

FOSFOR V ODPADNIH TOKOVIH IN PONOVA UPORABA

Dean ČERNEC

POVZETEK

Povrnitev fosforja iz odpadnih tokov lahko bistveno pripomore k trajnostnemu upravljanju z viri fosforja. Ponovna pridobitev iz odpadnih tokov ne omogoča samo ponovne uporabe fosforja, ampak je tudi eden glavnih faktorjev, ki zmanjšujejo odvisnost od svetovnih dobaviteljev fosfatne rude. Obstaja veliko različnih virov, ki so primerni za povrnitev fosforja in če pri tem upoštevamo še intenzivno raziskovalno delo, ki je bilo na tem področju opravljeno v zadnjih letih, je jasno, da smo v Evropski uniji nekaj korakov bliže k zaključevanju fosforjeve zanke.

ABSTRACT

Phosphorus recovery from waste streams can significantly contribute to a sustainable management of phosphorus resources. Recovery from waste streams does not only make reuse of phosphorus possible but it is also one of the key factors that have an impact on a decrease of dependency on the world's main phosphate rock suppliers. There are many sources from which phosphorus can be recovered and along with intensive research in recent years, further steps towards closing the phosphorus loop in EU are being made.

1. UVOD

Fosfor je kot makronutrient nujno potreben za vse žive organizme. Ob dejstvu, da največji delež fosforja dandanes vstopa v prehransko verigo z uporabo mineralnih umetnih gnojil in da je glavna surovina za proizvodnjo umetnih gnojil fosfatna ruda, katere zaloge so omejene (t.j. gre za neobnovljiv vir z neenakomerno razporejenimi svetovnimi nahajališči) ter ob dejstvu, da se globalno število prebivalcev nenehno povečuje, lahko zaključimo, da se bo brez ustreznih ukrepov tudi zahodni svet kmalu soočil s pomanjkanjem hrane. Neizogibno je, da bo v prihodnosti napočil trenutek, ko bo povpraševanje po fosfatni rudi preseglo kapacitete dobaviteljev in če države takrat ne bodo ustrezno pripravljene oziroma ne bodo imele na razpolago ustreznih alternativnih pristopov ter tehnologij za rabo in ponovno uporabo fosforja, si lahko le predstavljamo neobvladljivost razmer, ki bi nastale zaradi pomanjkanja. Če pri tem upoštevamo še neučinkovitost rabe fosforja (samo 15-20% fosforja, ki vstopa v prehransko verigo z umetnimi mineralnimi gnojili se dejansko porabi za rast pridelkov in vzrejo živali), je stvar še bolj zaskrbljujoča, saj se ves preostali fosfor več ali manj nenadzorovano porazgubi v različnih odpadnih tokovih. Količine fosforja v odpadnih tokovih torej še zdaleč niso zanemarljive in prav tukaj se nahaja velik potencial za ponovno uporabo. Med takšne odpadne

tokove, če navedemo nekaj primerov, sodijo recimo tudi s fosforjem bogate komunalne in industrijske odplake ter gnojnice, ki nastaja v živinorejskih dejavnostih. Upoštevajoč, da je nenadzorovano odvajanje fosfatov, ki predstavljajo glavni vir fosforja v tovrstnih odplakah, zaradi eutrofikacijskih učinkov nezaželeno že iz okoljevarstvenega vidika, pa postane upravičenost in smiselnost povrnitve (ang. recovery) in ponovne uporabe fosforja iz odpadnih tokov še toliko večja.

2. VIRI IN NAČINI POVRNITVE FOSFORJA IZ ODPADNIH TOKOV

Viri fosforja iz odpadnih tokov so raznoliki, nabor možnosti za njegovo povrnitev pa je sorazmerno velik. Pri tem lahko gre za mešanico različnih odplak ali pa za ločene frakcije, kot so na primer urin, fekalije ali odplake iz gospodinjstev. Viri so lahko tudi živalska gnojnica, ostanki pridelkov, mrhovina, odpadki iz klavnice ter zavržena hrana.

