

Trendy bilance a látkových toků fosforu v ČR

Josef Hejzlar

Biologické centrum AV ČR, v.v.i., Hydrobiologický ústav, České Budějovice

Souhrn

V poslední době se v rozvinutých zemích volá po zvýšení recyklace fosforu (P), který je strategickou surovinou pro zemědělství a další produkční sféry; zároveň P působí vážné environmentální problémy, např. eutrofizaci vod. S použitím metodiky analýzy materiálových toků van Dijk et al. (Sci. Total Environ. 2016, 552: 1078–1093) kvantifikovali hlavní toky a zásoby P v 27 státech Evropské unie. V příspěvku jsou představena a diskutována data z uvedené publikace pro materiálové toky P v ČR ve srovnání s EU. Bilance pro ČR ukazuje její závislost na dovozu P prostřednictvím minerálních hnojiv (1 kg/os/rok), potravin a krmiv (1,5 kg/os/rok) a zároveň upozorňuje na značné ztráty do prostředí a nevyužitý potenciál recyklace. Například komunální kaly (0,4 kg/os/rok) a masokostní moučka (0,25 kg/os/rok) by mohly nahradit 70 % množství aplikovaných minerálních hnojiv. Míra recyklace P je v ČR ve srovnání s EU-27 podprůměrná (68 % v živočišné výrobě, 21 % v produkci potravin, 10 % v lidské spotřebě). Zemědělská výroba v ČR dosud využívá zásobu P v půdě z minerálních P hnojiv aplikovaných v minulosti.

Klíčová slova: cyklus fosforu, analýza materiálových toků, účinnost využití živin, zemědělská bilance, spotřebitelský systém

Summary

In developed countries, many voices call for increasing the recycling of phosphorus (P) that is a strategic raw material for agriculture and other production sector; phosphorus is also causing environmental problems, for example. eutrophication. Using the methodology of material flow analysis, van Dijk et al. (Sci. Total Environ. 2016, 552: 1078-1093) quantified the main flows and stocks of P in 27 states of the European Union. The contribution presents and discusses data from that publication for the material flows P in the Czech Republic (CR) and compared with the EU. The P balance of CR shows the dependence on imported P through mineral fertilizers (1 kg/ca/yr), food and feed (1.5 kg/ca/yr) and also draws attention to significant environment losses and unused recycling potential. For example, municipal sludge (0.4 kg/ca/yr) and bone meal (0.25 kg/ca/yr) could replace 70% of the P amount in applied mineral fertilizers. P recycling rate in CR in comparison with EU-27 is below average (68% in livestock production, 21% in food production, 10% for human consumption). Agricultural production in CR still uses P reserves in the soil of mineral fertilizers in the past.

Key words: phosphorus cycle, material flow analysis, nutrient use efficiency, agricultural balance, consumer system

Úvod

Fosfor (P) je esenciálním prvkem pro život na Zemi nutný k životním funkcím všech živých organismů. Použití fosforečných hnojiv, získávaných ze sedimentárních či vyvřelých hornin, je jedním z faktorů, které umožňují vysoké výnosy v rostlinné a živočišné produkci nutné při rostoucí světové populaci. Zároveň je P neobnovitelný zdroj s časově omezenou dostupností. Podle posledních údajů sice nehrozí, že by těžitelné zásoby fosfátových rud měly být v krátkodobém časovém měřítku vyčerpány [11], ale další faktory, jako je světově nerovnoměrný výskyt ložisek fosfátů, jejich umístění v geopoliticky nestabilních oblastech a rostoucí znečištění těžebních rud (zejména těžkými kovy – Cd, U) ovlivňují dostupnost fosforečných hnojiv a způsobují růst jejich cen [12]. Více než 90 % celosvětové těžby fosfátových rud je v Maroku, Číně, USA, Rusku a Jižní Africe. Cenu fosfátů také ovlivňuje malá míra recyklace P a strategická rozhodnutí států bohatých na fosfor.

V minulosti se odpady bohaté na živiny včetně fosforu recyklovaly ve všech hospodářských sektorech v uzavřených nebo téměř uzavřených smyčkách [2]. Urbanizace tento stav změnila a opětovné využití živin z odpadů se stalo ekonomicky nerentabilní [3, 13]. Studie koloběhu P v antroposféře provedené na globální úrovni [4, 7, 13] upozorňují, že tento stav je třeba změnit a recyklaci fosforu v hospodářských systémech obnovit. Proto se v posledních letech začaly propočítávat látkové toky P rámci národních ekonomik, zejména v Evropě (Finsko [1], Švédsko [9], Rakousko [5], Francie [10]), ale i jinde po světě (např. USA [14], Čína [6, 17], Japonsko [8], Thajsko [15]). V letošním roce publikovali van Dijk et al. [16] jednotnou metodikou zpracované komplexní bilance toků P pro všechny státy Evropské unie (EU-27), což umožňuje reprezentativně porovnávat stavy recyklace v jednotlivých zemích. Cílem tohoto příspěvku je představit a diskutovat data z uvedené publikace pro toky P v ČR ve srovnání s EU a ukázat, jak se v ČR fosfor do výrobního a spotřebního systému dostává, jak je využíván, kde jsou oblasti ztrát a jaký potenciál mohou mít opatření v různých sektorech ekonomiky pro zlepšení jeho recyklace.

