen. Außerdem beschreibt er, wie die tschechische Praxis technologische und rechtliche Entwicklungen in den Nachbarländern reflektiert.

Einleitung

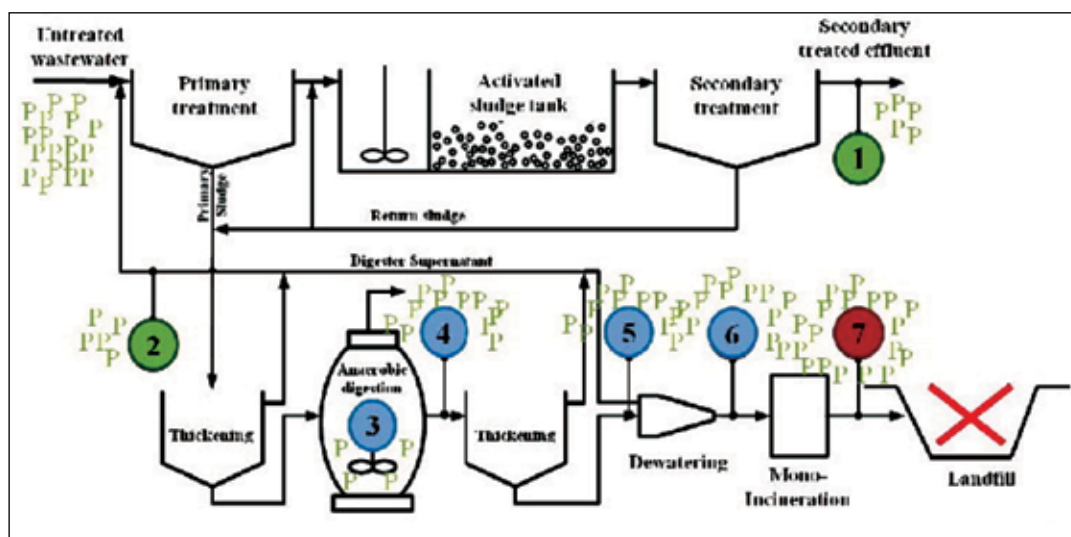
Klärschlamm, der wichtigste Abfall aus der Abwasseraufbereitung, reflektiert mit seiner Zusammensetzung die zunehmende Vielfalt der Abwasserverschmutzung und die steigenden Ansprüche auf die Qualität von in Kläranlagen gereinigtem Wasser. Im kommunalen Klärschlamm werden zahlreiche Nährstoffe wie Stickstoff, Kohlenstoff und insbesondere Phosphor aufgefangen, ein Element, das für ein gesundes Pflanzen- und Menschenwachstum unerlässlich ist. Die primäre Phosphorquelle für landwirtschaftliche Zwecke ist das Phosphaterz Apatit, dessen Lagerstätten in Europa kaum vorkommen. Phosphor wurde daher auf die EU-Liste der kriti-

dami, či uvolňováním kovů z potrubních tras. Právě přítomnost těchto kontaminantů významně snižuje vhodnost přímého využití kalů na zemědělských půdách, jež je doposud nejrozšířenějším způsobem využití fosforu z kalů. To je také reflektováno v legislativě některých evropských států, kdy v reakci na přítomnost kontaminantů dochází ke zpřísnování podmínek, za jakých je možno kal na zemědělské půdy aplikovat. Pro využití fosforu z čistírenských kalů je tedy třeba hledat vhodné metody zpracová-

ní, které dokážou reflektovat jak ekonomické tak environmentální požadavky.

Technologické možnosti pro znovuvyužití fosforu

Obrázek č. 1 demonstruje pohyb toku fosforu v průběhu čištění odpadních vod. V souladu s tímto pohybem lze fosfor z komunální odpadní vody principálně získávat:



Obr. 1. Pohyb toku fosforu v průběhu čištění odpadních vod s vyznačením významných toků vhodných pro získávání fosforu: (1) odtok po sekundárním čištění, (2) kalová voda, (3-6) čistírenský kal, (7) produkt zpracování čistírenského kalu [Egle et al. 2016]

Abb. 1. Bewegung des Phosphorstroms während der Abwasserreinigung mit Kennzeichnung der für die Phosphorgewinnung relevanten Ströme: (1) Ablauf von der Nachreinigung, (2) Schlammwasser, (3-6) Klärschlamm, (7) Klärschlammprodukt [Egle et al. 2016]

schon Rohstoffe gesetzt. Der meiste Phosphor für die Herstellung von Phosphatdüngemitteln wird aus Marokko, Syrien oder China importiert. Den verfügbaren Daten zufolge könnte Klärschlamm etwa ein Viertel des jährlichen Phosphorverbrauchs in der Landwirtschaft decken. Neben Nährstoffen werden jedoch auch zahlreiche Verunreinigungen einschließlich pathogener Mikroorganismen, Arzneimittelrückstände, Tagespflegeprodukte (Kosmetik, Drogerie) sowie toxischer Metalle in kommunalem Klärschlamm aufgefangen, die mit nachgereinigten industriellen Abwässern oder durch Metallfreisetzung aus Rohrleitungen darin gelangen. Das Vorhandensein dieser Verunreinigungen verringert erheblich die Eignung der direkten Klärschlammausbringung auf Agrarböden, der bisher am weitesten verbreiteten Verwertung von Phosphor aus Klärschlamm. Dies wird auch in Rechtsvorschrift-

ten einiger europäischer Länder reflektiert, wo die Bedingungen, unter denen Klärschlamm auf Agrarflächen ausgebracht werden kann, in Bezug auf Schadstoffe verschärft werden. Für die Verwertung von Phosphor aus Klärschlamm müssen daher geeignete Behandlungsmethoden gesucht werden, die sowohl wirtschaftlichen als auch ökologischen Anforderungen Rechnung tragen würden.

Technologische Möglichkeiten der Wiederverwendung von Phosphor

Die Abbildung Nr. 1 zeigt die Bewegung des Phosphorstroms während der Abwasserreinigung. Anhand dieser Bewegung kann Phosphor prinzipiell auf folgende Weisen aus Kommunalabwasser gewonnen werden:

- přímo z odpadní vody,
- z kalové vody,
- z odtoku po sekundárním čištění,
- z čistírenského kalu a produktů jeho úpravy.

V současné době je vyvinuto přes 50 metod, jež technologicky umožňují využití fosforu z odpadních vod a čistírenských kalů. Stručný přehled těch nejvýznamnějších a uvádí Obrázek č. 2.

Z odtoku po sekundárním čištění a kalové vody je možné fosfor získávat ve formě struvitu srážením amonnými činidly. Tzv. struvitickým srážením lze získat čistý produkt s vysokou biodostupností fosforu, který lze aplikovat přímo na zemědělské půdy. Problémem těchto technologií je jejich nízká účinnost (max. přibližně 30 %). Technologie založené na struvitickém srážení (např. AirPrex, NuReSys, Pearl, PhosphoGREEN, PHOSPAQ), jsou dnes postupně instalovány na zařízení čistíren zejména v zemích, jako je Německo, Nizozemí, Velká Británie, Dánsko či Belgie.

- direkt aus Abwasser
- aus Schlammwasser
- am Ablauf von der Nachreinigung
- aus Klärschlamm und den Produkten seiner Behandlung.

Derzeit sind über 50 technische Verfahren entwickelt, welche die Phosphor-Rückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm ermöglichen. Eine Übersicht der wichtigsten von ihnen zeigt die Abbildung Nr. 2.

Vom Ablauf nach der Nachreinigung und von Schlammwasser kann Phosphor in Form von Struvit durch Fällung mit Ammoniumreagenzien gewonnen werden. Durch die sogenannte Struvitfällung kann ein reines Produkt mit hoher Bioverfügbarkeit von Phosphor entstehen, das direkt auf Agrarböden aufgebracht werden kann. Problematisch ist bei diesen Verfahren ihr niedriger Wirkungsgrad (max. ca. 30 %). Die auf Struvitfällung basierenden Verfahren (z.B. AirPrex, NuReSys, Pearl, PhosphoGREEN, PHOSPAQ) werden heutzutage insbesondere in Ländern wie Deutschland,

Z mokrého či odvodněného **čistírenského kalu** je fosfor získáván obvykle metodami založenými na kyselé extrakci s následnou separací fosforečného produktu a těžkých kovů. V poslední době pak vzrůstá zájem o hydrotermální úpravy kalů. Technologie termální hydrolýzy je dnes v zahraničí (zejména ve Velké Británii) běžně využívána pro předúpravu kalů před stabilizací anaerobní digesce, s cílem zvýšit výtěžnost bioplynu, čehož je dosaženo rozložením organických molekul (jednodušších cukrů, tuků i některých proteinů) na jednodušší organické řetězce, které jsou pak náchylnější ke konverzi na bioplyn v průběhu anaerobní digesce. Nevýhodou těchto technologií je potřeba velkých zařízení a tudíž technologická komplikovanost celého procesu. Nadto jsou v komunálním čistírenském kalu přítomny i vysokomolekulární organické látky (např. zbytky léčiv), pro jejichž rozklad na jednodušší řetězce je třeba „drsnějších podmínek“ jako je např. využití vyšší teploty a odpovídajícího tlaku. V případě rozložení veškerých organických látek, by výtěžnost fosforu mohla dosahovat až 90 %.

Niederlande, Großbritannien, Dänemark und Belgien in Kläranlagen schrittweise installiert.

Aus nassem oder entwässertem **Klärschlamm** wird Phosphor üblicherweise durch Verfahren gewonnen, die auf einer Säureextraktion mit anschließender Trennung des Phosphorproduktes von Schwermetallen basieren. Neuerlich wächst das Interesse an der hydrothermalen Schlammbehandlung. Heutzutage wird die thermische Hydrolyse im Ausland (insbesondere in Großbritannien) üblicherweise zur Schlammvorbehandlung vor der Stabilisierung der anaeroben Vergärung eingesetzt, um die Biogasausbeute zu erhöhen, was durch den Abbau organischer Moleküle (einfachere Zucker, Fette und einige Proteine) zu einfacheren organischen Ketten erzielt wird, die dann bei anaerober Vergärung besser zur Umwandlung in Biogas neigen. Der Nachteil dieser Verfahren ist die Größe der Anlagen und damit die technologische Komplexität des gesamten Prozesses. Darüber hinaus sind in kommunalem Klärschlamm auch hochmolekulare organische Substanzen (z.B. Arzneimittelrückstände) enthalten, für deren Zerlegung in einfachere

Žádná z těchto metod však zatím není průmyslově využívána.

Další variantou je využití **produktů úpravy čistírenských kalů** jako suroviny pro získání fosforu. Při spalování dojde k destrukci veškerých organických látek, k zakoncentrování fosforu do pevného zbytku (popelé) a významné objemové redukci (až 90 %) i hmotnostní redukci (cca 50 %) zpracovávaného materiálu. Získaná matrice má minerální charakter a je tedy možno ji uchovat pro pozdější využití. Fosfor se při spalování chová velmi stabilně, při teplotě 1000°C zůstává většina fosforu v popelu, navíc může fosfor při spalování působit pozitivně proti průběhu aglomeračních procesů, neboť tvoří s Ca, K, či Mg stabilní fosforečnany. Pro recyklaci fosforu je nezbytné ovšem mono-spalování kalů tj. spalování bez přídavku jiného paliva. V současné době je v Evropě spalováno cca 35 % čistírenských kalů a význam tohoto zpracování postupně roste a to zejména v zemích, které již s využitím principu předběžné opatrnosti legislativně zcela zakázaly přímou

zemědělskou aplikaci čistírenských kalů (např. Rakousko, Německo, Nizozemí či Švýcarsko). Tyto země souběžně zavádějí povinnost v budoucnu fosfor z komunálních čistírenských kalů vyprodukovaných na větších čistírnách odpadních vod získávat. Komunální čistírenský kal je zde většinou spalován, přičemž popel je často uchován pro budoucí recyklaci fosforu. V ČR však žádné zařízení na mono-spalování čistírenských kalů není.

V popelu po spalování komunální čistírenských kalů je typický obsah fosforu (přepočtený jako P_2O_5) běžně 11–25 hm. %. Nejčastěji se vyskytuje ve formě $Ca_3(PO_4)_2$ či $AlPO_4$ nebo $FePO_4$. Velký rozptyl obsahu fosforu v popelu je dán složením kalu, kde hlavní vliv mají sezónní výkyvy a charakter čistírny odpadních vod (typ a její lokalita). Poměr přítomných fosforečnanů je závislý na technologii odstraňování fosforu na čistírně odpadních vod. V České Republice, kde je fosfor běžně chemicky srážen pomocí síranu železitého nebo hlinitého lze očekávat vysoký obsah $AlPO_4$ nebo $FePO_4$ v případném po-

Ketten „rauere Bedingungen“ wie höhere Temperatur und entsprechender Druck erforderlich sind. Bei der Zerlegung sämtlicher organischer Substanzen könnte die Phosphorausbeute bis zu 90 % erreichen. Keines dieser Verfahren wird jedoch bisher industriell eingesetzt.

Eine andere Variante ist die Verwertung von **Klärschlammprodukten** als Rohstoff zur Phosphorergewinnung. Bei der Schlammverbrennung werden alle organischen Substanzen zerlegt, Phosphor konzentriert sich im festen Rückstand (Asche), und bei dem verarbeiteten Stoff verringert sich signifikant sowohl sein Volumen (um bis zu 90 %) als auch seine Masse (um ca. 50 %). Die erhaltene Matrix hat einen mineralischen Charakter und kann daher zu einer späteren Verwendung aufbewahrt werden. Phosphor verhält sich bei der Verbrennung sehr stabil, bei 1000 °C verbleibt er größtenteils in der Asche, außerdem kann er den Agglomerationsprozessen während der Verbrennung entgegenwirken, da er mit Ca, K oder Mg stabile Phosphate bildet. Für die P-Wiederverwendung ist jedoch eine Monoverbrennung von Schlamm erforderlich, d.h.

Verbrennung ohne Zusatz von einem anderen Brennstoff. Gegenwärtig werden in Europa etwa 35 % des Klärschlammes verbrannt, und die Bedeutung dieser Behandlung nimmt allmählich zu, insbesondere in den Ländern, die nach dem Vorsorgeprinzip den direkten landwirtschaftlichen Einsatz von Klärschlamm bereits gesetzlich verboten haben (z.B. Österreich, Deutschland, Niederlande, Schweiz). Parallel dazu führen diese Länder die Verpflichtung ein, in größeren Kläranlagen künftig Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen zu gewinnen. Der kommunale Klärschlamm wird hier in den meisten Fällen verbrannt, wobei die Asche häufig für die künftige P-Rückgewinnung aufbewahrt wird. In Tschechien gibt es jedoch keine Anlage zur Monoverbrennung von Klärschlamm.

Der typische Phosphorgehalt (berechnet als P_2O_5) in der Asche nach der Verbrennung von kommunalem Klärschlamm beträgt normalerweise 11–25 Ma%. Am häufigsten kommt er in Form von $Ca_3(PO_4)_2$ oder $AlPO_4$ bzw. $FePO_4$ vor. Die große Streuung des Phosphorgehalts in der Asche ergibt sich aus der Klärschlammzusammensetzung, beeinflusst

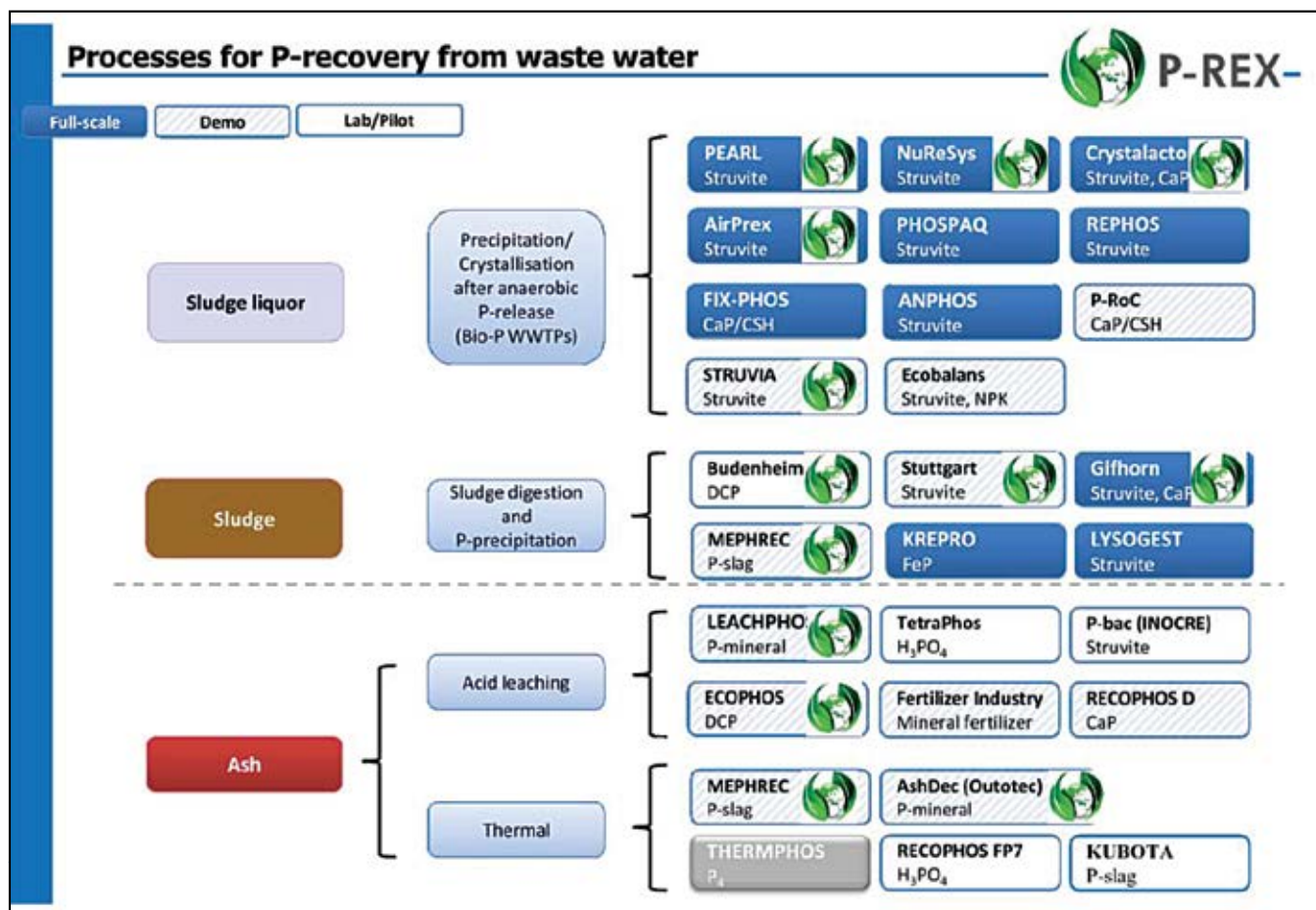
pelu po spálení čistírenských kalů. Právě přítomnost AlPO_4 a FePO_4 je pak ztěžuje zemědělské využití přítomného fosforu, jelikož takto vázaný fosfor mohou plodiny zpracovat jen částečně. Další nutriční hodnotu popelu pak zajišťují i CaO (12–20 %), K_2O (0,5–3 %), MgO (1,0–2,5 %) a NaO (pod 1 %). Běžná fosforečná hnojiva obsahují okolo 18 % P_2O_5 , některá vícesložková pak jen 9–12 % P_2O_5 . Pro srovnání P-hnojivo super fosfát obsahuje 18–20 % P_2O_5 , vícesložková PK- či NPK-hnojiva obsahují 5–12 % P_2O_5 . Obsah dalších (minoritních) prvků v popelu je velmi variabilní a závisí na charakteru čistěných vod a rozsahu industriálních aktivit v místě. Běžně přítom popel po spalování čistírenských kalů obsahuje řadu toxických kovů (As, Cd, Cr, Ni, Pb či Zn), jež brání jeho přímému využití jako zemědělského zdroje fosforu. Pro zemědělské využití fosforu je tak nutná sekundární technologická úprava popela po spalování čistírenských kalů, která zajistí dostatečnou separaci fosforu a těžkých kovů. Pro sekundární technologickou úpravu popele jsou zpravidla využívány hydrometalurgické nebo pyrometalurgické metody. Při hydrometalurgické úpravě je chemicky

nebo biologicky vázaný fosfor loužen z popele za pomoci silné kyseliny nebo zásady, přičemž loužením pomocí kyseliny lze docílit vyšší účinnosti loužení. Zároveň však do loužičího roztoku přechází i těžké kovy a hliník či železo, které musejí být z roztoku následně odstraněny. Právě tento krok je technologicky nejnáročnější a obvykle zahrnuje kombinaci metod jako je selektivní srážení, iontová výměna, nanofiltrace, apod. Z vyvíjených procesů je v průmyslovém měřítku využit pouze proces EcoPhos® v němž je fosfor získáván ve formě kyseliny fosforečné. Při pyrometalurgické úpravě je fosfor separován od těžkých kovů na principu rozdílné těkavosti, za teplot obvykle přesahujících 1000 °C. Těkavé kovy (např. Cd, Hg, Pb, Zn) se za vysokých teplot odpaří a následně z popele prostřednictvím plynné fáze odcházejí. Je-li pracovní teplota zařízení pod teplotou tavení popela, méně těkavé kovy (např. Fe, Cu, Cr, Ni) se koncentrují v popelu spolu s fosforem. Při teplotě přesahující teplotu tavení popela se méně těkavé kovy nacházejí ve formě kovové taveniny, zatímco fosfor je koncentrován v pevné minerální strusce. S ohledem na vysokou energetickou nároč-

vor allem durch saisonale Schwankungen und den Charakter (Typ und Standort) der Kläranlage. Das Verhältnis der vorhandenen Phosphate hängt von der Technologie der Phosphorelimination in der Kläranlage ab. In Tschechien, wo Phosphor üblicherweise mit Eisen- oder Aluminiumsulfat chemisch ausgefällt wird, ist in der Asche nach der Klärschlammverbrennung ein hoher Gehalt an AlPO_4 oder FePO_4 zu erwarten. Eben das Vorhandensein von AlPO_4 und FePO_4 macht die landwirtschaftliche Verwendung des vorliegenden Phosphors schwierig, da Pflanzen auf diese Weise gebundenen Phosphor nur teilweise verarbeiten können. Weitere Nährwerte der Asche liefern auch CaO (12–20 %), K_2O (0,5–3 %), MgO (1,0–2,5 %) und NaO (unter 1 %). Zum Vergleich: P-Dünger Superphosphat enthält 18–20 % P_2O_5 , mehrkomponentige PK- oder NPK-Dünger 5–12 % P_2O_5 . Der Gehalt an anderen (Minoritäts-) Elementen in Asche ist sehr variabel und hängt vom Charakter gereinigter Abwässer und dem Umfang der lokalen industriellen Aktivitäten ab.

Üblicherweise enthält die Klärschlammasche eine Anzahl toxischer Metalle (As, Cd, Cr, Ni, Pb oder Zn), die ihre direkte Verwendung als Phosphorquelle für die Landwirtschaft verhindern.

Für die landwirtschaftliche Verwendung von Phosphor ist daher eine sekundäre technologische Behandlung der Klärschlammasche erforderlich, die eine ausreichende Trennung von Phosphor und Schwermetallen gewährleistet. Zu dieser sekundären technologischen Behandlung von Asche werden in der Regel hydrometallurgische oder pyrometallurgische Verfahren verwendet. Bei der hydrometallurgischen Behandlung wird chemisch oder biologisch gebundener Phosphor mithilfe einer starken Säure oder Base aus der Asche ausgelaugt, wobei das saure Auslaugen zu einer höheren Laugungsausbeute führen kann. Gleichzeitig gelangen allerdings Schwermetalle und Aluminium oder Eisen in die Laugungslösung, woher sie dann entfernt werden müssen. Dieser Schritt ist technisch der anspruchsvollste und umfasst üblicherweise eine



Obr. 2. Přehled nevýznamnějších metod umožňujících využití fosforu z odpadních vod, čistírenských kalů a produktů jejich spalování [Adam et al. 2015].

*Technologie STRUVIA a ECOPHOS jsou dnes již využívány v průmyslovém měřítku.

Abb. 2. Übersicht der wichtigsten Verfahren, welche die P-Rückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlamm-Verbrennungsprodukten ermöglichen [Adam et al. 2015].

* Die Verfahren STRUVIA und ECOPHOS werden heute bereits industriell eingesetzt.

Kombination von Verfahren wie selektive Ausfällung, Ionenaustausch, Nanofiltration usw. Von den entwickelten Verfahren wird nur der EcoPhos®-Prozess, bei dem Phosphor in Form von Phosphorsäure rückgewonnen wird, im industriellen Maßstab eingesetzt. Bei der pyrometallurgischen Behandlung wird Phosphor bei üblicherweise über 1000 °C liegenden Temperaturen nach dem Prinzip der unterschiedlichen Flüchtigkeit von Schwermetallen getrennt. Flüchtige Metalle (z.B. Cd, Hg, Pb, Zn) verdampfen bei hohen Temperaturen und verlassen in der Gasphase die Asche. Solange die

Betriebstemperatur unter dem Schmelzpunkt der Asche liegt, konzentrieren sich weniger flüchtige Metalle (z. B. Fe, Cu, Cr, Ni) zusammen mit Phosphor in der Asche. Bei einer Temperatur über dem Schmelzpunkt der Asche liegen weniger flüchtige Metalle in Form einer Metallschmelze vor, während Phosphor sich in einer festen Mineralschlacke konzentriert. Angesichts des hohen Energieaufwands und der aktuellen Apatit-Preise sind diese Methoden der Phosphor-Rückgewinnung nicht wirtschaftlich wettbewerbsfähig und werden daher noch nicht industriell eingesetzt.

nost a současnou cenu apatitu nejsou tyto procesy získávání fosforu ekonomicky konkurenceschopné, a proto zatím nejsou průmyslově využívány.

Odras technologických možností v legislativě a praxi

Na rozdíl od Německa, Rakouska či Švýcarska jde Česká Republika prozatím pro producenty kalů shovívavější cestou postupného zpřísnování limitů pro množství patogenních mikroorganismů, toxických kovů a některých typů organických látek, při jejichž splnění je možné kal aplikovat na zemědělské půdy k tomu vhodné, jejichž charakteristika a databáze je dostupná na adrese <https://kaly.vumop.cz/>. S kalem, který nesplní limity pro aplikaci na zemědělské půdy, se dále nakládá v souladu se zákonem č. 223/2015 Sb. o odpadech, přičemž takovým nakládáním může být i jeho skládkování. Aby bylo v budoucnosti možné využít v zemědělství fosfor i z čistírenských kalů, které nesplní podmínky výše zmíněných vyhlášek, bude nutné nevyhovující

čistírenský kal dále technologicky upravit. V České republice však zatím neexistují jasná pravidla, která by upravovala podmínky, za jakých by mohly být produkty vzniklé úpravou čistírenských kalů využity jako zdroj fosforu v zemědělství. Prvním krokem k tomu, aby takové podmínky mohly být vytvořeny, je zmapování kvality produkovaných čistírenských kalů. Náš projekt „Možnosti využití čistírenských kalů jako sekundárního zdroje fosforu v ČR“ mapuje potenciál kalů z čistíren odpadních vod v České republice z hlediska možností recyklace fosforu v nich obsaženého. Cílem projektu je vypracování ucelené datové základny formou studie mapující složení kalů, zejména obsah fosforu a míru kontaminace těžkými kovy na typově různých ČOV v ČR, přičemž je uvažován vliv typu sběrné oblasti i použité technologie na kvalitu produkovaného kalu. Z předběžných výsledků naší studie vyplývá, že při české produkci kalů (přesahující 170 tis. tun sušiny ročně) a při uvažování spodní hranice zjištěného obsahu fosforu, je v ČR ročně jen v kalech vyprodukováno minimálně 3 500 tun odpadního

Resonanz technologischer Möglichkeiten in Gesetzgebung und Praxis

Anders als Deutschland, Österreich und die Schweiz wählt die Tschechische Republik bisher einen gegenüber den Klärschlammproduzenten duldsameren Weg der allmählichen Verschärfung der Grenzwerte für pathogene Mikroorganismen, toxische Metalle und einige Typen organischer Substanzen, bei deren Einhaltung Klärschlamm auf geeignete Agrarflächen aufgebracht werden darf, deren Charakteristik und Datenbank unter <https://kaly.vumop.cz/> aufrufbar ist. Klärschlamm, der die Anwendungsgrenzen für landwirtschaftliche Verwendung nicht erfüllt, wird gemäß Abfallgesetz Nr. 223/2015 Slg. weiter behandelt, wobei diese Behandlung auch das Deponieren umfasst. Um Phosphor aus Klärschlämmen, welche die Bedingungen der vorgenannten Verordnungen nicht erfüllen, in der Landwirtschaft künftig verwenden zu können, muss der mangelhafte Klärschlamm weiter technologisch behandelt werden. In Tschechien gibt es je-

doch bisher keine klaren Regeln über Bedingungen, unter denen Klärschlammprodukte als Phosphorquelle für die Landwirtschaft verwendet werden können. Der erste Schritt zur Entwicklung solcher Bedingungen besteht darin, die Qualität der erzeugten Klärschlämme zu ermitteln. In unserem Projekt „Verwertungsmöglichkeiten von Klärschlamm als sekundäre Phosphorquelle in Tschechien“ wird das inländische Klärschlammpotenzial hinsichtlich der Verwertung des darin enthaltenen Phosphors kartiert. Das Ziel des Projekts ist die Erarbeitung einer umfassenden Datenbasis in Form einer Studie, welche die Zusammensetzung des Klärschlammes, insbesondere den Phosphorgehalt und den Schwermetallbelastungsgrad, bei verschiedenen Typen von Kläranlagen in Tschechien darstellt, unter Berücksichtigung der Einflüsse der Art des Sammelgebietes sowie der verwendeten Verfahren auf die Qualität des produzierten Klärschlammes.

Aus vorläufigen Ergebnissen unserer Studie geht hervor, dass bei der tschechischen Klärschlamm-

fosforu (P). Při průměrné spotřebě cca 6,5 kg P na hektar orné půdy to znamená dostatek fosforu pro obdělání minimálně 18% orných půd v ČR. Při využití kalu by tak bylo možné významně snížit závislost ČR na dovozu minerálních zdrojů fosfor. Před potenciálním zemědělským využitím je však třeba vzít v úvahu znečištění kalů těžkými kovy. Zejména koncentrace As a Pb stojí za pozornost, jelikož v některých případech převyšují množství povolené v materiálech vhodných na zemědělské využití. U znečištění As, Ni a Pb je pak vidět, že jejich koncentrace v sušině narůstají s rostoucí kapacitou ČOV. Tento fenomén pravděpodobně souvisí s nárůstem velikosti aglomerace, z níž je voda na ČOV zpracovávána, což sekundárně souvisí jednak s podílem průmyslových odpadních vod dočišťovaných na komunální ČOV a jednak s délkou potrubní sítě k ČOV vedoucí.

produktion (über 170.000 Tonnen Trockensubstanz pro Jahr) und unter Einbeziehung der unteren Grenze des ermittelten Phosphorgehalts mindestens 3.500 Tonnen Abfallphosphor (P) pro Jahr nur im Klärschlamm in Tschechien produziert werden. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von etwa 6,5 kg P pro Hektar Ackerland bedeutet es eine ausreichende Phosphormenge für den Anbau auf mindestens 18 % des inländischen Ackerlands. Durch die Klärschlammverwertung könnte die Abhängigkeit der Tschechischen Republik vom Import phosphorhaltiger Mineralstoffe erheblich verringert werden. Vor einer potenziellen landwirtschaftlichen Nutzung ist allerdings die Schwermetallbelastung der Klärschlämme zu betrachten. Insbesondere die As- und Pb-Konzentration ist erwähnenswert, da sie in einigen Fällen die für die landwirtschaftliche Nutzung zulässige Menge überschreitet. Bei der As-, Ni- und Pb-Belastung ist offensichtlich, dass ihre Konzentrationen in der Trockensubstanz mit der zunehmenden Kläranlagenkapazität ansteigen. Dieses Phänomen ist wahrscheinlich mit der wach-

Poděkování

Práce vznikla v rámci projektu „Strategické partnerství pro environmentální technologie a produkci energie“ č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008413 a projektu „Možnosti využití čistírenských kalů jako sekundárního zdroje fosforu v ČR“ č. TJ01000074.

Literatura

- [1] Adam, C.; Herzel, H.; Remy, C.; Kabbe, C. Phosphate Recycling – Options and Efficacy. In Life+ Conference “Resource recovery and water protection” Phosphate; Skellefteå, Sweden, 2015.
- [2] Bundes-Abfallwirtschaftsplan, Austria, 2017.
- [3] Donatello S., Tong D., Cheeseman C.R. Production of technical grade phosphoric acid from

senden Größe des Ballungsraumes bedingt, dessen Abwasser in der jeweiligen Kläranlage aufbereitet wird, was sekundär mit dem Anteil von nachgeklärten Industrieabwässern und mit der Länge des angeschlossenen Rohrleitungsnetzes zusammenhängt.

Danksagung

Die Arbeit entstand im Rahmen der Projekte „Strategische Partnerschaft für Umwelttechnologien und Energieerzeugung“ Nr. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008413 und „Verwertungsmöglichkeiten von Klärschlamm als sekundäre Phosphorquelle in Tschechien“ Nr. TJ01000074.

Literaturverzeichnis

- [1] Adam, C.; Herzel, H.; Remy, C.; Kabbe, C. Phosphate Recycling – Options and Efficacy. In Life+ Conference “Resource recovery and water protection” Phosphate; Skellefteå, Sweden, 2015.

- incinerator sewage sludge ash (ISSA). Waste Management, 30 (2010) 1634–1642.
- [4] Egle, L.; Rechberger, H.; Krampe, J.; Zessner, M. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Sci. Total Environ.* 2016, 571, 522–542.
- [5] European Commission. Communication on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU.
- [6] German phosphorus recycling ordonnance, 2017.
- [7] Swiss Ordonnance on Mineral Fertilisers from Recycling, 2018,
- [8] Sartorius Ch., von Horn J., Tettenborn F., Phosphorus Recovery from Wastewater – Expert Survey on Present Use and Future Potential. *Water Environment Research*, 84 (2012) 313–322.
- [9] Václavková, Š.; Šyc, M.; Moško, J.; Pohořelý, M.; Svoboda, K. Fertilizer and Soil Solubility of Secondary P Sources - The Estimation of Their Applicability to Agricultural Soils. *Environ. Sci. Technol.* 2018, acs.est.8b02105.

- [2] Bundes-Abfallwirtschaftsplan, Österreich, 2017.
- [3] Donatello S., Tong D., Cheeseman C.R. Production of technical grade phosphoric acid from incinerator sewage sludge ash (ISSA). *Waste Management*, 30 (2010) 1634–1642.
- [4] Egle, L.; Rechberger, H.; Krampe, J.; Zessner, M. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Sci. Total Environ.* 2016, 571, 522–542.
- [5] European Commission. Communication on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU.
- [6] German phosphorus recycling ordonnance, 2017.
- [7] Swiss Ordonnance on Mineral Fertilizers from Recycling, 2018.
- [8] Sartorius Ch., von Horn J., Tettenborn F., Phosphorus Recovery from Wastewater – Expert Survey on Present Use and Future Potential. *Water Environment Research*, 84 (2012) 313–322.
- [9] Václavková, Š.; Šyc, M.; Moško, J.; Pohořelý, M.; Svoboda, K. Fertilizer and Soil Solubility of Secondary P Sources – The Estimation of Their Applicability to Agricultural Soils. *Environ. Sci. Technol.* 2018, acs.est.8b02105.



Recyklace fosforu z čistírenských kalů – možnosti optimalizovaného managementu fosforu v Rakousku

zkrácená verze

Matthias Zessner, Arabel Amann

TU Wien

Fosfor v odpadních vodách a recyklační technologie

Fosfor (P) je nezbytnou a nenahraditelnou živinou pro všechny živé organismy a klíčovým prvkem mnoha fyziologických a biochemických procesů. Již několik let vzrůstá povědomí o tom, že v souvislosti s fosforem a jeho primárním zdrojem, surovým fosfátem, je nutné čelit některým globálním výzvám s cílem zajistit v budoucnu bezpečné zásobování touto živinou. Současně byly jako důležité, převážně nevyužité zdroje fosforu identifikovány komunální odpadní vody (~ 1,0 kg P/E * a) a s nimi i různé materiálové toky na čistírnách odpadních vod (ka-

lová voda, kal z ČOV, popel z čistírenských kalů), které bude v budoucnu nutné ve smyslu efektivního nakládání s odpady vracet do koloběhu živin, a to ideálně do zemědělství. V posledních letech byly zkoumány, vyvíjeny a v některých případech již i v průmyslovém měřítku realizovány četné technologie zaměřené na recyklaci fosforu z odpadních vod ve formě konečných produktů přístupných pro rostliny, se současným snižováním souvisejících environmentálních rizik.