V svetovnem merilu predstavljajo človeški urin in fekalije okoli 14% izgubljenega fosforja (od tega ga je 60÷70% v urinu), pri čemer velja omeniti, da gre tu za največje vire fosforja v urbanih predelih sveta. Po nekaterih ocenah bi povrnitev fosforja iz urina in fekalij lahko nadomestila 22% letnih svetovnih potreb po fosforju. Zaradi večanja svetovne populacije in vse večjega konzumiranja s proteini bogate hrane, pa bi lahko na tak način nadomestili še večji delež fosforja. Največjo korist in prednost pri povrnitvi fosforja iz človeških iztrebkov bi lahko imeli Afrika in Azija, predvsem v predelih, kjer je vzpostavljanje sanitarnih sistemov šele v začetni fazi in uvajanje alternativnih pristopov ne bi povzročalo težav (za razliko od razvitega sveta, kjer je potrebno razmisliti o možnostih nadgradnje že obstoječih sistemov ter o preprekah, ki se pri tem pojavijo). V Afriki in Aziji bi se lahko torej že v zgodnji fazi izgradnje sanitarnih sistemov uvajali postopki kompostiranja trdnih frakcij ter ločeno zbiranje urina. Pri tem se ponuja enkratna priložnost trajnostne oskrbe (vključujoč učinkovitejšo rabo in ponovno uporabo fosforja) za 2,6 milijarde ljudi, ki se vsakodnevno soočajo z nezadovoljivo in pomanjkljivo sanitarno ureditvijo.

V Evropski uniji se v nekaterih ruralnih predelih fosfor v veliki meri vrača na polja tudi s tradicionalnimi tehnikami, na primer z uporabo hlevskega gnoja in gnojnice, po drugi strani pa je enak pristop na drugih ruralnih predelih Evropske unije zaradi strogih regulativ zelo omejen. Količina fosforja v takšnih odpadnih produktih je pogojena s številčnostjo živine, tipa živine, tipa krmil ter režima krmljenja. Pomanjkljivost pri uporabi živalskih iztrebkov so tudi logistične težave, saj je živinoreja postala preveč centralizirana. Tako imamo na eni strani opravka z velikimi količinami živalskih iztrebkov oziroma z okoliško obdelovalno zemljo, ki vsebuje presežne količine fosforja, na drugi strani pa z bolj oddaljenimi kmetijskimi površinami, kjer je zemlja siromašnejša. Rešitev za ta problem se kaže predvsem v enakomernejši regionalni razporeditvi živinoreje. Tu lahko še dodamo, da se je direktno odlaganje raznih živalskih ostankov, kot so kosti in kri, zaradi možnosti pojava in širjenja raznih bolezni močno zmanjšalo.

Recikliranje ostankov hrane in zavržene hrane je po zaslugi kompostiranja, ki ga izvajajo posamezna gospodinjstva, v Evropi postalo že prava vsakdanjost. Količine fosforja v ostankih hrane seveda variirajo glede na prehranjevalne navade prebivalstva.

Odločitev o tem, katera oblika povrnitve fosforja se bo na določenem območju uveljavila, je odvisna predvsem od lokalnih pobudb, nasprotovanj ter strategij za prihodnost. Na Švedskem ter v Švici in Franciji je na primer ponavljajoče cvetenje alg vzpodbudilo napredek tehnologij za odstranjevanje fosforja iz sistemov čiščenja komunalnih odplak. Pri tem pomembno vlogo igrajo tudi predpisi, ki določajo mejne vrednosti izpustov. Na Nizozemskem, kjer je na primer odlaganje odpadnega blata v tla praktično nedovoljeno, je zadnjo fazo »obdelave« prevzel sežig blata, iz nastalega pepela pa pridobijo celo nekaj fosforja.

3. POSTOPKI ZA POVRNITEV FOSFORJA IZ ODPADNIH VOD

V sistemih, ki omogočajo povrnitev fosforja iz odpadnih vod se pogosto uporabljajo različice tehnoloških postopkov za čiščenje odpadnih vod v čistilnih napravah, s to razliko, da primarni cilj niso samo parametri očiščene vode, temveč čim večja stopnja povrnitve fosforja ter možnost njegove ponovne uporabe.