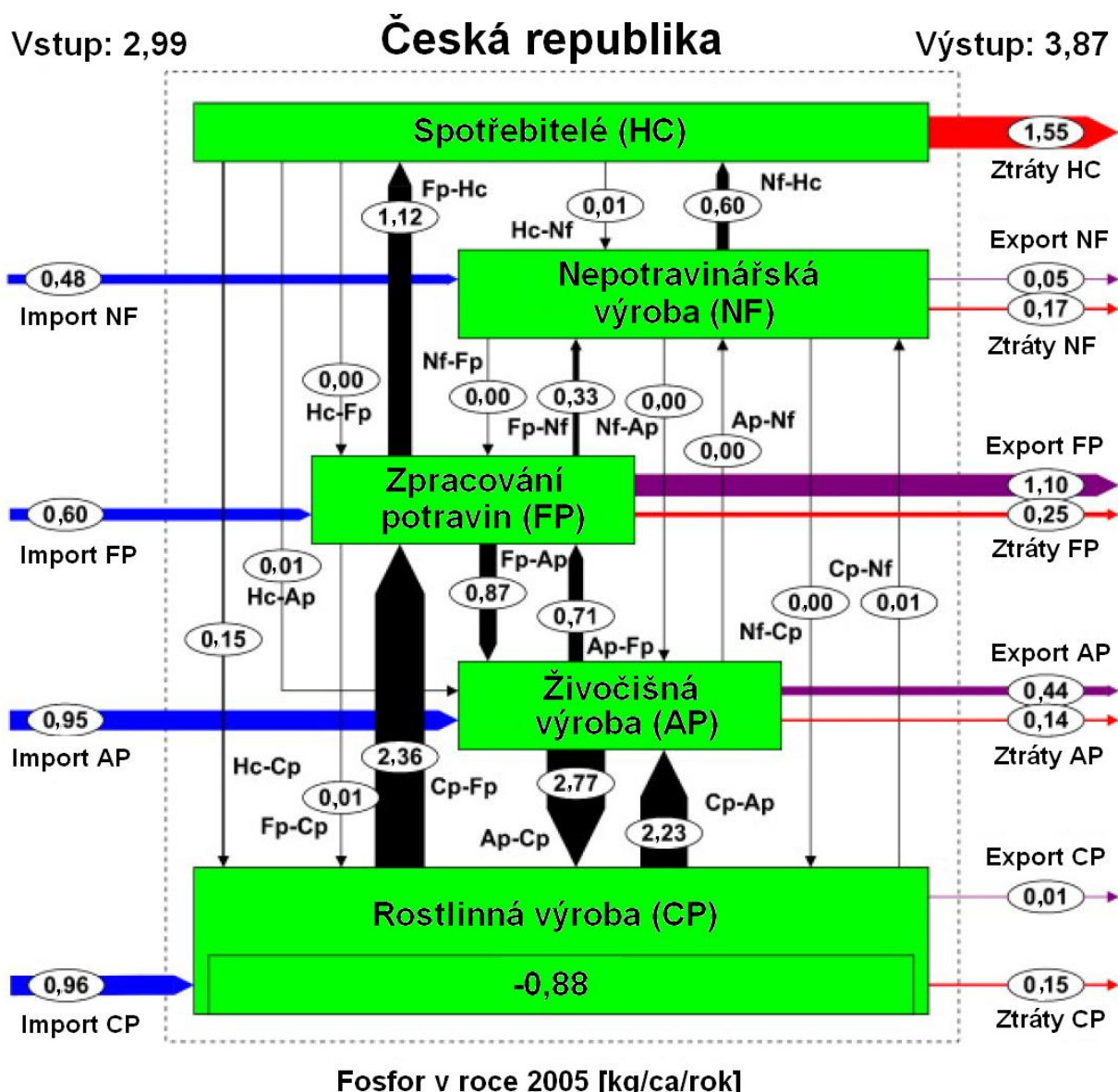
Metodika

Modelový systém pro hodnocení toků P v ekonomikách jednotlivých států EU-27 je detailně popsán v práci [16]. Používá členění do 5 hospodářských sektorů, jimiž jsou rostlinná výroba (CP), živočišná výroba (AP), zpracování potravin (FP), nepotravinářská odvětví (NF) a spotřebitelé (HC) (obr. 1). Sektor CP zahrnuje produkci na orné půdě a travních porostech včetně semenářství. Sektor AP zahrnuje chovy dobytka, produkci ryb, aquakultury a zpracování krmiv. Sektor FP zahrnuje zpracování zemědělských plodin, mléka a vajec, porážku hospodářských zvířat, rybníkářství a aquakultury, a dále také úlovky ryb a volně žijících zvířat v přírodě jako externí vstup do systému. Sektor NF obsahuje výrobu papíru a celulózy, lesnictví, výrobu krmiv pro domácí zvířata a detergenty. Sektor HC zahrnuje spotřebu potravin na bázi rostlinných a živočišných produktů, využití ne-potravinářských výrobků, jako jsou vlákna, tabák, kůže, kožešiny, kůže, krmivo pro domácí zvířata, detergenty, dřevo a papír; přitom spotřeba je realizována prostřednictvím domácností, velkoobchodu, maloobchodu, restauračních služeb včetně cateringu atd.; na výstupní straně tento sektor zahrnuje toky v rámci komunálních odpadů, jako jsou odpadní vody, tuhý odpad, bio- a zelený odpad, výkaly domácích zvířat, papír a dřevo. Jiné nekomunální odpadní toky jsou zahrnuty v příslušných odvětvích, jako např. ztráty stájevých hnojiv v AP, kapalné a tuhé průmyslové odpady včetně masokostní moučky v FP a spalování biomasy pro výrobu bio-energie v NF. Modelový systém zahrnuje 31 hlavních toků (obr. 1), které jsou složeny z 96 dílčích toků. Základní výpočet látkových toků [16] byl proveden s detailními daty pro rok 2005; autoři udělali také odhad vývoje v EU-27 v období 1961–2009, ale pro ČR a Slovensko použili data až od roku 1993 po rozdělení Československa. Pro tento příspěvek byly provedeny vlastní výpočty vývoje toků P v ČR pomocí analogie s údaji z ročenek ČSÚ 1961–2010 pro stavy skotu, prasat a drůbeže, aplikovaná minerální P hnojiva, sklizeň obilovin, obilovin a píce, množství spotřebovaných detergentů a z nich odvozenou produkci P od obyvatel do odpadních vod a účinnost čištění P v odpadních vodách.

Výsledky a diskuse