Fosfor lze získávat z nejrůznějších materiálových toků při sběru a zpracování odpadních vod, přičemž recyklační potenciály celkového množství

Phosphorrecycling aus Klärschlamm – Möglichkeiten für ein optimiertes Phosphormanagement in Österreich

Kurzfassung

Matthias Zessner, Arabel Amann

TU-Wien

Phosphor in Abwasser und Ansätze zur Rückgewinnung

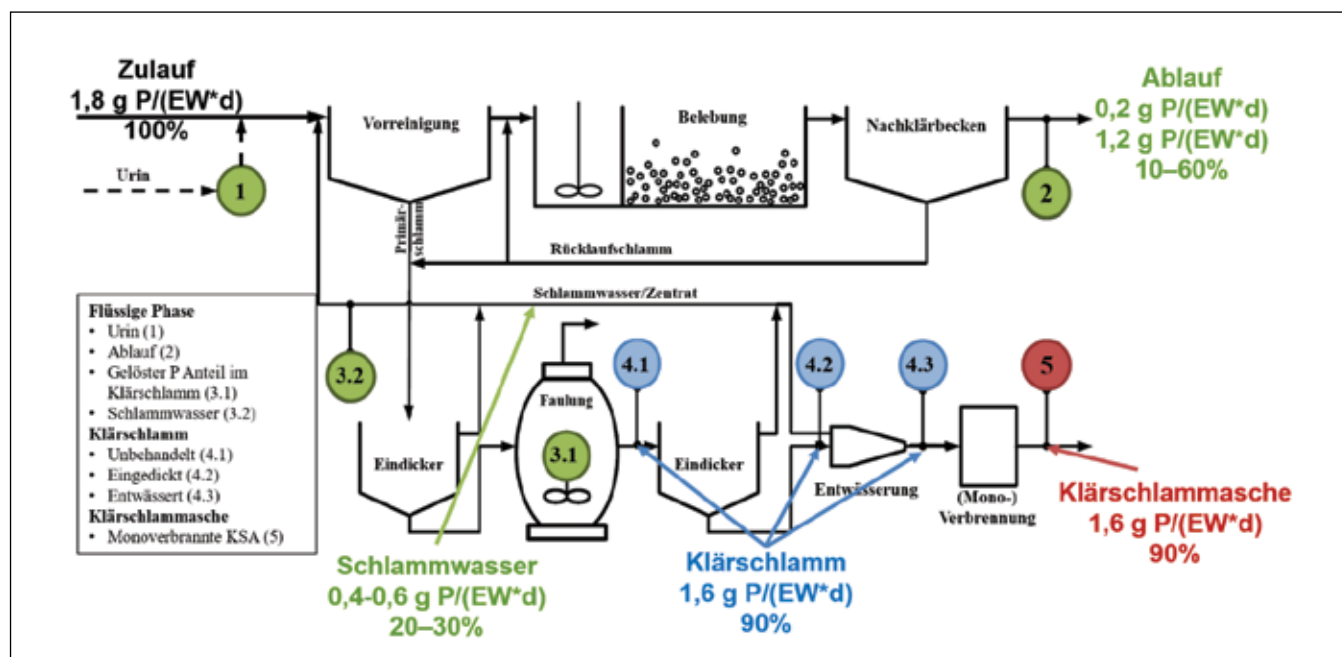
Phosphor (P) ist ein essentieller und nicht substituierbarer Nährstoff für alle Lebewesen und ein Schlüsselement in zahlreichen physiologischen und biochemischen Prozessen. Seit einigen Jahren steigt das Bewusstsein darüber, dass im Zusammenhang mit Phosphor und seiner primären Quelle Rohphosphat, einige globale Herausforderungen zu bewältigen sein werden, um zukünftig die sichere Versorgung mit diesem Nährstoff gewährleisten zu können. Gleichzeitig wurde kommunales Abwasser (~1,0 kg P/E*a) und damit die verschiede-

nen Stoffströme einer Kläranlage (Schlammwasser, Klärschlamm, Klärschlammmasche) als wichtige, größtenteils ungenutzte P-Ressourcen erkannt, die zukünftig im Sinne einer effizienten Abfallbewirtschaftung wieder in den Nährstoffkreislauf und damit idealerweise in die Landwirtschaft rückzuführen sind. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Technologien erforscht, entwickelt und teilweise bereits großtechnisch umgesetzt, um den abwasserbürtigen P in Form von pflanzenverfügbaren Endprodukten, mit gleichzeitiger Verringerung der damit einhergehenden Umweltrisiken rückzugewinnen.

získaného fosforu se liší podle použité technologie (obrázek 1). Stávající technologie lze proto účelně rozlišovat podle místa aplikace, tj. jako metody, které fosfor získávají buď přímo z kapalně fáze (2, 3.1, 3.2), z čistírenského kalu (4.1, 4.2, 4.3) nebo z produktu spalování čistírenských kalů (5).

Srovnání technologií

Vzhledem k širokému spektru a různým fázím vývoje technologií pro recyklaci fosforu bylo v Rakousku jako první krok ke stanovení perspektivní recyklační strategie provedeno technické, ekonomické a ekologické srovnání těchto metod. Toto



Obr. 1. Možná místa zpětného získávání fosforu, vysvětlivky v textu
Abb. 1. Mögliche Ansatzpunkte der P-Rückgewinnung

Phosphor kann aus den unterschiedlichsten Stoffströmen der Abwassersammlung und -behandlung rückgewonnen werden, wobei die Rückgewinnungspotentiale bezogen auf den gesamt anfallenden Phosphor je nach Ansatzpunkt schwanken (Abbildung 1). Die bestehenden Technologien können daher sinnvollerweise nach ihrem Ort des Einsatzes unterschieden werden, d.h. nach Verfahren die den Phosphor direkt aus der flüssigen Phase (2, 3.1, 3.2), dem Klärschlamm (4.1, 4.2, 4.3) bzw. der Klärschlammmasche (5) rückgewinnen.

Verfahrensvergleich

Aufgrund der Bandbreite an unterschiedlichen Entwicklungsstufen und technologischen Prozessen für eine Phosphorrückgewinnung, wurde in Österreich als erster Schritt um zukunftsfähige Nutzungsstrategien identifizieren zu können ein technisch,

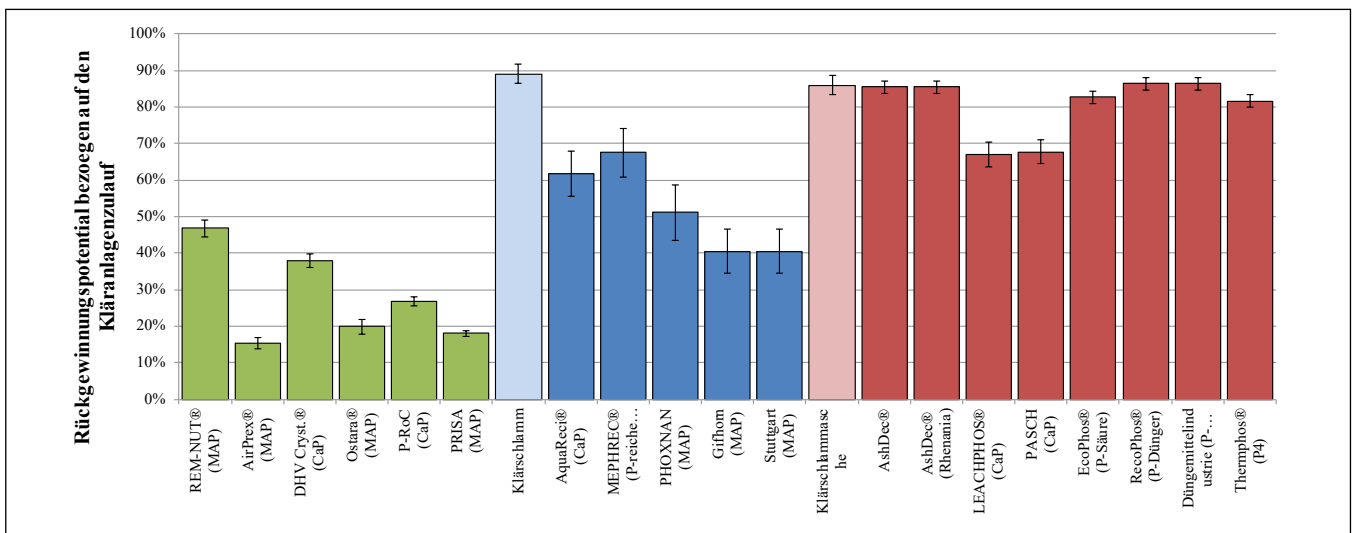
wirtschaftlicher und ökologischer Verfahrensvergleichs durchgeführt. Dieser Vergleich zeigt, dass eine Vielzahl an Verfahren so weit technisch fortgeschritten und beherrschbar ist, dass eine großtechnische Umsetzung ohne Einschränkung möglich ist. Allerdings verdeutlicht diese Studie auch, dass die Wahl für ein bestimmtes Verfahren nicht auf Basis eines finalen Bewertungskriteriums erfolgen sollte. Vielmehr ergeben die zahlreichen Kriterien ein Gesamtbild für eine Technologie, die mit den zukünftigen Anforderungen und Vorstellungen an eine gezielte P-Rückgewinnung aus dem Abwasser abgeglichen werden und auf Basis derer eine Auswahl erfolgen soll.

Im Hinblick auf eine weitgehende Nutzung des vorhandenen P-Potenzials aus dem Abwasser zeigt sich, dass derzeit in erster Linie die Verfahren zur P-Rückgewinnung aus der Klärschlammmasche die

srovnání ukazuje, že mnohé metody jsou technicky vyzrálé a zvládnutelné, takže je možná jejich neomezená realizace v průmyslovém měřítku. Tato studie však také ukazuje, že volba konkrétní technologie by neměla vycházet z konečného hodnotícího kritéria. Mnohá kritéria poskytují spíše jen celkový přehled metod, který je nutné porovnat s budoucími požadavky a představami o cíleném získávání fosforu z odpadních vod, a teprve na jejich základě se bude provádět výběr.

S ohledem na rozsah stávajícího potenciálu získávání fosforu z odpadních vod se ukazuje, že v současné době mají nejlepší předpoklady metody získávání P z popela z čistírenských kalů (na obr. 2 označené červeně). Tyto metody však lze uplatnit pouze při spalování čistírenských kalů bez přídavku jiných paliv chudých na P (např. mono-spalování).

Výhodou takové strategie by také bylo, že není vázána na konkrétní lokalitu ČOV a dá se realizovat ve velkých jednotkách. Navíc by umožňovala i společné spalování a zpracování fosforových odpadů z recyklace živočišných těl. Metody využití fosforu z popela z čistírenských kalů bez nutnosti separace těžkých kovů mohou již dnes poskytovat dobrý bio-dostupný produkt za ceny odpovídající konvenčnímu komerčnímu hnojivu. V posledních letech se projevil také potenciál začlenění popela z čistírenských kalů do průmyslových procesů, jako je přímé využití v průmyslu hnojiv, výroba kyseliny fosforečné a P4. Průmyslová odvětví zdůrazňují svůj zájem o druhotné suroviny bohaté na P, např. popel z čistírenských kalů a z masokostní moučky, což by umožnilo fosfor nejen získávat, ale také ekonomicky výhodně recyklovat a uplatňovat na trhu.



Obr. 2. Recyklační potenciál metod, vztažený ke vstupu do ČOV

Abb. 2. Rückgewinnungspotential der Verfahren bezogen auf den Kläranlagenzulauf

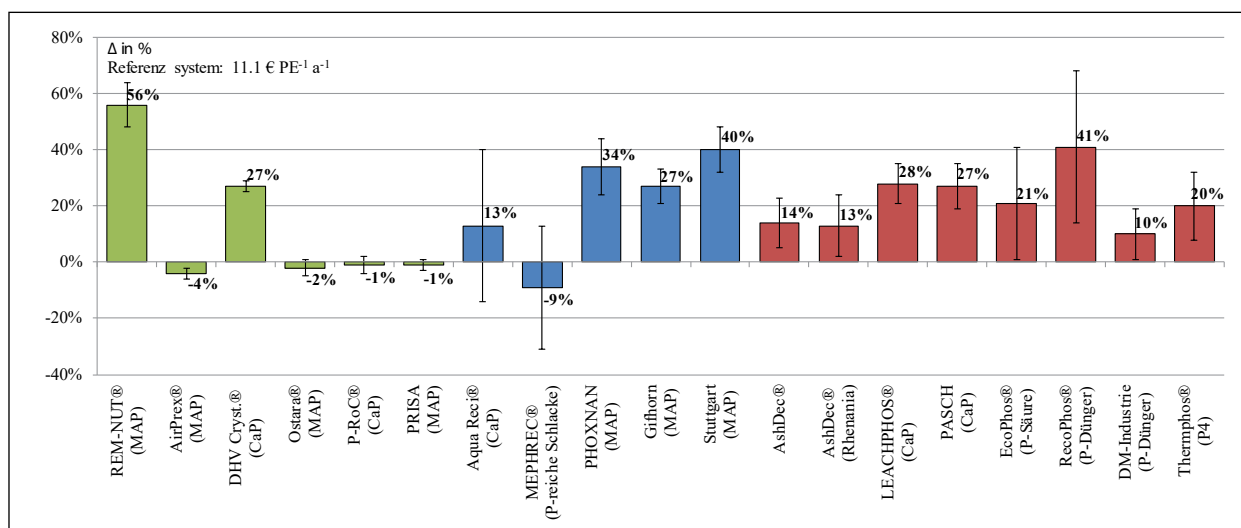
besten Voraussetzungen haben (in Abbildung 2 rot dargestellte Verfahren). Allerdings ist zur Umsetzung dieser Verfahren eine Klärschlammverbrennung ohne Vermischung mit P-armen Brennstoffen erforderlich (z. B. Monoverbrennung). Ein Vorteil einer entsprechenden Strategie wäre auch, dass eine Bindung an einen Kläranlagenstandort nicht gegeben ist und eine Umsetzung in großen Einheiten möglich wäre. Zudem würde sich eine gemeinsame Verbrennung und Aufbereitung mit P-reichen Abfällen aus der Tierkörperverwertung anbieten. Ver-

fahren zur Nutzung des P in der Klärschlammmasche ohne Abreicherung der Schwermetalle können bereits heute ein gut pflanzenverfügbares Produkt bei Kosten im Bereich der herkömmlichen Handelsdünger bieten. In den letzten Jahren hat sich auch ein Potential bei der Einbindung von Klärschlammmasche in industrielle Prozesse wie direkte Integration in die Düngemittelindustrie, Herstellung von P-Säure und von P4 gezeigt. Die Industriezweige betonen ihr Interesse an P-reichen Sekundärrohstoffen wie z.B. Klärschlamm- und Tiermehlasche

Kterou z možných technologických variant preferovat, to závisí nejen na ekonomických úvahách, ale také na požadavcích na čistotu produktu a bio-dostupnost. Zásadní otázkou přitom je, jaké celkové zatížení těžkými kovy, jež se spolu s produkty recyklace dostávají do půdy, může zemědělství dlouhodobě snášet. Je pravda, že i v postupech bez separace těžkých kovů mohou být dodržovány limity těžkých kovů pro komerční hnojiva, pokud se přípravek při výrobě smíchá s jinými fosfátovými hnojivy. To však nic nemění na vnášeném zatížení, jehož limity jako takové je nutné stanovit na základě příslušných výzkumů. Pokud jde o bio-dostupnost, je otázkou, zda je pro všechny produkty obecně nutná rychlá

využitelnost, nebo zda se uplatní i pomalu využitelná hnojiva z druhotných surovin.

Náklady vynakládané na recyklaci P jsou z národohospodářského hlediska nízké, ale stále podléhají velké nejistotě (obr. 3). Důležitým podnětem však zde budou i rámcové právní podmínky, kde může legislativa klást průlomové požadavky na recyklaci P (viz např. novelu německé vyhlášky o čistírenských kalech a švýcarskou vyhlášku o prevenci a likvidaci odpadů). Aby však příslušné právní nástroje podpořily optimální recyklaci P, je nezbytné, aby Rakousko znalo regionální i celostátní dopady různých strategií využití P.



Obr. 3. Výsledky porovnání nákladů a výnosů s referenčním scénářem (celý procesní řetězec vč. výnosů a úspor)

Abb. 3. Ergebnisse Kosten/Erlöse gegenüber Referenzszenario (gesamte Prozesskette inkl. Erlöse + Einsparungen)

was nicht nur eine P-Rückgewinnung, sondern auch ein wirtschaftliches P-Recycling und Integration in den Markt ermöglichen könnte.

Welchem der unterschiedlichen möglichen Verfahrensvarianten der Vorzug zu geben ist, hängt neben wirtschaftlichen Überlegungen auch von den Anforderungen an die Reinheit des Produktes und der Pflanzenverfügbarkeit ab. Eine grundlegende Frage dabei ist, welche Gesamtfrachten an Schwermetallen, die über Recyclingprodukte auf die Böden gelangen, die Landwirtschaft längerfristig verträgt. Zwar können auch bei Verfahren ohne Schwermetallanreicherung, Schwermetallgrenzwerte für Handelsdünger eingehalten werden, wenn es bei der Aufbereitung zur Vermischung mit anderen P-

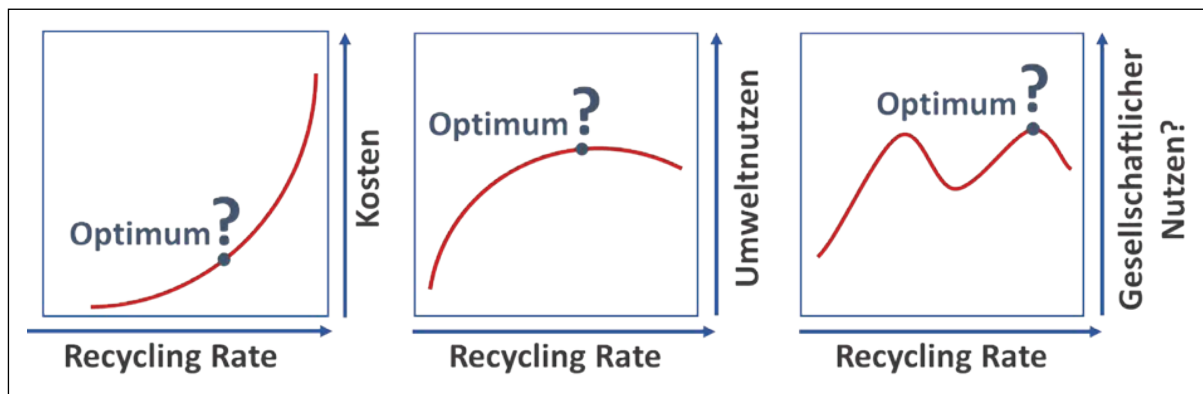
haltigen Düngern kommt. Dies ändert allerdings nichts an der zurückgeführten Fracht, deren Begrenzung als solche auf Basis entsprechender Untersuchungen ebenfalls erforderlich sein kann. Im Hinblick auf die Pflanzenverfügbarkeit stellt sich die Frage, ob generell eine rasche Verfügbarkeit bei allen Produkten gefordert werden muss, oder ob auch langsam verfügbare Sekundärrohstoffdünger Absatz finden.

Die anfallenden Kosten für P Recycling sind volkswirtschaftlich betrachtet gering, aber noch großen Unsicherheiten unterworfen (Abbildung 3). Wichtige Treiber werden aber auch die rechtlichen Rahmenbedingungen sein, wobei hier durch die Gesetzgebung richtungsweisende Anforderungen an

Perspektivní strategie managementu fosforu pro Rakousko

Zkušenosti z Německa, vyplývající ze zdlouhavé diskuse k novele vyhlášky o čistírenských kalech, jež zavádí povinnou recyklaci fosforu, ukazují, že před stanovením závazné specifikace musí být vypracován nejen požadovaný cílový systém s určitou mírou recyklace, ale že je nutné prozkoumat potenciální strategie a specifikace z hlediska jejich účinnosti a použitelnosti. K prosazování optimální recyklace P pomocí vhodných právních nástrojů je nezbytné znát regionální a národní dopady různých strategií recyklace fosforu.

V Rakousku proto Spolkové ministerstvo pro udržitelnost a cestovní ruch zadalo projektovou studii „StraPhos – Perspektivní strategie pro management fosforu pro Rakousko“. Studie si klade za cíl nalézt optimalizovanou strategii pro realizaci recyklace fosforu se zohledněním ekonomických i ekologických nákladů a přínosů. Je založena na obecně známé skutečnosti, že náklady, které má nést národní ekonomika, se obvykle zvyšují s rostoucí mírou recyklace, zatímco optimální přínos pro životní prostředí obvykle není podmíněn stoprocentní recyklací (obr. 4).



Obr. 4. Souvislost mezi mírou recyklace, náklady a environmentálním a společenským přínosem.

Abb. 4. Zusammenhang der Recyclingrate mit Kosten, Umweltnutzen und dem gesellschaftlichen Nutzen.

das P-Recycling gestellt werden können (siehe Beispiel Novellierung der deutschen Klärschlammverordnung und Schweizer Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen). Um jedoch ein optimales P-Recycling mit geeigneten rechtlichen Instrumenten zu fördern, ist es für Österreich von essentieller Bedeutung, die regionalen und nationalen Auswirkungen verschiedener Strategien der P-Rückgewinnung zu kennen.

Zukunftsfähige Strategien des Phosphormanagements für Österreich

Erfahrungen aus Deutschland, in Hinblick auf die langwierige Diskussion um die Novellierung der Klärschlammverordnung zur Einführung der verpflichtenden P-Rückgewinnung, zeigen, dass vor einer Festlegung von bindenden Vorgaben nicht nur das gewünschte Zielsystem anhand einer Rückge-

winnungsquote auszuarbeiten ist, sondern auch potentielle Strategien und Vorgaben auf ihre Effizienz und Anwendbarkeit zu untersuchen sind. Um ein optimales P-Recycling mit geeigneten rechtlichen Instrumenten zu fördern, ist es von essentieller Bedeutung, die regionalen und nationalen Auswirkungen verschiedener Strategien der P-Rückgewinnung zu kennen.

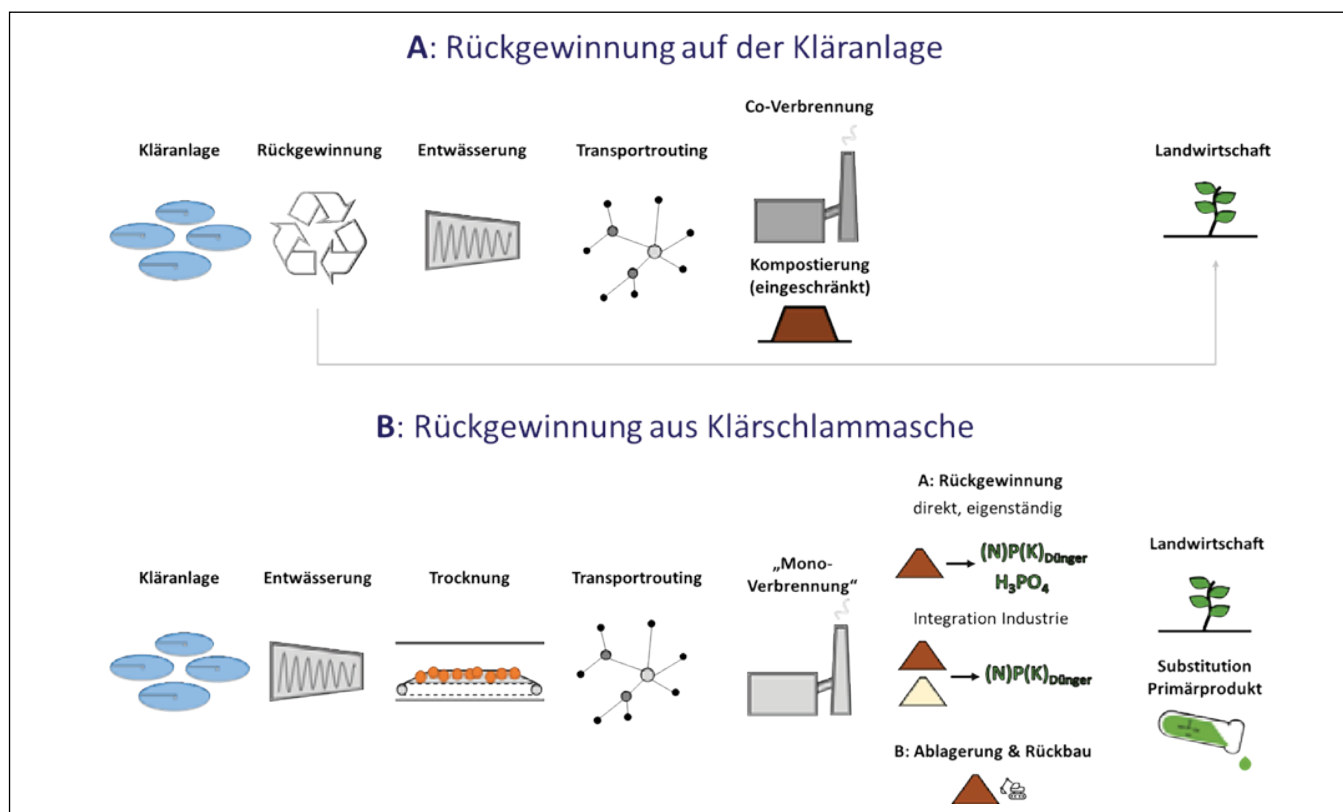
In Österreich wurde daher vom Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus die Projektstudie „StraPhos – Zukunftsfähige Strategien des Phosphormanagements für Österreich“ in Auftrag gegeben. Die Studie zielt darauf ab, eine optimierte Strategie zur Umsetzung der P-Rückgewinnung unter Berücksichtigung von Aufwand und Nutzen im ökonomischen und ökologischen Sinne zu finden. Dies begründet sich in der allgemein bekannten Tatsache, dass die volkswirtschaftlich zu tragenden

V rámci tohoto projektu se má dosáhnout dvou primárních cílů:

- podrobné zmapování současného stavu využívání a likvidace čistírenských kalů a související vodohospodářské a spalovací infrastruktury,
- zjištění hospodářských a ekologických dopadů různých scénářů (obr. 5) pro využití odpadů obsahujících fosfor v Rakousku s přihlédnutím

ke stávající regionální a národní infrastruktuře a k podmínkám v oblasti komunálního vodního hospodářství.

Následně budou výsledky projektu projednány v široké diskusi zainteresovaných stran a využity jako podklad při výběru efektivní strategie pro využití recyklovaného fosforu v Rakousku.



Obr. 5. Přehled analyzovaných složek pro 2 příkladové scénáře: A: na ČOV; B: z popela čistírenských kalů.

Abb. 5. Darstellung der analysierten Komponenten für 2 beispielhafte Szenarienansätze.

Kosten mit zunehmenden Recyclingquoten üblicherweise ansteigen, während das Optimum des Umweltnutzens meist nicht bei einer 100%igen Recyclingquote liegt (Abbildung 4).

Innerhalb dieses Projektes sollen zwei primäre Ziele erreicht werden. Dies sind:

- die Detail-Erhebung des Status Quo der Klärschlammverwertung und -entsorgung, sowie der im Zusammenhang damit stehende siedlungswasserwirtschaftlichen und verbrennungsseitigen Infrastruktur,

- die Prüfung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen von Szenarien (Abbildung 5) zur P-Rückgewinnung in Österreich unter Berücksichtigung der regional und national vorhandenen (siedlungswasserwirtschaftlichen) Infrastruktur und Gegebenheiten.

Anschließend sollen die Projektergebnisse in einem breiten Stakeholderprozess diskutiert und unterstützend zur Wahl einer effizienten Strategie für die Phosphorrückgewinnung in Österreich herangezogen werden.

Rozdílná dostupnost fosforu v konvenčně a ekologicky obhospodařovaných orných půdách

Záhora, J., Vavříková, J., Tůma, I., Stroblová, M., Mikajlo, I., Dvořáčková, H., Sáblíková, H.

Mendelova univerzita v Brně, jaroslav.zahora@mendelu.cz

Fosfor (P) patří mezi základní biogenní prvky (C, H, O, N, S) nezbytné pro všechny organismy. Je základním stavebním prvkem biomembrán. Na buněčné úrovni má nezastupitelnou úlohu pro transformaci energie, pro přenos dědičných vlastností, dělení buněk a fotosyntézu. Fosfor je nepostradatelný pro syntézu nukleových kyselin, díky kterým mohou organismy realizovat svůj životní program a reagovat žádoucím způsobem na podněty z vnějšího prostředí. U obratlovců je fosfor součástí kostry. Fosfor koluje v ekosystémech po charakteristických drahách. Mluvíme o koloběhu fosforu podobně jako je tomu u koloběhu uhlíku, dusíku, síry apod. Pro udržení stávající dynamiky koloběhu fosforu je rozhodující návrat imobilizovaného fosforu z biomasy rostlinných a živočišných produktů zpět do půdního zásobníku, rychlost rozkladu organických

sloučenin fosforu a jejich následná mineralizace, přeměna organického fosforu na minerální.

Moderní zemědělství se musí v relativně velmi krátké době několika příštích desetiletí vypořádat s problémem snižování dostupnosti a kvality surovin pro výrobu stále dražších fosforečných hnojiv. Musí nalézt cestu k pokrytí potravinových nároků narůstajícího počtu obyvatel planety s omezenými zdroji fosforu. Má přitom jednu jistotu, stávající model konvenčního zemědělství s aplikacemi agrochemikálií, s vysokými nároky na dodatečné zdroje energie a s devastujícími účinky na životní prostředí diskvalifikuje sama sebe z úvah o budoucím udržitelném modelu zemědělství. V souvislosti s neudržitelností současného modelu konvenčního zemědělství by ale bylo dobré připomenout, že ku-

Unterschiedliche Verfügbarkeit von Phosphor in konventionell und ökologisch bewirtschafteten Ackerböden

Záhora, J., Vavříková, J., Tůma, I., Stroblová, M., Mikajlo, I., Dvořáčková, H., Sáblíková, H.

Mendelova univerzita v Brně, jaroslav.zahora@mendelu.cz

Phosphor (P) ist eines der grundlegenden biogenen Elemente (C, H, O, N, S), die für alle Organismen unentbehrlich sind. Er ist ein grundlegender Baustein von Biomembranen. Auf zellulärer Ebene hat er eine unersetzliche Rolle bei der Energieumwandlung, Übertragung von Erbanlagen, Zellteilung und Photosynthese. Phosphor ist unentbehrlich für die Synthese von Nukleinsäuren, durch die Organismen ihr Lebensprogramm umsetzen und auf Reize von dem äußeren Milieu reagieren können. Phosphor befindet sich auch im Skelett der Wirbeltiere. Phosphor zirkuliert in Ökosystemen auf charakteristischen Wegen. Man spricht über den Phosphorkreislauf, ähnlich wie bei Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel usw. Für das Aufrechterhalten der bestehenden Dynamik des Phosphorkreislaufs sind die Rückführung von immobilisiertem Phosphor aus der Biomasse pflanzlicher und tierischer Produkte

in den Bodenvorrat, die Zersetzungsgeschwindigkeit organischer Phosphorverbindungen und deren anschließende Mineralisierung sowie die Umwandlung von organischem Phosphor zu Mineralien entscheidend.

Die moderne Landwirtschaft wird sich in relativ kurzer Zeit einiger weniger Jahrzehnte mit dem Problem der schrumpfenden Verfügbarkeit und Qualität von Rohstoffen für die Produktion von immer teurer werdenden Phosphordüngern auseinandersetzen müssen. Es muss ein Weg gefunden werden, um die Nahrungsansprüche der wachsenden Bevölkerung des Planeten mit begrenzten Phosphorquellen abzudecken. Es gilt dabei die Gewissheit, dass das bestehende Modell der konventionellen Landwirtschaft mit Agrochemikalienanwendung, mit hohen Anforderungen an zusätzliche

kumulativní zásoby fosforu v našich orných půdách vytvořené v období od roku 1905 do roku 2005 dlouhodobým hnojením činí cca 1450 kg.ha⁻¹ (Van Dijk, 2016). Jsou sice nižší než kumulativní zásoby fosforu v Německu (2 040 kg.ha⁻¹), přesto ale představují téměř dvojnásobek kumulativních zásob půdního fosforu v sousedním Rakousku a Polsku (Van Dijk, 2016). A to navzdory každoročním ztrátám fosforu v České republice ve výši 2,1 kg.ha⁻¹ (Van Dijk, 2016) a zhruba šestinásobnému propadu hnojení fosforem v posledních 27 letech ve srovnání s obdobím před rokem 1991 (Sálusová, 2018). Možným důvodem pro snížení hnojení fosforem po roce 1991 jsou tedy mimo jiné relativně velmi dobré zásoby fosforu v našich půdách. Alternativním důvodem mohou být vlastní pozorování zemědělských praktiků, kteří nenacházeli na pěstovaných plodinách příznaky nedostatečného příjmu fosforu a tím ani důvod ke zvýšení aplikace fosforu doporučované na základě pravidelného agrochemického zkoušení půd. Předmětem tohoto příspěvku ale není polemika s vhodnou laboratorní extrakční

metodou pro stanovení zásob a dostupnosti fosforu v orných půdách. Naopak, předzásobení půd fosforem, ať už z jakéhokoliv důvodu, ochránilo naše půdy před mnohem větší nežádoucí zátěží uranem a dalšími cizorodými látkami, např. kadmíem. Větší zátěží cizorodými látkami proto, že se těžba suroviny pro výrobu fosfátů dostává do větších hloubek s větší mírou kontaminace těmito xenobiotiky. Ke zvyšování obsahu uranu ve fosfátovém hnojivu, dochází také při kyselém loužení fosfátové rudy a následném vysušování roztoku kyseliny fosforečné (Kratz et al., 2008). Pro biologické systémy je uran škodlivý jak svou radioaktivitou, tak i toxicitou. Jen pro ilustraci je dobré připomenout situaci v sousedním Německu, do kterého v posledních desetiletích připutovalo ročně s fosfátovými hnojivy stěží uvěřitelných 167 t U. ha⁻¹ (Schnug a Haneklaus, 2014). Při průměrné roční dávce 22 kg P.ha⁻¹ se s fosfátovými hnojivy aplikuje 9 g U.ha⁻¹, což podle použitého modelu vede k ustavení rovnovážného stavu 22 µg.l⁻¹ v perkolující půdní vodě (Jacques et al., 2008). Výsledky modelu jsou v některých oblastech Ně-

Energiequellen und mit verheerenden Umweltauswirkungen sich selbst aus Überlegungen über das zukunftssträchtige nachhaltige Landwirtschaftsmodell disqualifiziert. Im Zusammenhang mit der Unhaltbarkeit des aktuellen konventionellen Landwirtschaftsmodells sei jedoch daran erinnert, dass die kumulierten Phosphorvorräte in unseren Ackerböden, die im Zeitraum von 1905 bis 2005 durch langjährige Düngung entstanden sind, etwa 1450 kg.ha⁻¹ betragen (Van Dijk, 2016). Obwohl sie niedriger als die kumulierten Phosphorvorräte in Deutschland (2 040 kg.ha⁻¹) sind, stellen sie immer noch fast das Doppelte gegenüber den kumulierten Phosphorvorräten in den Nachbarländern Österreich und Polen dar (Van Dijk, 2016). Und das trotz der alljährlichen Phosphor-Verluste in Tschechien von 2,1 kg.ha⁻¹ (Van Dijk, 2016) und der etwa sechsmal kleineren Phosphor-Ausbringung in den letzten 27 Jahren im Vergleich mit der Zeit vor 1991 (Sálusová, 2018). Eine mögliche Ursache für die Abnahme der Phosphordüngung nach 1991 sind deshalb unter anderem die relativ sehr guten

Phosphorvorräte in unseren Böden. Mitgespielt haben könnten auch die Beobachtungen von landwirtschaftlichen Praktikern, die keine Anzeichen eines Phosphormangels bei ihren Pflanzen und damit auch keinen Grund für eine erhöhte Phosphor-Ausbringung gefunden haben, die aufgrund der regelmäßigen agrochemischen Bodenprüfungen empfohlen wurde. Dieser Beitrag will allerdings nicht über geeignete laboratorische Extraktionsmethoden zur Bestimmung der Vorräte und Verfügbarkeit von Phosphor in Ackerböden polemisieren. Ganz im Gegenteil, der Phosphorvorrat im Boden, aus welchen Gründen auch immer entstanden, konnte unsere Böden vor viel größeren unerwünschten Belastungen durch Uran und andere Fremdstoffe wie z.B. Cadmium schützen. Eine größere Belastung durch Fremdstoffe deshalb, weil die Gewinnung des Rohstoffs für die Phosphatherstellung in größere Tiefen mit mehr Verunreinigung mit diesen Xenobiotika gerät. Zur Erhöhung des Urangehalts im Phosphatdünger kommt es auch bei der sauren Auslaugung von Phosphaterz

mecka a Rakouska potvrzovány velkými koncentracemi uranu ve zdrojích pitné vody (Birke et Rauch, 2008). Proto jsou v současné době usilovně hledány možnosti, jak kontaminaci půd a vod uranem omezit, jak eliminovat kontaminaci uranem a těžkými kovy již v procesu výroby fosfátových hnojiv případně jak najít způsob recyklace fosforu např. z čistírenských kalů.

Na základě pozorovaného uvolňování uranu z fosforečných hnojiv při větším hnojení minerálním dusíkem (Rogasik et al., 2008) lze vyslovit hypotézu týkající se uvolňování fosforu ze starých půdních zásob na lokalitách dlouhodobě nehnojených fosforem v závislosti na intenzitě hnojení minerálním dusíkem. Cílem příspěvku je posouzení zmíněné hypotézy.

Formy fosforu v půdě

V půdě je podle různých autorů obsaženo průměrně 0,1 % fosforu. Do půdy se fosfor dostává z ma-

tečných hornin a rozkladem organických zbytků. Primárním zdrojem fosforu jsou poměrně málo rozpustné minerály. Mezi ně patří např. fosforit, apatit nebo vivianit. Fosfor je v půdě přítomný ve dvou základních formách - organické a minerální. Organického fosforu je 30 až 50 % z celkového množství fosforu v půdě. Je převážně obsažen ve fosfolipidech, nukleových kyselinách a inositol-fosfátech (estery kyseliny fosforečné s vícesytnými cyklickými alkoholy). Minerální fosfor je zastoupen v podobě anorganických sloučenin, ve kterých je ortofosforečnanový aniont (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) vázán především na železo a hliník v půdách kyselých a na vápník v půdách zásaditých. Minerální sloučeniny fosforu v půdě jsou převážně nerozpustné. Pouze část celkového fosforu v půdě je rozpuštěna v půdním roztoku. Rozpustného fosforu je ale velice málo, asi 1 % z celkového fosforu v půdě, a jeho koncentrace v půdním roztoku bývá 0,1 až 1 mg.l⁻¹. Ze všech hlavních živin nutných k růstu rostlin je koncentrace fosforu v půdním roztoku nejnižší. Část rozpuštěného fosforu může být vysrážena jako

und der anschließenden Trocknung der Phosphorsäure-Lösung (Kratz et al., 2008). Für biologische Systeme ist Uran sowohl durch seine Radioaktivität als auch Toxizität schädlich. Zur Illustration kann an die Situation im benachbarten Deutschland erinnert werden, wohin in den letzten Jahrzehnten jährlich kaum zu glaubende 167 t Uran mit Phosphatdünger gekommen sind (Schnug und Hanecklaus, 2014). Mit einer durchschnittlichen jährlichen Dosis von 22 kg P.ha⁻¹ werden 9 g U.ha⁻¹ mit Phosphatdüngern aufgetragen, was nach dem verwendeten Modell zu einem Gleichgewichtszustand von 22 µg.l⁻¹ in perkolierendem Bodenwasser führt (Jacques et al., 2008). Die Modellergebnisse werden in einigen Regionen Deutschlands und Österreichs durch große Urankonzentrationen in Trinkwasserquellen bestätigt (Birke et Rauch, 2008). Daher wird derzeit nach Möglichkeiten zur Reduzierung der Boden- und Wasserbelastung mit Uran oder zur Elimination der Uran- und Schwermetallkontamination bereits im Produktionsprozess von Phosphatdüngern bzw. nach Methoden zur Phos-

phorrückgewinnung z.B. aus Klärschlamm intensiv gesucht.