3.1 Manjši decentralizirani sistemi

Manjši decentralizirani sistemi so sistemi, v katerih se obdeluje odpadna voda iz individualnih poslopij ter manjših območij oziroma skupnosti. V Evropi razvite tehnologije omogočajo na primer ločeno zbiranje urina, fekalij in vode za izplakovanje, s čimer se učinkovitost reciklaže znatno poveča. Kot že omenjeno, je ta oblika ekološke sanitarne ureditve decentralizirana in primerna predvsem za uporabo na nivoju posameznih gospodinjstev ali manjših skupnosti. Glavna pomanjkljivost teh sistemov je, da je potrebno ločene frakcije na koncu vendarle nekje skladiščiti, kar zahteva določeno obliko centralnega zbiranja, pri čemer ne smemo pozabiti na transport posameznih frakcij do centralne zbiralne postaje. Primere takšnih sistemov najdemo že marsikje po svetu (Južna Afrika, Kitajska, Mehika in v razvitem svetu predvsem Skandinavija, Nizozemska ter Nemčija) in čeprav njihova učinkovitost na lokalni ravni ni sporna, bodo za uporabo v večjem obsegu potrebna še dodatna testiranja.

Obstajajo tudi primeri manjših decentraliziranih sistemov v Braziliji in Indiji, kjer iz straniščnih (urin in fekalije) in gospodinjstevskih odplak s pomočjo anaerobne razgradnje proizvajajo bioplin, ki ga potem uporabljajo kot lokalni energent za kuhanje in razsvetljava, preostalo blato pa porabijo kot gnojilo na vrtovih. Spet druge straniščne odpadke in ostanke hrane kompostirajo, ponekod pa obdelujejo gospodinjstevske odplake, dokler le-te niso primerne za namakanje vrtnih površin.

Prednosti manjših decentraliziranih sistemov so napram centraliziranim sistemom precejšnje, saj so ob manjši porabi energije, vode in materiala nižji tudi obratovalni stroški. Za primerjavo – pri centraliziranih čistilnih napravah predstavljajo stroški vzpostavitve kanalizacijskega omrežja največji del celotne investicije (od 50 do 70%). Veliko prednost predstavlja tudi ločevanje odpadkov na izvoru, saj je s tem omogočena obdelava posameznih frakcij glede na njihove lastnosti (pri mešanem odpadnem toku, ki vstopa v centralno čistilno napravo, seveda to ni mogoče).

Slabosti teh sistemov so logistika (transport in skladiščenje frakcij), pomanjkanje prostora (sploh v gosto naseljenih urbanih središčih) ter (ne)prevzemanje odgovornosti za upravljanje in vzdrževanje, saj gre tu vendarle za individualno upravljanje ali upravljanje na nivoju manjših skupnosti.

3.2 Večji centralizirani sistemi za povrnitev in ponovno uporabo fosforja

Tehnologije za odstranjevanje fosforja iz centralnih čistilnih naprav so se razvijale nekaj desetletij. Ker je bilo primarno gonilo razvoja teh tehnologij v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja zmanjšanje onesnaženja vodnih teles, so bile dejavnosti temu primerno osredotočene predvsem na učinkovito odstranjevanje fosforja iz odplak, povrnitvi fosforja za ponovno uporabo pa se ni posvečalo pretirane pozornosti. Premik na tem področju se je zgodil v zadnjih dveh, treh desetletjih, ko je začelo naraščati zanimanje za ponovno uporabo fosforja iz odpadnih tokov. Postopki, ki omogočajo odstranjevanje fosforja temeljijo večinoma na pretvorbi raztopljenega fosforja v trdno obliko, ki pa ni nujno primerna za ponovno uporabo ali reciklažo. To pomeni, da je potrebno za povrnitev fosforja postopke odstranjevanja prilagoditi tako, da je končna, trdna oblika fosforja že primerna za ponovno uporabo (največkrat kot gnojilo) ali pa, da je uporabna vsaj kot surovina v reciklažnih postopkih. Spodaj je opisanih nekaj tehnologij za povrnitev fosforja, pri čemer velja še omeniti, da obstaja tudi veliko različic in kombinacij teh tehnologij.

3.2.1 Izboljšano biološko odstranjevanje fosforja

Gre za postopek odstranjevanja fosforja iz odpadnega blata s pomočjo anaerobnih bakterij. Kot vsi živi organizmi tudi bakterije za svoje preživetje potrebujejo fosfor, zato le-te v anaerobnih pogojih iz odpadnega blata črpajo fosfor ter ga v obliki polifosfatov vgrajujejo v svoje celice. Na koncu procesa bakterije ločimo od preostalega blata, ki praktično ne vsebuje fosforja. V Evropi se ta postopek, ki se izvaja s pomočjo velikih zadrževalnih bazenov z aerobnimi in anaerobnimi conami, uporablja pri približno 30% postrojenj za čiščenje odpadnih vod. Dodatna prednost tega postopka je možnost proizvodnje bioplina, postopek pa se ponavadi izvaja pred precipitacijo struvita (glej postopek opisan v nadaljevanju).