Import, export, ztráty P

Bilance toků P v Evropské unii (EU-27) ukazuje (tab. 1), že do států EU bylo v roce 2005 importováno 2392 Gg P, z čehož zhruba polovina zůstala akumulována v zemědělských půdách a polovina byla ztracena ze systému prostřednictvím pevných a kapalných odpadů v rámci různých sektorů. EU byla silně závislá na P dovezeném ze zahraničí, zejména na dovozu primárního P (tj. fosforu pocházejícího z těžených fosfátových rud, na rozdíl od sekundárního P souvisejícího s koloběhem organické hmoty v biosféře), které představovaly 74 % z celkového importu. V sektorech souvisejících s výrobou potravin (CP, AP a FP) bylo importováno 91 % z celkového dovozu P. Podíl zemědělských odvětví CP a AP na celkovém dovozu byl 76 %; současně se tato odvětví rozhodujícím způsobem podílela na celkovém dovozu primárního P (92 %). Zemědělství a potravinářský sektor byly tedy hlavní hnací silou v poptávce po dovozu P a vytvářely evropskou závislost na primárním P.



Obr. 1: Látkové toky a využití fosforu v ČR v roce 2005: agregovaná data do řetězce potravinová produkce – spotřeba – odpady založená na údajích pro 96 dílčích toků s rozlišením importu (modře), exportu (fialově), ztrát (červeně) a vnitřních toků mezi sektory CP, AP, FP, NF a HC; tloušťka čar šipek ukazuje relativní velikost toků; negativní bilance -0,88 kg/ca/rok u CP představuje čistou ztrátu P ze zemědělské půdy (ochuzení).

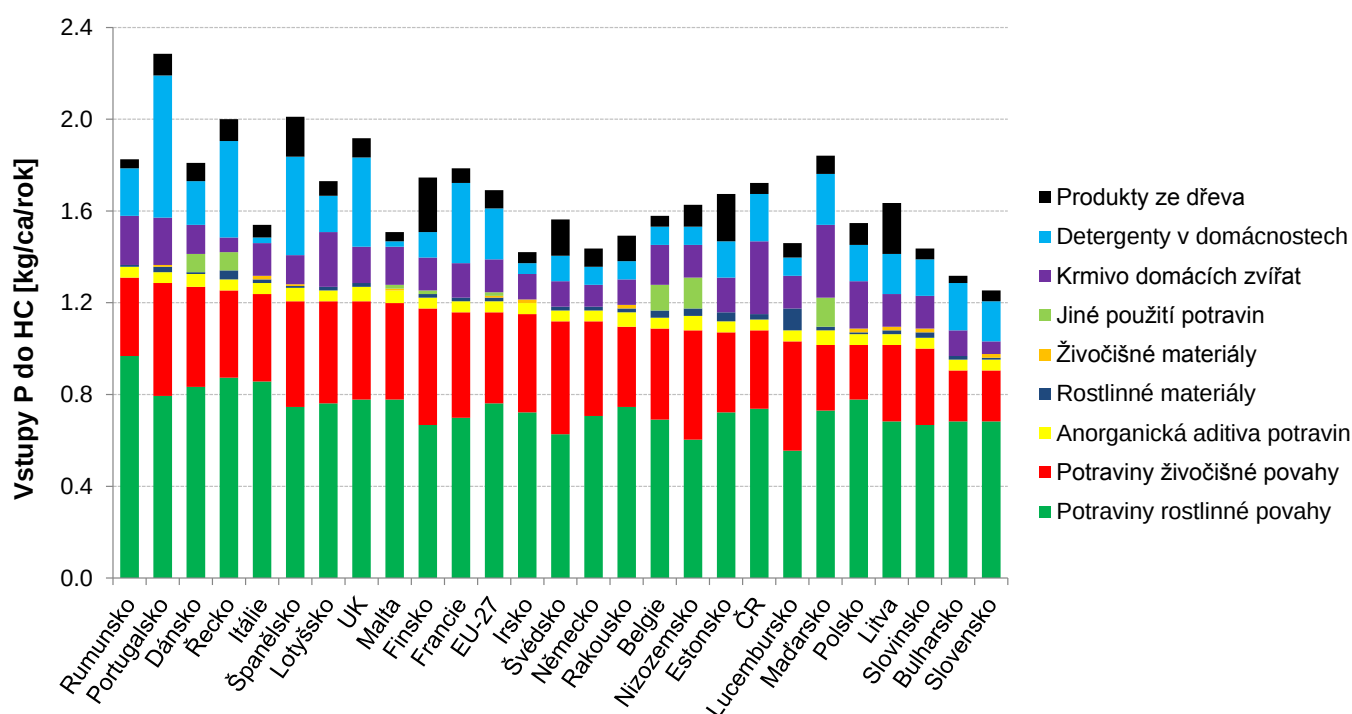
Do hospodářského systému ČR vstupovalo na rozdíl od EU méně P, než z něj vystupovalo, a to především díky výrazně nižšímu vstupu P do rostlinné výroby, který byl v jednotkách na osobu a rok (obr. 1) oproti celé EU-27 přibližně třetinový. Na naopak vysokém relativním výstupu P z ČR se podílel v evropských měřících nadprůměrný export P, a to zejména v sektorech zpracování potravin (vysoký vývoz rostlinných potravin) a živočišné výroby (vysoký vývoz rostlinných krmiv a živého dobytka). V relativní velikosti celkových ztrát P se hospodářský systém ČR od průměru EU-27 příliš neodlišoval. Nižší hodnoty byly v sektorech CP a FP, naopak o cca 20 % vyšší než evropský průměr byly ztráty ze sektorů AP (stájová hnojiva), NF výroby (odpad dřevozpracujícího průmyslu) a HC (odpadní vody, výkaly domácích zvířat).

