

Jakost drenážních vod (živiny, pesticidy a jejich metabolity) a její potenciální vliv na vodní zdroje

Mgr. Antonín Zajíček, Ph.D., Ing. Petr Fučík, Ph.D., Ing. Renata Duffková, Ph.D.,
Mgr. Markéta Kaplická, Ing. Jana Maxová

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i (zajicek.antonin@vumop.cz)

Úvod

V České republice bylo odvodněno celkem 1,0165 mil ha, což představuje více než 1/3 zemědělské půdy (Kulhavý et al., 2007). Drenážní systémy byly v České republice obvykle koncipovány jako kombinace podrobného drenážního odvodnění s povrchovými nebo zatrubněnými odvodňovacími kanály a upravenými drobnými vodními toky. Největší část výstavby probíhala v průběhu 20. století, a to ve 3 etapách. První dvě etapy odehrávající se těsně před 1. sv. válkou resp. mezi válkami se týkaly především nejméně zorněných půd v Polábí a moravských úvalech a odvodnění se týkalo především dlouhodobě zorněné půdy. V průběhu třetí etapy výstavby drenáží mezi lety 1965-1985 bylo odvodněno nejvíce půdy, a to zejména v úpatích vrchovin jako Českomoravská vrchovina, kde došlo k zornění velkých ploch travních porostů v honbě za získáním co největší plochy orné půdy bez ohledu na možná rizika zhoršení stavu životního prostředí. Většina odvodnění byla provedena tzv. trubkovou drenáží. Do 60. let 20. stol. byly drenáže považovány za jednoznačně kladné opatření (Jůva 1957), poté nastala diskuse o jejich vlivu na jakost podzemních i povrchových vod a vodní režim povodí, která trvá dodnes. Názory se v průběhu tohoto období měnily, např. Tlapák a Prudil (1983) uvádí, že závěry o nepříznivém vlivu drenáže na jakost vody jsou přes vysoké korelace nesprávné, naopak drenáž působí jako ochrana hlubších vod před kontaminací neboť zvyšuje aktivní povrch půdy a její retenci. Švihla (1985) uvádí, že vliv drenáže na celkovou hydrologickou bilanci povodí je menší než vliv počasí a není to zásah, který by vybočoval z rámce účinků vyvolaných přírodními jevy (na kvartérních svahovinách). Současný stav drenážních systémů v České republice zhodnotili Kulhavý a Fučík (2015), kteří za největší problémy pokládají, kromě zvýšeného vyplavování dusíku z povodí, nevyjasněné majetkové vztahy a z toho vyplývající zanedbanou údržbu a stárnutí drenáží. S touto situací souvisí zvýšený výskyt lokálně zamokřených ploch v místech poruch drenážních systémů. Další oblastí zvýšeného zájmu o drenážní systémy v současné době je jejich podíl na vyplavování pesticidů. (Fauser et al., 2008; Zajíček a Fučík, 2015). Odvodňovací soustavy na zemědělských půdách se sice již v České republice téměř nebudují, ale stávající drenáže přesto stále výrazně ovlivňují hydrologický i hydrochemický režim krajiny v kladném i záporném smyslu.

Odvodnění vybudované ve svahu v úpatních polohách vysočin a hornatin je specifickým krystalinika České republiky a při hledání způsobu zlepšení jakosti drenážních vod je třeba brát v úvahu způsob tvorby odtoku ve svahu a skutečnost, že podstatná část drenážního odtoku a jeho kvalita vzniká mimo vlastní odvodněnou lokalitu a pro bilanční studie je nutno brát do úvahy celé povodí (Krishnappan, a Marsalek 2002; Herrmann a Duncker, 2008, Zajíček et al., 2009). V současné době se autoři shodují, že mělký podpovrchový odtok je jedním z hlavních faktorů, které formují odtok v malých svažitéch povodích v oblastech humidního klimatu (Hrnčíř et al., 2010; Dušek et al., 2012; Šanda et al., 2013). Tesař a Šír (1995), Šanda et al. (1999), Císlarová (2003) uvádějí, že epizodní charakter podpovrchového odtoku v horských oblastech závisí na průběhu srážek a přitom podpovrchový odtok je

dominantní složkou vodního režimu horských oblastí. Podobnou váhu podpovrchovému odtoku přisuzují pro oblast Českomoravské vrchoviny (Doležal et al., 2004).