3.2.2 Precipitacija (vključno s proizvodnjo struvita)

Kemična precipitacija (t.j. proizvodnja ločljive trdne faze v tekočem mediju) se za odstranjevanje fosforja iz odpadnih vod uporablja že od pedesetih let prejšnjega stoletja, šele v zadnjih desetletjih pa se je fokus premaknil na povrnitev fosforja za ponovno uporabo. Precipitacija se lahko pojavi spontano, vendar pa jo navadno sprožimo z dodajanjem kovinskih ionov (največkrat z dodajanjem magnezijevih ali kalcijevih ionov). Najpogostejša oblika povrnitve fosforja s precipitacijo je proizvodnja struvita (magnezijev amonijev fosfat).

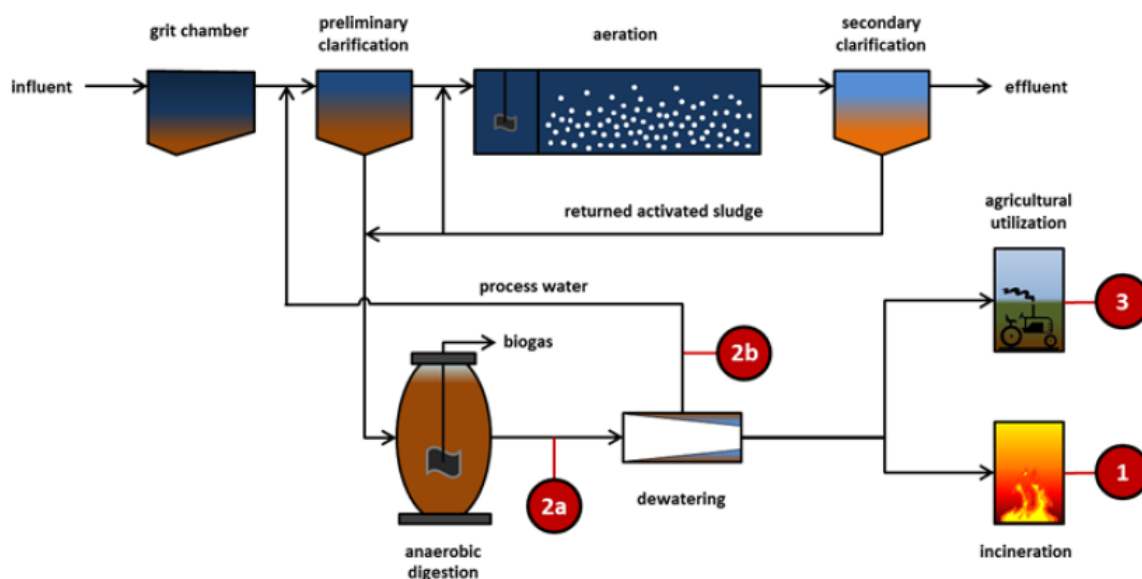
Precipitacija se pogosto izvaja na s fosforjem in amonijem bogatem tekočem ostanku odpadnega blata, ki je bilo predhodno podvrženo anaerobnemu procesu razgradnje. Za proizvodnjo struvita obstajata dve možnosti: pred ali po procesu odstranjevanja vode (Slika 1, 2a in 2b). Struvit, ki ga dobimo po procesu odstranjevanja vode vsebuje manj nečistoč in je

malenkost bolj kvaliteten od struvita, ki ga dobimo direktno iz tekočega ostanka odpadnega blata. Vendar pa ima način s precipitacijo pred odstranjevanjem vode več prednosti. Prva je ta, da se z odvzemom fosforja v obliki struvita pred odstranjevanjem vode poveča učinkovitost samega procesa odstranjevanja vode, ki sledi. Naslednja prednost se kaže v manjši porabi kemičnih dodatkov, obenem pa so tudi stroški vzdrževanja sistema manjši, kadar se precipitacija izvaja pred odstranjevanjem vode (manj oblog na ceveh in manjša obraba centrifug). Odvisno od posamezne države oziroma njenih predpisov, pa lahko dodatno prednost pomenijo tudi manjši stroški odstranitve odpadnega blata, če le-to ne vsebuje fosforja. V nekaterih podjetjih so ocenili, da lahko učinki naštetih prednosti prihranijo tudi do nekaj sto tisoč evrov letno in to brez upoštevanja dobička od prodaje struvita.