Tabulka 1: Import, export a ztráty fosforu v absolutním množství [Gg/rok] a jako relativní podíly v rámci dílčích sektorů v státech EU-27 a v ČR v roce 2005; rozlišeny jsou sektory rostlinná (CP) a živočišná výroby (AP), zpracování potravin (FP), nepotravinářská výroba (NF) a spotřebitelský sektor (HC)

Sektor	EU-27			ČR		
	Množství P, Gg/rok, popř. %			Množství P, Gg/rok, popř. %		
	Import	Export	Ztráty	Import	Export	Ztráty
CP	1399 (58 %)	4 (1 %)	84 (7 %)	9.8 (32 %)	0.1 (1 %)	1.6 (7 %)
AP	440 (18 %)	21 (9 %)	62 (5 %)	9.7 (32 %)	4.5 (28 %)	1.4 (6 %)
FP	338 (14 %)	216 (86 %)	339 (28 %)	6.2 (20 %)	11.2 (68 %)	2.5 (11 %)
NF	215 (9 %)	11 (4 %)	77 (6 %)	4.9 (16 %)	0.5 (3 %)	1.8 (8 %)
HC	-	-	655 (54 %)	-	-	15.9 (68 %)
celkem	2392 (100 %)	252 (100 %)	1217 (100 %)	30.6 (100 %)	16.4 (100 %)	23.2 (100 %)

Vnitřní toky P mezi sektory

Největší výměny P uvnitř systému ČR se odehrávaly mezi sektory rostlinné a živočišné výroby (CP – AP). Jejich velikosti byly srovnatelné s dalším, ale jednosměrným tokem z CP do FP. Sektor CP byl v roce 2005 kromě přímých vstupů z importu a vnitřních toků dotován fosforem odebíraným z půdy v množství 9 Gg, což je ekvivalentní množství fosforu 0,9 kg/os/rok nebo 2,1 kg/ha/rok. Asi 48 % fosforu ve výstupech sektoru CP připadalo na krmiva pro AP (krmné plodiny, objemová krmiva), 51 % postupovalo do zpracování potravin a pouze 0,1 % byl tok do nepotravinářské výroby.