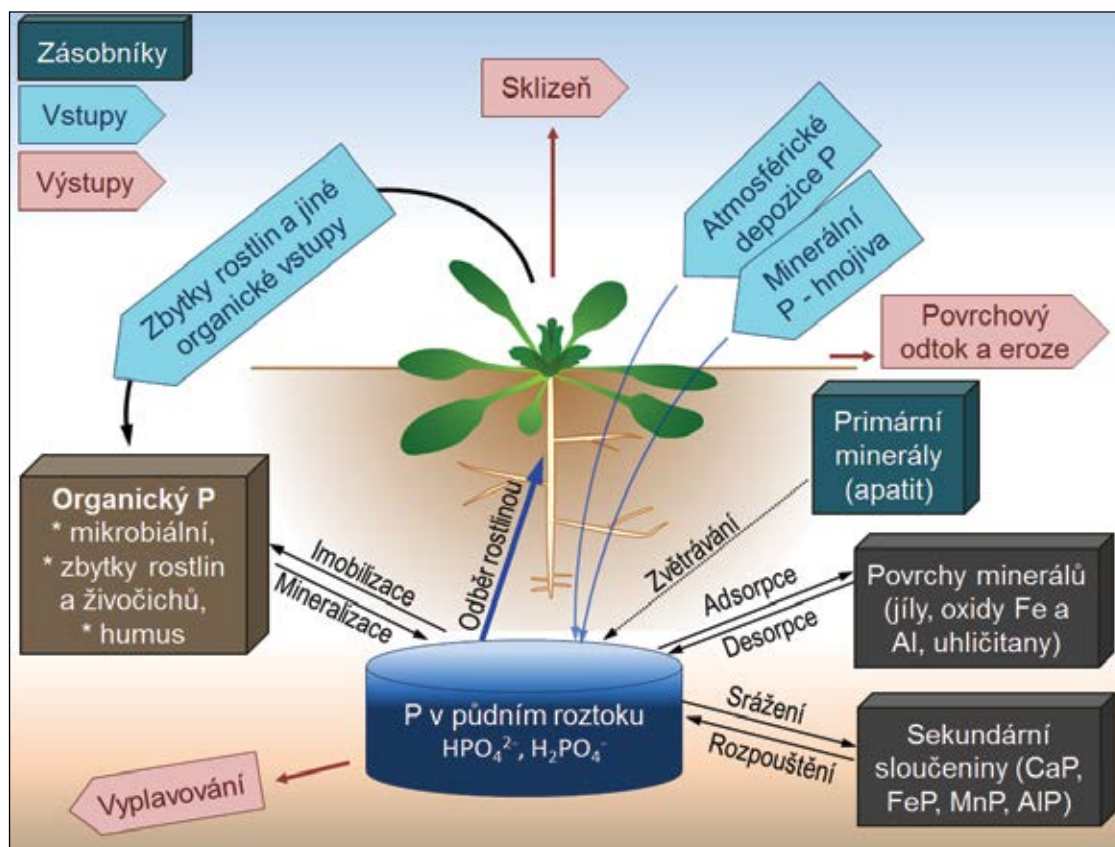
Basierend auf der beobachteten Uranfreisetzung aus Phosphatdüngern bei einer stärkeren Düngung mit mineralischem Stickstoff (Rogasik et al., 2008) kann eine Hypothese über die Phosphorfreisetzung aus alten Bodenvorräten an langfristig mit Phosphor nicht gedüngten Standorten in Abhängigkeit von der Intensität der mineralischen Stickstoffdüngung formulieren. Das Ziel des Beitrags ist eine Beurteilung dieser Hypothese.

Phosphorformen im Boden

Laut verschiedenen Autoren ist im Boden durchschnittlich 0,1 % P vorhanden. Phosphor gelangt in den Boden aus dem Muttergestein und durch Zersetzung organischer Rückstände. Die Primärquelle von Phosphor sind relativ schwer lösliche Mineralien. Darunter gehören beispielsweise Phosphorit, Apatit oder Vivianit. Phosphor ist im Boden in zwei

sekundární minerály nebo přeměněna na vázané formy. Současně s těmito procesy spotřebovávají fosfor z půdního roztoku půdní organismy a kořeny rostlin a zůstává delší či kratší dobu zabudován v jejich organické hmotě. Forma fosforu, kterou rostliny a mikroby přijímají, je ortofosforečnanový

anion. V lesních půdách je všeobecně nižší obsah fosforu než ve hnojených zemědělských půdách. Obsah celkového fosforu v ekosystémech je poměrně stálý a lze jej dlouhodobým fosfátovým hnojením úspěšně zvětšit, jak je patrné z úvodní části.



Obr. 1. Koloběh fosforu v ekosystému. Znázorněny jsou hlavní vstupy, hlavní výstupy a zásobníky. Atmosférická depozice je nepatrná, jedná se o sloučeniny fosforu unášené s polétavými prachovými částicemi.

Abb. 1. Phosphorkreislauf im Ökosystem. Anzeigt werden die wichtigsten In- und Outputs sowie Vorräte. Die atmosphärische Deposition ist vernachlässigbar, es handelt sich um Phosphorverbindungen, die mit fliegenden Staubpartikeln mitgerissen werden.

Grundformen vorhanden – organisch und mineralisch. Organischer Phosphor macht 30 bis 50 % der gesamten Phosphormenge im Boden aus. Er ist überwiegend in Phospholipiden, Nukleinsäuren und Inositolphosphaten (Phosphorsäureester mit mehrwertigen zyklischen Alkoholen) enthalten. Mineralischer Phosphor liegt in Form anorganischer Verbindungen vor, bei denen das Orthophosphatanion (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) in sauren Böden hauptsächlich an Eisen und Aluminium und in alkalischen Böden an Calcium gebunden ist. Mineralverbindungen von Bodenphosphor sind überwiegend unlöslich. Nur ein Teil des Gesamt-

phosphors im Boden ist in der Bodenlösung gelöst. Der Gehalt von löslichem Phosphor ist jedoch gering, etwa 1 % von Gesamt-Bodenphosphor, und seine Konzentration in der Bodenlösung beträgt 0,1 bis 1 mg.l^{-1} . Von allen wichtigen Nährstoffen, die für das Pflanzenwachstum notwendig sind, ist die Phosphorkonzentration in der Bodenlösung am kleinsten. Ein Teil von gelöstem Phosphor kann als sekundäre Mineralien ausgefällt oder in gebundene Formen umgewandelt werden. Parallel zu diesen Prozessen wird Phosphor aus der Bodenlösung von Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln verbraucht und bleibt über eine längere oder kürzere

Koloběh fosforu v půdě

Většina fosforu v půdě se nachází ve svrchních horizontech. V přírodě blízkých ekosystémech je koloběh fosforu téměř uzavřený, tj. množství fosforu uvolněné mikrobiálním rozkladem rostlinných a živočišných zbytků a aktivitami rostlinných kořenů je prakticky shodné s množstvím, které zabudují do svých pletiv a tkání rostliny a organismy. Činnost mikroorganismů má pro půdy přírodě blízkých ekosystémů mimořádný význam, o mnoho větší než pro pravidelně obdělávané a fosforem hnojené zemědělské půdy.

Z celkového ročního množství rostlinného opadu, které může představovat i jednotky tun suché hmoty na hektar, připadá asi 10 % na minerální látky, ostatní podíl tvoří celulóza, lignin, škrob, bílkoviny, tuky, pryskyřice a jiné organické sloučeniny. Na povrchu půdy dochází k postupnému osidlování opadu mikroorganismy. Osidlování rostlinného opadu zahajují zpravidla bakteriální společenstva,

později pak nastupuje pomaleji se vyvíjející společenstvo půdních hub a aktinomycet. Na opad se postupně dostává půdní mikrofauna a mezofauna (prvoci, vířníci, háďátka apod.). Přitom dochází k postupnému odbourávání snadněji rozložitelných organických látek. Ačkoliv je biomasa půdních mikroorganismů malá, je z hlediska koloběhu živin velmi významnou součástí půdní organické hmoty. K obdobným procesům dochází ve větším rozsahu v blízkosti kořenů. Většina mikroorganismů využívá při získávání fosforu z půdy enzym fosfatázu, která štěpí organické sloučeniny fosforu. V mikrobiální biomase se může dočasně vázat v průměru 2 - 5 % z celkového množství fosforu v půdě (Kalčík, 2001).

Mikrobiální koloběh fosforu zahrnuje přeměny minerálních a organických sloučenin fosforu a jejich nerozpustných a rozpustných forem. Mikrobi hrají významnou úlohu v rozpouštění, imobilizaci a mineralizaci fosforu. Pro přeměny minerálních a organických sloučenin fosforu v půdě působením mikroorganismů existují čtyři základní mechanismy:

Zeit in ihrer organischen Substanz eingebaut. Die für Pflanzen und Mikroben verfügbare Phosphorform ist der Orthophosphatanion. In Waldböden ist der Phosphorgehalt im Allgemeinen kleiner als in gedüngten Agrarböden. Der Gesamtphosphorgehalt in Ökosystemen ist relativ stabil und kann durch langfristige Phosphatdüngung erfolgreich erhöht werden, wie aus dem einleitenden Teil ersichtlich ist.

Phosphorzyklus im Boden

Phosphor befindet sich im Boden überwiegend in den oberen Horizonten. In naturnahen Ökosystemen ist der Phosphorkreislauf nahezu geschlossen, das bedeutet, dass die Phosphormenge, die durch die mikrobielle Zersetzung von pflanzlichen und tierischen Rückständen sowie durch die Aktivität der Pflanzenwurzeln freigesetzt wird, praktisch gleich mit der Menge ist, die von Pflanzen und Organismen in ihr Gewebe eingebaut wird. Die Aktivität der Mikroorganismen ist für den Boden in

naturnahen Ökosystemen von größter Bedeutung, viel größer als für regelmäßig bewirtschaftetes mit und mit Phosphor gedüngtes Agrarland.

Von der jährlichen Gesamtmenge an Pflanzenstreu, die sogar Tonnen Trockensubstanz pro Hektar betragen kann, entfallen etwa 10 % auf Mineralien, der übrige Teil auf Zellulose, Lignin, Stärke, Proteine, Fette, Harze und andere organische Verbindungen. Auf der Bodenoberfläche werden die Pflanzenreste allmählich von Mikroorganismen angesiedelt. Diese Besiedlung wird in der Regel von Bakteriengemeinschaften initiiert, später kommen die sich langsamer entwickelnden Gemeinschaften von Bodenpilzen und Aktinomyceten. Danach wird die Pflanzenstreu mit Mikro- und Mesofauna (Protozoen, Rädertiere, Nematoden usw.) schrittweise besiedelt. Gleichzeitig werden leichter zersetzbare organische Substanzen abgebaut. Obwohl die Biomasse der Bodenmikroorganismen klein ist, im Hinblick auf den Nährstoffkreislauf ist sie ein sehr wichtiger Bestandteil der organischen Bo-

(a) Mineralizace organických sloučenin fosforu

Organický fosfor se musí pro zpřístupnění mineralizovat. Při mineralizaci vzniká organická látka a přístupný ortofosforečnan. Děje se tak pomocí enzymů, které se obecně nazývají fosfatázy. Mineralizace fosfolipidů a nukleových kyselin probíhá poměrně rychle, inositolfosfátů pomalu.

(b) Imobilizace fosforu

Jde o zabudování fosforu do rostoucích mikrobiálních buněk. Tento dočasně nepřístupný fosfor se po odumření buněk uvolňuje, a stává se tak opět dostupným pro mikroorganismy i rostliny. Mikrobiálního fosforu je asi 10krát více než fosforu v rostlinách. Obsah fosforu je například v myceliu hub 0,5 až 1 %, v biomase bakterií 1 až 3 % (přepočteno na sušinu).

(c) Rozpouštění minerálních fosfátů (solubilizace fosforu)

densubstanz. Ähnliche Prozesse treten in größerem Umfang in der Nähe der Wurzeln auf. Die meisten Mikroorganismen verwenden das Enzym Phosphatase, um Phosphor aus dem Boden zu extrahieren, wobei organische Phosphorverbindungen gespalten werden. In der mikrobiellen Biomasse können im Durchschnitt 2 – 5 % der gesamten Phosphormenge im Boden vorübergehend gebunden werden (Kalčík, 2001).

Der mikrobielle Phosphorkreislauf umfasst die Umwandlung von mineralischen und organischen Phosphorverbindungen und ihren unlöslichen und löslichen Formen. Mikroben spielen eine wichtige Rolle bei der Auflösung, Immobilisierung und Mineralisierung von Phosphor. Es gibt vier grundlegende Mechanismen für die Umwandlung von mineralischen und organischen Phosphorverbindungen im Boden durch Mikroorganismen:

Některé mikroorganismy vylučují organické kyseliny (např. kyselinu mléčnou, glykolovou, šťavelovou, citronovou), které rozpouštějí ve vodě nerozpustné fosforečnany, a činí je tak přístupnými pro rostliny a mikroorganismy.

(d) Oxidace a redukce minerálního fosforu

Určité mikroorganismy jsou schopny v anaerobních podmínkách asimilovat fosforitan (sloučenina s trojmocným fosforem) a ten přeměňovat na fosforečnan (sloučenina s pětímocným fosforem). Tyto oxidačně redukční reakce však nemají v půdě velký význam.

Role půdních živočichů v koloběhu fosforu spočívá hlavně v mechanickém rozrušování a tím ke zvětšování povrchu organických zbytků a v jejich promíchávání s minerálními složkami půdy. Zažívací systém půdních živočichů představuje unikátní fermentory, ve kterých se přijímaná trávenina se-

(a) Mineralisierung organischer Phosphorverbindungen

Organischer Phosphor muss für die Bioverfügbarkeit mineralisiert werden. Die Mineralisierung erzeugt eine organische Substanz und ein verfügbares Orthophosphat. Dies geschieht mittels Enzyme, die im Allgemeinen als Phosphatasen bezeichnet werden. Die Mineralisierung von Phospholipiden und Nucleinsäuren verläuft relativ schnell, von Inositolphosphaten langsamer.

(b) Phosphor-Immobilisierung

Es handelt sich um die Einbindung von Phosphor in wachsende mikrobielle Zellen. Dieser vorübergehend unverfügbare Phosphor wird nach dem Zelltod freigesetzt und steht somit wieder für Mikroorganismen und Pflanzen zur Verfügung. Mikrobieller Phosphor stellt eine etwa zehnmahl größere Menge als Phosphor in Pflanzen dar. Der Phosphorgehalt beispielsweise im Pilzmycel beträgt 0,5 % bis 1 %, in der Bakterien-Biomasse 1 % bis 3 % (umgerechnet auf Trockensubstanz).

tkává ve stálém a enzymaticky bohatém prostředí se specifickou mikroflórou zaživacího traktu a dochází k explozivnímu urychlování rozkladu. Významnou skupinou půdních organismů jsou žížaly. Na stanovištích nevhodných pro žížaly zastávají podobnou úlohu roupice, jež jsou přizpůsobeny kyselým půdám. Při průchodu střevem žížaly se zvýší jak početnost, tak aktivita mikrobních populací. Podle literárních údajů se např. počty bakterií a aktinomycet zvýšily až 1000krát. To má významný vliv na mineralizaci organického fosforu. Vedle toho při hloubení chodeb zvyšují půdní živočichové aeraci půdy a tím nepřímo zintenzivňují i rozklad organických látek (Kalčík, 2001).

Získávání živin kořeny ovlivňuje velikost difúze v půdě, zvláště u nepohyblivého fosforu, který může difundovat jen do vzdálenosti menší než 1 mm. Pouze fosfor z této tenké vrstvy kolem povrchu kořene je tedy potenciálně přístupný pro rostliny. Zlepšení fyzikálních vlastností půdy činností půd-

ních živočichů vede k rozvoji bohatšího kořenevého systému a ke zvětšení objemu půdy, z něhož mohou být živiny přijímány. Exkrementy živočichů obsahují díky intenzivní mineralizaci relativně více fosforu než samotná půda. Ačkoliv se celkový obsah fosforu v půdě a opadu činností půdních živočichů nezvýší, jejich význam spočívá ve zvětšení rychlosti koloběhu a přístupnosti a tím ve zvýšení množství živin získaných kořeny za stejnou dobu.

Ztráty fosforu

Ve většině půdních ekosystémů dochází k větším či menším ztrátám fosforu. V systémech s otevřeným koloběhem fosforu, mezi které patří agroekosystémy, dochází k pravidelným ztrátám fosforu sklizní plodin. Tento úbytek fosforu pak musí být nahrazen hnojením fosforečnými hnojivy. Přírodní ekosystémy lze s určitým omezením považovat za systémy s uzavřeným koloběhem fosforu. Avšak ani na netěžených lesních plochách není koloběh fosforu beze zbytku uza-

(c) Auflösung von Mineralphosphaten (Phosphor-Solubilisierung)

Einige Mikroorganismen scheiden organische Säuren (z.B. Milch-, Glykol-, Oxal-, Zitronensäure) aus, die wasserunlösliche Phosphate lösen und auf diese Weise für Pflanzen und Mikroorganismen verfügbar machen.

(d) Oxidation und Reduktion von mineralischem Phosphor

Bestimmte Mikroorganismen können Phosphit (Verbindung mit dreiwertigem Phosphor) unter anaeroben Bedingungen assimilieren und in Phosphat (Verbindung mit fünfwertigem Phosphor) umwandeln. Diese Oxidations- und Reduktionsvorgänge sind jedoch im Boden nicht von großer Bedeutung.

Die Rolle von Bodenfauna im Phosphorkreislauf beruht hauptsächlich auf einer mechanischen Lockerung organischer Rückstände und damit Vergrößerung ihrer Oberfläche und Vermischung mit mineralischen Bodenbestandteilen. Das Verdau-

ungssystem von Bodentieren stellt einzigartige Fermenter dar, in denen das Verdauungsmaterial in einer stabilen und enzymatisch reichen Umgebung mit einer spezifischen Verdauungsmikroflora angegriffen und sein Abbau explosionsartig beschleunigt wird. Eine wichtige Gruppe von Bodenorganismen sind die Regenwürmer. In für Regenwürmer ungeeigneten Lebensräumen spielen die Enchyträen eine ähnliche Rolle, die an saure Böden angepasst sind. Während des Durchgangs durch den Regenwurmdarm nehmen sowohl die Häufigkeit als auch die Aktivität der Mikrobenpopulationen zu. Literaturangaben zufolge steigt beispielsweise die Anzahl von Bakterien und Aktinomyceten bis zu tausendmal an. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Mineralisierung von organischem Phosphor. Außerdem verbessert die Grabtätigkeit der Bodentiere die Belüftung des Bodens, was den Abbau organischer Stoffe indirekt verstärkt (Kalčík, 2001).

Die Nährstoffaufnahme durch Wurzeln wird von der Bodendiffusion beeinflusst, insbesondere bei wenig mobilem Phosphor, der nur in eine Entfernung von unter 1 mm diffundieren kann. Daher

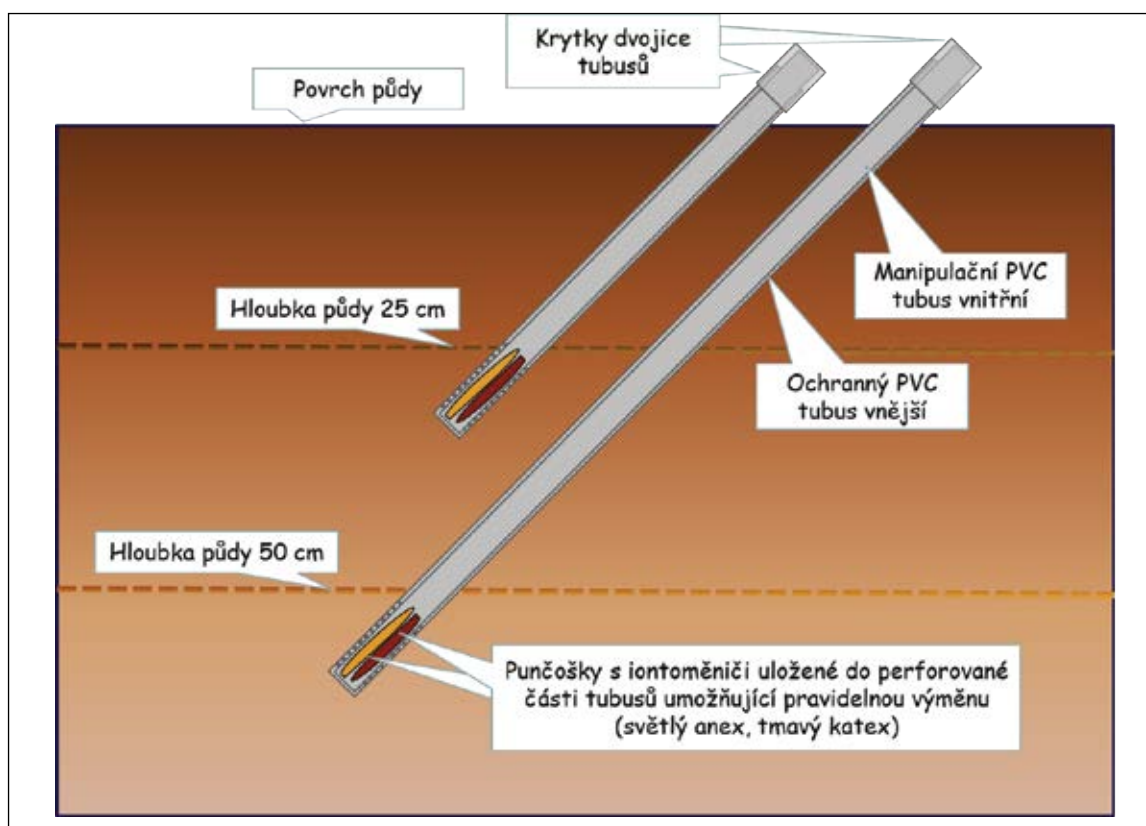
vřený. Ztráty fosforu se dějí hlavně vodní erozí půdy. Ke snížení ztrát fosforu z lesní půdy je proto velmi důležité omezit na nejmenší míru vznik erozních rýh v půdě při těžební činnosti (Kalčík, 2001).

Měření dostupnosti fosforu in situ

Dostupnost minerálních forem fosforu byla měřena metodou stanovení minerálního fosforu nahromaděného na výměnných místech iontoměničových zrn umístěných po určitou dobu v manipulačních tubusech (viz obr. 2) podle Binkley at Matson

(1983). Metoda představuje jednoduchý a nedestruktivní způsob záchytu minerálních iontů fosforu z půdního roztoku výměnnými reakcemi. Umožňuje stanovit množství nevyužitého odtékajícího fosforu ze dvou různých hloubek, 25 a 50 cm.

Iontoměničová zrna, katex – PUROLITE C100E a anex - PUROLITE A520E, byly před aplikací odděleně vloženy do punčošek zhotovených z polyamidové síťoviny. Ve dvou různých hloubkách 25 a 50 cm byly ve vnitřních tubusech (obr. 2) exponovány po dobu tří po sobě jdoucích období (dvou



Obr. 2. Umístění iontoměničových sond pod úhlem 45° do různých hloubek (25 a 50 cm)

Abb. 2. Position der Ionenaustauschsonden unter dem Winkel von 45° in unterschiedlichen Tiefen (25 und 50 cm)

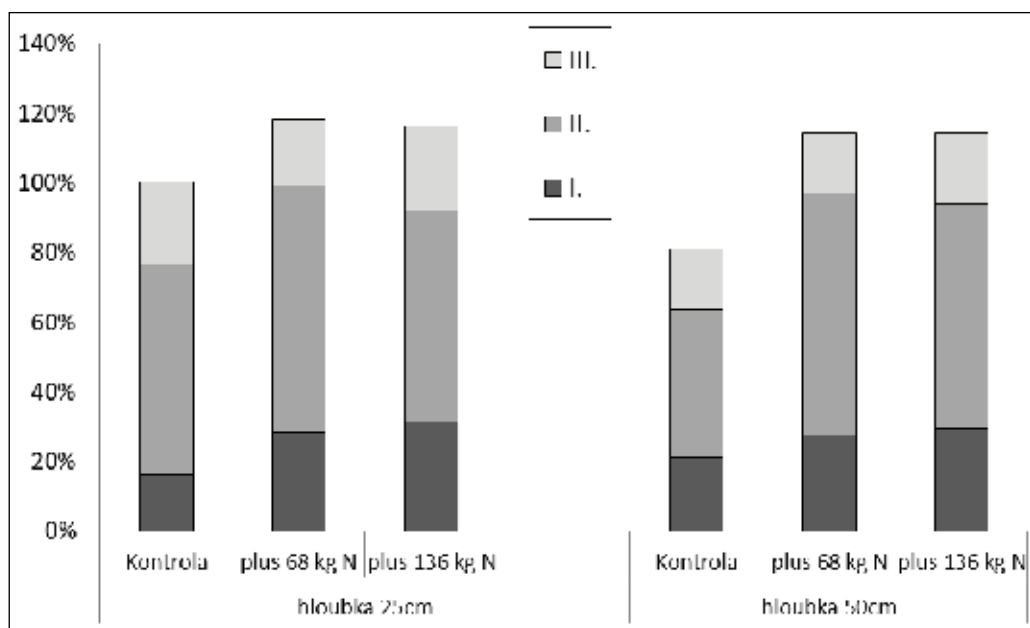
ist nur Phosphor aus dieser dünnen Schicht um die Wurzeloberfläche pflanzenverfügbar. Eine Verbesserung der physikalischen Bodeneigenschaften durch die Wirkung von Bodentieren führt zur Entwicklung eines reichhaltigeren Wurzelsystems und zur Vergrößerung des Bodenvolumens, aus dem Nährstoffe entnommen werden können. Tierexkremamente enthalten dank der intensiven Mineralisie-

rung relativ mehr Phosphor als der Boden selbst. Obwohl die Bodentieraktivität den Gesamtgehalt an Phosphor im Boden und der Pflanzenstreu nicht erhöhen kann, besteht ihre Bedeutung in der Steigerung der Kreislaufgeschwindigkeit und der Pflanzenverfügbarkeit und somit zur Zunahme der Nährstoffmenge, die von den Wurzeln während einer bestimmten Zeit gewonnen werden kann.

vegetačních - od 10. dubna 2017 do 11. října 2017 a od 17. 4. 2018 do 11. října 2018; a jednoho období vegetačního klidu - od 11. 10. 2017 do 17. 4. 2018). Pro desorpci zachyceného reaktivního fosforu z iontoměníčů byl použit koncentrovaný roztok NaCl. Stanovení rozpuštěných anorganických orthofosforečnanů z extrakčního roztoku bylo provedeno absorpční spektrofotometrií (spektrofotometr HACH).

Dostupnost minerálních forem fosforu byla měřena na dvou rozdílných experimentálních lokalitách

v původně konvenčně obhospodařované orné půdě v katastrálním území obce Banín v Pardubickém kraji. Pokusné parcelky s odstupňovaným dusíkatým hnojením byly na daných lokalitách založeny v roce 2012. Území se nachází v ochranném pásmu vodního zdroje II. stupně Březová nad Svitavou, které je jímacím územím a hlavním zdrojem pitné vody pro brněnskou aglomeraci. V dotčeném území jsou hnědé půdy kyselé na slínovcích a pískovcích (detailnější charakteristiky lokalit viz Záhora et al., 2012).



Obr. 3. Relativní porovnání množství fosforu zachyceného ve dvou různých hloubkách 25 a 50cm v období od 10. dubna 2017 do 11. října 2017 (označeno jako období I.), od 11. 10. 2017 do 17. 4. 2018 (II.) a poslední období od 17. 4. 2018 do 11. října 2018. Záchyty fosforu v hloubce 25cm z experimentální parcely bez hnojení minerálním dusíkem (Kontrola) jsou považovány za 100%.

Abb. 3. Relativvergleich der Phosphormengen in zwei unterschiedlichen Tiefen von 25 und 50 cm, die in den Perioden vom 10. April 2017 bis 11. Oktober 2017 (als Periode I bezeichnet), vom 11. 10. 2017 bis zum 17. 4. 2018 (Periode II.) sowie vom 17. 4. 2018 bis zum 11. 10. 2018 (Periode III.) eingefangen wurden. Die Phosphoranlagerung in einer Tiefe von 25 cm am Versuchsstandort ohne mineralische Stickstoffdüngung (Kontrolle) wird als 100% betrachtet.

Phosphorverluste

In den meisten Bodenökosystemen kommt es zu größeren oder geringeren Phosphorverlusten. In Systemen mit einem offenen Phosphorkreislauf, einschließlich der Agrarökosysteme, kommt es zu regelmäßigen Phosphorverlusten durch die Ernte. Dieser Phosphorverlust muss dann mithilfe Phos-

phatdünger ersetzt werden. Natürliche Ökosysteme können mit gewissen Einschränkungen als Systeme mit einem geschlossenen Phosphorkreislauf betrachtet werden, vollständig geschlossen ist der Phosphorkreislauf jedoch nicht einmal auf eingriffsfreien Waldgebieten. Phosphorverluste erfolgen hauptsächlich durch die Wassererosion des Bodens. Es ist daher sehr wichtig, das Entstehen

Výsledky jsou prezentovány v relativním vyjádření v kumulativní podobě za všechna období na obr. 3. Pro snazší vzájemné porovnání jednotlivých variant je za stoprocentní základ zvolena míra záchytu minerálního fosforu v kontrolní variantě bez vstupu minerálního dusíku v hloubce 25cm. Z výsledků vyplývá, že aktivity a odběr fosforu půdními organismy a kořeny rostlin v průběhu vegetačních období (období I. a III., viz obr. 3) měly vliv na snížení záchytu minerálního fosforu přibližně na jednu polovinu proti obdobím vegetačního klidu. Dále, že ve variantách hnojených minerálním dusíkem byl v obou hloubkách celkový záchyt minerálního fosforu o 14 až 18 % větší, což podporuje hypotézu o větším uvolňování fosforu ze starých půdních zásob na lokalitách dlouhodobě nehnojených fosforem při hnojení minerálním dusíkem. Zpřístupnění relativně velmi dobrých zásob fosforu v našich půdách po hnojení minerálním dusíkem může vysvětlit rezignaci na hnojení fosforem v posledních 27 letech ve srovnání s obdobím před rokem 1991 (Sálusová, 2018).

O jednu třetinu menší dostupnost fosforu v hloubce 50cm kontrolní varianty bez přídatku minerálního dusíku ve srovnání s variantami s dusíkatým hnojením lze dát do souvislosti s tím, že snahy o regeneraci půdního oživení cestou snížení minerálního dusíkatého hnojení mohou v budoucnu zmenšovat dostupnost půdního fosforu. Důvodem je regenerace fyzikálního stavu půdy. 13%-ní zvýšení stability půdních agregátů, tedy regeneraci půdní struktury, potvrdili Brtnický a kol. (2017) v nehnojené variantě po prvních čtyřech letech téhož experimentu. Obnova půdních agregátů zlepšuje mikrobiální kontrolu půdního fosforu. Následkem toho se ale přístup rostlin k fosforu stává komplikovanější. Je vynucena těsnější spolupráce s půdními mikroorganismy, která se paradoxně ani nemusí projevit nedostatkem fosforu v rostlině. Naopak může donutit rostlinu k většímu vylučování energie a uhlíkatých látek z kořenů na podporu spolupracujících mikroorganismů v okolí kořene a tím i ke zlepšení kvality organické hmoty v půdě spojené s efektivnější kontrolou klíčových živin.

von Erosionsfurchen bei dem Holzschlag möglichst zu verhindern, um die Phosphorverluste aus dem Waldboden zu reduzieren (Kalčík, 2001).

In-situ-Messung der Phosphorverfügbarkeit

Die Phosphorverfügbarkeit in Mineralformen wurde mit dem Verfahren Binkley at Matson (1983) gemessen, bei dem mineralischer Phosphor an Austauschplätzen der Ionenaustauscherkörner angesammelt wurde, die sich über eine bestimmte Zeit in Manipulationsröhrchen befanden (siehe Abb. 2). Das Verfahren ist eine einfache und zerstörungsfreie Methode zum Einfangen von Phosphor-Mineralionen aus der Bodenlösung durch Austauschreaktionen. Es erlaubt, die Menge an ungenutztem abfließendem Phosphor in zwei verschiedenen Tiefen (25 und 50 cm) zu bestimmen.

Die Ionenaustauscherkörner, Kationenaustauscher PUROLITE C100E und Anionenaustauscher PUROLITE A520E, wurden vor der Applikation in je

ein Polyamid-Netz gelegt. In zwei Tiefen von 25 und 50 cm wurden sie während drei aufeinanderfolgenden Perioden (zwei Vegetationsperioden – vom 10. April 2017 bis 11. Oktober 2017 und vom 17. 4. 2018 bis 11. 10. 2018 – und einer Ruheperiode – vom 11. 10. 2017 bis 17. 4. 2018) in inneren Röhrchen (Abb. 2) exponiert. Für die Desorption des angelagerten reaktiven Phosphors von den Ionenaustauschern wurde eine konzentrierte NaCl-Lösung verwendet. Die Bestimmung gelöster anorganischer Orthophosphate aus der Extraktionslösung wurde durch Absorptions-Spektrophotometrie (Spektrophotometer HACH) durchgeführt.

Die Verfügbarkeit der mineralischen Phosphorformen wurde an zwei verschiedenen Versuchstandorten im ursprünglich konventionell bewirtschafteten Ackerboden im Katastergebiet Banín in der Region Pardubice gemessen. An den beiden Standorten wurden 2012 Versuchspartellen mit abgestufter Stickstoffdüngung eingerichtet. Das Gebiet liegt in der Wasserschutzzone II Březová nad

Jsou-li tedy podle Van Dijka (2016) kumulativní zásoby fosforu v našich orných půdách vytvořené dlouhodobým hnojením tak vysoké, že dosahují průměrně až $1450 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ a činí-li každoroční ztráty fosforu v České republice $2,1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, potom by tato zásoba stačila ve stávajícím zemědělském systému hypoteticky na 690 roků. Převedením konvenčního zemědělství na zemědělství bez vstupů minerálního dusíku a tím i odhadovaným snížením ztrát fosforu o jednu třetinu by tato zásoba stačila dokonce na 1030 roků, tedy o 340 roků více. Jde samozřejmě o čísla orientační vypočítaná z měření na jedné lokalitě a z průměrných charakteristik pro celou republiku. Na straně druhé tyto hypotetické hodnoty ilustrují význam potenciálního zdroje fosforu v půdě při úvahách o žádoucích změnách našeho zemědělství.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován s podporou projektu INTERREG V-A Rakousko – Česká Republika „Inovace technologií při kompostování, využití kompostu

a ochrana půdy ATCZ42 - INTEKO a s podporou Brněnských vodáren a kanalizací, a.s. Poděkování dále patří Ing. Jitce Čermákové, bez jejíž mnohostranné pomoci by práce nemohla vzniknout.

Literatura

Binkley, D., Matson P. 1983. Ion Exchange Resin Bag Method for Assessing Forest Soil Nitrogen Availability. *Soil Science Society of America Journal*, 47: 1050 - 1052.

Birke, M., Rauch, U. 2008. Uranium in stream water of Germany. In: *Loads and fate of fertilizer-derived uranium*. De Kok L.J., Schnug, E. (Eds), Backhys Publishers, Leiden, 79-90.

Brtnický, M., Elbl, J., Dvořáčková, H., Kynický, J., Hladký, J. 2017. Changes in Soil Aggregate Stability Induced by Mineral Nitrogen Fertilizer Application. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(5): 1477–1482.

Svitavou, einem Wassergewinnungsgebiet mit der wichtigsten Trinkwasserquelle für den Brünner Ballungsraum. In dem betroffenen Gebiet kommen saure Braunböden auf Mergel- und Sandsteinen vor (nähere Angaben zu den Standorten siehe Záhora et al., 2012).

Abb. 3 Relativvergleich der Phosphormengen in zwei unterschiedlichen Tiefen von 25 und 50 cm, die in den Perioden vom 10. April 2017 bis 11. Oktober 2017 (als Periode I bezeichnet), vom 11. 10. 2017 bis zum 17. 4. 2018 (Periode II.) sowie vom 17. 4. 2018 bis zum 11. 10. 2018 (Periode III.) eingefangen wurden. Die Phosphoranlagerung in einer Tiefe von 25 cm am Versuchsstandort ohne mineralische Stickstoffdüngung (Kontrolle) wird als 100% betrachtet.

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 3 kumuliert für alle Perioden in einer relativen Darstellung gezeigt. Um den gegenseitigen Vergleich der einzelnen Varianten zu erleichtern, wurde der Anlagerungs-

grad von mineralischem Phosphor in der Kontrollvariante ohne Mineralstickstoffeintrag in der Tiefe von 25 cm als 100%-Basis gewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Aktivität und Phosphorentnahme durch Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln während der Vegetationsperioden (Perioden I und III, siehe Abb. 3) zur Abnahme der Anlagerung von mineralischem Phosphor auf etwa die Hälfte gegenüber den Ruheperioden führen. Des Weiteren, in den Varianten mit der mineralischen Stickstoffdüngung war die gesamte mineralische Phosphoranlagerung in den beiden Tiefen um 14 bis 18 % größer, was die Hypothese stützt, dass an mit Phosphor langfristig nicht gedüngten Standorten bei der mineralischen Stickstoffdüngung mehr Phosphor aus alten Bodenvorräten freigesetzt wird. Der Zugang zu relativ sehr guten Phosphorvorräten in unseren Böden nach der mineralischen Stickstoffdüngung kann den Verzicht auf die Phosphordüngung in den letzten 27 Jahren im Vergleich zu der Zeit vor 1991 erklären (Sálusová, 2018).