Raziskave so pokazale, da struvit vsebuje podobne sestavine kot standardna umetna mineralna gnojila (npr. DAP – diamonijev fosfat, TSP - trojni superfosfat). Potekale so tudi že razprave, da je v določenih okoliščinah struvit lahko celo boljše gnojilo, saj gre za gnojilo s počasnim sproščanjem in ni nevarnosti, da bi v primeru prekomerne uporabe prišlo do »ožiga« korenin (za razliko od nekaterih standardnih umetnih gnojil, kjer se lahko zgodi prav to). Vendarle pa je potrebno omeniti tudi, da gnojila s počasnim sproščanjem niso primerna za vse vrste gnojenja, kar velja še posebej za tehnike »preciznega« gnojenja, saj je čas delovanja gnojil s počasnim sproščanjem težko določljiv. Počasno delovanje struvita se dobro obnese npr. v obalnih kmetijskih dejavnostih, za travnate površine, sadovnjake, pogozditve, pri gojenju lončnic, na golfiščih in pri gnojenju okrasnih zelenic.

Obstajajo tudi metode, ki bi v prihodnosti lahko še dodatno optimalizirale proces povrnitve fosforja. Ena od takšnih metod je recimo uporaba termične hidrolize odpadnega blata še pred anaerobno razgradnjo. Dejansko gre tu za prevretje odpadnega blata pod visokim tlakom in visoko temperaturo, rezultat pa je večja stopnja razkroja v odpadnem blatu še preden je le-to podvrženo procesu anaerobne razgradnje. Učinkovitost le-te se zaradi tega znatno izboljša, saj se proizvede več bioplina, predhodna termična hidroliza pa omogoči tudi pretvorbo slabo topnih fosfatov v bolj topno obliko, ki jih potem s precipitacijo odstranimo oz. povrnemo v obliki struvita.

Tudi večanje zavesti o nezadostnih količinah vode v nekaterih predelih sveta oziroma potreba po "reciklaži" vode bi lahko povečala potencial za povrnitev in ponovno uporabo fosforja. V Avstraliji recimo že razvijajo projekte za reciklažo vode, kjer z uporabo membran za mikro- ali nanofiltracijo filtrirajo straniščne odplake. Pri tem se znova srečamo s sinergijskim učinkom čiščenja odpadnih vod in procesa povrnitve fosforja. Pri omenjenih filtracijskih postopkih dobimo namreč poleg čiste vode tudi koncentrirane odpadne tokove, ki vsebujejo veliko fosforja v obliki fosfatov, in so kot taki zelo primerni za pridobivanje struvita. Glavna slabost teh sistemov je velika poraba energije, ki je potrebna za mikro- ali nanofiltracijo, zato je odločitev za tak sistem potrebno dobro pretehtati.



- 1 ash after incineration
- 2a undrained sludge after anaerobic digestion
- 2b sludge liquor after dewatering
- 3 direct agricultural utilisation of dewatered sludge

Sl.1: Možnosti povrnitve fosforja iz centralnih čistilnih naprav

3.2.3 Adsorpcijski postopki in ionska izmenjava

Proces adsorpcije omogoča pretvorbo fosforja iz tekočega v trdno stanje s pomočjo adsorbenta, ki zadrži fosfor na svoji površini. Kot adsorbenti se mnogokrat uporabljajo stranski produkti drugih industrijskih procesov (npr. aluminijev sulfat ali železov klorid). Ta način se uporablja tudi pri sanaciji jezer, ki so utrpela škodo zaradi prevelikih vnosov fosforja (fosfor v vodi se adsorbira in z adsorbentom potone na dno jezera). Težava pri teh adsorbentih je, da je fosfor premočno vezan na njihovo površino in zaradi tega slabo dostopen rastlinam, odprta pa so tudi vprašanja glede vplivov na človeško zdravje in okolje na sploh. Razvijajo se sicer že tudi novi adsorbenti (na podlagi polimerov in nanomaterialov), a ne glede na to mora uporaba teh sredstev ostati podvržena strogi presoji zdravstvene in okoljevarstvene stroke.