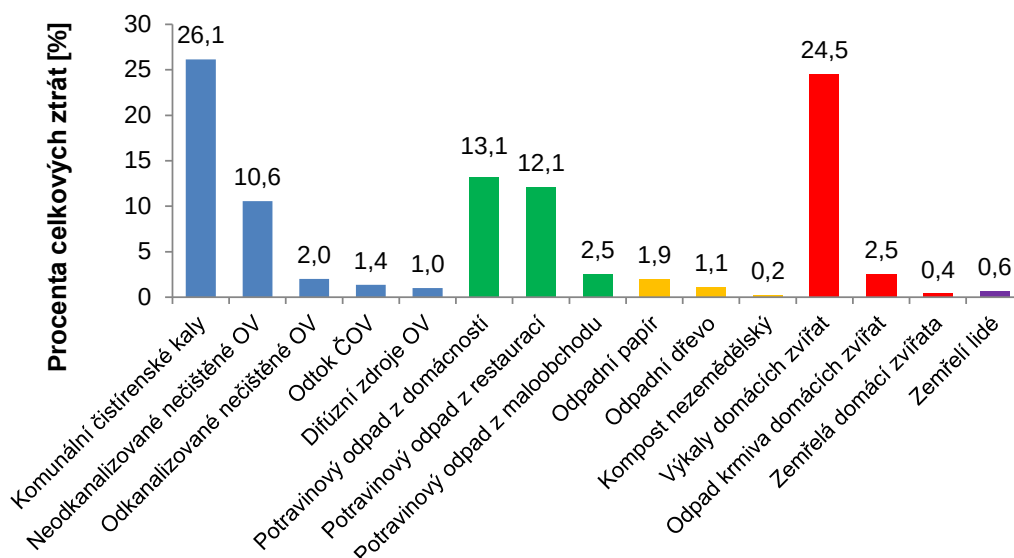


Obr. 2: Množství P ve výrobcích dodávaných do spotřebního sektoru (HC) v EU-27 a jejich členských státech v roce 2005; řazeno sestupně podle celkového množství P v potravinách rostlinného a živočišného původu

Vstup fosforu do spotřebitelského sektoru (HC) prostřednictvím potravin byl v jednotlivých státech EU-27 v rozmezí od 0,92 do 1,36 kg/ca/rok, přičemž hodnota 1,12 kg/ca/rok v ČR byla na úrovni dolního kvartilu (obr. 2). Poměr P z rostlinných a živočišných potravin ve vstupu potravinami ve vstupu do HC byl rovněž variabilní a pohyboval se od cca 3:1 (Polsko, Slovensko, Bulharsko) do 1,2:1 (Švédsko, Lucembursko, Nizozemsko). Nepotravinářská výroba (NF) dotovala spotřebitelský sektor v ČR fosforem hodnotou 0,61 kg/ca/rok, což je mírně nad průměrem EU-27 (0,54 kg/ca/rok). V tomto toku v ČR dominovalo krmivo pro domácí zvířata a detergenty (18 a 12 % celkového vstupu do HC). Podíl krmiva pro domácí zvířata v ČR byl nejvyšší ze všech států EU-27, kdežto podíl detergentů byl blízký průměru.

Ztráty

Tok fosforu vstupujícího v ČR do HC v potravinách a ostatních produktech (1,66 kg/ca/rok) po spotřebě výrobků končil v několika odpadních proudech, z nichž byla pouze relativně malá část vracena do opětovného využití (0,17 kg/ca/rok, tj. 10 %; kaly z komunálních ČOV a kompost v zemědělské výrobě, zbytky potravin v živočišné výrobě, recyklace papíru a dřeva). Ve srovnání s ostatními zeměmi EU-27 byla recyklace v ČR silně podprůměrná – průměr EU-27 byl 21 % a řada států dosahovala hodnot nad 30 % (např. Dánsko, Španělsko, Francie, UK). Struktura odpadního proudu ze spotřebitelského sektoru (obr. 3) ukazuje, že největší podíl připadal na odpadní vody a kaly z ČOV (41 %), přičemž prostřednictvím odpadních vod se do povrchových vod dostávalo 0,64 g/ca/d fosforu. Tato hodnota relativně dobře odpovídá průměrné účinnosti ČOV v ČR pro fosfor kolem roku 2005. Další velké ztráty byly prostřednictvím potravinových odpadů (28 %) a prostřednictvím chovu domácích zvířat – jejich výkalů na veřejných prostranstvích a zahradách a zbytků krmiv končících v tuhém komunálním odpadu (27 %).



Obr. 3: Podíly ztrátových množství fosforu (P) v pevných a kapalných odpadech ze spotřebitelského sektoru (v celkové výši 1,55 kg/ob/rok) pro ČR v roce 2005; uspořádáno zleva doprava – odpadní vody (modrá), potravinové odpady (zelená), jiné organické odpady (oranžová), odpady domácích zvířat (červená), zemřelí lidé (purpurové).

Další podíly fosforu byly ve ztrátových tocích z ostatních sektorů: 0,25 kg/ca/rok z FP a 0,14–0,17 kg/ca/rok z NF, AP a CP. Celkem tedy v ČR v roce 2005 přecházelo do odpadu 23,2 Gg (2,26 kg/ca/rok) fosforu, což znamená, že 76 % množství P vstupujícího do systému bylo ztraceno.

Efektivita

Způsob, jakým je P v systému využit a recyklován, určuje efektivitu jeho využití. Efektivita využití P (PUE) se obecně počítá jako podíl efektivně využitého P vůči celkovému vstupu P do systému nebo do dílčího nebo sektoru:

$$PUE_{\text{sektor}} = \frac{\text{výstup}_{\text{efektivní}}}{\text{vstup}_{\text{celkový}}} \times 100 \quad (1)$$

Definice efektivního výstupu je uzanční a závisí na úrovni analýzy systému, zahrnutých tocích a cílech studie. V této studii jsou uvažovány dva typy PUE, které se liší přístupem k hodnocení efektivního výkonu (tab. 2). V typu PUE-1 je jako efektivní výstup uvažován celkový výstup sektoru s odečtením ztrát, tedy se předpokládá, že efektivní výkon snižují pouze ztráty. V typu PUE-2 jsou do efektivního výstupu zahrnuty pouze toky P vzhůru plus export sektoru a sestupné proudy jsou pominuty (viz schéma obr. 1). Rozdíl PUE-1 minus PUE-2 je míra recyklace a udává recyklované množství jako procento vstupu do daného sektoru.