Jacques, D., Mallants, D., Šimůnek, J., Th. van Genuchten, M. 2008. Modeling the fate of uranium from inorganic phosphorus fertilizer applications in agriculture. In: Loads and fate of fertilizer-derived uranium. De Kok L.J., Schnug, E. (Eds), Backhys Publishers, Leiden, 57-64.

Kalčík, J. 2001: Koloběh fosforu v lesních půdách. Ochrana lesa. Roč. 80, č. 11 (2001), s. 491-493.

Kratz, S., Knappe, F., Rogasik, J., Schnug, E. 2008. Uranium balances in agroecosystems. In: Loads

and fate of fertilizer-derived uranium. De Kok L.J., Schnug, E. (Eds), Backhys Publishers, Leiden, 179-190.

Rogasik, J., Kratz, S., Funder, U., Panten, K., Barkusky, D., Baumecker, M., Gutser, R., Lausen, P., Scherer, H.W., Schmidt, L., Schnug, E. 2008. Uranium in soils of German long-term fertilizer experiments. In: Loads and fate of fertilizer-derived uranium. De Kok L.J., Schnug, E. (Eds), Backhys Publishers, Leiden, 135-146.

Die um ein Drittel kleinere Phosphorverfügbarkeit in der Tiefe von 50 cm in der Kontrollvariante ohne Zusatz von Mineralstickstoff im Vergleich zu den Varianten mit Stickstoffdüngung kann damit zusammenhängen, dass Bemühungen um eine Regeneration der Bodenbelebung durch Verringerung der Mineralstickstoffdüngung künftig die Verfügbarkeit von Bodenphosphor verringern können. Der Grund ist die Regeneration des physischen Bodenzustands. Eine Erhöhung der Bodenaggregatstabilität um 13 %, d.h. die Regeneration der Bodenstruktur, wurde von Brtnický et al. (2017) in der ungedüngten Variante nach den ersten vier Jahren desselben Experiments bestätigt. Die Wiederherstellung von Bodenaggregaten verbessert die mikrobielle Kontrolle des Bodenphosphors. Infolgedessen wird allerdings die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor erschwert. Eine engere Zusammenarbeit mit Bodenmikroorganismen wird notwendig, die sich paradoxerweise nicht durch Phosphormangel in Pflanzen manifestieren muss. Die Pflanzen können im Gegenteil dazu gezwungen werden, Energie und kohlenstoffhaltige Substanzen aus ihren Wurzeln auszuscheiden, um kooperierende Mikroben um die Wurzeln herum zu unterstützen und die Qualität der organischen Substanzen im Boden sowie eine effektivere Kontrolle der wichtigsten Nährstoffe dadurch zu verbessern.

Solange die durch langfristige Düngung erzeugten kumulativen Phosphorvorräte in unseren Ackerböden Van Dijk (2016) zufolge so hoch sind, dass sie

durchschnittlich bis zu 1450 kg.ha⁻¹ erreichen, und wenn die jährlichen Phosphorverluste in Tschechien 2,1 kg.ha⁻¹ betragen, würde dieser Vorrat im gegenwärtigen Agrarsystem hypothetisch für 690 Jahre genügen. Nach einer Umwandlung der konventionellen Landwirtschaft auf die Bewirtschaftung ohne mineralischen Stickstoffeintrag und somit nach der geschätzten Verringerung der Phosphorverluste um ein Drittel würde dieser Bestand sogar für 1030 Jahre genügen, d.h. um 340 Jahre länger. Es handelt sich selbstverständlich um Richtwerte, die aus Messungen an einem Standort und aus Durchschnittswerten für das gesamte Land berechnet wurden. Andererseits zeigen diese hypothetischen Werte, wie wichtig die potenziellen Bodenphosphorvorräte für Überlegungen über wünschenswerte Veränderungen der tschechischen Landwirtschaft sind.

Danksagung

Der Beitrag wurde dank der Förderung aus dem Projekt INTERREG V-A Österreich – Tschechien „Innovation der Technologien bei Kompostierung, Kompostanwendung und Bodenschutz“ ATCZ42 – INTEKO und mit Unterstützung der Gesellschaft Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. erarbeitet. Unser Dank gehört auch Ing. Jitka Čermáková, ohne ihre vielseitige Hilfe hat die Arbeit nicht entstanden können.

Sálusová, D. 2018. České zemědělství očima statistiky 1918-2017. Praha: Český statistický úřad, ISBN 978-80-250-2841-4.

Schnug, E., Haneklaus, N. 2014. Uranium, the hidden treasure in phosphates. "SYMPHOS 2013", 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry. Procedia Engineering 83 (2014) 265 – 269.

Van Dijk, K.C., Lesschen, J.P., Oenema O. 2019. Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. Science of The Total Environment, Vol. 542, Part B, 1078-1093.

Záhora, J. et al., 2012. Výroční zpráva projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum, projektu QJ1220007: Možnosti zadržení reaktivního dusíku ze zemědělství ve vodohospodářsky nejzranitelnější oblasti.

Literatur

Binkley, D., Matson P. 1983. Ion Exchange Resin Bag Method for Assessing Forest Soil Nitrogen Availability. Soil Science Society of America Journal, 47: 1050 - 1052.

Birke, M., Rauch, U. 2008. Uranium in stream water of Germany. In: Loads and fate of fertilizer-derived uranium. De Kok L.J., Schnug, E. (Eds), Backhuys Publishers, Leiden, 79-90.

Brtnický, M., Elbl, J., Dvořáčková, H., Kynický, J., Hladký, J. 2017. Changes in Soil Aggregate Stability Induced by Mineral Nitrogen Fertilizer Application. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 65(5): 1477–1482.

Jacques, D., Mallants, D., Šimůnek, J., Th. van Genuchten, M. 2008. Modeling the fate of uranium from inorganic phosphorus fertilizer applications in agriculture. In: Loads and fate of fertilizer-derived uranium. De Kok L.J., Schnug, E. (Eds), Backhuys Publishers, Leiden, 57-64.

Kalčík, J. 2001: Koloběh fosforu v lesních půdách. Ochrana lesa. Roč. 80, č. 11 (2001), S. 491-493.

Kratz, S., Knappe, F., Rogasik, J., Schnug, E. 2008. Uranium balances in agroecosystems. In: Loads and fate of fertilizer-derived uranium. De Kok L.J.,

Schnug, E. (Eds), Backhuys Publishers, Leiden, 179-190.

Rogasik, J., Kratz, S., Funder, U., Panten, K., Barkusky, D., Baumecker, M., Gutser, R., Lausen, P., Scherer, H.W., Schmidt, L., Schnug, E. 2008. Uranium in soils of German long-term fertilizer experiments. In: Loads and fate of fertilizer-derived uranium. De Kok L.J., Schnug, E. (Eds), Backhuys Publishers, Leiden, 135-146.

Sálusová, D. 2018. České zemědělství očima statistiky 1918-2017. Praha: Český statistický úřad, ISBN 978-80-250-2841-4.

Schnug, E., Haneklaus, N. 2014. Uranium, the hidden treasure in phosphates. "SYMPHOS 2013", 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry. Procedia Engineering 83 (2014) 265 – 269.

Van Dijk, K.C., Lesschen, J.P., Oenema O. 2019. Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. Science of the Total Environment, Vol. 542, Part B, 1078-1093.

Záhora, J. et al., 2012. Výroční zpráva projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum, projektu QJ1220007: Možnosti zadržení reaktivního dusíku ze zemědělství ve vodohospodářsky nejzranitelnější oblasti.



Obhospodařování půdys šetrným přístupem k vodním tokům s ohledem na vnos fosforu z pohledu zemědělství

Zkrácená verze

Josef Springer, *Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer*

Vnos fosforu ze zemědělských užitkových ploch do povrchových vod vlivem eroze znamená pro zemědělce v každém případě ztrátu vody, půdy, živin a v důsledku toho ztrátu úrodnosti půdy. V posledních desetiletích v zemědělství podstatně stouplo povědomí o tomto problému v této formě degradace půdy.

Vývoj pěstebních metod omezujících erozi

Ještě před několika málo desetiletími bylo používání pluhu při orbě standardem, doprovázeným přípravou půdy k osevu pomocí rotačních bran. Ve stále větší míře bylo používání pluhu nahrazováno kultivátorem coby nástrojem k rozvolňování půdy a přímíchávání zbytků sklizně. Se vstupem Rakouska do EU byl v rámci 2. pilíře Společné agrární politiky (GAP) etablován rakouský Program ekologického

zemědělství („ÖPUL“). Tento program od počátku zahrnoval rovněž opatření „Ozelenění ploch orné půdy“. Přitom je pěstováním (nevyužívaných) meziplodin po raných kulturách podstatně zkracována doba bez porostu. Cílem tehdy bylo primárně snížit únik dusičnanů do spodních vod pomocí biologické fixace nitrodusičnanu v rostlinách meziplodin.

Z důvodu nedostatku vhodné secí techniky byly tyto meziplodiny na sklonku podzimu často pořežány a následně zaorány. Pro pěstování následných jařin (např. kukuřice, cukrová řepa, slunečnice) tím ještě nebyla dána ochrana proti erozi. Ovšem opatření „ÖPUL“ s názvem „Ozelenění ploch orné půdy“ bylo postupem let dále rozvíjeno a pro lepší ochranu proti erozi doplněno o opatření „Setí do mulče a přímý výsev“. Meziplodiny se přitom přes

Gewässerschonende Bewirtschaftung in Bezug auf Phosphoreintrag aus Sicht der Landwirtschaft

Kurzfassung

Josef Springer, *Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer*

Phosphoreintrag von landwirtschaftlichen Nutzflächen in Oberflächengewässer durch Erosion bedeutet für den Landwirt jedenfalls den Verlust von Wasser, Boden, Nährstoffen und somit von Bodenfruchtbarkeit. In den letzten Jahrzehnten ist seitens der Landwirtschaft das Problembewusstsein für diese Form der Bodendegradation wesentlich angestiegen.

Die Entwicklung von erosionshemmenden Anbauverfahren

War vor wenigen Jahrzehnten der Pflugeinsatz im Ackerbau noch eine Standardmaßnahme, begleitet von einer Saatbettbereitung mittels Kreiselegge. Zunehmend wurde der Pflugeinsatz vom Grubber als Gerät zur Bodenlockerung und zur Einmischung von Ernterückständen in den Boden abgelöst. Mit dem Beitritt Österreichs zur EU wurde in der 2.

Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik GAP das österreichische Programm für eine umweltgerechte Landwirtschaft ÖPUL etabliert. Dies enthielt von Anfang an auch die Maßnahme „Begrünung von Ackerflächen“. Dabei wird mit einem Anbau von (nicht genutzten) Zwischenfrüchten nach frühreimenden Kulturen die Zeit ohne Pflanzenbewuchs wesentlich verringert. Die Zielsetzung lag damals primär in der Reduktion des Nitrataustrages in das Grundwasser durch eine biologische Fixierung von Nitratstickstoff im Auswuchs der Zwischenfrüchte.

Mangels geeigneter Sätechnik wurden diese Zwischenfrüchte im Spätherbst häufig gehäckselt und anschließend eingepflügt. Für den Anbau der folgenden Sommerungen (zB Mais, Zuckerrübe, Sonnenblume) war damit noch kein Erosionsschutz gegeben. Doch die ÖPUL-Maßnahme „Begrünung

zimní měsíce ponechávají na poli a při postupu s použitím mulče je teprve krátce před osemem na jaře provedena příprava půdy k osevu bez obracení půdy. U přímého výsevu není prováděno zpracování půdy, jsou ovšem zapotřebí speciální secí stroje.

Aktuální vývoj

V případě setí do mulče nebylo pokrytí půdy po přípravě k osevu vždy uspokojivé a ochrana proti erozi byla nadále nedostačující. Proto se první zemědělci pokoušeli o přímý výsev, jakmile byla tato technika k dispozici. Odpadnutím přípravy půdy k osevu již není půda příliš rozvolněna a odmrznuté meziplodiny zůstávají celé na povrchu půdy, čímž je dosaženo výborné ochrany proti erozi. Tento efekt lze vyjádřit pomocí faktoru povrchového pokrytí půdy (faktor C) univerzální rovnice ztráty půdy. Aktuálně nedostatečně vyjádřitelné je zlepšení půdní struktury (stabilnější půdní agregáty, stabilnější půdní póry a tím zlepšená infiltrace vody = lepší vsakování dešťo-

vé vody) z důvodu téměř celoročního pokrytí a zakořenění orných ploch. S tím spojené biologická stabilizace struktury půdy umožňuje podstatné zvýšení odolnosti půd vůči srážkové erozi.

Proč dojde k prosazení postupů přímé setby

Postup přímé setby v kombinaci s pěstováním mezipločin představuje kromě zabraňování nežádoucímu zhutnění půdy jedno z nejzásadnějších opatření na zabránění erozi na plochách produktivní zemědělské půdy. Častější období bez dostatečných srážek podstatnou měrou přispívají k tomu, aby pomocí té nejlepší půdní struktury byla zvyšována schopnost půdy infiltrovat vodu a bylo sníženo neproduktivní odpařování přes vrstvu mulče. Do budoucna to bude představovat zásadní strategii přizpůsobení zemědělství v oblastech sucha se zřetelem na změny klimatu. Tím bude v budoucnu rovněž více zamezeno erozi půdy než je tomu v současné době.

von Ackerflächen“ wurde mit den Jahren weiterentwickelt und für einen verbesserten Erosionsschutz um die ÖPUL-Maßnahme „Mulch- und Direktsaat“ ergänzt. Dabei wird der Zwischenfruchtbestand über die Wintermonate am Acker belassen und beim Mulchsaatverfahren erfolgt erst kurz vor dem Anbau im Frühjahr eine Sattbettbereitung ohne wendende Bodenbearbeitung. Bei der Direktsaat erfolgt keine Bodenbearbeitung, allerdings sind spezielle Sägeräte erforderlich.

Aktuelle Entwicklung

Bei Mulchsaatverfahren war die Bodenbedeckung nach der Saatbettbereitung nicht immer zufriedenstellend und damit der Erosionsschutz nach wie vor unzureichend. Daher versuchten sich erste Landwirte in der Direktsaat, sobald diese Technik verfügbar war. Durch Entfall der Saatbettbereitung wird der Boden nicht mehr überlockert, und die abgefrosteten Zwischenfrüchte verbleiben zur Gänze an der Bodenoberfläche, womit ein ausgezeichneter Erosionsschutz erreicht wird. Dieser Effekt ist mit dem Bodenbedeckungsfaktor (C-Faktor) der Allgemeinen Bodenerosionsgleichung darstellbar. Aktuell unzureichend darstellbar ist die Verbesserung der Bodenstruktur

(stabilere Bodenaggregate, stabilere Bodenporen und damit eine verbesserte Wasserinfiltration = höhere Regenverdaulichkeit) durch eine annähernd ganzjährige Bedeckung und Durchwurzelung der Ackerflächen. Die damit verbundene Lebendverbauung lässt die Böden wesentlich widerstandsfähiger gegenüber erosiven Niederschlagsereignissen werden.

Warum sich Direktsäverfahren durchsetzen werden

Direktsäverfahren in Kombination mit Zwischenfruchtanbau sind neben der Vermeidung von Bodenschadverdichtungen einer der wesentlichsten Maßnahmen zur Erosionsverminderung auf landwirtschaftlich produktiven Ackerflächen. Vermehrte Zeiträume ohne ausreichende Niederschläge tragen ganz wesentlich dazu bei, mittels bester Bodenstruktur das Wasserinfiltrationsvermögen der Böden zu erhöhen und die unproduktive Verdunstung mittels Mulchschicht zu verringern. Dies wird eine wesentliche Anpassungsstrategie der Landwirtschaft im Trockengebiet hinsichtlich Klimawandel zukünftig darstellen. Damit wird auch das Ausmaß von Bodenerosion zukünftig stärker eingedämmt als die derzeit der Fall ist.



Obr. 1. Rozmanitá směs meziplodin
Abb. 1. Vielfältige Zwischenfruchtmischung



Obr. 2. Setba kukuřice pomocí přímého výsevu do odmrznuté meziplodiny
Abb. 2. Maisanbau mittels Direktsaat in die abgefrostete Zwischenfrucht



Obr. 3. Zbytky meziplodiny poskytují ochranu proti erozi
Abb. 3. Rückstände der Zwischenfrucht bieten Erosionsschutz



Obr. 4. Odmrznutá meziplodina chrání před větrnou erozí (menší ztráta půdy, více vody)
Abb. 4. Abgefrostete Zwischenfrucht schützt vor Winderosion (weniger Bodenverlust, mehr Wasser)

Formy, výskyt, koloběh a hodnocení obsahu fosforu v půdách

Lenka Prášková; Michaela Smatanová

Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně, lenka.praskova@ukzuz.cz

Fosfor je jedním z klíčových prvků ve výživě rostlin. Příjem a metabolismus fosforu kladně koreluje s celou řadou biochemických procesů probíhajících, jak buňkách kořenového systému, tak i v nadzemních částech rostlin (Fecenko & Ložek, 2000). Fosfor v půdě podléhá procesům sorpce anebo desorpce a srážení nebo naopak rozpouštění fosforečnanů a mineralizace/imobilizace organicky vázaného P (Brady et Weil, 2002).

Nevázaný fosfor se v přírodě vyskytuje a je také přijímán rostlinami téměř výlučně ve formě disociované kyseliny fosforečné (H_2PO_4). Hodnota pH určuje formy fosforečnanových aniontů a také rozpustnost minerálů obsahujících P. V neutrálním a mírně kyselém prostředí má největší zastoupení anion $H_2PO_4^-$ a v alkalickém HPO_4^{2-} (Holtan et al.,

1988). Přijatý minerální fosfor je rychle zabudován do organických sloučenin a následně transportován v rostlinách do míst jeho nejvyšší potřeby.

V půdě se obsah fosforu pohybuje v rozmezí od 0,01 do 0,15 %, je v půdě málo pohyblivý a jeho obsah v půdním roztoku je nízký – většinou pod 1 ppm. Vyšší obsah fosforu zpravidla vykazují půdy s vyšším obsahem organické hmoty.

Většina celkového fosforu v půdě je pro rostliny nepřijatelná. Přijatelnou část tvoří kyselina trihydrogenfosforečná (H_3PO_4), v menší míře pak ještě vazby kyseliny pyrofosforečné ($H_4P_2O_7$), které jsou potenciálním zdrojem fosforu v půdě pro výživu rostlin.

Formen, Aufkommen, Kreislauf und Bewertung des Phosphorgehalts in Böden

Lenka Prášková; Michaela Smatanová

Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brünn, lenka.praskova@ukzuz.cz

Phosphor ist eines der Schlüsselemente in der Pflanzenernährung. Der Phosphorempfang und -metabolismus korrelieren positiv mit zahlreichen biochemischen Prozessen, die sowohl in den Zellen des Wurzelsystems als auch in oberirdischen Pflanzenteilen verlaufen (Fecenko & Ložek, 2000). Bodenphosphor unterliegt Sorptions- und Desorptionsprozessen sowie der Fällung oder Auflösung von Phosphaten und der Mineralisierung/Immobilisierung von organisch gebundenem P (Brady et Weil, 2002).

Ungebundener Phosphor kommt in der Natur fast ausschließlich in Form der dissoziierten Monophosphorsäure (H_2PO_4) vor, und so wird er auch von den Pflanzen empfangen. Der pH-Wert bestimmt die Formen der Phosphat-Anionen sowie die Löslichkeit von P-haltigen Mineralien. Im neutralen und schwach sauren Milieu ist der Anion $H_2PO_4^-$ am meisten vertreten, und im alkalischen

HPO_4^{2-} (Holtan et al., 1988). Verfügbarer mineralischer Phosphor wird schnell in organische Verbindungen eingebaut und anschließend innerhalb der Pflanzen zu den Stellen des größten Bedarfs transportiert.

Im Boden schwankt der Phosphorgehalt zwischen 0,01 und 0,15 %, Phosphor ist hier wenig mobil, und sein Gehalt in der Bodenlösung ist gering – meistens unter 1 ppm. Einen höheren Phosphorgehalt weisen in der Regel Böden mit einem höheren Anteil organischer Substanzen auf.

Die Mehrheit des Gesamtphosphors im Boden ist für Pflanzen unverfügbar. Den verfügbaren Teil bildet die Orthophosphorsäure (H_3PO_4), in kleinerem Maße auch noch Produkte der Pyrofosfordsäure ($H_4P_2O_7$), die eine potenzielle Quelle des Bodenphosphors für die Pflanzenernährung darstellen.

Celkový fosfor v půdě rozdělujeme na dvě základní formy, anorganický a organický (Sanchez 2007). Jejich podíl na celkovém obsahu fosforu je v jednotlivých půdách rozdílný v závislosti na druhu půdy a obsahu organických látek v půdě.

Anorganický fosfor (od 25 do 98 %) je v půdě zastoupen původními minerály a jejich sloučeninami vápenatými a hořčnatými fosforečnany dobře rozpustnými ve vodě a slabých organických kyselinách. V půdě vznikají také nerozpustné fosforečnany, jejichž vznik je podmíněn přítomností volných iontů těchto tří prvků, Al a Fe při kyselém pH půdy a Ca v zásadité půdě.

Organického fosforu je od 2 do 75 % a je zastoupen fytynem, fosfolipidy, nukleovými kyselinami, nukleoproteidy, fosforylované lipidy a sacharidy a je důležitou součástí organické půdní hmoty. Tento fosfor se dostává do půdy posklizňovými zbytky a statkovými, případně organickými hnojivy. Tvoří v půdě důležitou rezervu, ze které se

v průběhu mineralizace uvolňuje a je zpřístupněn pro rostliny.

Proto, že se fosfor v půdě velmi pomalu pohybuje, je jeho obsah v přístupném množství největší buď přímo na povrchu anebo až v substrátovém horizontu (Rejšek et Vácha, 2018).

Boj o fosfor v půdě je tak mimořádný, že faktorem číslo jedna je délka a hustota vlastního kořenového systému rostliny. Teprve dalším v pořadí je koncentrace hydrogenfosforečnanů a poté difúzní přesun (Rejšek et Vácha, 2018).

Problematické chování P v půdách vede často k nadměrné aplikaci hnojiv, jejich akumulaci v půdě a následně k zvýšenému riziku exportu P do povrchových vod (Sharpley et al., 2003). Jak v oblastech dlouhodobě intenzivně zemědělsky využívaných, tak v oblastech s nedostatečným čištěním komunálních odpadních vod, dochází k eutrofizaci povrchových vod (Rejšek et Vácha, 2018).

Den Gesamtphosphor im Boden kann man in zwei Grundformen zusammenfassen: anorganisch und organisch (Sanchez 2007). Ihr Anteil an dem gesamten Phosphorgehalt ist in einzelnen Böden unterschiedlich, je nach dem Bodentyp und dem Anteil organischer Substanzen im Boden.

Anorganischer Phosphor (zwischen 25 und 98 %) befindet sich im Boden in Form von ursprünglichen Mineralien und ihren Verbindungen, Kalk- und Magnesiumphosphaten, die in Wasser und schwachen organischen Säuren gut löslich sind. Im Boden entstehen auch unlösliche Phosphate, deren Entstehung durch die Anwesenheit freier Ionen folgender drei Elemente bedingt ist: Al und Fe beim saurem pH-Wert des Bodens und Ca im alkalischen Boden.

Organischer Phosphor (zwischen 2 und 75 %) ist von Phytinsäure, Phospholipiden, Nukleinsäuren, Nukleoproteiden sowie phosphorylierten Lipiden und Sachariden vertreten und bildet einen wichtigen Teil der organischen Bodensubstanz. Dieser Phosphor gelangt in den Boden mit Ernterückstän-

den und Wirtschafts- bzw. organischen Düngern. Im Boden stellt er eine wichtige Reserve dar, die sich während der Mineralisierung löst und pflanzenverfügbar wird.

Phosphor bewegt sich im Boden sehr langsam, deshalb befindet sich seine größte verfügbare Menge entweder auf der Oberfläche, oder erst in dem Substrathorizont (Rejšek et Vácha, 2018).

Der „Kampf“ um Bodenphosphor ist so stark, dass der Faktor Nummer eins für die Pflanzen die Länge und Dichte des eigenen Wurzelsystems ist, erst danach die Konzentration der Hydrogenphosphate und drittens die Diffusionsbewegung (Rejšek et Vácha, 2018).

Dieses problematische Verhalten von P in Böden führt häufig zur übermäßigen Düngermanagement, zu ihrer Ansammlung im Boden und anschließend zur erhöhten Gefahr des P-Eintrags in die Oberflächengewässer (Sharpley et al., 2003). Sowohl auf langfristig und intensiv landwirtschaftlich genutz-

Přirozený obsah P v půdě závisí především na typu matečného substrátu, stupni zvětrávání podloží, klimatických podmínkách a velikosti ztrát P z půdy povrchovým a podpovrchovým odtokem. Největším přirozeným zdrojem P je proces zvětrávání matečných hornin obsahujících apatitové minerály (Stevenson, 1986). Kromě apatitů jsou dalšími hlavními primárními zdroji fosforu variscit, strengit a vivianit (Pitter, 1999). Zastoupení P v těchto minerálech se pohybuje zhruba od 13 % do 19 %. Koncentrace P v běžných matečných horninách se pohybuje od 0,01 % do 0,2 %, což je v přepočtu na jeden hektar okolo 1000 kg P.

U zemědělských půd koncentrace P a zastoupení jeho forem závisí především na způsobu hospodaření a aplikaci hnojiv (Motavalli et Milles 2002), přičemž v porovnání s jinými živinami je koncentrace rozpuštěného fosforu v půdním roztoku malá, obvykle se pohybuje od 0,001 mg.l⁻¹ u velmi neúrodných půd až po zhruba 1 mg.l⁻¹ u úrodných, intenzivně hnojených půd (Brady et Weil, 2002). Nej-

větší obsah P je obvykle v horním A horizontu, a to především díky recyklaci fosforu rostlinami a půdními organismy (Stevenson, 1986).

Zemědělskou produkcí se část P odčerpaného z půdy rostlinami nevrací zpět a v půdě logicky ubývá. K udržení vysokých výnosů jsou běžně užívána fosforečná hnojiva, a to především ze třech důvodů:

- Množství P v půdách je obecně nízké
- Většina sloučenin P je pro rostliny nedostupná, díky jejich nízké rozpustnosti
- A pokud jsou přístupné formy P v podobě hnojiv aplikovány do půdy, převážná část je fixována a časem se přemění na velmi nerozpustné formy (Brady et Weil, 2002)

Problém správného hnojení zemědělských plodin fosforem nabývá na aktuálnosti, s ohledem na dlouhodobě nízkou spotřebu fosforečných hnojiv a následkem toho klesající zásobou obsahu přístupného fosforu v zemědělských půdách České republiky.

ten Gebieten als auch auf denen mit unzureichender Reinigung von kommunalem Abwasser tritt die Eutrophierung von Oberflächengewässern auf (Rejšek et Vácha, 2018).

In Agrarböden hängen die P-Konzentration und Vertretung seiner Formen hauptsächlich von der Bewirtschaftungsart und der Anwendung von Düngemitteln ab (Motavalli et Milles 2002), wobei die Konzentration von gelöstem Phosphor in der Bodenlösung im Vergleich zu anderen Nährstoffen klein ist und normalerweise zwischen 0,001 mg.l⁻¹ in sehr kargen Böden bis zu etwa 1 mg.l⁻¹ in fruchtbaren, intensiv gedüngten Böden liegt (Brady et Weil, 2002). Der größte P-Gehalt befindet sich in der Regel im oberen A-Horizont, vor allem aufgrund der Wiederverwertung von Phosphor durch Pflanzen und Bodenorganismen (Stevenson, 1986).

Durch die landwirtschaftliche Produktion kehrt ein Teil des von den Pflanzen entnommenen Boden-P nicht zurück, und sein Gehalt im Boden nimmt logischerweise ab. Zur Aufrechterhaltung hoher Erträge werden üblicherweise Phosphatdünger ange-

wendet, und zwar hauptsächlich aus folgenden drei Gründen:

Die P-Menge in Böden ist im Allgemeinen gering.

Die meisten P-Verbindungen sind aufgrund ihrer geringen Löslichkeit für Pflanzen unverfügbar.

Und wenn verfügbare P-Formen als Düngemittel in den Boden eingetragen werden, wird der Großteil davon fixiert und im Laufe der Zeit in sehr unlösliche Formen umgewandelt (Brady et Weil, 2002).

Die Problematik der richtigen Phosphordüngung für landwirtschaftliche Kulturen nimmt an Aktualität an, wenn man bedenkt, dass der Verbrauch von Phosphatdüngern langfristig niedrig ist, und der Vorrat an verfügbarem Phosphor in den Agrarböden in Tschechien demzufolge sinkt. In den letzten 25 bis 30 Jahren betrug die durchschnittliche Jahresdosis nur 12 kg P₂O₅ pro Hektar Agrarfläche, was zu einem Verlust an verfügbarem Phosphor in den Böden führt.

Za posledních zhruba 25–30 let se průměrná roční dávka na 1 hektar zemědělské půdy pohybovala pouze 12 kg P₂O₅ zemědělské půdy, což postupně vede k úbytku přístupného fosforu v půdách.

Kontrolu stavu přístupných živin, půdní reakce a potřeby vápnění garantuje stát pravidelným Agrochemickým zkoušením zemědělských půd (AZZP), jehož výsledky slouží vlastníkům a uživatelům zemědělské půdy.

AZZP je šestiletý cyklus a v jeho průběhu je prozkoušena téměř celá výměra zemědělské půdy (z.p.) ČR, což ročně představuje více než 500 tisíc ha a odběr téměř 70 tisíc vzorků. Plocha pro odběr jednoho průměrného vzorku činí u orné půdy a trvalých travních porostů (TTP) 7-10 ha, u speciálních pozemků tj. chmelnic, vinic a ovocných sadů 2-3 ha.

Základní půdní vlastnosti jsou hodnoceny samostatně pro ornou půdu, vinice, sady, chmelnice a trvalé travní prosty. AZZP je prováděno podle zákona č. 156/1998 Sb., o hnojivech, ve znění pozdějších

předpisů, je metodicky a organizačně zabezpečováno Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským (ÚKZÚZ).

Hodnocení obsahu přístupného P v půdách ČR

Všechny živiny stanovované v rámci AZZP jsou analyzovány v extraktu podle Mehlicha 3 a množství jednotlivých živin v půdě je udáváno v mg.kg⁻¹ půdy. Vyhodnocení obsahu živin se provádí podle kritérií uvedených v příloze č. 5 k vyhlášce č. 275/1998 Sb.

Obsah přístupného fosforu u orných půd se od roku 1990 v průměru ČR snížil o 17 mg.kg⁻¹. Také v půdách speciálních druhů pozemků došlo ve většině případů k poklesu obsahu přístupného P, avšak ještě výraznějšímu než u orné půdy. Na druhé straně je v půdách chmelnic patrný i postupný nárůst (+80 mg.kg⁻¹ P). Vinice vykazují v průměru pokles obsahu v půdě o 36 mg.kg⁻¹. Také v půdách ovocných sadů obsah fosforu v průměru republiky znač-

Die Kontrolle der verfügbaren Nährstoffe, der Bodenreaktion und des Kalkbedarfs wird vom Staat durch die regelmäßige Agrochemische Agrarbodenprüfung (AZZP) gewährleistet, deren Ergebnisse Eigentümern und Nutzern des Agrarbodens dienen.

AZZP ist ein sechsjähriger Zyklus, in dessen Verlauf fast das gesamte Ausmaß des Ackerbodens (z.p.) in Tschechien getestet wird, was über 500.000 ha und fast 70.000 Proben jährlich ausmacht. Die Fläche für die Entnahme einer durchschnittlichen Probe beträgt 7-10 ha für Ackerland und Dauergrünland, 2-3 ha für Sonderland wie z.B. Hopfenfelder, Rebanlagen und Obstplantagen.

Die Bodeneigenschaften werden für Ackerland, Rebanlagen, Obstplantagen, Hopfenfelder und Dauergrünland getrennt bewertet. AZZP wird gemäß Gesetz Nr. 156/1998 Slg. über Düngemittel, i.d.F. späterer Vorschriften, durchgeführt und methodisch sowie organisatorisch vom Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZÚZ; Zentrales Kontroll- und Prüfinstitut für die Landwirtschaft) geleitet.

Bewertung des verfügbaren P-Gehalts in den Böden der Tschechischen Republik

Alle innerhalb von AZZP ermittelten Nährstoffe werden im Extrakt nach Mehlich 3 analysiert, wobei die Menge der einzelnen Nährstoffe in mg.kg⁻¹ Boden angegeben wird. Die Bewertung des Nährstoffgehalts erfolgt nach den Kriterien im Anhang 5 zur Verordnung Nr. 275/1998 Slg.

Der Gehalt an verfügbarem Phosphor in Ackerböden in Tschechien ist seit 1990 im Durchschnitt um 17 mg.kg⁻¹ gesunken. Auch in den Böden spezieller Landtypen ist der Gehalt an verfügbarem P in den meisten Fällen sogar noch mehr als im Ackerland zurückgegangen. In den Hopfengärten wurde hingegen ein allmählicher Anstieg (+80 mg.kg⁻¹) festgestellt. In Rebanlagen ist im Durchschnitt ein Rückgang um 36 mg.kg⁻¹ zu verzeichnen. Auch im Boden von Obstplantagen hat der Phosphorgehalt im Landesdurchschnitt signifikant abgenommen (-27 mg.kg⁻¹). Bei dem Dauergrünland zeigt sich, dass der Gehalt an verfügbarem Phosphor im Boden in Tschechien leicht gesunken ist (-3 mg.kg⁻¹) (Tabelle 2).

ně klesl (-27 mg.kg^{-1}). U TTP je patrné, že v rámci ČR klesl obsah přístupného fosforu v půdě nepatrně (-3 mg.kg^{-1}) (tabulka 2).

Kategorizace obsahu přístupného fosforu u orné půdy, podle kritérií hodnocení obsahu fosforu, má v rámci republiky zhoršující se tendenci. Dokládá to zejména neustálý nárůst u kategorie půd s nízkým obsahem přístupného fosforu – oproti začátku 90. let minulého století, o 17 %. Připočítáme-li kategorii orných půd s vyhovujícím obsahem přístupného P, je nárůst ploch, které je nutno přednostně

touto živinou hnojit, bezmála 20 %. Podíl půd s nízkou zásobou přístupného fosforu se zvyšoval také u vinic a ovocných sadů. Pouze chmelnice vykazují v průměru republiky snížení podílu půd s nízkou zásobou fosforu a naopak nárůst podílu půd v kategorii dobrého až velmi vysokého obsahu. U půd TTP nejsou změny významné. Postupně se zvyšují výměry nízkého a vyhovujícího obsahu P mírně klesá podíl půd s dobrým (22,3 %), ale nepatrně i s vysokým (17,21 %) až velmi vysokým obsahem (7,42 %) fosforu (tabulka 1).

Tab. 1. Hodnocení přístupného fosforu na orné půdě - zastoupení výměry mezi roky 1981-2016

Tab. 1. Bewertung des verfügbaren Phosphors im Ackerboden – Ausmaße 1981-2016

cyklus zkoušení	Obsah přístupného P (mg/kg) v prozkoušených kulturách				
	Gehalt von verfügbarem Phosphor nach den Bewertungskriterien (%)				
	< 50 mg/kg	51-80 mg/kg	81-115 mg/kg	116-185 mg/kg	>185 mg/kg
Prüfzyklus	nízká niedrig	vyhovující genügend	dobrá gut	vysoká hoch	velmi vysoká sehr hoch
1981 - 1983	26,7	45,7	9,80	17,80	*
1984 - 1986	19,9	45,0	11,9	23,20	*
1987 - 1989	14,6	42,5	13,5	29,40	*
1990 - 1992	9,11	25,64	29,59	27,31	8,36
1993 - 1998	11,97	29,75	27,97	23,26	7,04
1999 - 2004	17,40	29,18	25,54	20,53	7,34
2005 - 2010	24,58	28,72	22,85	17,57	6,25
2011 - 2016	26,51	27,87	21,49	17,06	7,04

*Od 1990 rozšíření a změna klasifikace na pět kategorií / Seit 1990 Erweiterung und Änderung der Einstufung zu fünf Kategorien

Die Einstufung des verfügbaren Phosphorgehalts in Ackerböden nach den Bewertungskriterien des P-Gehalts hat sich landesweit verschlechtert. Dies zeigt sich insbesondere in einer stetigen Zunahme der Kategorie der Böden mit niedrigem Gehalt an verfügbarem Phosphor – um 17 % im Vergleich zu den frühen 1990er Jahren. Wenn wir die Kategorie der Ackerböden mit einem genügenden Gehalt an verfügbarem P hinzufügen, beträgt die Zunahme der Flächen, die mit diesem Nährstoff vorrangig gedüngt werden müssen, beinahe 20 %. Der Anteil der Böden mit einem geringen Vorrat an verfügbarem Phosphor nahm auch in Rebanlagen und Obst-

plantagen zu. Nur Hopfenfelder weisen im Durchschnitt einen Rückgang des Anteils von Böden mit geringen Phosphorreserven auf und umgekehrt einen Anstieg des Anteils der Böden in der Kategorie mit einem guten bis sehr hohen Gehalt. In den Böden des Dauergrünlands sind keine signifikanten Änderungen bemerkbar. Flächen mit niedrigen und zufriedenstellenden P-Gehalten nehmen allmählich zu, der Anteil der Böden mit gutem P-Gehalt sinkt leicht (22,3%), geringfügig auch mit dem hohen (17,21 %) bis sehr hohen (7,42%) P-Gehalt (Tabelle 1).