V primerjavi z adsorpcijo je ionska izmenjava bolj selektivna metoda. V zadnjem času je nekoliko pridobila na veljavi kot obetajoča metoda za odstranjevanje fosforja, vendar je bila njena učinkovitost do sedaj preverjena le na podlagi manjšega števila raziskav, ki so se osredotočale na odstranjevanje fosforja iz komunalnih odplak.

3.2.4 Sežig odpadnega blata in povrnitev fosforja v obliki pepela

Sežig odpadnega blata v pepel je metoda, ki omogoča pridobitev koncentriranega fosforja v obliki čistega, visoko kvalitetnega in zanesljivega produkta. Postopek je posebej popularen na Nizozemskem in v Švici, kjer je uporaba obdelanega odpadnega blata na kmetijskih zemljiščih zelo omejena že od leta 1995. Posotpek je sicer energijsko potraten in drag, saj je v procesu proizvodnje potrebno odstraniti kontaminante in omogočiti, da je fosfor pripravljen v takšni obliki, da ga korenine rastlin lahko absorbirajo. Prodaja na trgu še ni prav zaživela, vendarle pa produkt iz obdelanega pepela nekateri dobavitelji umetnih gnojil ponujajo kot del razširjene ponudbe.

4. ZAKLJUČEK

Postopki povrnitve fosforja, ki so opisani v pričujočem prispevku so samo povzetek trenutno najbolj uporabljanih tehnologij, a možnih pristopov je še mnogo (npr. postopki, ki so sorodni tistim iz rastlinskim čistilnim naprav, "gojenje" alg v umetnih ribnikih, kamor se dovajajo odplake,...). Pri zaključevanju fosforjevaga cikla igra povrnitev fosforja iz odpadnih tokov pomembno vlogo, zato se v povezavi z razvojem novih tehnologij in ozaveščanja v Evropski uniji zadnja leta vršijo številne dejavnosti, poudarek pa je na razvojnih skupinah, ki proučujejo nove koncepte z dodatnimi procesnimi stopnjami, ki bi lahko še povečale učinkovitost že ustaljenih procesov. Seveda se pri tem pojavi tehtno vprašanje, če je vsaka od teh izboljšava tudi ekonomsko upravičena. Pri dograjevanju obstoječih objektov, še posebej pa pri gradnji novih objektov za povrnitev fosforja je zato potrebno sprejemati uravnotežene odločitve v zvezi z investiranjem v posamezne tehnologije. Za lažje sprejemanje tovrstnih odločitev se v okviru krovne organizacije za trajnostno rabo fosforja (ESPP – European Sustainable Phosphorus Platform) izvajajo tudi pilotni projekti, ki bodo omogočili ovrednotenje ter primerjavo različnih procesov in tehnologij. V Evropski uniji že obstaja nekaj objektov, ki so v celoti prilagojeni povrnitvi fosforja iz odpadnih tokov, a se le-ti za zdaj nahajajo samo v nekaterih državah (pravzaprav samo na Nizozemskem ter v Nemčiji in Belgiji). Ponuja se edinstvena priložnost, da se omenjenim državam med prvimi pridruži tudi Slovenija.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] Rajasekar Karunanithi, Ariel A. Szogi, Nanthi Bolan, Ravi Naidu, Paripurnanda Loganathan, Patrick G. Hunt, Matias B. Vanotti, Christopher P.Saint, Yong Sik Ok, SathiyaKrishnamoorthy, Phosphorus Recovery and Reuse from Waste Streams, *Advances in Agronomy*, Volume 131, 173-250, 2015
- [2] N. Samec, "Inženirstvo okolja (Študijsko gradivo za univerzitetni študijski program strojništva – smer okoljevarstveno inženirstvo)," Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005.
- [3] D. Černec, "Izzivi trajnostne rabe fosforja"; Maribor, 26. Mednarodno posvetovanje "Komunalna energetika 2017"

- [4] Science for Environment Policy, IN-DEPTH REPORT: Sustainable Phosphorus Use, October 2013, Issue 7
- [5] A. Amann, O. Zoboli, J. Krampe, H. Rechberger, M. Zessner, L. Egle, "Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater"; Resources, Conservation & Recycling 130, 127-139, 2018

NASLOV AVTORJEV

Dean Černec

Ob potoku 13

3210 Slov. Konjice

Tel: + 386 41 840 156

Elektronska pošta: cerdej@yahoo.com