Tabulka 2: Efektivita využití fosforu (PUE, %) odhadnutá pro jednotlivé sektory v EU-27 a v ČR pro rok 2005.

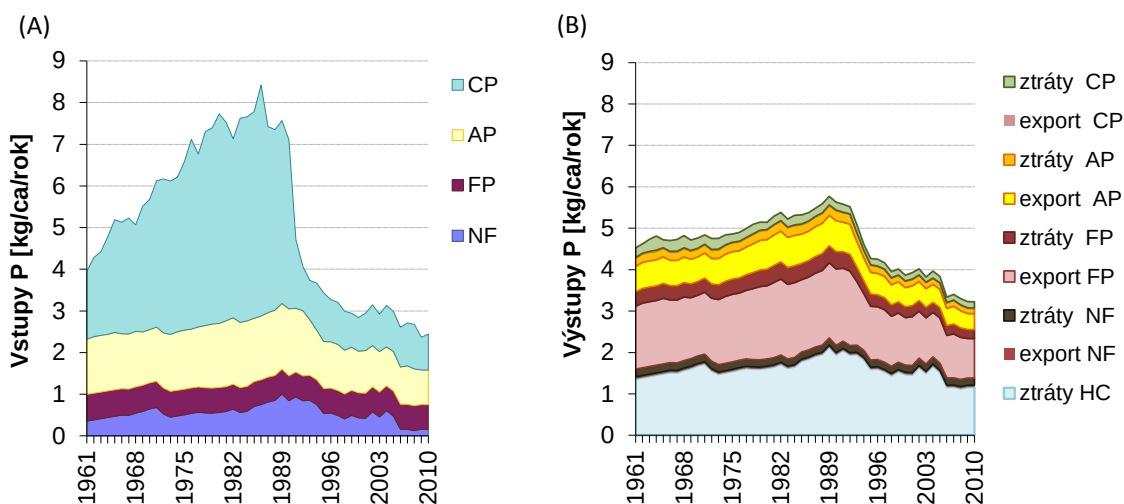
Veličina	CP		AP		FP		NF		HC	
	EU-27	ČR	EU-27	ČR	EU-27	ČR	EU-27	ČR	EU-27	ČR
PUE-1 (výstupní toky minus ztráty)	70	118	97	97	80	93	76	79	21	10
PUE-2 (výstupní toky vzhůru plus export)	70	118	24	28	52	72	76	79	-	-
Míra recyklace	0	0	73	68	28	21	0	0	21	10

V roce 2005 v ČR byla PUE v sektoru CP 118 %, což bylo způsobeno zápornou bilancí P v půdě, čili využitím většího množství P než jaké bylo do půdy dodáno minerálními hnojivy a recyklovanými organickými odpady; tuto efektivitu snižovaly 4% ztráty P z půdy do povrchových vod erozí a vyluhováním. PUE-1 v sektoru AP dosahovala 97 %, v sektoru FP 93 %, v sektoru NF 79 % a v sektoru HC 10 %. Hodnoty míry recyklace (tab. 2) byly v ČR nižší oproti hodnotám pro EU-27 ve všech sektorech; nejmarkantnější rozdíl je zejména v sektoru HC, kde se jedná o poloviční hodnotu.