Tab. 2. Změny obsahu P v období 1990 - 2017 (vážené průměry)

Tab. 2. Änderungen des P-Gehalts 1990 – 2017 (gewichtete Mittelwerte)

cyklus zkoušení Prüfzyklus	Zastoupení přístupného P dle kritérií hodnocení (%) Gehalt von verfügbarem P (mg/kg) in geprüften Pflanzungen				
	orná půda	chmelnice	vinice	ovocné sady	TTP
	Ackerland	Hopfenfelder	Rebanlagen	Obstplantagen	Dauergrünland
A*: 1990-1992	108	230	129	143	77
B*: 1993-1998	101	229	111	126	76
C: 1999-2004	97	251	103	131	78
D: 2005-2010	90	282	97	115	78
E: 2011-2016	89	302	106	115	71
F: 2012-2017	91	310	93	116	74
Index2017/1990	-17,0	80,0	-36	-27	-3

*Od 1990 rozšíření a změna klasifikace na pět kategorií / Seit 1990 Erweiterung und Änderung der Einstufung zu fünf Kategorien

Fosfor je základní a nezbytnou složkou většiny dnes využívaných hnojiv. Je nepostradatelný, a přitom jeho zdroje nejsou neomezené. Šest zemí světa disponuje 90 % veškerých zdrojů (Maroko, Čína, Alžírsko, Sýrie, Jordánsko, region Jižní Afriky) (Čermák et al., 2018). Od roku 2008 narostly globální ceny fosforu o 800 %. Tento fakt ukazuje na blížící se problém, který je společný zemědělství, životnímu pro-

středí, odpadovému hospodářství, případně dalším oblastem lidské činnosti. Bude tedy nezbytné využívat k recyklaci fosfor z bohatých zdrojů, které jsou dnes běžně odpady, kaly z čistíren odpadních vod, kejda, potravinový odpad, zbytky zemědělských plodin a další marginální zdroje mj. popílky, kosti, maso, krev, guáno, vodní vegetace, sedimenty.

Phosphor ist ein wesentlicher und notwendiger Bestandteil der meisten gegenwärtig angewendeten Düngemittel. Er ist unverzichtbar, und dennoch sind seine Ressourcen nicht unbegrenzt. Sechs Länder (Marokko, China, Algerien, Syrien, Jordanien, Region von Südafrika) verfügen über 90 % der weltweiten Ressourcen (Čermák et al., 2018). Seit 2008 sind die weltweiten Phosphorpreise um 800 % gestiegen. Diese Tatsache weist auf das bevorstehende gemeinsame Problem der Landwirtschaft, der Umwelt, der Abfallwirtschaft sowie anderer Bereiche der menschlichen Tätigkeit hin. Daher wird es notwendig sein, Phosphor aus den reichen Quellen zu verwerten, welche die heute gängigen Abfälle wie Abwasserschlamm, Gülle, Speisereste, Ernterückstände und weitere marginale Quellen wie u.a.

Flugasche, Knochen, Fleisch, Blut, Guano, Wasservegetation und Sedimente darstellen.

Literaturverzeichnis

Brady N. C. et Weil R. R. (2002): The Nature and Properties of Soils, thirteenth edition. Pearson Education Ltd. New Jersey, 960 pp.

Čermák P., Mühlbachová G., Káš M., Pechová M., Lošák T., Hlušek J., Kulháněk M., Sedlár O., Balík J. (2018): Metodický postup pro optimalizaci hnojení fosforem na zemědělských půdách, včetně půd karbonátových, VURV, v.v.i., ISBN 978-80-7427-294-3, 35 pp.

Použitá literatura

Brady N. C. et Weil R. R. (2002): The Nature and Properties of Soils, thirteenth edition. Pearson Education Ltd. New Jersey, 960 pp.

Čermák P., Múhlbachová G., Káš M., Pechová M., Lošák T., Hlušek J., Kulhánek M., Sedlář O., Balík J. (2018): Metodický postup pro optimalizaci hnojení fosforem na zemědělských půdách, včetně půd karbonátových, VURV, v.v.i., ISBN 978-80-7427-294-3, 35 pp.

Fecenko J., Ložek O. 2000. Výživa a hnojení polních plodín. Nitra: SPU. 452 s. ISBN 80-7137-777-5. Holtan H., Kamp-Nielsen L. et Stuanes A. O. (1988): Phosphorus in soil, water and sediment: an overview. Hydrobiologia 170: 19–34.

Motavalli P. P. et Miles R. J. (2002): Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications. Biol Fertil Soils 36: 35–42.

Pitter P. (1999): Hydrochemie. Vydavatelství VŠCHT, Praha, 568 pp. Rejšek K., Vácha R. (2018): Nauka o půdě. Olomouc, ISBN 978-80-87091-82-1, 527 pp.

Sanchez, Ch. A. (2007): Phosphorus, in AV Barker, DJ Pilbeam (eds), Handbook of Plant Nutrition, Taylor and Francis, Boca Raton: 51–90 str.

Sharpley A. N., Daniel T., Sims T., Lemunyon J., Stevens R. et Parry R. (2003): Agricultural Phosphorus and Eutrophication, Second Edition. United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service.

Stevenson F.J. (1986): Cycles of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. A Wiley-Interscience Publication, 380pp.

Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech), ve znění pozdějších předpisů.

J. Zbírka a kolektiv autorů 2016. Analýza půd I. Jednotné pracovní postupy ÚKZÚZ. ÚKZÚZ Brno, Národní referenční laboratoř. 4. přepracované a rozšířené vydání. ISBN 978-80-7401-123-8.

Fecenko J., Ložek O. 2000. Výživa a hnojení polních plodín. Nitra: SPU. 452 s. ISBN 80-7137-777-5.

Holtan H., Kamp-Nielsen L. et Stuanes A. O. (1988): Phosphorus in soil, water and sediment: an overview. Hydrobiologia 170: 19–34.

Motavalli P. P. et Miles R. J. (2002): Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications. Biol Fertil Soils 36: 35–42.

Pitter P. (1999): Hydrochemie. Vydavatelství VŠCHT, Praha, 568 pp.

Rejšek K., Vácha R. (2018): Nauka o půdě. Olomouc, ISBN 978-80-87091-82-1, 527 pp.

Sanchez, Ch. A. (2007): Phosphorus, in AV Barker, DJ Pilbeam (eds), Handbook of Plant Nutrition, Taylor and Francis, Boca Raton: 51–90 pp.

Sharpley A. N., Daniel T., Sims T., Lemunyon J., Stevens R. et Parry R. (2003): Agricultural Phosphorus and Eutrophication, Second Edition. United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service.

Stevenson F.J. (1986): Cycles of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. A Wiley-Interscience Publication, 380 pp.

Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech), ve znění pozdějších předpisů.

J. Zbírka a kolektiv autorů 2016. Analýza půd I. Jednotné pracovní postupy ÚKZÚZ. ÚKZÚZ Brno, Národní referenční laboratoř. 4. přepracované a rozšířené vydání. ISBN 978-80-7401-123-8.

Stanovení rozpustnosti fosforu a jeho dostupnosti pro rostliny v různých druhotných materiálech

Olivier Duboc, Jakob Santner, Franz Zehetner, Gerhard Soja, Christoph Pfeifer, Walter W. Wenzel

University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Soil Research

Vzhledem k omezeným světovým zásobám fosforu je stále významnější recyklace hnojiv vyráběných z různorodých druhotných surovin, jako jsou komunální čistírenské kaly (MSS), odpady z jatek nebo statková hnojiva. Různé procesy zpracování odpadu dále zvyšují rozmanitost produktů. Již dříve jsme ukázali, že „infinite-sink“ extrakce na bázi ferrihydritem plněných dialyzačních vaků poskytuje lepší odhad biologicky dostupné P frakce v chemicky odlišných materiálech, než je tomu u rovnovážných extrakcí (např. H_2O , neutrální citrát amonný) (Duboc et al. 2017).

V návaznosti na tyto předběžné výsledky provádíme další měření rozpustnosti/extrahovatelnosti P v různých druhotných materiálech a konverzních

produktech. Cíle jsou (1) vybudovat referenční seznam stanovením reprezentativního výběru recyklačních materiálů a referenčních hnojiv a (2) zlepšit naše vědomosti o výhodnosti různých procesů konverze. K tomuto účelu používáme (1) metodu infinite-sink dialýzy jako odhad množství P dostupného pro rostliny a (2) extrakci pomocí H_2O (30 min, 1:100 w:v) pro stanovení snadno rozpustného P.

Naše výsledky zatím ukazují, že P v karbonizovaném zvířecím hnoji (pyrolýza, hydrotermální karbonizace) má nižší rozpustnost než v původních surovinách. To může být způsobeno počáteční hydrofobností karbonizovaného produktu. Naproti tomu množství P dostupného pro rostliny bylo touto úpravou buď zvýšeno, nebo zůstalo nedotčeno.

Ermittlung der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in verschiedenen Sekundärrohstoffen

Olivier Duboc, Jakob Santner, Franz Zehetner, Gerhard Soja, Christoph Pfeifer, Walter W. Wenzel

University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Soil Research

Aufgrund der begrenzten globalen Phosphorvorräte wird die Rückgewinnung von Düngemitteln aus verschiedenen Sekundärrohstoffen wie kommunaler Klärschlamm (MSS), Schlachthausabfälle oder Tiermist immer wichtiger. Verschiedene Abfallbehandlungsverfahren erhöhen weiter die Produktvielfalt. Wir haben bereits früher gezeigt, dass eine Infinite-Sink-Extraktion auf der Basis von mit Ferrihydrit gefüllten Dialysesäcken eine bessere Abschätzung der bioverfügbaren P-Fraktion in chemisch diversen Materialien bietet, als es bei bestehenden Gleichgewichtsextraktionen (z.B. H_2O , neutrales Ammoniumcitrat) der Fall ist (Duboc et al. 2017).

Im Anschluss an diese vorläufigen Ergebnisse messen wir weiterhin die Löslichkeit/Extrahierbarkeit

von Phosphor in verschiedenen Sekundärrohstoffen und deren Umwandlungsprodukten. Die Ziele bestehen darin, (1) eine Referenzbasis aufzubauen, indem eine repräsentative Auswahl von Recyclingmaterialien und Referenzdüngemitteln identifiziert wird, und (2) unser Wissen über die Vorteile verschiedener Umwandlungsverfahren zu verbessern. Zu diesem Zweck verwenden wir (1) die Methode der Infinite-Sink-Dialyse zur Abschätzung des pflanzenverfügbaren P-Gehalts und (2) die Extraktion mittels H_2O (30 min, 1: 100 w:v) zur Bestimmung von leicht löslichem P.

Unsere bisherigen Ergebnisse zeigen, dass P in karbonisiertem Tiermist (Pyrolyse, hydrothermale Karbonisierung) eine geringere Löslichkeit als in den ursprünglichen Rohstoffen aufweist. Dies kann

Produkty založené na přeměně komunálního čistírenského kalu vykazují velmi nízkou rozpustnost P a velmi široký rozsah množství P dostupného pro rostliny v rozmezí od zhruba 10 % (MSS popel a biouhel) do 90 % pro pokročilejší typy procesů zpracování MSS.

Naše výsledky celkově naznačují, že karbonizace buď zvyšuje, nebo výrazně neovlivňuje dostupnost P pro rostliny, a že produkty konverze MSS mohou být na stejné úrovni jako konvenční hnojiva. Počáteční nízká rozpustnost P pro většinu zpracovaných produktů je potenciální výhodou ve srovnání s konvenčními hnojivy, pokud jde o vliv na životní prostředí (louhování/odtok) a účinnost využití živin v zemědělství. Kombinace infinite-sink a H₂O extrakce poskytuje slibný nástroj pro vývoj a hodnocení produktů v kontextu diverzifikace zdrojových materiálů, aplikací hnojiv a trhu s těmito produkty.

Klíčová slova

Recyklace, hnojiva, dostupnost pro rostliny

Reference

Duboc O, Santner J, Golestani Fard A, et al (2017) Predicting phosphorus availability from chemically diverse conventional and recycling fertilizers. *Sci Total Environ* 599–600:1160–1170. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.054.

durch die anfängliche Hydrophobie des karbonisierten Produkts verursacht werden. Der pflanzenverfügbare P-Gehalt wurde hingegen durch diese Behandlung entweder erhöht oder nicht beeinflusst. Produkte, die auf der Umwandlung von kommunalem Klärschlamm basieren, zeigen eine sehr geringe P-Löslichkeit und eine besonders breite Spanne des pflanzenverfügbaren P-Gehalts zwischen etwa 10 % (MSS-Asche und Biokohle) und 90 % bei fortschrittlicheren MSS-Behandlungsverfahren.

Insgesamt deuten unsere Ergebnisse an, dass die Karbonisierung die P-Pflanzenverfügbarkeit entweder erhöht, oder nicht wesentlich beeinflusst, und dass die MSS-Umwandlungsprodukte die gleiche Qualität wie herkömmliche Düngemittel erreichen können. Die anfänglich geringe Löslichkeit von P bei den meisten hergestellten Produkten ist ein potenzieller Vorteil gegenüber herkömmlichen Düngern, was die Umweltauswirkungen (Auslaugung/Abschwemmung) und die Effizienz der Nährstoffverwertung in der Landwirtschaft betrifft. Die

Kombination von Infinite-Sink- und H₂O-Extraktion bietet ein vielversprechendes Instrument für die Produktentwicklung und -bewertung im Kontext der Diversifizierung von Ausgangsstoffen und Düngemittelanwendungen sowie der Vermarktung dieser Produkte.

Schlüsselwörter

Recycling, Dünger, Pflanzenverfügbarkeit

Referenzen

Duboc O, Santner J, Golestani Fard A, et al (2017) Predicting phosphorus availability from chemically diverse conventional and recycling fertilizers. *Sci Total Environ* 599–600:1160–1170. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.054.

Rybniční sedimenty a nové možnosti recyklace živin a organických látek v zemědělské krajině – příkladová studie rybník Horusický

Lenka Kröpfelová¹, Jan Potužák², Jindřich Duras³, Jana Šulcová¹, Zdeňka Benedová¹, Marek Baxa¹ a Jan Pokorný¹

¹ENKI, o.p.s., kropfelova@enki.cz

²Povodí Vltavy, státní podnik, České Budějovice, jan.potuzak@pvl.cz

³Povodí Vltavy, státní podnik, Plzeň

Abstrakt

V současné době je více jak 50% orné půdy v České republice ohroženo určitou formou eroze. Příčiny lze hledat např. v nevhodné agrotechnice, v plošném pěstování širokořádkových plodin, ve vlastnostech pozemků, či klimatické změně. Výsledkem je postupná ztráta půdních částic bohatých na živiny a organickou hmotu, která vede k celkové ztrátě půdní úrodnosti. Česká republika disponuje obrovským bohatstvím rybníků, v kterých je přirozeně

skryt velký potenciál zachycovat živiny (zejména pak fosfor). Klíčovou roli zde hraje rybníční sediment. Proto je dle našeho názoru důležité zaměřit se více na možnosti navrátit živinami často bohatě zásobený rybníční sediment zpátky na pole a přispět tak k jejich opětovnému zúrodnění. V tomto příspěvku budou představeny výsledky modelové studie ukazující možný technologický postup recyklace živin z rybníčních sedimentů, který využívá sacího bagru, integrované stanice pro dávkování flokulantu a geotextilních vaků pro lokální aplikaci

Teichsedimente und neue Möglichkeiten der Wiederverwertung von Nährstoffen und organischen Substanzen in der Agrarlandschaft – Beispielstudie am Horusický-Teich

Lenka Kröpfelová¹, Jan Potužák², Jindřich Duras³, Jana Šulcová¹, Zdeňka Benedová¹, Marek Baxa¹ a Jan Pokorný¹

¹ENKI, o.p.s., kropfelova@enki.cz

²Povodí Vltavy, státní podnik, České Budějovice, jan.potuzak@pvl.cz

³Povodí Vltavy, státní podnik, Plzeň

Resümee

Derzeit werden mehr als 50 % des Ackerlands in Tschechien von verschiedenen Formen der Erosion gefährdet. Die Ursachen liegen zum Beispiel in unangemessener Agrotechnologie, im großflächigen Anbau von erosionsfördernden Pflanzen, in Eigenschaften der Grundstücke oder im Klimawandel. Das Ergebnis ist ein allmählicher Verlust an nährstoffreichen Bodenpartikeln und organischen Stoffen, was zu einem allgemeinen Rückgang der Bodenfruchtbarkeit führt. In Tschechien befinden sich zahlreiche Teichen mit einem riesigen natürlichen

Potenzial zum Abfangen von Nährstoffen (insbesondere Phosphor). Eine Schlüsselrolle spielt hier das Teichsediment. Daher ist es unserer Meinung nach wichtig, sich stärker auf die Möglichkeiten zu konzentrieren, das oft nährstoffreichhaltige Teichsediment wieder auf die Felder zurückzuführen und so zu deren Wiederfruchtbarmachung beizutragen. In diesem Beitrag werden Ergebnisse einer Modellstudie vorgestellt, die ein mögliches technologisches Verfahren für die Verwertung von Nährstoffen aus Teichsedimenten zeigt. Dabei werden im Rahmen des Projektes TAČR TA04020123 ein Saugbagger, eine integrierte Station zum Dosieren

sedimentu v mikropovodí řešené v rámci projektu TAČR: TA04020123.

Klíčová slova: Rybníční sediment, recyklace živin, eroze, geotextilní vaky, zemědělská půda

1. Úvod

Využití rybníčních sedimentů pro zúrodnění zemědělských pozemků není v naší krajině novou záležitostí. Bahno z rybníků bylo vždy považováno za velmi kvalitní, na živiny bohaté hnojivo, které bylo dokonce součástí deputátů pracovníků v rybníkářství [1]. Ještě na počátku 20. století byly sedimenty z rybníků řazeny mezi jakostní zeminy. S bohatnutím společnosti a se zavedením snadno dostupných průmyslových hnojiv se i hospodaření s živinami v rybníkářství připojilo k otevřeným koloběhům, odkud látky odcházejí mimo systém, v němž byly odnepaměti recyklovány. Situaci dále zkomplikovala častá kontaminace sedimentů cizorodými látkami a zároveň také přísnění legislati-

vy upravující využívání sedimentů. Zájem o tuto surovinu nejen že značně poklesl, ale na rybníční usazeniny začalo být nahlíženo spíše jako na odpad, kterého je nutné se co nejrychleji zbavit. Hospodařící subjekty tak často při výlovehách posouvali a posouvají sedimenty z rybníka do rybníka stále níže a níže v povodí až do velkých vodních nádrží, kde se těžba usazenin stává velmi nákladnou záležitostí. Cestou navíc obvykle dochází ke kontaminaci sedimentů, a poté již nelze o využití naakumulovaných živin zpět pro zemědělskou produkci uvažovat ani teoreticky. Z cenné suroviny jsme tak vyrobili nebezpečný odpad, jehož likvidace je velmi nákladná.

Z pohledu transportu fosforu v povodích fungují rybníky jako články fosfor přirozeně zachycující [2]. Využívání (recyklace) takto zachyceného fosforu je – jakožto alternativa k jeho vypouštění dále do povodí – také významným protieutrofizačním opatřením.

von Flockungsmittel und Geotextilsäcke für lokale Sedimentaufbringung in einem Kleinzugsgebiet genutzt.

Schlüsselwörter: Teichsediment, Nährstoffrecycling, Erosion, Geotextilsäcke, Agrarboden

1. Einleitung

Die Verwertung von Teichsedimenten zur Fruchtbarmachung von Agrarland ist in unserer Landschaft kein neues Thema. Schlamm aus Fischteichen gilt seit jeher als hochwertiger, nährstoffreicher Dünger, der sogar den Mitarbeitern in Teichwirtschaft als Deputat verteilt worden war [1]. Noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren Teichsedimente als Qualitätsböden eingestuft. Mit dem Reichtum der Gesellschaft und der Einführung von erschwinglichen Düngemitteln wurde auch das Nährstoffmanagement in der Fischzucht zu einem offenen Kreislauf, wobei Substanzen das System verlassen, in dem sie seit undenklichen Zeiten re-

cyclert wurden. Die Situation wurde weiter durch die häufige Kontaminierung von Sedimenten durch Fremdstoffen und gleichzeitig durch eine Verschärfung der Gesetzgebung zur Regelung der Sedimentverwendung erschwert. Das Interesse an diesem Rohstoff hat nicht nur erheblich abgenommen, sondern die Teichsedimente werden eher für Abfall gehalten, der so schnell wie möglich entsorgt werden muss. Die Teichwirte haben oft Sedimente von Teich zu Teich tiefer und tiefer in Einzugsgebieten verlegt, bis hin in große Stauseen, wo der Rückbau von Verlandungen zu einem sehr teuren Anfangen wird. Außerdem kommt es in der Regel zu einer Sedimentverunreinigung, und die Verwendung der angesammelten Nährstoffe für die landwirtschaftliche Produktion kann dann nicht mal theoretisch in Betracht gezogen werden. So haben wir aus einem wertvollen Rohstoff einen gefährlichen Abfall produziert, dessen Entsorgung sehr kostspielig ist.

Aus der Perspektive des Phosphortransports innerhalb Einzugsgebiete wirken die Teiche als natürliche

Z pohledu rybářského hospodaření je důležité otázku sedimentů také řešit, a to alespoň formou odbahnování oblasti loviště před výlovem. Zabahněné loviště znamená riziko pro zdravotní stav lovených ryb (zabahnění žaber, dušení). Aktuálně se zanesená loviště běžně „řeší“ tím, že bahno je pomocí sacího bagru „recyklováno“ v rámci rybníka tím, že je přečerpáváno do dostatečné vzdálenosti od jeho loviště, do kterého se za čas jeho velký podíl opět vrátí [3].

Cílem tohoto příspěvku je představit výsledky získané v rámci řešení projektu TAČR: TA04020123 (2014 – 2017), který se zabýval technologickým postupem recyklace živin z rybníčních sedimentů s využitím sacího bagru, integrované stanice pro dávkování flokulantu a geotextilních vaků s následnou aplikací sedimentu na zemědělskou půdu v mikropovodí rybníka.

2. Materiál a metody

Pro realizaci komplexního pokusu zaměřeného na recyklaci živin z rybníčních sedimentů byl zvolen

rybník Horusický (415 ha) ležící u Veselí nad Lužnicí. Na rybníce Horusický je před výlovem, tedy každým druhým rokem, prováděno odbahnění loviště s použitím sacího bagru. Zhruba 2-4 tis. m³ sedimentu je vždy přečerpáno do rozsáhlých lagun v katastru rybníka, kde je sediment odvodněn a skladován. V rámci projektu byl sediment z loviště čerpán přes flokulační stanici do geotextilních vaků, kde byl měsíc uložen z důvodu jeho řádného odvodnění.

Celkové schéma realizovaného experimentu lze shrnout do následujících bodů:

- Vývoj, výroba a optimalizace integrované stanice pro přípravu a dávkování flokulantu a přídatných látek
- Ovzorkování a provedení analýz sedimentu z pohledu využitelnosti na zemědělskou půdu
- Vytipování vhodných flokulantů a dalších komponent s ohledem na možnost zvýšení úživnosti vytěženého materiálu a zlepšení živinových poměrů

Phosphorsammler [2]. Die Verwertung (Recycling) dieses aufgefangenen Phosphors ist – alternativ zu seiner weiteren Einleitung in das Einzugsgebiet – auch eine wichtige Maßnahme gegen Eutrophierung.

Unter dem Gesichtspunkt des Fischzuchtbetriebs ist es auch wichtig, sich mit der Sedimentfrage zu befassen, zumindest durch Entschlammung des Abfischplatzes vor der Abfischung. Ein schlammiger Abfischplatz bedeutet ein Gesundheitsrisiko für die Fische (Kiemenschlamm, Erstickung). Derzeit werden verschlammte Abfischplätze häufig mittels Saugbagger so „gereinigt“, indem der Schlamm in eine ausreichende Entfernung vom Abfischplatz gepumpt wird, um größtenteils früher oder später wieder zurückzukommen [3].

Das Ziel dieses Beitrags ist es, Ergebnisse des TAČR-Projekts TA04020123 (2014–2017) zu präsentieren, das sich mit einem Recycling-Verfahren für Nährstoffe aus Teichsedimenten befasste, unter

Verwendung eines Saugbaggers, einer integrierten Station zum Dosieren vom Flockungsmittel sowie Geotextilsäcke mit anschließendem Aufbringen der Sedimentstoffe auf Agrarflächen im Kleineinzugsgebiet des Teiches.

2. Material und Methoden

Für einen umfassenden Versuch zur Wiederverwertung von Nährstoffen aus Teichsedimenten wurde der Horusický-Teich (415 ha) in der Nähe von Veselí nad Lužnicí ausgewählt. Der Horusický-Teich wird vor der Abfischung, d.h. alle zwei Jahre, mit einem Saugbagger entschlammt. Ca. 2.000–4.000 m³ Sediment werden immer in große Lagunen auf dem Teichgrundstück gepumpt, wo das Sediment entwässert und gelagert wird. Im Rahmen des Projekts wurde das Sediment von dem Abfischplatz über eine Flockungsstation in Geotextilsäcke gepumpt, in denen es einen Monat lang zwecks einer ordnungsgemäßen Entwässerung aufbewahrt wurde.

- Odtěžení části rybníčního sedimentu pomocí sacího bagru
- Úprava sedimentu pomocí vhodného flokulantu s přihlédnutím ke zvýšení úživných vlastností sedimentu (přídavek dolomitického vápence)
- Uložení ošetřeného sedimentu do geotextilních vaků (TenCate Geotube®) a jeho odvodnění
- Analýzy upraveného sedimentu z geotextilních vaků (celk. P, celk. N, uhlík a jeho formy, organické látky, nerozpuštěné látky, celk. Ca, Mg, Na, K, rozpuštěný Ca, Mg, Na a K)
- Aplikace sedimentu na zemědělskou půdu dle platné legislativy (nedaleko Horusického rybníka)
- Sledování reprezentativní plochy zemědělské půdy s aplikovaným ošetřeným sedimentem a porovnání s kontrolní reprezentativní plochou zemědělské půdy (bez aplikace sedimentu)

Pro stanovení sušiny a množství celkových a rozpuštěných živin v sedimentu byly z geotextilních vaků odebírány směsné vzorky pomocí komoro-

vého vzorkovače s křídlem (Ejkelkamp). Výsledky byly využity k odhadu množství živin, které bylo aplikací sedimentu vneseno do půdy.

V rámci agrotechnického pokusu byly na poli vytýčeny dvě pokusné plochy (300 a 600 m²), na které byl vytěžený sediment aplikován a zapraven do půdy. Výška vrstvy aplikovaného sedimentu byla vypočtena na 6 cm.

3. Výsledky a diskuze

Po celou dobu odvodňování sedimentu ve třech geotextilních vacích (2. 9. - 7. 10. 2015), bylo sledováno jejich zaklesávání a měřeny hodnoty sušiny sedimentu. V době aplikace dosahovala hodnota sušiny sedimentu přibližně 29 %. Objem sedimentu v době aplikace byl v jednotlivých vacích cca 20 m³. Po 31 dnech uložení sedimentu v odvodňovacích vacích byly dne 7. 10. 16 vaky rozříznuty a sediment pomocí nákladních aut odvezen na pole. Hustota sedimentu aplikovaného na pole byla 1,315 g cm³.

Das Gesamtschema des Experiments kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Entwicklung, Errichtung und Optimierung einer integrierten Station zur Vorbereitung und Dosierung von Flockungs- und Zusatzstoffen
- Probenahme und Analyse der Sedimente hinsichtlich der Verwertbarkeit auf dem Agrarboden
- Identifizierung geeigneter Flockungsmittel und anderer Komponenten zur Erhöhung der Nährstoffausbeute und zur Verbesserung der Nährstoffverhältnisse
- Abpumpen eines Teils des Teichsediments mit einem Saugbagger
- Sedimentbehandlung mit einem geeigneten Flockungsmittel unter Berücksichtigung der Verbesserung der Nähreigenschaften des Sediments (Zusatz von Dolomit)
- Lagerung und Entwässerung des behandelten Sediments in Geotextilsäcken (TenCate Geotube®)
- Analyse des behandelten Sediments aus Geotextilsäcken (Gesamt-P, Gesamt-N, Kohlenstoff und seine Formen, organische Substanzen, un-

gelöste Substanzen, Gesamt-Ca, Mg, Na, K, gelöstes Ca, Mg, Na und K)

- Aufbringung des Sediments auf Agrarboden (in der Nähe des Horusický-Teichs) gemäß der einschlägigen Gesetzgebung
- Untersuchung einer repräsentativen Ackerfläche mit aufgebrachtem behandeltem Sediment und Vergleich mit einer repräsentativen Kontroll-Ackerfläche (ohne Sedimentanwendung).

Zur Bestimmung der Trockensubstanz sowie der gesamten und gelösten Nährstoffmenge im Sediment wurden Mischproben aus den Geotextilsäcken mittels eines Kammerbohrers mit Flügel (Ejkelkamp) entnommen. Die Ergebnisse wurden zur Abschätzung der Nährstoffmengen verwendet, die durch die Sedimentaufbringung in den Boden eingetragen wurden.

Im Rahmen des agrotechnischen Experiments wurden zwei Versuchsgrundstücke (300 und 600 m²) auf dem Feld abgesteckt, wo das behandelte Sediment aufgebracht und in den Boden eingearbeitet wurde. Die Höhe der aufgetragenen Sedimentschicht wurde mit 6 cm berechnet.

Tabulka 1 Výsledky analýz celkových a dostupných živin v zemědělské půdě a v sedimentu z Horusického rybníka a vnos na hektar zemědělské půdy.

Parametr	Zemědělská půda	Horusický rybník sediment	Vnos na ha zemědělské půdy
	mg.kg ⁻¹ .suš	mg.kg ⁻¹ .suš	kg.ha ⁻¹
TC	-	110 000	26 693
TOC	-	110 000	26 693
N _(celk.)	3 300	10 000	2 427
N-NH ₄	3,2	50	12
P _(celk.)	360	2 000	485
P _(využitelný)	34	5,9	1,4
Ca _(celk.)	1 100	12 000	2 912
Ca _(využitelný)	140	10 000	2 427
Mg _(celk.)	820	3 300	801
Mg _(využitelný)	39	540	131
Na _(celk.)	-	240	58
Na _(využitelný)	-	87	21
K _(celk.)	1 600	5 100	1 238
K _(využitelný)	59	320	78

V souhrnné tabulce 1 jsou uvedeny obsahy živiny a organických látek v zemědělské půdě, na kterou byl vytěžený sediment aplikován a obsahy živin a organických látek v sedimentu zadržném v geotextilních vacích. Z těchto dat byl dále dopočten průměrný celkový vnos živin na 1 ha zemědělské půdy [4].

Tabulka 2 Procentický podíl využitelných živin k jejich celkovému obsahu v půdě

Parametr	Měsíc odběru	Zemědělská půda bez sedimentu	Zemědělská půda s aplikovaným sedimentem
		%	%
Fosfor	duben	3,74	4,76
	srpen	3,86	5,40
	listopad	6,15	5,74
Hořčík	duben	50,78	64,29
	srpen	27,74	67,16
	listopad	39,79	33,42
Draslík	duben	1,33	1,79
	srpen	2,19	2,24
	listopad	3,25	2,57
Vápník	duben	74,83	78,03
	srpen	72,44	75,23
	listopad	65,40	76,88

Tabelle 1 Analysenergebnisse der gesamten und verfügbaren Nährstoffe im Agrarboden und im Sediment aus dem Horusický-Teich sowie Eintrag pro Hektar Agrarboden.

Parameter	Agrarboden	Horusický-Teich Sediment	Eintrag pro Hektar Agrarboden
	mg.kg ⁻¹ .TS	mg.kg ⁻¹ .TS	kg.ha ⁻¹
TC	-	110 000	26 693
TOC	-	110 000	26 693
N _(Ges.)	3 300	10 000	2 427
N-NH ₄	3,2	50	12
P _(Ges.)	360	2 000	485
P _(verfügbar)	34	5,9	1,4
Ca _(Ges.)	1 100	12 000	2 912
Ca _(verfügbar)	140	10 000	2 427
Mg _(Ges.)	820	3 300	801
Mg _(verfügbar)	39	540	131
Na _(Ges.)	-	240	58
Na _(verfügbar)	-	87	21
K _(Ges.)	1 600	5 100	1 238
K _(verfügbar)	59	320	78

Tabelle 2 Prozentanteil der verwertbaren Nährstoffe an ihrem Gesamtbodengehalt

Parameter	Monat Entnahme	Agrarboden ohne Sediment	Agrarboden mit dem aufge- brachten Sediment
verwertbar/gesamt		%	%
Phosphor	April	3,74	4,76
	August	3,86	5,40
	November	6,15	5,74
Magnesium	April	50,78	64,29
	August	27,74	67,16
	November	39,79	33,42
Kalium	April	1,33	1,79
	August	2,19	2,24
	November	3,25	2,57
Kalzium	April	74,83	78,03
	August	72,44	75,23
	November	65,40	76,88

V tabulce 2 je uveden procentický podíl využitelných živin k jejich celkovému obsahu v zemědělské půdě. Z výsledků je patrné, že rybničním sedimentem se na pokusné plochy aplikovalo řádově vyšší množství N, P i K než by byla běžná hnojivá dávka (20-180 kg N/ha, 15-40 kg P/ha a 50-170 kg K/ha) [5,6,7].

Porovnáme-li ale obsah živin okamžitě rostlinami využitelných, obraz se obrátí: dodali jsme sice průměrně (K), ale velmi málo (P), takže bychom na první pohled zhodnotili rybniční sediment jako málo přínosný. Principem ale je, že sloučeniny P i N (kromě aktuálně přítomného N-NH₄) a částečně i K (fixovaný a organický vázaný K) se stávají využitelnými teprve během procesu postupné mineralizace. To znamená, že dodané živiny budou v mimovegetačním období vymývány do povrchových či podzemních vod jen nepatrně a plného uplatnění dojdou, teprve až zvýšená teplota na začátku vegetačního období podpoří mikrobiální rozklad dodaných organických látek. V té době se ale už

dostanou do plného růstu i pěstované rostliny, které budou pro svůj růst uvolňované látky průběžně odebírat. Postupné uvolňování anorganických forem živin v plném vegetačním období tak zásadně omezuje jejich vyplavování způsobené např. intenzivní srážkovou činností či jarním táním do povrchových vod. Aplikací sedimentu tak byla vlastně půda předzásobena všemi živinami na několik let. To potvrzují i praktické zkušenosti zemědělců, kteří pozorovali výraznější zlepšení produkce v několika následujících letech po aplikaci sedimentu.

4. Závěr

V rybnících v ČR je uloženo cca 197 mil. m³ sedimentu, v drobných vodních tocích 5 mil. m³ a v odvodňovacích kanálech 0,8 mil. m³, o tento objem je snížena jejich akumulární schopnost [8]. Hmota sedimentů představuje trvalou zátěž pro rybniční ekosystém a vodohospodářskou soustavu jako celek. Ztráta látek z kulturní krajiny je jedním z nejzávažnějších důsledků antropogenních vlivů na

3. Ergebnisse und Diskussion

Während der gesamten Entwässerungsphase (2. 9. bis 7. 10. 2015) von Sedimenten in drei Geotextilsäcken wurden die Absenkung und die Sediment-Trockensubstanzwerte gemessen. Zum Zeitpunkt der Aufbringung betrug der Sediment-Trockensubstanzwert etwa 29 %. Das Sedimentvolumen betrug zum Zeitpunkt der Aufbringung in den Entwässerungssäcken etwa 20 m³. Nach 31 Tagen Lagerung des Sediments in den Entwässerungssäcken wurden die Säcke am 7. Oktober 2016 aufgeschnitten, und das Sediment wurde mit LKWs auf das Feld aufgebracht. Die Dichte des auf das Feld aufgetragenen Sediments betrug 1,315 g/cm³.

Die zusammenfassende Tabelle 1 zeigt die Gehalte an Nährstoffen und organischen Stoffen in dem Agrarboden, auf welches das behandelte Sediment aufgebracht wurde, und die Gehalte an Nährstoffen und organischen Substanzen im Sediment in den Geotextilsäcken. Aus diesen Daten wurde dann der durchschnittliche Gesamtnährstoffeintrag pro Hektar Agrarboden berechnet [4].

Die Tabelle 2 zeigt den Prozentanteil der pflanzenverwertbaren Nährstoffe an ihrem Gesamtboden-gehalt. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass mit dem Teichsediment eine in der Größenordnung höhere Menge an N, P und K auf die Versuchsfelder aufgebracht wurde, als die übliche Düngerdosis (20-180 kg N/ha, 15-40 kg P/ha und 50-170 kg K/ha) wäre [5,6,7].

Vergleicht man jedoch den sofort pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalt, ist das Bild umgekehrt: Wir haben zwar eine angemessene Menge von (K), aber sehr wenig (P) geliefert, so dass das Teichsediment auf den ersten Blick als wenig wertvoll einzuschätzen wäre. Das Prinzip ist jedoch, dass die P- und N-Verbindungen (neben dem aktuell vorhandenen N-NH₄) und teilweise auch K (fixiertes und organisch gebundenes K) erst während des Prozesses der allmählichen Mineralisierung bioverfügbar werden. Dies bedeutet, dass die zugeführten Nährstoffe außerhalb der Vegetationsperiode nur geringfügig in Oberflächen- oder Grundwasser ausgewaschen und erst dann vollständig genutzt werden, wenn die erhöhte Temperatur zu Beginn der Ve-

životní prostředí. Výsledky projektu přinesly ucelený postup řešení problému vysokých ztrát fosforu a dalších látek z mikropovodí na jedné straně a ekonomicky nákladných a energeticky náročných vstupů na zemědělskou půdu na straně druhé.

Obecně se ukázalo, že s aplikovaným sedimentem dodáme do půdy relativně hodně celkového fosforu, který však není z velké části aktuálně využitelný pro růst rostlin. Fosfor se bude uvolňovat postupně, což je z hlediska přímého vymývání do vod (eutrofizace) dobré zjištění. V průběhu vegetační sezóny může docházet vlivem bakteriální aktivity a dalších mineralizačních procesů ke změnám ve formách fosforu, a tím ke zvýšení jeho dostupnosti pro rostliny.

Domníváme se, že v porovnání s průmyslově vyráběnými hnojivy je hnojení rybníčními sedimenty investicí do budoucna - výsledný pozitivní efekt na úrodnost a následnou produkci se projeví až v následujících několika letech po aplikaci. Výsledky z agrotechnického pokusu však naznačují, že již v prvním roce po aplikaci se projevil mírný pozitivní efekt aplikovaného rybníčního sedimentu na zvýšení obsahu hlavních nutriétů v půdě. Současně došlo i k navýšení celkové biomasy pěstované plodiny a mírně se zlepšily i sledované výnosotvorné ukazatele [4].

getationsperiode den mikrobiellen Abbau der zugeführten organischen Substanzen unterstützt. Zu diesem Zeitpunkt werden auch die Kulturpflanzen intensiv wachsen, welche die freigesetzten Substanzen für ihr Wachstum kontinuierlich abnehmen werden. Durch die allmähliche Freisetzung anorganischer Nährstoffformen in der vollen Vegetationsperiode ist ihr Ausspülen in Oberflächengewässer, beispielsweise durch intensive Regenfälle oder die Frühlingsschmelze, erheblich verringert. Durch das Aufbringen von Sediment wurde der Boden mit allen Nährstoffen für mehrere Jahre quasi bevorratet. Dies wird auch mit praktischen Erfahrungen der Landwirte bestätigt, die im Laufe einiger Jahre nach der Sedimentaufbringung eine deutliche Verbesserung der Produktion festgestellt haben.

4. Fazit

Die Teiche in der Tschechischen Republik enthalten ungefähr 197 Mio. m³ Sediment, kleine Fließgewässer 5 Mio. m³ und die Entwässerungskanäle 0,8 m³, und dieses Volumen verringert ihre Akkumulationsfähigkeit [8]. Die Sedimentmasse stellt eine permanente Belastung für das Ökosystem der Teiche und für das gesamte Wasserwirtschaftssystem dar. Der Verlust von Substanzen aus der Kulturland-

schaft ist eine der schwerwiegendsten Folgen der anthropogenen Einflüsse auf die Umwelt. Die Projektergebnisse bringen eine umfassende Herangehensweise an das Problem der hohen Verluste an Phosphor und andere Stoffe im Kleinzugsgebiet einerseits und die kostspielige und energieintensive Nährstoffzuführung in den Agrarboden andererseits.

Im Allgemeinen hat sich gezeigt, dass mit dem aufgebrauchten Sediment relativ viel Gesamtphosphor in den Boden eingetragen wird, der jedoch aktuell größtenteils nicht pflanzenverfügbar ist. Phosphor wird erst schrittweise freigesetzt, was eine gute Feststellung in Bezug auf sein direktes Auswaschen in Gewässer (Eutrophierung) ist. Während der Vegetationsperiode können dann die bakterielle Aktivität und andere Mineralisierungsprozesse zu Änderungen der Phosphorformen und dadurch zu seiner höheren Pflanzenverfügbarkeit führen.

Wir nehmen an, dass die Teichsedimentdüngung im Vergleich zu industriell hergestellten Düngemitteln eine Investition in die Zukunft darstellt – der daraus resultierende positive Effekt für die Bodenfruchtbarkeit und Produktion wird sich erst in mehreren Jahren nach der Anwendung zeigen. Die

5. Poděkování

Výsledky uvedené v tomto příspěvku byly financovány projektem TAČR (TA04020123): Technologický postup recyklace živin z rybníčních sedimentů s využitím sacího bagru, integrované stanice pro dávkování flokulantu a geotextilních vaků pro lokální aplikaci v mikropovodí.

6. Literatura/References

Šušta, J. Pět století rybníčního hospodářství v Třeboni. Příspěvek k dějinám chovu ryb se zvláštním zřetelem na přítomnost. Šušta, J. [Z něm. Originálu přeložil]: Lhotský O. Třeboň: Carpio. 1995. 212s. ISBN 80-901945-1-6.

Potužák, J.; Duras, J.; Drozd (2016): Mass balance of fishponds: are they sources or sinks of phosphorus? *Aquaculture International*. 24(6): DOI 10.1007/s10499-016-0071-4, s. 1725-1745

Potužák, J., Duras, J., Kröpfelová, L., Šulcová, J., Baxová Chmelová, I., Benedová, Z., Svoboda, T., Novotný, J., Pokorný, J., Marcel, M. 2017. Rybníční sedimenty a nové možnosti recyklace živin a organických látek v malých povodích – příkladová studie rybník Horusický. *Vodní hospodářství*. Roč. 67, č. 2, ISSN 1211-0760, s. 8-10.

Baxa, M., Baxová Chmelová, I., Benedová, Z., Duras, J., Hrubec, R., Kröpfelová, L., Novotný, O., Pokorný, J., Potužák, J., Svoboda, T., Šulcová, J. 2017. Certifikovaná metodika TA04020123: Technologický postup recyklace živin z rybníčních sedimentů s využitím sacího bagru, integrované stanice pro dávkování flokulantu a geotextilních vaků pro lokální aplikaci v mikropovodí.

Ergebnisse des agrotechnischen Experiments deuten jedoch darauf hin, dass bereits im ersten Jahr nach der Anwendung ein leichter positiver Effekt des aufgebrauchten Teichsediments auf die Erhöhung des Hauptnährstoffgehalts im Boden aufgetreten ist. Gleichzeitig hat die Gesamtbiomasse der Kulturpflanzen zugenommen, und auch die beobachteten Ertragsindikatoren haben sich leicht verbessert [4].

5. Danksagungen

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden vom TAČR-Projekt (TA04020123) „Technologisches Verfahren zur Rückführung von Nährstoffen aus Teichsedimenten mit einem Saugbagger, einer integrierten Station zum Dosieren von Flokkungsmitteln und Geotextilsäcken für die lokale Anwendung im Kleineinzugsgebiet“ finanziert.

6. Literatur/References

Šušta, J. Pět století rybníčního hospodářství v Třeboni. Příspěvek k dějinám chovu ryb se zvláštním zřetelem na přítomnost. Šušta, J. [Z něm. originálu přeložil]: Lhotský O. Třeboň: Carpio. 1995. 212s. ISBN 80-901945-1-6.

Potužák, J.; Duras, J.; Drozd (2016): Mass balance of fishponds: are they sources or sinks of phosphorus? *Aquaculture International*. 24(6): DOI 10.1007/s10499-016-0071-4, s. 1725-1745

Potužák, J., Duras, J., Kröpfelová, L., Šulcová, J., Baxová Chmelová, I., Benedová, Z., Svoboda, T., Novotný, J., Pokorný, J., Marcel, M. 2017. Rybníční sedimenty a nové možnosti recyklace živin a organických látek v malých povodích – příkladová studie rybník Horusický. *Vodní hospodářství*. Roč. 67, č. 2, ISSN 1211-0760, s. 8-10.

Baxa, M., Baxová Chmelová, I., Benedová, Z., Duras, J., Hrubec, R., Kröpfelová, L., Novotný, O., Pokorný, J., Potužák, J., Svoboda, T., Šulcová, J. 2017. Certifikovaná metodika TA04020123: Technologický postup recyklace živin z rybníčních sedimentů s využitím sacího bagru, integrované stanice pro dávkování flokulantu a geotextilních vaků pro lokální aplikaci v mikropovodí. Třeboň. ENKI, o.p.s. 2017 ISBN 978-80-905483-0-5. 64s.

Petr, J.; Huska, J.; et al. Rostlinná výroba – I (Obecná část, obiloviny). Praha: Agronomická fakulta ČZU v Praze, katedra rostlinné výroby. 1997. 197s. ISBN 80-213-0152-X.

ký postup recyklace živin z rybníčních sedimentů s využitím sacího bagru, integrované stanice pro dávkování flokulantu a geotextilních vaků pro lokální aplikaci v mikropovodí. Třeboň. ENKI, o.p.s. 2017 ISBN 978-80-905483-0-5. 64s.

Petr, J.; Huska, J.; et al. Rostlinná výroba – I (Obecná část, obiloviny). Praha: Agronomická fakulta ČZU v Praze, katedra rostlinné výroby. 1997. 197s. ISBN 80-213-0152-X.

Petr J. (2008): Žito a triticales: biologie, pěstování, kvalita a využití. Praha: Profi Press, 192s. ISBN 978-80-86726-29-8.

Diviš, J., et al. (2010): Pěstování rostlin. 2. doplňkové vydání. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 260 s. ISBN 978-80-7394-216-8

Gergel, J., Kolář, L., Šedivý, V., Hůda, J., 2002. Rybníční sedimenty, geneze, posuzování, odstraňování a další nakládání s nimi. Příloha k výzkumné zprávě projektu VaV6304/02, MSM:J06/98:1222200002, 44 s

Petr J. (2008): Žito a triticales: biologie, pěstování, kvalita a využití. Praha: Profi Press, 192s. ISBN 978-80-86726-29-8.

Diviš, J., et al. (2010): Pěstování rostlin. 2. doplňkové vydání. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 260 s. ISBN 978-80-7394-216-8

Gergel, J., Kolář, L., Šedivý, V., Hůda, J., 2002. Rybníční sedimenty, geneze, posuzování, odstraňování a další nakládání s nimi. Příloha k výzkumné zprávě projektu VaV6304/02, MSM:J06/98:1222200002, 44 s

Environmentální dopady recyklace fosforu z komunálních odpadních vod

A. Amann^{1,2}, O. Zoboli^{1,2}, J. Krampe¹, H. Rechberger^{1,2}, M. Zessner^{1,2}, L. Egle^{1,2}

¹Institute for Water Quality and Resource Management, TU Wien, Vídeň, Rakousko, aamann@iwag.tuwien.ac.at

²The Centre for Water Resource Systems, TU Wien, Vídeň, Rakousko

Úvod

Získávání fosforu z fosfátové rudy je spojeno s ekonomickými i environmentálními problémy. Jednotlivé státy by mohly snížit svou závislost na globálním trhu s fosfátovou rudou díky recyklaci fosforu z komunálních odpadních vod, mohlo by to však vést ke zvýšení dopadů výroby hnojiv na životní prostředí. Intenzivní výzkum vedl v posledních le-

tech k vývoji různých technologií recyklace fosforu z odpadních vod. Při hledání nejvhodnějšího řešení zavádění recyklace fosforu do praxe bude pro zákonodárce nezbytné, aby měli k dispozici detailní znalosti vlivu různých technologií na životní prostředí. Tato práce se tedy zabývá hodnocením emisí a spotřebou energie 18 různých technologií recyklace fosforu (obr. 1), a také kvalitou jejich produktů.

Umweltleistung der Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Abwasser

A. Amann^{1,2}, O. Zoboli^{1,2}, J. Krampe¹, H. Rechberger^{1,2}, M. Zessner^{1,2}, L. Egle^{1,2}

¹Institute for Water Quality and Resource Management, TU Wien, Vídeň, Rakousko, aamann@iwag.tuwien.ac.at

²The Centre for Water Resource Systems, TU Wien, Vídeň, Rakousko

Einleitung

Die Phosphorgewinnung aus Phosphatgestein ist sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus Sicht der Umwelt problematisch. Durch die Rückgewinnung von Phosphor aus kommunalem Abwasser könnte die EU ihre Abhängigkeit vom Weltmarkt für Phosphatgesteine verringern, was jedoch möglicherweise zu einer Erhöhung der Umweltauswirkungen der Düngemittelproduktion führen könnte. Intensive Forschung hat in den letzten Jahren die Entwicklung vielfältiger Technologien für die Phos-

phorrückgewinnung aus Abwasser gefördert. Um Gesetzgebern ein umfassendes Bild zu vermitteln, wie eine zukünftige P-Rückgewinnung am besten umgesetzt werden kann, sind Kenntnisse über die Auswirkungen verschiedener Technologien auf die Umwelt erforderlich. Diese Arbeit beschäftigt sich deshalb mit der Bewertung von Emissionen und dem Energieverbrauch von 18 verschiedenen P-Rückgewinnungstechnologien (Abb. 1) sowie der Qualität ihrer Produkte.

Obr. 1. Analyzované technologie

Kapalná fáze	Čistírenský kal	Popílek z kalu
REM NUT®	Gifhornský proces Stuttgartský proces	PASH LEACHPHOS® EcoPhos®
krystalizace kalu	mokrý oxidace	mokrý chemická extrakce
AirPrex®	PHOXNAN	RecoPhos® hnojářský průmysl
krystalizace supernatantu	oxidace superkritickou vodou	termo-chemicky
OsyaraPearlReactor® DHV Crystalactor® P-RoC PRISA	Aqua Reci®	AshDec®
	metalurgicky	Termo-elektricky
	MEPHREC®	Thermphos (P₄)

Obr. 2. Nastavení metody

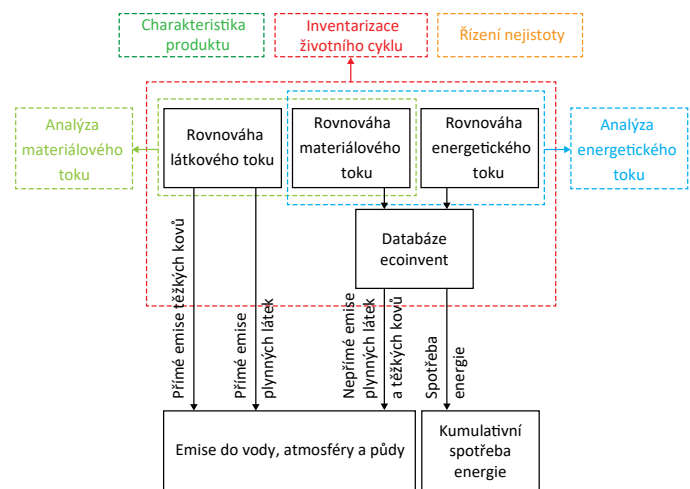
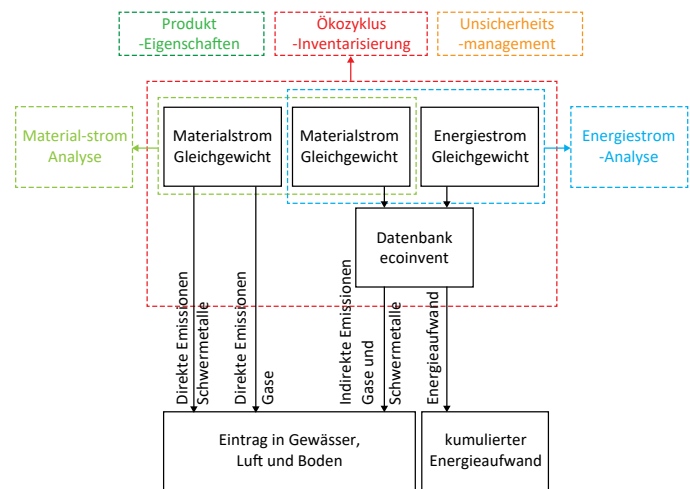


Abb. 1. Analyzierte Verfahren

Flüssige Phase	Klärschlamm	Klärschlammasche
REM NUT®	Gifhorn-Verfahren Stuttgart-Verfahren	PASH LEACHPHOS® EcoPhos®
Schlamm- Kristallisation	nasse Oxidation	nasse chemische Extraktion
AirPrex®	PHOXNAN	RecoPhos® Dünger Industrie
Supernatant Kristallisation	Oxidation mit superkritischem Wasser	thermo-chemisch
OsyaraPearlReactor® DHV Crystalactor® P-RoC PRISA	Aqua Reci®	AshDec®
	metalurgisch	thermo-elektrisch
	MEPHREC®	Thermphos (P₄)

Abb. 2. Verfahrensaufbau



Metoda

Poptávka po zdrojích, energetické nároky a emise do vodního prostředí, atmosféry a půdy byly určeny metodou analýzy materiálového a energetického toku (MFA, EFA; obr. 2). Dále byly analyzovány následující ukazatele prostřednictvím posuzování životního cyklu (LCA; norma ISO 14040):

- kumulativní spotřeba energie (CED) v [kWh]
- potenciál globálního oteplování (GWP) v [g CO₂e]
- acidifikační potenciál (AD) v [g SO₂e]

Jako referenční systém byla vybrána ČOV s kapacitou 100 000 ekvivalentních obyvatel (EO) s mono-spalováním splaškových kalů a úpravou a likvidací vznikajících odpadů.

Tyto ukazatele pak byly porovnány s jinými environmentálními kritérii, tj. s potenciálem recyklace, potenciálem dekontaminace od těžkých kovů a organických mikropolutantů a s účinností hnojiv pro sta-

novení jejich celkového environmentálního dopadu.

Výsledky

Analýza LCA ukazuje, že v souvislosti se zavedení recyklace fosforu z odpadních vod lze očekávat široké spektrum změn v plynných emisích a spotřebě energie. Propojení na další výsledky v oblasti dopadů na životní prostředí odhaluje srovnání jednotlivých technologií.

Recyklace z kapalně fáze má většinou pozitivní nebo relativně malý dopad na emise a spotřebu energie, nicméně, nízký potenciál recyklace je v rozporu s poptávkou po efektivní míře recyklace. Technologie recyklace z čistírenských kalů, které jsou již aplikovány téměř nebo zcela v provozním měřítku, jsou spojeny s poměrně vysokými emisemi a spotřebou energie. Recyklace z popílku z čistírenských kalů vykazuje různé výsledky a částečně odhaluje nesoulad mezi dekontaminací od těžkých kovů, emisemi a spotřebou energie. Využití popílku je však spojeno s nejvyšším potenciálem pro účinnou recyklaci fosforu.

Methode

Ressourcenbedarf, Energieverbrauch sowie Einträge in Gewässer, Luft und Boden wurden mit Hilfe der Material- und Energieflussanalyse (MFA, EFA; Abb. 2) bestimmt. Darüber hinaus wurden die folgenden Indikatoren anhand der Methode des Life Cycle Assessments (LCA; ISO-Norm 14040) analysiert:

- kumulierter Energieaufwand (KEA) in [kWh]
- Treibhausgaspotential (GWP) in [g CO₂e]
- Versauerungspotenzial (AP) in [g SO₂e]

Als Referenzsystem wurde eine Kläranlage mit 100.000 Einwohnerwerten (EW) mit Monoverbrennung von Klärschlamm und Behandlung und Entsorgung anfallender Abfälle gewählt.

Diese Indikatoren wurden dann mit anderen Umweltkriterien verglichen, d.h. dem Wiederherstellungspotenzial, dem Dekontaminationspotenzial für Schwermetalle und organische Mikroverunrei-

nigungen sowie mit der Düngereffizienz, um ihre Gesamtumweltleistung zu bestimmen.

Ergebnisse

Die Ökobilanz zeigt, dass durch die Einführung der P-Rückgewinnung aus Abwasser ein breites Spektrum an Änderungen der gasförmigen Emissionen und des Energieverbrauchs zu erwarten ist. Durch die Verknüpfung mit weiteren Ergebnissen im Bereich der Umweltleistung ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren.

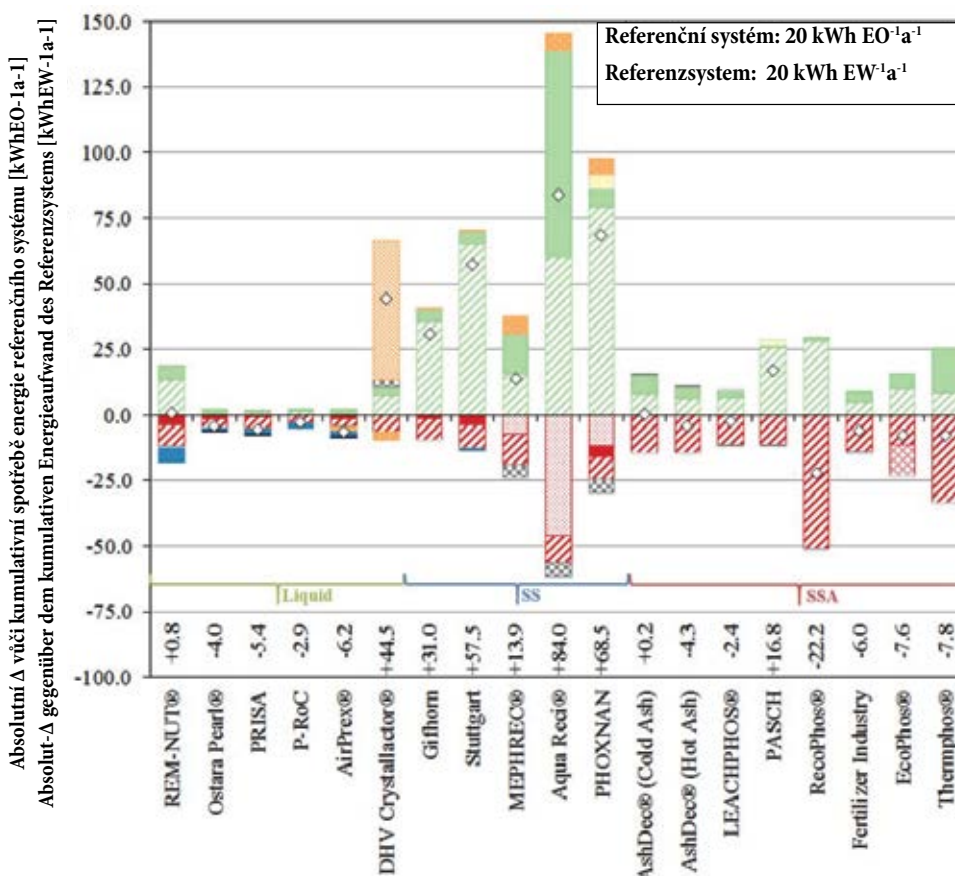
Die Rückgewinnung aus der flüssigen Phase hat meist positive oder vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Emissionen und den Energieverbrauch, das geringe Rückgewinnungspotenzial widerspricht jedoch der Forderung nach effizienten Recyclingraten. Technologien für die Rückgewinnung aus Klärschlamm, die bereits im Vollbetrieb eingesetzt werden oder bald zum Einsatz kommen, sind mit vergleichsweise hohen Emissionen und Energieansprüchen verbunden. Die Rückgewin-

Výhled

Další výzkum by měl zohledňovat místní infrastrukturu a právní rámec pro stanovení ekonomicky a environmentálně optimalizovaných koncepcí znovuvyužití a recyklace fosforu.

Celý text práce (volně přístupný):

Amann, A., Zoboli, O., Krampe, J., Rechberger, H., Zessner, M., Egle, L., 2018. Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater. Resources, Conservation and Recycling 130, 127–139.



Obr. 3. Vzorový výsledek: Kumulativní spotřeba energie

Abb. 3. Beispielergebnis: Kumulativer Energieverbrauch

nung aus Klärschlammasche zeigt unterschiedliche Ergebnisse und teilweise Trade-Offs zwischen der Schwermetall-Dekontaminierung, den Emissionen und dem Energieverbrauch. Dennoch ist die Rückgewinnung aus der Asche mit dem höchsten Potenzial für eine effiziente Phosphorrückgewinnung verbunden.

Aussicht

Weitere Forschung sollte Auswirkungen unter Einbeziehung der lokalen Infrastruktur und der

rechtlichen Rahmenbedingungen betrachten, um ökonomisch und ökologisch optimierte P-Rückgewinnungs- und Recyclingkonzepte zu bestimmen.

Volle Fassung (open access):

Amann, A., Zoboli, O., Krampe, J., Rechberger, H., Zessner, M., Egle, L., 2018. Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater. Resources, Conservation and Recycling 130, 127–139.

Posouzení biologické dostupnosti partikulovaného fosforu v různých složkách životního prostředí

Amann, A., Trautvetter, H., Strenge, E., O. Zoboli, Saracevic, E., Saracevic, Z., Zessner, M.

Institute of water quality and resource management, TU Wien, Vídeň, Rakousko, aamann@iwag.tuwien.ac.at

Úvod

Partikulovaný fosfor (PP) pocházející z eroze nebo čistíren odpadních vod se může rozpouštět chemickými, biologickými a fyzikálními procesy ve vodách a jezerních sedimentech, stát se biologicky dostupným a následně přispět k eutrofizaci. Množství fosforu (P), které se – v závislosti na fyzikálně chemických vazebných podmínkách v říční nebo jezerní vodě a sedimentu – potenciálně rozpustí, závisí na chemických vazbách fosforu ve zkoumaných částicích. Aby bylo možné posoudit potenciální významnost částic P pro eutrofizaci řek, jezer a moří, je zapotřebí tyto chemické vazby a uvolňování do roztoku lépe poznat. Cílem této navazující práce je analyzovat pevné vzorky z několika rakouských

povodí s různými charakteristikami (přítok s převahou eroze v horském povodí vs. zemědělská povodí, přítok s převažujícími odpadními vodami v jezerních systémech) a v několika matricích (erodovaná půda, suspendované pevné látky, jezerní sedimenty) za účelem stanovení jejich chemických vazeb a dostupnosti rozpustného reaktivního fosforu (SRP) jako podkladových informací pro další modelování eutrofizace v těchto odlišných systémech.

Metoda

Analýzy byly provedeny podle frakcionace P dle Psennera et al. (1984). Tato metoda je založena na chemickém výluhu, při kterém se k substrátu přidávají kyselá a alkalická rozpouštědla. Vazby

Bewertung der Bioverfügbarkeit von partikulärem Phosphor in verschiedenen Umweltbereichen

Amann, A., Trautvetter, H., Strenge, E., O. Zoboli, Saracevic, E., Saracevic, Z., Zessner, M.

Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, TU Wien, Österreich, aamann@iwag.tuwien.ac.at

Einleitung

Durch Erosion oder aus Abwasserkläranlagen emittierter partikulärer Phosphor (PP) kann durch chemische, biologische und physikalische Prozesse in Gewässern und Seesedimenten gelöst und bioverfügbar werden und anschließend zur Eutrophierung beitragen. Der Anteil des Phosphors (P), der – abhängig von physikalisch-chemischen Randbedingungen in Fluss-/Seewasser und Sediment – gelöst werden kann, hängt von den chemischen Phosphor-Bindungen in den untersuchten Stoffen ab. Um die potenzielle Relevanz von P-Partikeln für die Eutrophierung in Flüssen, Seen und Meeren beurteilen zu können, ist ein besseres Wissen über diese chemischen Bindungen und ihr Lösungsverhalten erforderlich. Das Ziel dieser laufenden Arbeit

ist eine Analyse partikulärer Proben aus mehreren österreichischen Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Eigenschaften (erosionsdominierter Eintrag in Bergregionen vs. landwirtschaftlichen Einzugsgebieten, abwasserdominierter Eintrag in Seesystemen) und mehreren Kompartimenten (erodierter Boden, suspendierte Feststoffe, Seesedimente) zur Bestimmung ihrer chemischen Bindungen und der Verfügbarkeit als Hintergrundinformation für die weitere Modellierung der Eutrophierung in diesen unterschiedlichen Systemen.

Methode

Die Analysen wurden gemäß P-Fraktionierung von Psenner et al. (1984) durchgeführt. Das Verfahren basiert auf einem chemischen Auslaugungspro-

fosforu se pak dělí na labilní P (extrakce pomocí NH_4Cl), redukční rozpustný P (redukce pomocí NaHCO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), P vázaný na železo a oxid hlinitý a poly-P na huminových látkách (extrakce NaOH), P vázaný na vápník ve formě apatitu (extrakce HCl) a nedostupný P. V každé frakci se stanoví SRP a celkový obsah P (TP), kromě frakce HCl, ve které je analyzován pouze SRP, a zbytková frakce, ve které je analyzován pouze obsah TP. Kontrola věrohodnosti výsledků z frakcionace se provádí porovnáním součtového obsahu TP frakcí s analýzou TP celého vzorku.

Výsledky a diskuse

Obsah TP v erodovaných orných půdách se pohybuje mezi 0,8 až 1,1 g/kg sušiny. Vzhledem ke svým chemickým vazbám může být rozdělen na tři části téměř stejného podílu: biologicky dostupný P (NH_4Cl - a NaHCO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ -SRP) tvoří asi 35 %, špatně rozpustný nebo nerozpustný P (HCl- a zbytkový SRP) tvoří asi 30 % a frakce NaOH, jejíž

rozpustnost se nachází někde mezi předchozími, tvoří asi 35 % celkového obsahu TP. Vzorky nerozpuštěných látek z povodí, v nichž dominuje využívání orné půdy, vykazují podobné rozložení, což naznačuje, že erodované orné půdy jsou důležitým faktorem přepravovaných nerozpuštěných látek ve vodách. Naproti tomu obsah TP ve vzorcích nerozpuštěných látek z povodí, kde dominují lesy a hory, se pohybuje mezi 0,5 až 0,7 g/kg sušiny a procentuální podíl nerozpustného nebo špatně rozpustného P (zbytkový a HCl-SRP) tvoří přibližně 90 % celkového obsahu TP.

Zjištění podporují hypotézu, že partikulovaný P z alpských oblastí, kterým dominují lesy a hory, stěží přispějí k eutrofizaci řek a stojatých vod, a to i při dlouhých retenčních časech. Naopak partikulární P z eroze zemědělské půdy může přispívat k růstu řas v recipientních vodních plochách, a to s významným podílem 50 % a více v závislosti na retenční době a fyzikálně-chemických vazebných podmínkách.

zess, bei dem saure und alkalische Lösungsmittel dem Substrat zugegeben werden. P-Verbindungen werden unterteilt in labilen P (Extraktion durch NH_4Cl), reduktiven löslichen P (Reduktion durch NaHCO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), Eisen- und Aluminiumoxid-gebundenen P und Poly-P an Huminstoffen (Extraktion mit NaOH), an Calcium gebundenen P in Form von Apatit (Extraktion durch HCl) und refraktären P. In jeder Fraktion werden gelöster P und der Gesamt-P-Gehalt (TP) bestimmt, mit Ausnahme der HCl-Fraktion, bei der nur gelöster, und der Restfraktion, bei der nur der TP-Gehalt analysiert werden. Die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse der Fraktionierung wird durchgeführt, indem die aufsummierten TP-Gehalte der Fraktionen mit einer TP-Analyse der gesamten Probe verglichen werden.

Ergebnisse & Diskussion

Der TP-Gehalt in erodierten Ackerböden schwankt zwischen 0,8 und 1,1 g/kg Trockensubstanz (TS).

In Bezug auf seine chemischen Bindungen kann er in drei Teile nahezu gleichen Anteils unterteilt werden: pflanzenverfügbare P (NH_4Cl - und NaHCO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ -SRP) beträgt etwa 35 %, schlecht löslicher oder nicht löslicher P (HCl- und restlicher SRP) ca. 30 %, und die NaOH-Fraktion, deren Löslichkeit dazwischenliegt, beträgt ca. 35 % des gesamten TP-Gehalts. Proben von Schwebstoffen aus Einzugsgebieten, die von Ackerland dominiert werden, weisen eine ähnliche Verteilung auf, was darauf schließen lässt, dass erodierte Ackerböden ein wichtiger Faktor für den Transport von Schwebstoffen in Gewässern sind. Im Gegensatz dazu schwankt der TP-Gehalt von suspendierten Feststoffen aus Einzugsgebieten, die von Wäldern und Bergen dominiert werden, zwischen 0,5 und 0,7 g/kg TS, während der prozentuale Anteil an nicht löslichem oder schlecht löslichem P (restlicher und HCl-SRP) etwa 90 % der TP-Gesamtmenge beträgt.

Die Untersuchungen stützen die Hypothese, dass P-Partikel aus von Wäldern und Bergen dominier-

Další vzorky sedimentů byly odebírány za účelem stanovení eutrofizačního potenciálu sedimentů z různých míst rákosové litorální zóny jezera ve východní části Rakouska, které je napájeno převážně řekou s vlivem vypouštěných odpadních vod a eroze. Zatímco TP v sedimentu na přítoku do jezera činí kolem 1,1 g/kg sušiny a biologicky dostupný P tvoří přibližně 1/3, vzorky sedimentů v oblastech rákosového pásu vzdálených od přítoku vykazovaly koncentrace TP mezi 0,25 a 0,75 g/kg sušiny a podíl biologicky dostupného P asi 5–10 %.

To podporuje hypotézu, že biologicky dostupný P z přítoku je snadno přijímán organismy v jezerním systému a většina biologicky dostupného P je při ukládání sedimentu v porostu rákosu už spotřebovaná. Další výzkum by měl propojit získané poznatky a pomocí modelování určit, zda mohou srovnatelně malá množství biologicky dostupného P na rozdíl od vysokého podílu špatně rozpustného nebo nerozpustného P stále představovat skutečné riziko pro eutrofizaci jezera, pokud dojde v systému k nějakým změnám.

ten Alpenregionen auch nach langen Verweilzeiten kaum zur Eutrophierung von Flüssen und stehenden Gewässern beitragen. Im Gegensatz dazu kann partikuläres P aus der landwirtschaftlichen Boden-erosion mit einem signifikanten Anteil von 50 % und mehr dazu beitragen, dass Algen in Aufnahmegewässern wachsen, abhängig von der Verweildauer und den physikalisch-chemischen Randbedingungen.

Weitere Sedimentproben wurden an verschiedenen Stellen aus dem Schilfgürtel eines Sees im östlichen Teil Österreichs entnommen, der hauptsächlich von einem Fluss mit Abwasser- und Erosionseintrag gespeist wird, um das Potenzial der eingelagerten Sedimente im Schilfgebiet für die Eutrophierung des Sees zu bestimmen. Während TP in Sedimenten im Seeinlauf etwa 1,1 g/kg TS beträgt und pflanzen-

verfügbarer P etwa 1/3 davon bildet, zeigte TP in Sedimentproben in Schilfgebieten, die weiter vom Einlauf entfernt waren, nur noch Konzentrationen zwischen 0,25 und 0,75 g/kg TS und einen Anteil von pflanzenverfügbarem P um 5-10 % auf.

Dies unterstützt die Hypothese, dass pflanzenverfügbarer P aus dem Zufluss von Organismen im Seesystem leicht aufgenommen wird und meistens bereits verbraucht ist, wenn Seesediment im Schilfgürtel gelagert wird. Weitere Forschung soll das gesammelte Wissen kombinieren, um durch Modellierung zu bestimmen, ob die vergleichsweise geringen Mengen an pflanzenverfügbarem P im Gegensatz zum hohen Anteil an schlecht oder nicht löslichem P ein Risiko für die Eutrophierung des Sees bei Änderungen im System darstellen können.

Možnosti zvýšené eliminace fosforu, III. stupeň na ČOV Třebíč

Jiří Jelínek¹, Leoš Tůna²

¹VAS, a.s., TUGŘ, jelinek@vasgr.cz

²VAS, a.s., divize Třebíč, tuna@vastr.cz

Úvod

ČOV Třebíč byla poslední předcházející zásadní rekonstrukcí v letech 2002–2005 řešena jako nízko zatížený biologický systém R-D-N s úsporněji pojatým objemem aktivací. Během této rekonstrukce a následujícího období však došlo také k významným změnám v legislativě, které však nemohly být v tehdejších prováděných koncepčních změnách technologie již akcentovány, což v důsledku vedlo až k poslední rekonstrukci z let 2014–2016, zahrnující především terciární stupeň dočištění odpadních vod. Hlavním důvodem posledních úprav technologie byly zejména problematické výsledky v odtokových parametrech celkového a v zimních měsících i amoniakálního dusíku. Nejvýznamnější příčinou tohoto stavu bylo faktické stáří (14–16 dnů)

a zatížení kalu v intervalu asi 0,065–0,080 kg BSK₅/kg suš., a to při teplotě odpadních vod v zimních měsících v intervalu 4,0–5,5 °C.

Koncepce terciárního stupně byla zvolena na základě poloprovozních výsledků vlastního vývoje technologů a pracovníků VAS a praktických zkušeností provozovatele v oblasti odděleného srážení fosforu a denitrifikace imobilizovanou kulturou s využitím externího substrátu. Terciární stupeň ČOV Třebíč je navržen na snížení odtokové koncentrace dusičnanového dusíku o předem definovanou hodnotu a na snížení odtokové koncentrace celkového fosforu pod garantovaný koncentrační limit.

Möglichkeiten der erhöhten Phosphorelimination, III. Stufe der Kläranlage Třebíč

Jiří Jelínek¹, Leoš Tůna²

¹VAS, a.s., TUGŘ, Soběšická 820/156, 63800 Brno, 602 724 616, jelinek@vasgr.cz

²VAS, a.s., divize Třebíč, Kubišova 1172, 67411 Třebíč, 568 899 111, tuna@vastr.cz

Einleitung

Die Kläranlage (KA) Třebíč wurde bei dem letzten wesentlichen Umbau 2002–2005 als ein schwach belastetes biologisches R-D-N-System mit einem sparsameren Belegungsvolumen ausgelegt. Während der Bauzeit und der nachfolgenden Periode kam es jedoch zu wichtigen Gesetzesänderungen, die in dem damals umgesetzten technologischen Konzept nicht mehr berücksichtigt werden konnten, was in der Folge zu dem letzten Ausbau 2014–2016 führte, der hauptsächlich in der dritten Abwasserreinigungsstufe bestand. Der Hauptgrund für die letzten Änderungen der Technik waren insbesondere die problematischen Ergebnisse der

Abflussparameter von Gesamtstickstoff und in den Wintermonaten auch von Ammoniakalstickstoff. Die wichtigste Ursache für diesen Umstand war das faktische Schlammalter (14–16 Tage) und -belastung im Bereich von ca. 0,065 – 0,080 kg BSB₅/kg TS, und das bei der Abwassertemperatur in Wintermonaten im Bereich von 4,0 – 5,5 °C.

Die Tertiärstufe wurde aufgrund halbtechnischer Ergebnisse aus der eigenen Entwicklung der Technologen und VAS-Mitarbeiter sowie praktischer Erfahrungen des Betreibers im Bereich der getrennten Phosphorfällung und Denitrifikation mittels immo-

Stručný popis řešení terciárního stupně

Třetí stupeň čištění ČOV Třebíč je řešen ve dvou paralelních technologických linkách, ve kterých jsou realizovány postdenitrifikační sekce - každá se čtyřmi oddíly, a dvou linkách defosforizace s koagulačním srážením. Provozně tak lze nastavit různé varianty průtoku a obtokování - s klasickým řešením propojení „do kříže“:

- jedna denitrifikace + dvě linky defosforizace
- dvě linky denitrifikace + jedna linka defosforizace

Každá z osmi komor denitrifikační sekce je vybavena hyperboloidním míchadlem, které zajišťuje vzhled a pohyb nosičů biomasy, homogenizaci, případně trvalý kontakt s dávkovaným substrátem. Kromě míchadel je každá ze čtyř sekcí v lince vybavena přívodem prací vody a vzduchu za účelem praní, regenerace bionosičů a nastavení oxidačně-redukčních podmínek. Defosforizační jednotky jsou pak

představovány koagulačním čiričem s regulátorem gradientu míchání.