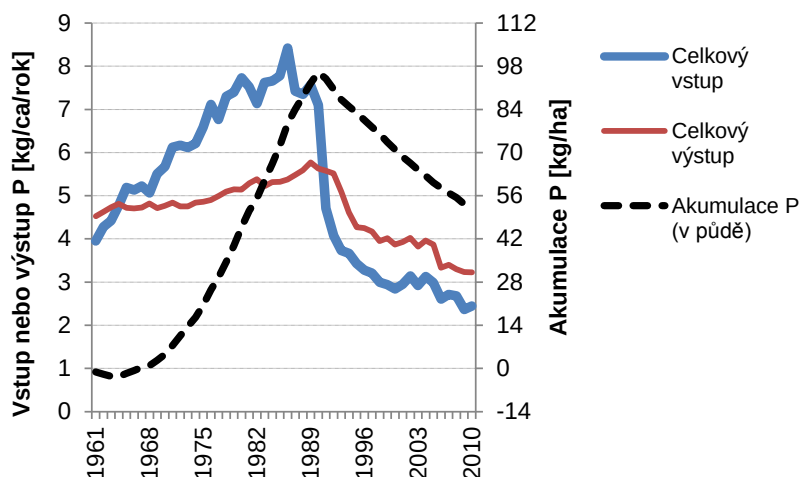
Vývoj vstupů P v ČR v období 1961–2010

Obr. 4 ukazuje, že vstupní tok P do ekonomiky ČR celkem rovnoměrně narůstal z přibližně 4 kg na osobu v roce 1961 až na hodnoty kolem 8 kg na osobu a rok v druhé polovině 80. let minulého století. Poté začátkem 90. let nastal rychlý pokles na hodnoty kolem 3 kg/ca/rok a po roce 2006 došlo k dalšímu snížení na hodnoty kolem 2,5 kg/ca/rok. Hlavní podíl na této variabilitě měl vývoj množství minerálních fosforečných hnojiv aplikovaných na zemědělskou půdu, které do roku 1989 rostlo (na hodnoty 30–35 kg/ha/rok) a pak se prudce snížilo na cca pětinu (5–8 kg/ha/rok), a částečně měly vliv také změny stavů hospodářských zvířat. Pokles vstupu P po roce 2006 vznikl v souvislosti s omezením fosforu v pracích prostředcích pro domácnosti. Rozdíl celkových vstupních a výstupních toků P představuje čisté množství P akumulované v zemědělské půdě (obr. 5). Velká zásoba P v půdě se vytvořila v 70. a 80. letech minulého století. Během těchto dvou desetiletí nahromadilo v zemědělské půdě množství P v 100 ke výši téměř 100 kg/ha. Tato zásoba se postupně vyčerpává a v roce 2010 se snížila na asi 55 kg/ha. Kdyby i v budoucnu zůstal stabilní současný poměr mezi intenzitou rostlinné výroby a hnojením, pak zásoba P v půdě ČR vydrží zhruba do roku 2040.

Na rozdíl od vysoké dynamiky vstupu P do systému zůstávala ve stejném období výroba potravin a příjem P na jednoho obyvatele relativně stabilní. V důsledku toho PUE celého systému v ČR klesala do konce 80. let minulého století (na hodnoty kolem 35 %), ale poté se zvýšila a od 90. let kolísá v mezi 50 a 60 %.



Obr. 4: Vývoj dílčích vstupů (A) a výstupů (B) fosforu v dílčích hospodářských sektorech ČR v období 1961–2010 [kg/ca/rok].



Obr. 5: Vývoj celkového vstupu a celkový výstupu fosforu v ekonomice ČR a akumulace fosforu v zemědělské půdě v období 1961–2010.

Potenciál pro zlepšení využití P

PUE je možné zvýšit pouze lepším hospodařením s živinami. V každém sektoru ekonomiky jak ČR, tak zemí EU-27 existuje řada možností, jak efektivitu využití P zlepšit snížením spotřeby nebo recyklací. Například v sektoru CP lze PUE zvyšovat vyváženým hnojením vůči potřebě rostlin a omezováním ztrát P z půdy erozí a vyluhováním. V sektoru AP je možné PUE zvyšovat optimalizací dávek krmiv a jejich obsahu P, současně s maximalizací využitelnosti P zvířaty. V sektoru FP je relativně velký potenciál pro zvýšení PUE zaváděním technologií s omezenými ztrátami surovin, zejména v porážce hospodářských zvířat (kosti jsou v současné době většinou spalovány a popel je skládkován). V sektoru NF je PUE poměrně vysoká, nicméně efektivita může být zvýšena i zde vyšší recyklací P, např. využitím dřevního popela pro výrobu hnojiv. V sektoru HC je PUE z definice rovna míře recyklace. V ČR je PUE v tomto sektoru výrazně nižší než v zemích, jako je Dánsko, Švédsko, Německo, Rakousko, Francie či Španělsko, kde jsou široce zavedeny a používány systémy sběru a separace bioodpadu. Vysoký recyklační potenciál má čištění odpadních vod a zpracování biologicky rozložitelného tuhého odpadu, jako je potravinový odpad a výkaly domácích zvířat. Z odpadních vod může být P recyklován nejen přímým použitím stabilizovaných čistírenských kalů na zemědělské půdě, ale také prostřednictvím

výroby struvitu pro hnojiva, která může jednak přímo srážet z odpadních vod, jednak separovat z popelu po spálení kalu [18]. Ztráty P prostřednictvím tuhého komunálního odpadu lze snížit omezením plýtvání potravinami v maloobchodě, domácnostech i stravovacích službách. Promyšleným ekologickým tříděním lze komunální odpady využívat pro výrobu vysoce kvalitního kompostu, vhodného pro použití v zemědělství.