Separovaný kal je odváděn do biologické části ČOV. Stejně tak lze recirkulovat i podstatnou část odpadních vod protékajících vlastním III. st.

Podle sledovaných parametrů procesu biologického a III. st. jsou do procesu dávkovány pomocný organický substrát a koagulant pro srážení fosforu.



Obr. 1. Pohled na nádrže postdenitrifikační linky

Abb. 1. Blick auf die Becken der Postdenitrifikationslinie

bilisierter Mikroorganismen mit Anwendung eines externen Substrats konzipiert. Die Tertiärstufe der KA Třebíč ist für eine Senkung der Abflusskonzentration von Nitrat-Stickstoff um einen vordefinierten Wert und für eine Senkung der Abflusskonzentration von Gesamtposphor unter einen garantierten Konzentrationsgrenzwert ausgelegt.

Kurze Beschreibung der Lösung der Tertiärstufe

Die tertiäre Reinigungsstufe der KA Třebíč besteht aus zwei parallelen technologischen Linien, in welchen die Postdenitrifikationsbereiche mit je vier Abteilen angebracht sind, und zwei Linien für die Phosphorelimination mit Flockung. Im Betrieb kann man also verschiedene Varianten von Durchfluss und Umleitung einstellen, mit der klassischen „kreuzförmigen“ Lösung:

- eine Linie für Denitrifikation + zwei für Phosphorelimination
- zwei Linien für Denitrifikation + eine für Phosphorelimination

Acht Kammern des Denitrifikationsbereichs sind mit je einem hyperboloiden Rührwerk ausgerüstet, die für Auftrieb und Bewegung der Biomasseträger, Homogenisierung bzw. kontinuierlichen Kontakt mit dem dosierten Substrat sorgen. Neben den Rührwerken ist jeder der vier Abteile in der Linie mit einer Wasser- und Luftzuleitung für Spülung, Regeneration von Bioträgern und Einstellung der Redoxbedingungen ausgestattet. Die Einheiten für die Phosphorelimination bestehen aus je einer Flockungsanlage mit einem gesteuerten Rührgradient.

Der abgetrennte Schlamm wird zum biologischen Teil der KA geführt. Auf dieselbe Weise kann auch ein wesentlicher Teil von Abwasser umwälzen, das durch die eigentliche Tertiärstufe fließt.

Je nach den überwachten Prozessparametern der biologischen und Tertiärstufe werden organische Hilfssubstrate und Flockungsmittel für die Phosphorfällung in das Verfahren dosiert.

Výsledky

Vlastní biologická linka ČOV ovlivňuje třetí stupeň čištění, ale stejně tak významným způsobem ovlivňuje proces postdenitrifikace i odděleného srážení fosforu vlastní funkcí biologické linky a za standardních podmínek provozu ji významným způsobem stabilizuje. Provoz užitého řešení III. st. tedy není jen dodatečným čištěním pro zlepšení odtokových parametrů biologicky vyčištěné odpadní vody, ale významným a obtížně vyhodnotitelným stabilizačním prvkem celé ČOV, v daném případě s již nedostačujícím objemem a problematickou konfigurací aktivačních nádrží.

Dosahované výsledky po doplnění ČOV o III. st. čištění a porovnání s předchozím obdobím uvádí následující tabulka:

Parametr / Parameter	ChSK	Nc	Pc	
Jednotka / Einheit	mg/l	mg/l	mg/l	
Přítok - typické hodnoty 2015-2018 Zufluss – typische Werte 2015-2018	870	65	10–16	
Odtok / Abfluss	Před rekcí	35	14–19	1,1–1,5
	2016	30,6	13,9	0,39
	2017	27,9	10	0,34
	2018	28,4	11,2	0,42

Ergebnisse

Die biologische Reinigungslinie beeinflusst die dritte Reinigungsstufe, zugleich beeinflussen jedoch das Postdenitrifikationsverfahren und die getrennte Phosphorfällung bedeutend die eigentliche Funktion der biologischen Linien, die dadurch unter standardmäßigen Betriebsbedingungen bedeutend stabilisiert wird. Der Betrieb einer so gestalteten Tertiärstufe ist also nicht nur eine Nachreinigung von biologisch gereinigtem Abwasser zu besseren Abflussparameter, sondern ein wichtiges und schwer auswertbares Stabilisierungselement der gesamten Kläranlage, in diesem Fall mit einem bereits unzureichenden Volumen und einer problematischen Konfiguration der Belebungsbecken.

Die folgende Tabelle zeigt Ergebnisse der KA nach dem Einbau der Tertiärstufe im Vergleich mit der vorherigen Periode:

Z uvedených čísel je kromě asi 8–12% zlepšení parametrů organického čištění a cca 15–25% posunu v odstraňování dusíku (nemluvě o stabilizaci funkce v průběhu roku) zřejmý kvalitativní skok v účinnosti odstraňování fosforu. Současné hodnoty dosahují cca třetiny původních parametrů koncentrací ve vypouštěných vodách, což představuje roční snížení bilanční emise fosforu o dalších cca 2,6-3,5 t/r. Posun v účinnosti srážení je tak z původních 85–90 % na asi 97 %

Literatura

FOLLER, Eyer, Tüna. *Třetí stupeň čištění – možná úsporná technická řešení*. Blansko, únor 2017

III. st. čištění ČOV Třebíč, Pracovní instrukce, dodatky PŘ ČOV

Aus den obigen Zahlen ist neben den verbesserten Parametern der organischen Reinigung um ca. 8-12 % und der Stickstoffentfernung um ca. 15-25 % (neben der Stabilisierung der Funktion im Laufe des Jahres) ein Qualitätssprung in der Wirksamkeit der Phosphorelimination ersichtlich. Die gegenwärtigen Werte erreichen etwa ein Drittel der ursprünglichen Konzentration im Ablaufwasser, was eine jährliche Senkung des bilanzierten Phosphoreintrags um weitere ca. 2,6-3,5 t/Jahr darstellt. Die Wirksamkeit der Fällung steigt dadurch von den ursprünglichen 85 bis 90 % auf ca. 97 %.

Literaturverzeichnis

FOLLER, Eyer, Tüna. *Třetí stupeň čištění – možná úsporná technická řešení*. Blansko, Februar 2017

III.st. čištění ČOV Třebíč, Arbeitsanweisung für die Kläranlage, Nachtrag zur Arbeitsordnung

Aplikace statkových hnojiv jako cenného zdroje fosforu a s tím spojené možnosti snížení ztrát fosforu na orné půdě

Jan Bursík

Domašín, jan.bursik.domasin@seznam.cz

Fosfor jako základní živina je často zemědělskou praxí opomíjen. Ve všech používaných statkových hnojivech se nejvíce hledí na obsahy dusíku a jeho využití ve výživě rostlin. Fosfor je přitom možné dodávat nejen nakupovanými minerálními hnojivy, ale také právě vlastními příp. nakoupenými statkovými hnojivy. Statková hnojiva ovšem nejsou dnes produkována v takovém objemu, který by byl potřebný pro správnou výživu rostlin a udržení úrodnosti půdy v ČR. Souvisí to samozřejmě s úbytkem

živočišné výroby v ČR za posledních dvacet let. Proto je využití statkových hnojiv podrobeno poměrně značnému drobnohledu. Obsahy fosforu ve vybraných statkových hnojivech uvádí tab. 1. Je zde patrné, že rozdíly mezi tabulkovými hodnotami získanými z různých výzkumných činností vykazují rozdílné hodnoty obsahu fosforu ve srovnání s vlastními rozbory statkových hnojiv v čerstvém stavu, které byly zjištěny ve vybraném zemědělském subjektu na okrese Benešov.

Tab. 1 Průměrný obsah fosforu (P) ve vybraných statkových hnojivech v čerstvém stavu

Tab. 1 Mittlerer Phosphorgehalt (P) in ausgewählten Wirtschaftsdüngern im frischen Zustand

Statkové hnojivo / Wirtschaftsdünger	% P tabulkové Tabellenwert	% P skutečné Messwert
Kejda prasat, výkrm / Gülle Schweine, Maststall	0,13	0,066
Kejda prasat, porodna / Gülle Schweine, Geburtsstall	0,13	0,059
Kejda skotu, dojnice / Gülle Rind, Melkkühe	0,07	0,107
Hnůj skotu, dojnice / Mist Rind, Melkkühe	0,11	0,120
Drůbeží podestýlka, brojleři / Geflügelstreu, Broiler	0,70	0,666

Einsatz wirtschaftseigener Dünger als wertvolle Phosphorquelle und die damit verbundenen Möglichkeiten zur Verringerung der Phosphorverluste im Ackerland

Jan Bursík

Domašín, jan.bursik.domasin@seznam.cz

Phosphor als Grundnährstoff wird in der landwirtschaftlichen Praxis oft vernachlässigt. Bei allen gängigen Wirtschaftsdüngern wird vor allem der Stickstoffgehalt und seine Nutzung in der Pflanzenernährung betrachtet. Phosphor kann allerdings nicht nur in gekauften Mineraldüngern, sondern eben auch in wirtschaftseigenen oder zugekauften Hofdüngern aufgebracht werden. Wirtschaftsdünger werden heute in Tschechien allerdings nicht in einer solchen Menge produziert, die für eine sachgerechte Pflanzenernährung und Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit erforderlich wäre. Dies hängt natürlich mit dem Rückgang der inländischen

Viehproduktion seit den letzten zwanzig Jahren zusammen. Daher unterliegt der Einsatz von Wirtschaftsdüngern einer relativ großen Überprüfung. Der Phosphorgehalt in ausgewählten Wirtschaftsdüngern ist in Tab. 1 dargestellt. 1. Es ist offensichtlich, dass Tabellenwerte des Phosphorgehalts aus verschiedenen Forschungsaktivitäten sich von eigenen Analysen von Wirtschaftsdüngern im frischen Zustand in einem ausgewählten Landwirtschaftsbetrieb im Bezirk Benešov unterscheiden.

Tab. 1 Mittlerer Phosphorgehalt (P) in ausgewählten Wirtschaftsdüngern im frischen Zustand

Těmito rozdíly mezi hodnotami obsahu fosforu narážíme na první problém. Zemědělec totiž poměrně často vůbec neví, s čím kalkulovat pro budoucí plodinu po hnojení statkovým hnojivem. Používá většinou tabulkové hodnoty, které neodpovídají hodnotám skutečným. To následně způsobuje zbytečné přehnojování nebo nedohnojování danou živinou, což má negativní vliv na rostlinu, půdní chemické procesy a také na znečištění životního prostředí. V praxi je téměř nereálné provádět rozboru u každého hnojiště nebo dokonce u každého vozu dopraveného na ornou půdu. Takové rozboru jsou poměrně nákladné a náročné na odběr. Navíc u kejdy se hodnoty výrazně liší podle technologie chovu a skladování. Jen u hnoje skotu se výsledky rozboru a tabulkové hodnoty téměř nelišily.

Neméně významným úskalím je téma vlastního skladování statkových hnojiv. Podrobnosti o skladování statkových hnojiv uvádí vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv. Požadavky na sklady stanoví vyhláška č. 268/2009 Sb., o tech-

nických požadavcích na stavby. Zemědělský subjekt (PO i FO) je povinen tyto vyhlášky plnit v plném rozsahu. Svoboda a kol. (2017) uvádí podrobnosti v Metodice řádného způsobu uložení hnoje na zemědělské půdě. Když pomineme význam legislativy na znečištění vod dusičnany, což řeší Nitrátová směrnice, tak dojdeme k závěru, že zemědělce nic neusměrňuje ke snižování ztrát fosforu. Tyto ztráty probíhají mimo jiné také vyluhováním fosforu ze skladovaného hnoje prostřednictvím hnojůvky, která je na polních složištích vsakována do půdy nebo dokonce odtéká po povrchu různými směry, někdy právě i do povrchových vod. To se pochopitelně děje u nevhodně uloženého hnoje na polním složišti. U správně umístěného složiště hnoje k takovému problému dochází zřídka. Je otázkou, zda se fosfor absorbuje do půdy nebo jestli se dostane skutečně až do vodních toků. Záleží na mnoha faktorech. Jedním z nich jsou konkrétní povětrnostní podmínky, potažmo vliv ročníku. Za dlouhotrvajícího sucha, při nízkých srážkách nedochází k takovým ztrátám fosforu a ostatních živin z hnojiště

Mit diesen Unterschieden zwischen den Phosphorgehaltswerten stoßen wir auf das erste Problem. Der Bauer weiß nämlich oft nicht, womit er nach der Düngung mit dem Wirtschaftsdünger für die künftige Frucht rechnen soll. Er verwendet meistens Tabellenwerte, die mit den tatsächlichen Werten nicht übereinstimmen. Dies führt wiederum zu einer unnötigen Über- oder Underdüngung mit dem jeweiligen Nährstoff, was sich auf die Pflanzen, die chemischen Prozesse im Boden sowie die Umweltbelastung negativ auswirkt. In der Praxis ist es kaum realistisch, Analysen an jedem Mistplatz oder sogar an jedem Wagen durchzuführen, der in Ackerland ausgebracht wird. Solche Analysen sind relativ kosten- und arbeitsintensiv. Darüber hinaus variieren die Werte für die Gülle erheblich in Abhängigkeit von der Zucht- und Lagertechnologie. Nur bei dem Rindermist unterscheiden sich die Analysenergebnisse kaum von den Tabellenwerten.

Nicht weniger wichtig ist das Thema der Lagerung von Wirtschaftsdüngern. Die Wirtschaftsdüngerla-

gerung wird mit der Verordnung Nr. 377/2013 Slg. über Lagerung und Anwendung von Düngemitteln geregelt. Anforderungen an Lagerflächen sind in der Verordnung Nr. 268/2009 Slg. über technische Anforderungen an Bauwerke festgelegt. Landwirtschaftsbetriebe (sowohl natürliche als auch juristische Personen) sind verpflichtet, diese Bestimmungen im vollen Umfang zu erfüllen. Svoboda et al. (2017) betrachtet die Regeln ausführlich in der „Methodik der ordnungsgemäßen Mistlagerung auf Ackerland“.

Abgesehen von der Bedeutung der Nitrat-Richtlinie, die sich auf die Regelung der Nitrat-Belastung von Gewässern bezieht, kommen wir zu der Ansicht, dass der Bauer auf keine Weise zur Verringerung der Phosphorverluste motiviert wird. Diese Verluste entstehen unter anderem auch, indem Phosphor aus dem eingelagerten Mist durch in den Boden sickende oder sogar in verschiedene Richtungen, manchmal sogar in Oberflächengewässer fließende Jauche ausgetragen wird. Dies geschieht

jako při prudkých srážkách nad 50 mm za hodinu. Toto téma by mohlo být námětem k další výzkumné činnosti některých výzkumných organizací včetně výzkumných aktivit zemědělských univerzit. Skladování hnoje a drůbeží podestýlky přímo na orné půdě je velmi kontroverzní záležitostí, protože vybudování pevných složišť je vysoce nákladné, logisticky náročné a z hlediska majetkoprávních vztahů velmi problematické.

U vybraného zemědělského podniku v okrese Benešov o průměrné nadmořské výšce 480 m n. m. a průměrných ročních srážkách 720 mm byly vybrány dva dílčí půdní bloky (DPB), u kterých byl porovnán průměrný obsah P v půdě za posledních 13 let a vliv hnojení statkovými hnojivými na tyto hodnoty. Hypotéza byla taková, že by časté aplikace statkových hnojiv měly ovlivnit pozitivně obsah P v půdě. Průměrný obsah P byl získán z agrochemic-



*Obr. 1. Polní složiště drůbeží podestýlky
Abb. 1. Felddeponie für Geflügelstreu*

natürlich bei unsachgemäß auf dem Feld gelagerem Stallmist. Bei einer ordnungsgemäß platzierten Mistdeponie kommt es nur selten vor. Die Frage ist, ob Phosphor in den Boden aufgenommen wird oder ob er tatsächlich die Wasserläufe erreicht. Das hängt von vielen Faktoren ab, darunter von den jeweiligen Wetterverhältnissen beziehungsweise dem Jahresverlauf. Bei einer anhaltenden Dürre, bei geringen Niederschlägen kommt es zu viel kleineren Verlusten an Phosphor und anderen Nährstoffen aus dem Mistplatz als bei starken Niederschlägen von über 50 mm pro Stunde. Dieses Thema könnte Gegenstand weiterer Untersuchungen in Forschungsanstalten einschließlich der Agraruniversitäten sein. Die Lagerung von Stallmist und Geflügelstreu direkt auf dem Ackerboden ist ein sehr umstrittenes Thema, da der Bau fester Deponien sehr kostspie-

lig, logistisch anspruchsvoll und in Bezug auf die Eigentumsverhältnisse sehr problematisch ist.

In einem ausgewählten Landwirtschaftsbetrieb im Bezirk Benešov auf einer durchschnittlichen Seehöhe von 480 m ü. NN und mit durchschnittlichen Jahresniederschlägen von 720 mm wurden zwei partielle Bodeneinheiten (DPB) ausgewählt, bei denen der mittlere Phosphorgehalt im Boden seit den letzten 13 Jahren und der Einfluss der Wirtschaftsdünger auf diese Werte verglichen wurden. Die Hypothese lautete, dass ein häufiger Einsatz von Wirtschaftsdüngern den Phosphorgehalt im Boden positiv beeinflussen sollte. Der mittlere Phosphorgehalt wurde aus agrochemischen Prüfungen der landwirtschaftlichen Böden (AZZP) übernommen. Auf den beiden DPB wurden Wirtschaftsdünger

kého zkoušení zemědělských půd (AZZP). Na obou DPB byla aplikována statková hnojiva s vyšší četností aplikací se stoupající tendencí mezi roky 2003 až 2016. Výsledky uvádí tab. 2.

Z tabulky je patrné, že u jednoho DPB došlo k poklesu obsahu fosforu v půdě a u druhého k vzestupu. Lze to vysvětlit tím, že na DPB Větráky byla aplikována statková hnojiva v podobě kejdy skotu jednou za dva roky a jednou za 4 roky byl aplikován hnůj skotu nebo drůbeží podestýlka. DPB se nachází v blízkosti mléčné farmy. Jednoznačně lze říci, že k poklesu u DPB Postupská homole došlo především vlivem vyššího odběru fosforu sklizní a nižšího dodání této živiny ve statkových hnojivech. Ten-

to DPB je sice také hnojen jednou za 5 let hnojem skotu a jednou za 4 roky kejdou skotu, ale je zde vyšší odběr fosforu pěstovanými plodinami, protože je zde četnější pěstování kukuřice na siláž, u které dochází k vyššímu odvozu fosforu z pole. Hypotéza byla tedy potvrzena z 50 %.

Optimalizace hnojení statkovými hnojivy spočívá ve faktickém upřesnění dávky statkového hnojiva. Běžně používaná rozmetadla statkových hnojiv nemají možnost aktuálního měření metodou NIRS a už vůbec nedisponují vlastní vahou, která by zaručila přesnější aplikaci hnoje. Existuje sice výrobce rozmetadel, který se touto problematikou zabývá, ale není to ještě pro zemědělskou praxi příliš do-

Tab. 2 Průměrný obsah fosforu (P) v půdě na vybraných DPB

Tab. 2 Mittlerer Phosphorgehalt (P) im Boden auf ausgewählten DPB

Název DPB/rok DPB / Jahr	mg/kg P			
	2003	2009	2016	Rozdíl 2003/2016 Differenz 2003/2016
Větráky	66	55	126	60
Postupská homole	104	136	73	-31

zwischen 2003 und 2016 in einer höheren Häufigkeit und mit zunehmender Tendenz ausgebracht. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Aus der Tabelle geht hervor, dass der Phosphorgehalt im Boden in einer DPB gesunken und in der anderen gestiegen ist. Dies kann damit erklärt werden, dass in der DPB Větráky die Wirtschaftsdünger in Form der Rindergülle alle zwei Jahre und als Rindermist oder Geflügelstreu alle 4 Jahre ausgebracht wurde. Diese DPB befindet sich in der Nähe einer Milchviehfarm. Es kann eindeutig festgestellt werden, dass der Rückgang bei der DPB Postupská homole hauptsächlich auf eine höhere Phosphorentnahme durch die Ernte und auf eine geringere Zufuhr dieses Nährstoffs im Wirtschaftsdünger zurückzuführen ist. Diese DPB wird zwar ebenfalls alle 5 Jahre mit Rindermist und alle 4 Jahre mit Rindergülle gedüngt, die Phosphorentnahme durch die angebauten Pflanzen ist hier jedoch höher, da hier der Silage-Mais häufiger angebaut wird, bei dem mehr Phosphor

vom Feld entnommen wird. Die Hypothese wurde damit zu 50 % bestätigt.

Die Optimierung der Düngung mit Hofdüngern besteht in einer präzisen Dosierung. Die geläufigen Stalldungstreuer ermöglichen keine aktuelle NIRS-Messung und verfügen über keine Waage für eine genauere Dungausringung. Es gibt zwar einen Hersteller von Dungstreuern, der sich mit dieser Problematik befasst, aber die Lösung ist für die landwirtschaftliche Praxis noch schwer verfügbar. Neuerlich verfügt nur ein Dienstleistungsunternehmen in Tschechien über diese Technik, die in der Lage ist, genaue Mengen von Nährstoffen pro Hektar in Echtzeit auszubringen. In der Praxis wird die ausgebrachte Dungmenge durch Multiplikation der Dungstreuer-Anzahl pro DPB und ihres gewogenen Gewichts berechnet, und das Ergebnis wird durch das DPB-Ausmaß dividiert. So beispielsweise 166 Dungstreuer x 16 t/Dungstreuer / 56 ha = 47,42 t Dung/ha, was 104 kg P/ha entspricht. Dies ist allerdings nur eine ungenaue Schätzung, da der aus-

stupné. Nově touto mechanizací, která dokáže v reálném čase aplikovat přesné množství živin na ha, disponuje jedna z firem zabývajících se službami v ČR. V praxi vše probíhá tak, že dojde k výpočtu aplikované dávky hnoje tím, že se vynásobí počet rozmetadel na DPB a jejich zvážená hmotnost, výsledek se vydělí výměrou DPB. Např. $166 \text{ rozmetadel} \times 16 \text{ t/rozmetadlo} / 56 \text{ ha} = 47,42 \text{ t hnoje/ha}$, což odpovídá až 104 kg P/ha. To je ovšem nepřesná, odhadová metoda, protože aplikovaný materiál je velmi nehomogenní, je rozdílný dle stájových i povětrnostních podmínek. Jinak je tomu už u někte-

rých nejnovějších fekálních cisteren a aplikátorů kejdy. Zde již dochází ke značnému posunu, kdy je možné agregovat přístroje NIRS i na starší aplikační cisterny. Na druhou stranu se opět hledí při aplikacích převážně na dusík, který je limitován Nitrátovou směrnicí a podle obsahu ostatních živin se dávka neřídí. U této mechanizace je možné aplikovat přesně takové množství N, P nebo K jaké obsluha přednastaví. Vše se ukládá do aplikačních map, díky kterým je možné zoptimalizovat následné hnojení. Jako příklad lze uvést certifikované zařízení pro tyto účely HarvestLab 3000 od firmy John Deere, který je



Obr. 2. Jarní aplikace hnoje skotu rozmetadly Annaburger
 Abb. 2. Frühlingsausbringen von Rindermist mit Dungstreuern Annaburger

gebrachte Stoff sehr inhomogen ist und sich je nach den Stall- und Wetterbedingungen unterscheidet.

Anders sieht es bei einigen neuesten Güllewagen und -applikatoren aus. Hier ist ein erheblicher Fortschritt bemerkbar, weil die NIRS-Geräte auch an ältere Güllewagen angeschlossen werden können. Andererseits wird bei der Applikation wieder hauptsächlich Stickstoff betrachtet, der durch die Nitrat-Richtlinie begrenzt ist, und die Dosis wird nicht nach dem Gehalt anderer Nährstoffe gesteuert. Mit dieser Technik ist es möglich, eine von der Bedienung genau voreinstellte Menge von N, P oder K auszubringen. Alles wird in Applikationskarten gespeichert, um die nachfolgende

Düngung zu optimieren. Als Beispiel kann das für diesen Zweck zertifizierte Gerät HarvestLab 3000 von John Deere genannt werden, das sogar von der deutschen und niederländischen Regierung anerkannt ist. Beim Einsatz von Applikationsbehältern ohne diese Ausrüstung wird das sogenannte Beobachtungsverfahren verwendet, bei dem zunächst die Fahrgeschwindigkeit, die zurückgelegte Strecke, die Arbeitsbreite und das Ladevolumen bzw. die Gesamtmenge der ausgebrachten Gülle festgestellt werden. Der ermittelte Wert wird in eine relativ einfache Formel eingegeben, mit der die Fahrgeschwindigkeit des Traktors entsprechend der erforderlichen Güllemenge in m^3/ha berechnet wird. Wenn die Gülledosis in t/ha ermittelt werden

dokonce uznáván německou a nizozemskou vládou. Při použití aplikačních cisteren bez tohoto zařízení se používá tzv. sledovací metoda, u které se nejdříve zjistí pojezdová rychlost, ujetá vzdálenost, šířka pracovního záběru a objem nákladu, resp. množství vyaplikované kejdy. Zjištěná hodnota je dosazena do relativně jednoduchého vzorce, díky kterému se následně vypočte pojezdová rychlost traktoru podle požadované dávky kejdy v m^3/ha . Pokud bychom chtěli zjistit dávku kejdy v t/ha , tak bychom museli dávku přepočíst přes objemovou hmotnost kejdy, která je ovšem proměnná. Příklad závislosti aplikovaného množství kejdy na pojezdové rychlosti kejdovače vyjadřuje tabulka 3. Hodnoty byly opět zjištěny ve výše zmíněném zemědělském podniku

na okrese Benešov. U některých typů cisteren je téměř nereálné splnit nízkou dávku kejdy, protože je technicky nemožné zvýšit v terénu rychlost nad $10 \text{ km}/\text{hod.}$, tak jako to je u cisterny Annaburger v tab. 3. Jedná se samozřejmě o nepřesnou metodu měření aplikační dávky pouze kejdy jako celistvého hnojiva v reálném čase. Ačkoliv kejda je také materiál značně nehomogenní opět to není praxí na poli více řešeno. V tab. 3 je uveden jako příklad kejdovač Annaburger, který je agregován s hadicovým aplikátorem přímo na půdu a druhý kejdovač Kirchner, který aplikuje kejdu rozstřikem na povrch půdy, tento způsob je ovšem nevhodný z hlediska úniku amoniaku do ovzduší, a tak se od tohoto způsobu rozstřikem ustupuje.



Obr. 3. Aplikace kejdy prasat, vlevo aplikace rozstřikem, vpravo hadicovým aplikátorem
Abb. 4. Ausbringung von Rindviehgülle mit integrierter Einarbeitung, Geräteträger Claas Xerion

soll, muss die Dosis über die Gülledichte berechnet werden, die allerdings variabel ist.

Ein Beispiel für die Abhängigkeit der ausgebrachten Güllmenge von der Fahrgeschwindigkeit des Güllerverteilers ist in der Tabelle 3 gezeigt. Die Werte wurden wiederum in dem oben erwähnten Landwirtschaftsbetrieb im Bezirk Benešov ermittelt. Bei einigen Typen von Güllewagen ist es kaum möglich, eine niedrige Gülledosierung einzuhalten, da es technisch unmöglich ist, die Fahrgeschwindigkeit

auf dem Feld über $10 \text{ km}/\text{h}$ zu erhöhen, wie es beim Güllwagen Annaburger in Tab. 3 der Fall ist. Es handelt sich natürlich um ein ungenaues Messverfahren für die Dosierung von Gülle als einem einheitlichen Dünger in Echtzeit. Obwohl Gülle ebenfalls ein sehr inhomogenes Material ist, wird es in der Praxis auf dem Feld wieder nicht besonders berücksichtigt. In der Tabelle 3 sind als zwei Beispiele der Güllerverteiler Annaburger mit einem Schleppschlauchapplikator und der Güllerverteiler Kirchner, der die Gülle auf die Bodenoberfläche

Tab. 3 Závislost aplikovaného množství kejdy na jezdové rychlosti vybraného kejdovače

Tab. 3 Abhängigkeit der ausgebrachten Güllemenge von der Fahrgeschwindigkeit ausgewählter Gülleverteiler

Kejdovač Gülleverteiler	jezdová rychlost (km/hod) Fahrgeschwindigkeit (km/h)	aplikované množství (m ³ /ha) ausgebrachte Menge (m ³ /ha)
Annaburger 15 m ³ , 12 m	4,5	50,0
	5	45,0
	6	37,5
	7	32,1
	8	28,1
	9	25,0
	10	22,5
	11	20,5
	12	18,8
	13	17,3
	14	16,1
	15	15,0
	16	14,1
Kirchner 10 m ³ , 10 m	3	66,7
	4	50,0
	5	40,0
	6	33,3
	7	28,6
	8	25,0
	9	22,2
	10	20,0
	11	18,2
	12	16,7
	13	15,4
	14	14,3
	15	13,3
16	12,5	

verspritzt, angeführt; das letztere Verfahren ist allerdings wegen Entweichens von Ammoniak in die Luft unpassend, und dieses Sprühverfahren wird immer weniger gebraucht.

Abschließend kann man also zusammenfassen, dass wenn ein Bauer über Wirtschaftsdünger verfügt, sollte er diese möglichst effizient einsetzen und möglichst genau ausbringen. Dazu verhelfen ihm eigene Analysen der Wirtschaftsdünger, die

Závěrem lze tedy říci, že pokud zemědělec disponuje statkovými hnojivy, tak by je měl využívat co nejefektivněji a pokud možno aplikovat je v co nejpreciznějším režimu. K tomu dopomůžou vlastní rozborů statkových hnojiv, které je nutné každoročně opakovat z důvodu proměnlivosti krmných dávek a dalších faktorů ovlivňujících kvalitu a obsah živin. Ze stejného důvodu jsou v tab. 1 výrazné rozdíly u kejdy prasat proti tabulkovým hodnotám. V chovech prasat se totiž za posledních několik let změnil přístup k zoohygieně a v kejdě prasat je více obsažena samotná voda a tím ponížena sušina materiálu. U kejdy skotu je také výrazný rozdíl mezi

skutečnou hodnotou a tabulkovou, tento rozdíl je pravděpodobně způsoben rozdílným krmením a technologií chovu. Pevná statková hnojiva vyšších rozdílů nemají, jedná se o stabilnější hmotu z hlediska živin oproti kejdě.

Na DPB Větráky došlo k několikaletému nárůstu obsahu fosforu v půdě oproti poklesu obsahu fosforu u DPB Postupská homole. Na DPB Postupská homole byla ve sledovaných letech čteněji pěstována kukuřice na siláž. Důvodem toho byl také fakt, že protierozní legislativa způsobila jiný přístup zemědělců k výsevu této plodiny a následně došlo



Obr. 4. Aplikace kejdy skotu společně se zapravením, nosič nářadí Claas Xerion

Abb. 4. Ausbringung von Rindviehgülle mit integrierter Einarbeitung, Geräteträger Claas Xerion

aufgrund der Variabilität von Futterrationen und anderen Einflüssen auf Nährstoffqualität und -gehalt jedes Jahr wiederholt werden müssen. Denselben Grund haben die signifikanten Unterschiede bei Schweinegülle gegenüber den Tabellenwerten in der Tabelle 1. In der Schweinezucht hat sich nämlich die Herangehensweise an die Zoohygiene in den letzten Jahren geändert, und Schweinegülle enthält mehr Wasser, wodurch die Trockensubstanz in dem Material abnimmt. Bei Rindergülle besteht auch ein erheblicher Unterschied zwischen dem tatsächlichen Wert und dem Tabellenwert. Dieser Unterschied ist wahrscheinlich auf verschiedene Fütterungs- und Zuchtverfahren zurückzuführen. Bei festen Wirtschaftsdüngern wurden keine grö-

ßeren Unterschiede festgestellt, in Bezug auf Nährstoffe handelt es sich im Vergleich zu Gülle um eine stabilere Masse.

In der DPB Větráky kam es zu einer mehrjährigen Zunahme des Phosphorgehalts im Boden gegenüber dem Rückgang des Phosphorgehalts in der DPB Postupská homole. Auf der DPB Postupská homole wurde in den betrachteten Jahren Silage-Mais häufiger angebaut. Der Grund dafür war auch die Tatsache, dass neue Erosionsschutzvorschriften eine andere Einstellung der Bauern zur Aussaat dieser Frucht verursacht haben, und anschließend wurde auch die Fruchtfolge geändert. Der Unterschied zwischen den beiden DPB wurde wahr-

k rozhození osevních postupů. Rozdíl mezi DPB byl zřejmě způsoben vyššími dávkami kejdy skotu na DPB Větráky a zároveň heterogenními půdními podmínkami v rámci odběrů vzorků půdy. Hypotéza byla tedy potvrzena z 50 %. Záleží na okolnostech a spoustě dalších provozních faktorů. Celkové bilance živin včetně fosforu je potřebné sledovat čteněji než jednou za několik let. Zároveň na těch půdách, které nejsou hnojeny statkovými hnojivy je vhodné dodávat fosfor v minerálních hnojivech, což ovšem je podmíněno delšími výpovědními lhůtami pachtovních smluv, protože návratnost investice do půdy je víceletá.

Cisterna Annaburger využívá hadicového aplikátoru, který ovšem nezajistí zapravení kejdy do půdy. Z hlediska nízkých ztrát živin je neoptimálnější aplikátor, který zapravuje kejdu přímo do půdy. Zcela nepřijatelná je tedy aplikace rozstříkem. Správné a precizní aplikace kejdy či hnoje příp. drůbeží podestýlky s co nejmenšími ztrátami živin lze dosáhnout jedině důsledným přístupem a především použitím v současnosti nejmodernějších zařízení a mechanizace, které jsou na trhu dostupné.



*Obr. 5. Aplikace kejdy skotu hadicovým aplikátorem, poté je nutné rychlé zapravení kejdy do půdy
Abb. 5. Ausbringung von Rindviehgülle mit Schleppschläuchen, danach ist eine schnelle Gülleinarbeitung in den Boden notwendig*

scheinlich durch höhere Dosen von Rindergülle bei DPB Větráky und zugleich durch heterogene Bodenbedingungen bei den Bodenprobenahmen verursacht. Die Hypothese wurde damit zu 50 % bestätigt. Das Ergebnis hängt von konkreten Umständen und vielen betrieblichen Faktoren ab. Die gesamten Nährstoffbilanzen einschließlich Phosphor sollten häufiger als alle paar Jahre überprüft werden. Gleichzeitig ist es ratsam, auf den Böden, die nicht mit Wirtschaftsdünger gedüngt werden, Phosphor in Mineraldüngern auszubringen. Dies ist jedoch mit längeren Kündigungsfristen für Pachtverträge verbunden, da die Investitionsrendite vom Ackerland mehrere Jahre beträgt.

Der Güllewagen Annaburger verwendet einen Schleppschlauchapplikator, der die Gülle jedoch nicht in den Boden einarbeitet. Unter dem Gesichtspunkt eines geringen Nährstoffverlustes ist derjenige Applikator optimal, der die Gülle direkt in den Boden bringt. Das Sprühverfahren ist daher völlig inakzeptabel. Eine sachgemäße und genaue Ausbringung von Gülle bzw. Stallmist oder Geflügelstreu mit dem geringstmöglichen Nährstoffverlust kann nur durch eine konsequente Vorgehensweise und vor allem durch den Einsatz modernster Ausrüstung und Mechanisierung erreicht werden, die auf dem Markt erhältlich sind.

Revitalizace Brněnské nádrže

Dušan Kosour

Povodí Moravy, s.p., kosour@pmo.cz

Úvod

Brněnská údolní nádrž byla uvedena do provozu v roce 1940. Rozkládá se na severozápadním okraji města Brně a díky této poloze je významným místem pro rekreaci obyvatel jihomoravské metropole. Počet návštěvníků je v letním období odhadován na tisíce denně. Nádrž poskytuje možnosti pro koupání, vodní sporty, plavbu výletními loděmi, blízké okolí nádrže nabízí mnoho pláží, restaurací, hotelů, přístavišť a přírodních i historických památek. Kromě nádrže samotné je největším lákadlem lodní doprava a hrad Veveří. Kvalita vody na pěti plážích je pravidelně sledována státními orgány.

Od 80. let na nádrži docházelo k masivnímu výskytu sinicového vodního květu vlivem dlouhodo-

bé eutrofizace, zejména kvůli zvýšenému přísunu fosforu z povodí. Situace se zhoršila natolik, že byly každoročně vyhlášovány zákazy koupání. Rekreační využití nádrže výrazně kleslo. V reakci na tento stav se začaly formovat plány na revitalizaci povodí nádrže i nádrže samotné. V roce 2003 byl vytvo-



Obr. 1. Poloha Brněnské nádrže

Abb. 1. Lage der Brünner Talsperre

Renaturierung der Brünner Talsperre

Dušan Kosour

Povodí Moravy, s.p., Brno, kosour@pmo.cz

Einleitung

Die Brünner Talsperre wurde 1940 in Betrieb genommen. Sie befindet sich am nordwestlichen Stadtrand von Brunn und ist dank dieser Lage ein wichtiger Erholungsort der Einwohner der süd-mährischen Metropole. Die Anzahl der täglichen Besucher wird im Sommer auf Tausende geschätzt. Der Stausee lädt zum Schwimmen, Wassersport und Schifffahrt ein, die nahe Umgebung bietet viele Strände, Gaststätten, Hotels, Anlegestellen und natürliche sowie historische Sehenswürdigkeiten an. Neben dem Stausee selbst sind die größten Attraktionen der Passagierschiffsverkehr und die Burg Veveří. Die Wasserqualität an fünf Stränden wird regelmäßig von staatlichen Behörden überwacht.