Závěry

- (i) Vstup primárního P z minerálních hnojiv do půdy v ČR v posledním půlstoletí prošly značnými změnami s maximem v 80. letech minulého století a dramatickým poklesem počátkem 90. let. Obdobný nárůst a následný pokles aplikace minerálních P hnojiv byl ve všech středo- a východoevropských zemích bývalého sovětského bloku na rozdíl od mnoha států severní, západní a jižní Evropy, kde se vysoké dávky minerálních P hnojiv používají do současnosti. Důsledkem poklesu používání minerálních P hnojiv P v zemích střední a východní Evropy je zde po roce 1990 nulová nebo záporná bilance P v půdě. Naopak země jižní a zejména severní a západní Evropy mají bilanci P v půdě pozitivní a k akumulaci P zde dosud dochází. Čisté vstupy sekundárního P se stále zvyšují, a to především kvůli zvýšenému dovozu potravin a krmiv. V zemích s vysokou hustotou hospodářských zvířat, jako je Nizozemsko nebo Belgie, existuje sice pokles aplikace minerálních P hnojiv, ale bilance P v půdě přesto zůstává vysoká, což je důsledek značné hustoty dobytka a následné nutnosti dovozu krmiv.
- (ii) Analýza toků P ekonomikou ČR ukázala, že efektivita využití P byla v roce 2005 v rostlinné výrobě 118 % a živočišné výrobě 28 %, popř. 97 %, pokud se uvažuje recyklace P v organických hnojivech. Na 1 kg P ve vyrobených potravinách se spotřebovalo asi 3 kg primárního P v minerálních P hnojivech. Tento relativně vysoký poměr ukazuje malou efektivitu řetězce zemědělská výroba – zpracovatelský sektor – spotřebitel. Evropský průměr (EU-27) je ovšem v tomto ukazateli ještě nepříznivější (tj. spotřebují se 4 kg primárního P na 1 kg P v potravinách využívaných spotřebiteli).
- (iii) Vysoké ztráty P byly zejména v domácnostech a také v potravinářském sektoru, a to především proto, že se P obsažený ve zbytcích potravin a odpadech jen málo recykluje zpět do potravinového výrobního řetězce a je deponován na skládkách nebo uniká do povrchových vod. Množství ztraceného P ze systému v ČR představovalo 76 % z celkového vstupu P, což je nepříznivá hodnota ve srovnání s průměrem EU-27, který činí 51 %.
- (iv) Existují poměrně velké možnosti jak účinněji a efektivněji využívat P, snížit ztráty P z hospodářského systému a zvýšit recyklaci P z odpadů. Withers et al. [18] uvádějí 5 strategických zásad pro udržitelné využívání P, které jsou schopny zvýšit PUE: 1) Sladění P vstupů fosforu do systému s požadavky výroby; 2) Minimalizace ztrát P do vody; 3) Efektivní recyklace P v biologických materiálech; 4) Zpětné získávání P z odpadů; 4) Předdefinování použití P ve společnosti se zaměřením na optimalizaci výživy a celého potravinového systému.

Poděkování

Tato práce vznikla s podporou projektu Grantové agentury ČR č. P504/15-04034S „Odrážejí dlouhodobá data o zooplanktonu Slapské nádrže civilizační a/nebo klimatické změny v minulých 50 letech?“.

Literatura

- [1] Antikainen R, Lemola R, Nousiainen JI, Sokka L, Esala M, Huhtanen P. Stocks and flows of nitrogen and phosphorus in the Finnish food production and consumption system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2005, 107: 287–305.

- [2] Ashley K, Cordell D, Mavinic D. A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere* 2011, 84: 737–746.
- [3] Cordell D, Drangert JO, White S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environment Change* 2009, 19: 292–305.
- [4] Cordell D, Rosemarin A, Schröder JJ, Smit AL. Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 2011, 84: 747–758.
- [5] Egle L, Zoboli O, Thaler S, Rechberger H, Zessner M. The Austrian P budget as a basis for resource optimization. *Resources, Conservation and Recycling* 2014, 83: 152–162.
- [6] Liu Y, Mol A, Chen J. Material flow and ecological restructuring in China: the case of phosphorus. *Journal of Industrial Ecology* 2004, 8: 103–120.
- [7] Liu Y, Villalba G, Ayres RU, Schroder H. Global phosphorus flows and environmental impacts from a consumption perspective. *Journal of Industrial Ecology* 2008, 12: 229–247.
- [8] Mishima S, Endo A, Kohyama K. Recent trends in phosphate balance nationally and by region in Japan. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 2010, 86: 69–77.
- [9] Neset TSS, Bader HP, Scheidegger R, Lohm U. The flow of phosphorus in food production and consumption-Linköping, Sweden, 1870–2000. *Science of the Total Environment* 2008, 396: 111–120.
- [10] Senthilkumar K, Nesme T, Mollier A, Pellerin S. Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: the case of France. *Global Biogeochemical Cycles* 2012, 26: GB2008.
- [11] Scholz RW, Wellmer F-W. Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: what we may learn from the case of phosphorus? *Global Environmental Change* 2013, 23: 11–27.
- [12] Silva EF, Mlayah A, Gomes C, Noronha F, Charef A, Sequeira A. Heavy elements in the phosphorite from Kalaat Khasba mine (North-western Tunisia). Potential implications on the environment and human health. *Journal of Hazardous Materials* 2010, 182: 232–245.
- [13] Smil V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment* 2000, 25: 53–88.
- [14] Suh S, Yee S. Phosphorus use-efficiency of agriculture and food system in the US. *Chemosphere* 2011, 84: 806–881.
- [15] Thitanuwat B, Polprasert C, Englande AJ, Jr. Quantification of phosphorus flows throughout the consumption system of Bangkok Metropolis, Thailand. *Science of the Total Environment* 2016, 542: 1106–1116.
- [16] van Dijk KC, Lesschen JP, Oenema O. Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. *Science of the Total Environment* 2016, 542: 1078–1093.
- [17] Yuan Z, Liu X, Wu X, Zhang L, Bi J. Anthropogenic phosphorus flow analysis of Lujiang County, Anhui Province, Central China. *Ecological Modelling* 2011, 222: 1534–1540.
- [18] Schoumans OF, Bouraoui F, Kabbe C, Oenema O, van Dijk KC. Phosphorus management in Europe in a changing world. *Ambio* 2015, 44: 180–192.
- [19] Withers PJ, van Dijk KC, Neset TS, Nesme T, Oenema O, Rubaek GH, Schoumans OF, Smit B, Pellerin S. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: the case of Europe. *Ambio* 2015, 44 (Suppl. 2): 193–206.