Seit den 1980er Jahren kam es infolge der langfristigen Eutrophierung zu einem massiven Blaualgen-

vorkommen im Stausee, hauptsächlich aufgrund einer erhöhten Phosphorzufuhr aus dem Einzugsgebiet. Die Situation hat sich so verschlechtert, dass jedes Jahr Badeverbot angekündigt wurde. Die Erholungsnutzung der Anlage ging deutlich zurück. Als Reaktion darauf wurden Pläne für eine Renaturierung des Einzugsgebietes und des Stausees selbst entwickelt. 2003 wurde das Projekt „Čistá Svratka“ ins Leben gerufen, und in seinem Rahmen entstand eine Reihe von Studien und Maßnahmen. 2006 wurde eine Machbarkeitsstudie für das Einzugsgebiet der Talsperre erarbeitet, in der ins-

řen projekt „Čistá Svratka“, v jehož rámci posléze vznikla řada studií a opatření. V roce 2006 vznikla studie proveditelnosti pro povodí nádrže, kde byla navržena zejména opatření mířící na čištění odpadních vod, revitalizaci toků a sedimentační nádrže. Protože mnoho z těchto opatření má dlouhodobý charakter, bylo potřeba provést opatření i přímo na nádrži. Tato opatření budou zlepšovat kvalitu vody v nádrži do té doby, než se zlepší stav povodí a přítoku. V roce 2007 byla proto vytvořena studie proveditelnosti pro opatření přímo na nádrži [1].

Ve stejném roce byly provedeny první přípravné práce, např. vápnění sedimentů nádrže. V roce 2008 byla hladina nádrže snížena na historické minimum (o zhruba 8 metrů z původních 16 metrů hloubky), kvůli čemuž došlo k obnažení podstatné části dna. Obnažení trvalo rok a půl. Horní obnažená část sedimentů prošla mrazem a erozí, část byla splavena níže. Sedimenty, které zůstaly pod vodou, byly převrstveny materiálem z horní části nádrže a z povodí. Odběry

besondere Maßnahmen zur Abwasserbehandlung und Gewässerrenaturierung sowie die Errichtung von Sedimentationsbecken vorgeschlagen wurden. Da viele dieser Schritte langfristig angelegt sind, mussten einige Maßnahmen auch direkt am Stausee eingeleitet werden. Sie sollen die Wasserqualität im Stausee so lange verbessern, bis der Zustand des Einzugsgebietes und der Zufluss verbessert werden wird. 2007 wurde deshalb eine Machbarkeitsstudie für Maßnahmen direkt am Stausee erstellt [1]

Im selben Jahr wurden die ersten Vorbereitungsarbeiten durchgeführt, zum Beispiel die Kalkung der Sedimente im Stausee. 2008 wurde der Wasserspiegel der Stauanlage auf ein historisches Minimum (um etwa 8 Meter gegenüber der ursprünglichen Tiefe von 16 Metern) abgesenkt, wodurch ein beträchtlicher Teil der Seesohle freigelegt wurde. Dieser Zustand dauerte anderthalb Jahre. Die obere freigelegte Sedimentschicht wurde dem Frost und der Erosion ausgesetzt, ein Teil davon flussabwärts gespült. Die unter Wasser verbliebenen Sedimente wurden mit Anschwemmungen vom oberen Beckenteil und vom Zufluss überschichtet. Die 2010

sedimentů v roce 2010 odhalily nové vrstvy materiálu silné 1–10 cm [2]. Díky těmto událostem byla změněna vnitřní zátěž nádrže a zásoby živého inokula přezimujících sinic (zejména rodu *Microcystis*).

V roce 2010 byl zahájen projekt „Revitalizace údolní nádrže“, který byl dotován Státním fondem životního prostředí. Projekt sestával ze tří hlavních opatření: **Srážení fosforu v přítoku do nádrže, aerace a destratifikace vodního sloupce a změna rybí obsádky** [3].

Projekt probíhal 3 roky, dalších 5 let trvalo období udržitelnosti. Od roku 2018 pokračuje revitalizace nádrže další etapou, na které se finančně podílí Povodí Moravy, s.p., Magistrát města Brna a Krajský úřad Jihomoravského kraje.



Obr. 2. Hráz nádrže

Abb. 2. Staudamm

entnommenen Sedimentproben zeigten neue, 1 bis 10 cm dicke Materialschichten [2]. Aufgrund dieser Maßnahmen wurden die innere Belastung des Stausees sowie Vorräte vom lebenden Blaualgen-Inokulum (insbesondere *Microcystis*) reduziert.

2010 wurde das Projekt „Revitalizace údolní nádrže“ (Renaturierung der Talsperre) mit einer Förderung vom Staatlichen Umweltfonds gestartet. Es bestand aus drei Hauptmaßnahmen: **Phosphorfällung am Zufluss zum Stausee, Belüftung und Destratifizierung der Wassersäule sowie Änderung des Fischbestands** [3].

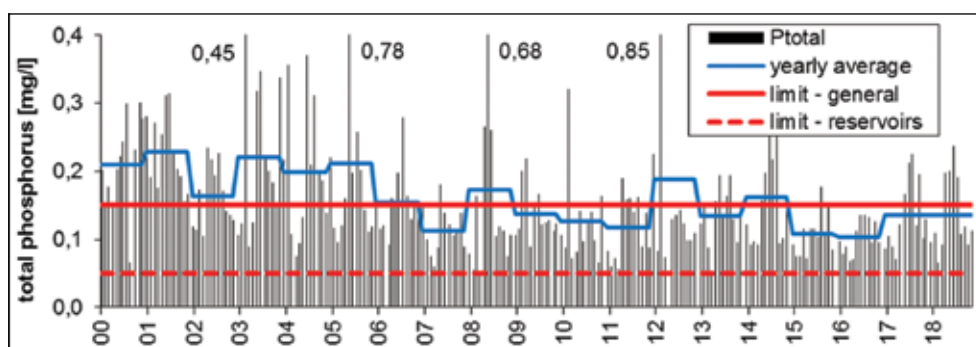
Das Projekt dauerte drei Jahre mit einer fünfjährigen Nachhaltigkeitsperiode. Seit 2018 wurde die Renaturierung des Stausees in einer neuen Phase

Výsledky a diskuse

Nejdůležitějším faktorem, který způsobuje problémy s kvalitou vody v nádrži, je přísun fosforu z povodí, konkrétně jeho koncentrace v řece Svratce. Koncentrace celkového fosforu se v dřívějších letech zlepšovala, avšak zhruba od roku 2007 stagnuje. U toků v ČR je to obecně dáno změnami v povodí po roce 1989, kdy skončila státem řízená ekonomika [4]. Následoval úbytek průmyslu a zánik kolektivního zemědělství, byla zahájena výstavba čistíren odpadních vod. Stagnace je dána tím, že odpadní vody ve větších obcích jsou už čistěny, menší obce však stále většinou čistírnu odpadních vod nemají nebo jejich čistírna odstraňuje fosfor s malou účinností [5].

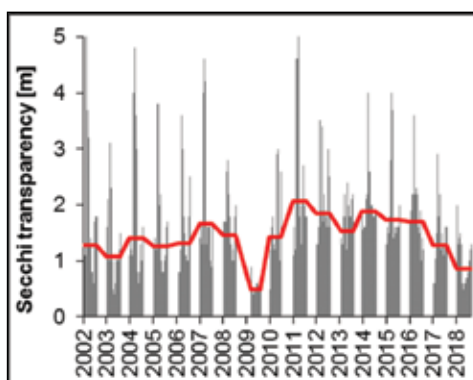
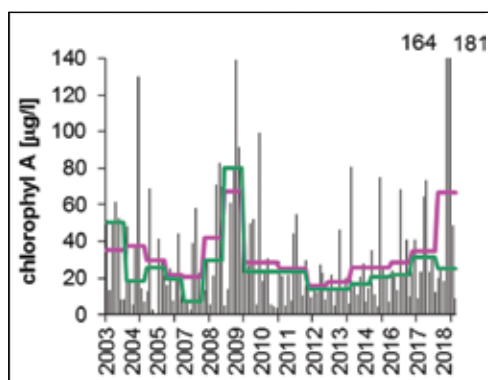
U toků v ČR je to obecně dáno změnami v povodí po roce 1989, kdy skončila státem řízená ekonomika [4]. Následoval úbytek průmyslu a zánik kolektivního zemědělství, byla zahájena výstavba čistíren odpadních vod. Stagnace je dána tím, že odpadní vody ve větších obcích jsou už čistěny, menší obce však stále většinou čistírnu odpadních vod nemají nebo jejich čistírna odstraňuje fosfor s malou účinností [5].

Obr. 3: Koncentrace celkového fosforu na přítoku do nádrže. Červená plná čára – obecný limit 0,15 mg/l pro všechny vodní útvary, přerušovaná čára –



Obr. 3. Koncentrace celkového fosforu na přítoku do nádrže.

Abb. 3. Gesamtposphorkonzentration am Einlauf in den Stausee.



Obr. 4. Koncentrace chlorofylu A ve směsném 4metrovém vzorku epilimnia u hráze.

Abb. 4. Chlorophyll-A-Konzentration in einer Mischprobe vom 4-Meter-Epilimnion am Staudamm.

Obr. 5. Průhlednost Secchiho deskou u hráze.

Abb. 5. Transparenz mittels Secchi-Platte am Staudamm.

fortgesetzt, an der sich das Staatsunternehmen Povodí Moravy, das Magistrat der Stadt Brunn und das Kreisamt des Kreises Südmähren finanziell beteiligen.

Ergebnisse und Diskussion

Der wichtigste Faktor, der zu Problemen mit der Wasserqualität im Stausee führt, ist der Phosphoreintrag aus dem Einzugsgebiet, im Besonderen die P-Konzentration im Fluss Svratka. Die Gesamtposphorkonzentration hat sich in früheren Jahren verbessert, aber seit 2007 stagniert sie. In tschechischen Gewässern ist dies im Allgemeinen auf Änderungen im Einzugsgebiet nach 1989, nach dem

Ende der staatlich geleiteten Wirtschaft, zurückzuführen [4]. Es begann die Schrumpfung der Industrie und das Verschwinden der kollektiven Landwirtschaft sowie der Bau von Abwasserkläranlagen. Die nachfolgende Stagnation ist dadurch bedingt, dass Abwässer in größeren Gemeinden bereits gereinigt werden, kleinere Gemeinden jedoch meistens über gar keine Kläranlage verfügen, oder über solche, wo Phosphor mit nur geringer Effizienz eliminiert wird [5].

Abb. 3: Gesamtposphorkonzentration am Einlauf in den Stausee. Rote volle Linie – allgemeiner Grenzwert von 0,15 mg/l für alle Wasserkörper, gestrichelte Linie – Grenzwert für Einzugsgebiete von

limit pro povodí nádrží 0,05 mg/l). Limity vyplývají z českého nařízení vlády č. 401/2015 Sb.

Monitoring nádrže probíhá ve vegetační sezóně od března nebo dubna do října. Soustředí se na měření fyzikálně-chemických parametrů na 8 vertikálních pomoci multiparametrické sondy a dále na chemické rozbory odebírané ve směsné 4m vrstvě epilimnia, na hladině, u dna a v několika dalších hloubkách. Důraz je kladen na kyslíkový režim nádrže, redoxní stav a výskyt fytoplanktonu a zooplanktonu.

Obr. 4: Koncentrace chlorofylu A ve směsném 4metrovém vzorku epilimnia u hráze. Purpurová čára – roční průměr, zelená čára – roční medián.

Obr. 5. Průhlednost Secchiho deskou u hráze. Červená čára roční průměr.

Na obrázcích 4 a 5 je patrné odpuštění hladiny (2009) a následné prudké zlepšení, posléze pokles průhlednosti a nárůst chlorofylu. Největší zhoršení po roce 2009 nastalo v roce 2018.

Srážení fosforu na přítoku do nádrže má za úkol odstranit přebytečný rozpuštěný fosfor přitékající



Obr. 6. a 7. Srážení fosforu síranem železitým na přítoku do nádrže – řeka Svatka pod obcí Veverská Bítýška

Abb. 6. und 7. Phosphorfällung mit Eisensulfat am Einlauf zum Stausee – Fluss Svatka unterhalb der Gemeinde Veverská Bítýška

Stauseen 0,05 mg/l). Die Grenzwerte ergeben sich aus der Verordnung der tschechischen Regierung Nr. 401/2015 Slg.

Das Monitoring am Stausee findet in der Vegetationsperiode von März oder April bis Oktober statt. Es konzentriert sich auf die Messung physikalisch-chemischer Parameter an 8 Vertikallinien mittels einer multiparametrischen Sonde sowie auf chemische Analysen von Proben, die in einer 4-m-Mischschicht im Epilimnion, an der Oberfläche, an der Sohle und in mehreren anderen Tiefen entnommen werden. Der Schwerpunkt liegt auf dem Sauerstoffhaushalt im Stausee, dem Redoxzustand und dem Vorkommen von Phyto- und Zooplankton.

Abb. 4: Chlorophyll-A-Konzentration in einer

Mischprobe vom 4-Meter-Epilimnion am Staudamm. Purpurrote Linie – Jahresdurchschnitt, grüne Linie – Jahresmedian.

Abb. 5. Transparenz mittels Secchi-Platte am Staudamm. Rote Linie – Jahresdurchschnitt.

Aus den Grafiken 4. und 5. sind die Wasserspiegelsenkung (2009) und die darauffolgende deutliche Verbesserung ersichtlich, später dann die Transparenzabnahme und Chlorophyllzunahme. Die größte Verschlechterung seit 2009 kam im Jahre 2018.

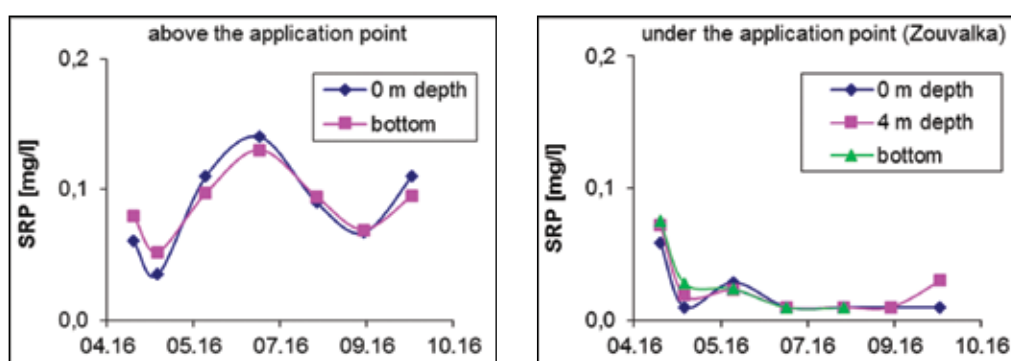
Abb. 6. und 7.: Phosphorfällung mit Eisensulfat am Einlauf zum Stausee – Fluss Svatka unterhalb der Gemeinde Veverská Bítýška

řekou Svratkou z povodí. Je aktivní většinou od začátku května do konce září. Sráží se 40% roztokem síranu železitého, který je aplikován do středu řeky v ústí do nádrže. Srážení probíhá za standardních odběrů, při vysokých průtocích se z ekonomického důvodu vypíná. Při dávce 20 mg síranu na 1 litr vody je účinnost odstranění fosforečnanového fosforu (SRP) zhruba 90 %. Vyšší dávky by byly ekonomicky náročné, účinnost by se již výrazně nezvýšila. Dávka na litr je až na výjimky konstantní, množství

síranu tak závisí pouze na průtoku, nikoli na koncentraci fosforu v přítoku.

Obr. 8: Srážení fosforu, výsledky z roku 2016. Vlevo profil nad srážecím místem, vpravo profil Zouvalka (pod srážecím místem). Při prvním a posledním měření srážení neprobíhalo.

Aerace a destratifikace nádrže má za cíl udržet nádrž promíchanou a okysličenou. Míchání má



Obr. 8. Srážení fosforu, výsledky z roku 2016. Vlevo profil nad srážecím místem, vpravo profil Zouvalka (pod srážecím místem). Při prvním a posledním měření srážení neprobíhalo.

Abb. 8. Phosphorfällung, Ergebnisse 2016. Links Werte oberhalb der Fällungsstelle, rechts am Profil Zouvalka (unterhalb der Fällungsstelle). Während der ersten und letzten Messung lief keine Fällung.

Mittels **Phosphorfällung am Einlauf zum Stausee** wird überschüssiger gelöster Phosphor entfernt, der durch Svratka aus dem Einzugsgebiet gebracht wird. Das Verfahren ist meistens von Anfang Mai bis Ende September aktiv. Die Fällung wird mit einer 40% Lösung von Eisensulfat durchgeführt, die in der Flussmitte an der Mündung in den Stausee appliziert wird. Die Fällung erfolgt bei Standardabflüssen, bei hohen Abflusswerten wird sie aus wirtschaftlichen Gründen abgeschaltet. Bei einer Dosis von 20 mg Sulfat pro Liter Wasser beträgt der Eliminationsgrad von Phosphat-Phosphor (SRP) etwa 90 %. Höhere Dosen wären kostenintensiv ohne wesentliche Effizienzsteigerung. Mit wenigen Ausnahmen ist die Dosierung pro Liter konstant, daher hängt die Sulfatmenge nur von dem Durchfluss ab, nicht von der Einlauf-Phosphorkonzentration.

Abb. 8: Phosphorfällung, Ergebnisse 2016. Links

Werte oberhalb der Fällungsstelle, rechts am Profil Zouvalka (unterhalb der Fällungsstelle). Während der ersten und letzten Messung lief keine Fällung.

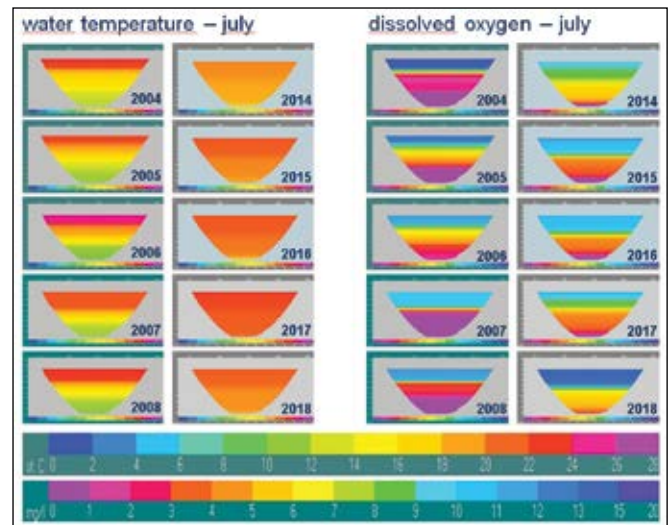
Die **Belüftung und Destratifizierung** soll Wasser im Stausee umwälzen und sauerstoffreich aufrechterhalten. Das Umwälzen soll gegen das Wachstum einiger planktonischer Blaualgen (*Microcystis*, *Dolichospermum*, *Aphanizomenon*) wirken, die Sauerstoffanreicherung von Sedimenten erschwert das Überwintern von Winterstadien (überwiegend die Gattung *Microcystis*). Das Verfahren läuft über den gleichen Zeitraum wie die Fällung und wird mit 5 Belüftungstürmen und 15 Pumpentürmen durchgeführt. Der Belüftungsturm ist eine Röhre, in welche in feine Blasen zerstreute Luft von unten eingeblasen wird. Die Luft wird zum Turm durch Schläuche an der Sohle vom Kompressor am Ufer geleitet. Belüftungstürme oxidieren das Hypolimni-

znesnadňovat produkci některým planktonním sinicím (*Microcystis*, *Dolichospermum*, *Aphanizomenon*), okysličení sedimentů zase přezimování zimních stádií (převážně rod *Microcystis*). Probíhá ve stejném období jako srážení a je prováděna pomocí 5 aeračních věží a 15 čerpadlových věží. Aerační věž je tubus, do kterého se zespodu vhání vzduch rozptylovaný do jemných bublin. Vzduch je do věže veden hadicemi při dně z kompresoru na břehu. Aerační věže okysličují hypolimnion a míchají vodu zespodu nahoru.

Čerpadlové věže obsahují v horní části turbínu s lopatkami, která je napájena kabelem ze břehu. Čerpadlo nasává teplou a přirozeně okysličenou vodu u hladiny a rozptyluje ji u dna. Během provedených měření se ukázalo, že největší efekt na promíchání nádrže má právě tento typ věží. Efektem destratifikace je minimální teplotní gradient od hladiny až ke dnu. Při příznivém počasí (ochlazení, vítr, déšť) dochází na nádrži ke kompletnímu promíchání, a to i v létě. V horkém a klidném počasí se vytváří drobná termoklina, rozdíl teplot mezi hladinou

Obr. 9. Teplotní (vlevo) a kyslíková (vpravo) stratifikace v červnu v letech 2004–2018. Profil v nejhlubším místě u hráze nádrže, cca 16 m hloubky.

Abb. 9. Temperatur- (links) und Sauerstoff-Stratifikation (rechts) im Juni 2004–2018. Profil an der tiefsten Stelle am Staudamm, ca. 16 m tief.



Obr. 10. Schéma nádrže s vyznačenými odběrnými profily, místem srážení a oblastí s aeračními a destratifikačními věžemi.

Abb. 10. Schema der Talsperre mit markierten Entnahmeprofilen, der Fällungsstelle sowie dem Bereich mit Belüftungs- und Destratifizierungstürmen.



on und treiben Wasser von unten nach oben um.

Die Pumpentürme haben oben eine Turbine mit Schaufeln, die über ein Kabel vom Ufer aus angetrieben wird. Die Pumpe saugt warmes und natürlich sauerstoffreiches Wasser von der Oberfläche an und verteilt es an der Sohle. Bei den Messungen hat sich gezeigt, dass eben dieser Turmtyp die größte Effizienz für das Umwälzen aufweist. Das Ergebnis der Destratifizierung ist ein möglichst kleines Temperaturgefälle zwischen der Oberfläche und der

Sohle. Bei günstigem Wetter (Abkühlung, Wind, Regen) wird der gesamte Stausee vollständig umgewälzt, und das auch im Sommer. Bei warmem und ruhigem Wetter bildet sich eine kleine Thermokline, die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Sohle ist allerdings auch in diesem Fall gering, normalerweise etwa 1–2 °C.

Die **Änderung des Fischbestands** wurde mit der Absicht entworfen, die Nahrungsbeziehungen im Stausee zu ändern. Die Biomanipulation zielte auf

a dnem je však i v tomto případě minimální, většínou cca 1–2 °C.

Změna rybí obsádky byla provedena s úmyslem změnit potravní vztahy v nádrži. Biomanipulace byla zaměřena na potlačení bílé ryby (cejn, cejnek, plotice) tak, aby poklesl predáční tlak na velké druhy zooplanktonu. Vyšší biomasa zooplanktonu by poté měla vést k silnějšímu spásání řas. Redukce bílé ryby byla prováděna pomocí odlovů cejna v době tření v letech 2010–2012. Další druhy mají tření rozptýlené do většího období a je obtížné je odlovy redukovat. Dále byla vysazena v několika vlnách dravá ryba (štika 1000 kg a candát 1000 kg). Po provedení biomanipulace byly provedeny kontrolní odlovy, které potvrdily výraznou redukci cejna, avšak nezaznamenaly zvýšení populací štiky a candáta. Cejn byl v jezerní části nahrazen cejnem, v přítokové části ploticí [6]. Výskyt bolena klesá, což je zapříčiněno absencí jeho vysazování.

Populace candáta a štiky utrpěla sportovním rybolovem. Bohužel se nepodařilo prosadit změnu

pravidel rybolovu, která by tyto dva druhy alespoň v prvních letech po vysazení ochránila. Původně se předpokládalo vysazení bolena a sumce, kteří mnohem lépe rybolovu odolávají [7], avšak v požadovaném období nebyla tato násada komerčně dostupná. Brněnská nádrž je rybářským revírem ve správě Moravského rybářského svazu, Povodí Moravy má na vysazování a pravidla rybolovu jen nepřímý vliv.

Sledováním rybí obsádky se nepodařilo prokázat významný efekt provedených biomanipulací na stav Brněnské nádrže. Účinnost biomanipulací na nádržích je obecně omezená, na nádržích s vyšší trofí je v podstatě neúspěšná [8]. Negativní faktory týkající se rybolovu jsou zejména prioritní vysazování kapra a velký tlak na dravé ryby.

Doprovodná opatření spočívala například v lokální těžbě sedimentů (vzhledem k celkové ploše šlo o zanedbatelnou část), sběr biomasy z hladiny a vápnění obnažených sedimentů v prvních letech projektu. Všechna tato opatření se ukázala jako víceméně neúčinná. Plošná těžba sedimentů by jistě kvalitu

die zahlenmäßige Reduktion von Weißfisch (Brachse, Güster, Rotaugen), um dessen Prädationsdruck auf große Zooplanktonarten zu mildern. Die größere Zooplankton-Biomasse sollte dann zu einem stärkeren Abweiden von Algen führen. Die Weißfischreduktion wurde 2010-2012 durch Abfischung der Brachse während ihrer Laichzeit durchgeführt. Bei anderen Arten ist die Laichzeit über einen längeren Zeitraum verteilt, und die Reduktion durch Abfischung ist schwierig. Außerdem wurden Raubfische (je 1000 kg Hecht und Zander) in mehreren Wellen ausgesetzt. Nach der Biomanipulation wurden Kontrollfänge gemacht, die eine signifikante Reduktion der Brachse bestätigt, aber keine Zunahme der Hecht- und Zanderpopulation gezeigt haben. Brachsen wurden im seeförmigen Teil des Stausees teilweise durch Güster, im Einlaufteil durch Rotaugen ersetzt [6]. Das Aufkommen von Rapfen nimmt ab, was durch mangelndes Aussetzen verursacht ist.

Die Hecht- und Zanderpopulation leidet unter An-

gelfischerei. Leider ist es nicht gelungen, eine Änderung der Fischereiordnung durchzusetzen, die diese beiden Arten zumindest in den ersten Jahren nach der Aussetzung schützen würde. Ursprünglich sollten Rapfen und Wels ausgesetzt werden, die dem Fischfang weitaus besser widerstehen [7], im erforderlichen Zeitraum waren allerdings Jungfische dieser Arten nicht erschwinglich. Die Brünner Talsperre ist ein Fischereirevier unter Verwaltung des Mährischen Fischervereins, das Staatsunternehmen Povodí Moravy kann den Fischbesatz und die Fischereiregeln nur indirekt beeinflussen.

Das Monitoring des Fischbestands konnte keinen signifikanten Einfluss der durchgeführten Biomanipulationen auf den Zustand der Brünner Talsperre nachweisen. Die Effizienz der Biomanipulationen in Stauseen ist im Allgemeinen begrenzt, bei einer höheren Trophie im Prinzip erfolglos [8]. Negative Faktoren der Fischerei sind vor allem der bevorzugte Besatz mit Karpfen und der große Druck auf

nádrže ovlivnila, avšak vyžadovala by enormní finanční náklady. Navíc při nevyřešeném přísunu znečištění z povodí by byl efekt krátkodobý. Sběr biomasy pomocí speciálního plavidla měl spíše estetický dopad, byla odstraňována pouze povrchová vrstva nahromaděných sinic, které už byly ve stádiu odumírání. Lze jím zabránit hromadění hnilobné biomasy a tím i zápachu. Vápnění sedimentů kvůli urychlení mineralizace bylo výrazně přebito přirozenou mineralizací přemrznutím a letněním [9].

Závěry

Série opatření na Brněnské nádrži dokázala zvrátit nepříznivý vývoj kvality vody. Nejvýznamnějšími zásahy jsou bezesporu srážení, které redukuje přebytečný rozpuštěný fosfor pocházející zejména z nedostatečně čištěných odpadních vod v povodí nádrže. Účinnost srážení rozpuštěného fosforu síranem železitým je za běžných podmínek velmi dobrá. Systém aeračních a destratifikačních věží účinně vyrovnává rozdíl teplot mezi epilimniem a hypo-

limniem a udržuje většinu času celý vodní sloupec okysličený.

Navzdory těmto opatřením se průhlednost v nádrži od výrazného zlepšení po roce 2009 postupně zhoršuje a obsah chlorofylu u hráze zvyšuje. Rovněž zpočátku silně utlumené sinice se začínají znovu prosazovat, zejména ke konci letní sezóny. Zcela výjimečný byl rok 2018, kdy se sešlo několik nepříznivých faktorů: jaro tohoto roku bylo extrémně teplé, letní teploty nastoupily zhruba o měsíc dříve než předchozí roky, a navíc byl kvůli změně financování projektu opožděn začátek srážení a aerace přibližně o 3 týdny. Výsledkem byl velmi rychlý nástup vodního květu sinic a zákaz koupání, který vydržel všech na sledovaných plázech 2 týdny, na dvou plázech v jihovýchodní části dokonce 6, respektive 7 týdnů.

Celý projekt ukázal, že opatření mohou být účinná, avšak nejsou stoprocentní zárukou čisté nádrže. Limitující je stále kvalita vody v přítoku, která

Raubfische.

Begleitende Maßnahmen waren beispielsweise eine lokale Sedimenträumung (auf einem geringen Teil der Gesamtfläche), das Sammeln von Biomasse von der Wasseroberfläche und das Entkalken freigelegter Sedimente in den ersten Projektjahren. Alle diese Maßnahmen haben sich als mehr oder weniger unwirksam erwiesen. Eine flächendeckende Sedimenträumung würde sich sicherlich auf die Qualität des Stausees auswirken, dabei jedoch enorme Kosten verursachen. Bei dem ungelösten Schmutzeintrag aus dem Einzugsgebiet wäre der Effekt zudem von kurzer Dauer. Das Sammeln von Biomasse mit einem speziellen Wasserfahrzeug wirkte sich eher ästhetisch aus, es wurde nur die oberflächenschicht der angesammelten Blaualgen entfernt, die sich bereits im Absterbestadium befanden. Es konnte dadurch der Geruch der verrottenden Masse minimiert werden. Die Kalkung der Sedimente zur Beschleunigung der Mineralisierung wurde von der

natürlichen Mineralisierung durch Einfrieren und Sömmerung erheblich übertroffen [9].

Fazit

Eine Serie von Maßnahmen an der Brünner Talsperre konnte die ungünstige Entwicklung der Wasserqualität umkehren. Der wichtigste Eingriff ist zweifellos die Fällung, die den überschüssigen gelösten Phosphor, insbesondere aus unzureichend gereinigtem Abwasser im Einzugsgebiet, verringert. Die Wirksamkeit der Phosphorfällung mit Eisensulfat ist unter geläufigen Bedingungen sehr gut. Das System der Belüftungs- und Destratifizierungstürme gleicht die Temperaturdifferenz zwischen Epilimnion und Hypolimnion effizient aus und sorgt dafür, dass die gesamte Wassersäule die meiste Zeit mit Sauerstoff versorgt wird.

Trotz dieser Maßnahmen hat sich die Transparenz im Stausee seit der erheblichen Verbesserung nach

závisí na kvalitě povodí nádrže. Bez snížení množství fosforu přítékajícího z tohoto povodí budou jakákoli opatření pouze dočasná a při nepříznivých podmínkách budou náchylná na selhání.

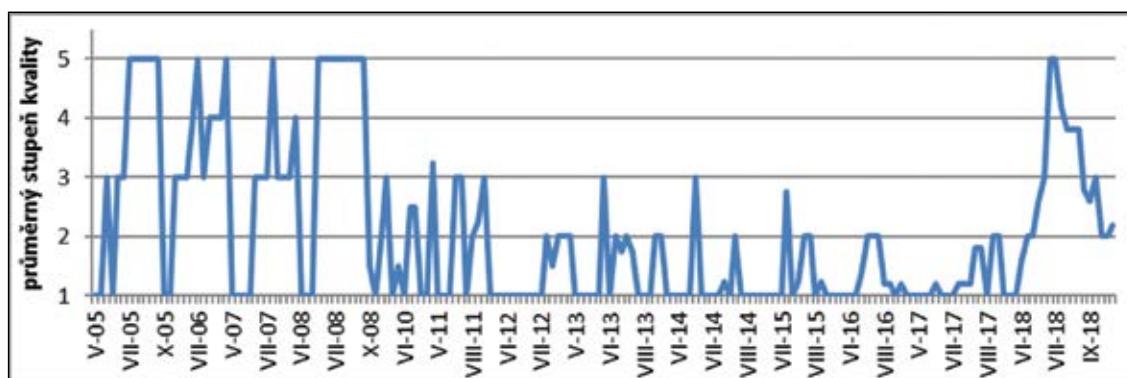
Literatura

[1] Projekt Čistá Svratka. Jihomoravský kraj [online]. Brno: Jihomoravský kraj, 2010 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.kr-jihomoravsky.cz/>

[sky.cz/svratka/](https://www.khsbrno.cz/svratka/)

[2] BOROVEC, Jakub. Realizace opatření na Brněnské údolní nádrži: Část C. Soubor opatření „Monitoring“, dílčí zpráva 2010. České Budějovice, 2010.

[3] MORONGA, Jan et al. Realizace opatření na Brněnské údolní nádrži. In: KOSOURL, Dušan, ed. Vodní nádrže 2012. Brno: Povodí Moravy, s.p.,



Obr. 11. Průměrný stupeň celkového hodnocení dle Krajské hygienické stanice Jihomoravského kraje. Průměr hodnocení všech 5 sledovaných pláží. Upraveno podle dat KHS JMK [www.khsbrno.cz].

Abb. 11. Durchschnittliche Gesamtbewertung der südmährischen Gesundheitsbehörde.

Durchschnittliche Bewertung aller 5 überwachten Strände. Modifiziert nach Angaben von KHS JMK [www.khsbrno.cz].

2009 allmählich verschlechtert, und der Chlorophyllgehalt am Staudamm steigt an. Auch die anfangs stark reduzierten Blaualgen beginnen sich zu erholen, insbesondere am Ende der Sommersaison. Das Jahr 2018 war ziemlich außergewöhnlich, nachdem mehrere negative Faktoren zusammenkamen: Der Frühling dieses Jahres war extrem warm, die Sommertemperaturen kamen etwa einen Monat früher als in den vergangenen Jahren, und infolge einer Änderung der Projektfinanzierung verzögerte sich der Beginn der Fällung und Belüftung etwa um drei Wochen. Das Ergebnis war ein sehr rasches Wachstum der Blaualgen und ein Badeverbot, das an allen Stränden zwei Wochen dauerte, an zwei südöstlichen Stränden sogar 6 bzw. 7 Wochen.

Das gesamte Projekt hat gezeigt, dass Maßnahmen wirksam sein können, aber keine hundertprozentige Garantie für einen sauberen Stausee

geben. Der limitierende Faktor ist nach wie vor die Wasserqualität am Einlauf, die von der Qualität des Einzugsgebiets abhängt. Ohne Herabsetzung der aus diesem Einzugsgebiet kommenden Phosphormenge sind alle Maßnahmen nur zeitweilig und unter ungünstigen Bedingungen zum Versagen anfällig.

Literaturverzeichnis

[1] Projekt Čistá Svratka. Jihomoravský kraj [online]. Brno: Jihomoravský kraj, 2010 [cit. 2019-04-04]. Abrufbar unter: <https://www.kr-jihomoravsky.cz/svratka/>

[2] BOROVEC, Jakub. Realizace opatření na Brněnské údolní nádrži: Část C. Soubor opatření „Monitoring“, dílčí zpráva 2010. České Budějovice, 2010.

- 2012, s. 109–112.
- [4] HEJZLAR, Josef. Trendy vývoje koncentrací fosforu v nádržích Orlík a Slapy. In: KOSOUR, Dušan et al., eds. Vodní nádrže 2017. Brno: Povodí Moravy, s.p., 2017, s. 60–67. ISBN 978-80-905368-5-2.
- [5] KOSOUR, Dušan et al. Kvalita povrchových vod v povodí Moravy. In: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod. Brno: Asociace pro vodu ČR, 2013, s. 16–23.
- [6] JURAJDA, Pavel. Fish community and fisheries management of Brno Reservoir following revitalisation measures. Folia Zoologica. Brno: Akademie věd České republiky, 2015, 64(2), 112–122. ISSN 0139-7893.
- [7] JURAJDA, Pavel. Realizace opatření na Brněnské nádrži: Management rybí obsádky. Zpráva pro Pöyry Environment a.s. Brno, 2009.
- [8] JEPPESEN Erik a SAMMALKORPI, Ilkka. Lakes. Handbook of Ecological Restoration: Restoration in Practice: Restoration in Practice, Volume 2. New York: Cambridge University Press, 2002, s. 297–324. ISBN 978-0-521-04775-3.
- [9] AQUATIS, a.s. Realizace opatření na Brněnské údolní nádrži, III. etapa. Brno, 2017, 189 s.
-
- [3] MORONGA, Jan et al. Realizace opatření na Brněnské údolní nádrži. In: KOSOUR, Dušan, ed. Vodní nádrže 2012. Brno: Povodí Moravy, s.p., 2012, S. 109–112.
- [4] HEJZLAR, Josef. Trendy vývoje koncentrací fosforu v nádržích Orlík a Slapy. In: KOSOUR, Dušan et al., eds. Vodní nádrže 2017. Brno: Povodí Moravy, s.p., 2017, S. 60–67. ISBN 978-80-905368-5-2.
- [5] KOSOUR, Dušan et al. Kvalita povrchových vod v povodí Moravy. In: Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod. Brno: Asociace pro vodu ČR, 2013, S. 16–23.
- [6] JURAJDA, Pavel. Fish community and fisheries management of Brno Reservoir following revitalisation measures. Folia Zoologica. Brno: Akademie věd České republiky, 2015, 64(2), 112–122. ISSN 0139-7893.
- [7] JURAJDA, Pavel. Realizace opatření na Brněnské nádrži: Management rybí obsádky. Zpráva pro Pöyry Environment a.s. Brno, 2009.
- [8] JEPPESEN Erik, SAMMALKORPI, Ilkka. Lakes. Handbook of Ecological Restoration: Restoration in Practice: Restoration in Practice, Volume 2. New York: Cambridge University Press, 2002, S. 297–324. ISBN 978-0-521-04775-3.
- [9] AQUATIS, a.s. Realizace opatření na Brněnské údolní nádrži, III. etapa. Brno, 2017, 189 S.































ISBN: 978-80-907141-1-3