V procesu tvorby drenážního odtoku na svazích krystalinika České republiky mají významnou roli také pramenné vývěry, které se v této oblasti hojně vyskytují. Při výstavbě drenážních systémů zamokřených půd českých vrchovin a parovin v 60. – 90. letech minulého století byly pramenné vývěry identifikovány jako významný bodový i plošný zdroj zamokření

Z dlouhodobých výzkumů vyplývá, že podpovrchový (drenážní) představuje zdroj znečištění zejména z hlediska živin (dusičnanový dusík, fosfor) a některých pesticidů a jejich metabolitů. Cílem příspěvku je shrnout poznatky o vyplavování výše zmíněných látek a stručně nastínit některé možnosti zmírnění negativních vlivů podpovrchových zdrojů znečištění na jakost vod.

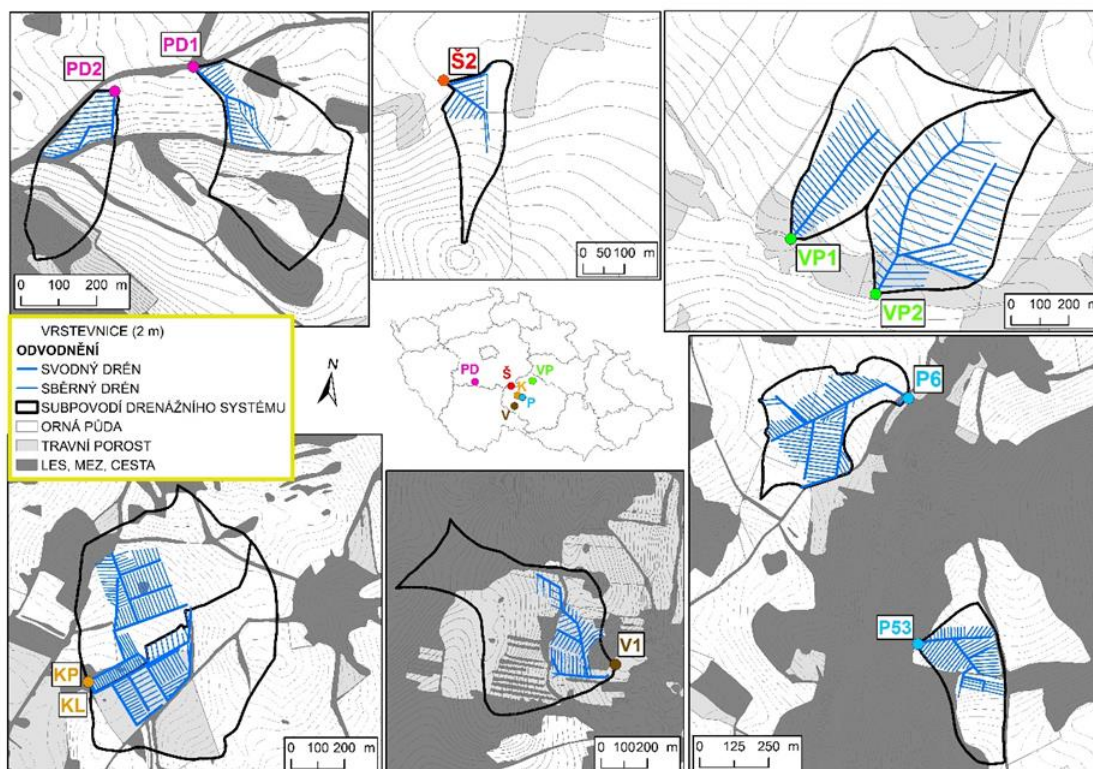
Materiál a metody

Výzkum vyplavování živin probíhal na deseti závěrových profilech (šachtice nebo drenážní výusti) drenážních skupin, jejichž mikropovodí (4 – 37 ha) je využíváno převážně jako zemědělská půda. Tato mikropovodí se nacházejí na šesti experimentálních lokalitách, jejichž umístění a přehledná mapa jsou znázorněny na obr. 1. Společnou charakteristikou všech sledovaných mikropovodí je drenážní systém vybudovaný ve svahu. Geologickým podkladem jsou krystalické horniny, místy přeměněné, v různém stadiu rozpadu. V dolních partiích svahů se vyskytují kvartérní sedimenty v podobě svahových písků a hlín s různou mocností. Půdní pokryv je velmi variabilní zejména ve výtokových oblastech, kde se vyskytují kambizemě oglejené, pseugogleje, gleje modální a místy organozemě. Ve zdrojových oblastech (horní části svahů, poblíž rozvodnic) se vyskytují zejména kambizemě modální až arenické, místy rankery. Srážkové úhrny byly ve sledovaném období velmi variabilní a pohybovaly se od 450 do 750 mm za rok. Základní charakteristiky pokusných lokalit jsou uvedeny v tab. 1.

Na měrných profilech sledovaných drenážních skupin byly kontinuálně měřeny výšky hladin nad přepadem pomocí ultrazvukových sond, které byly přepočteny na průtok a ukládány v desetiminutovém kroku. Společně s výškou hladin byla také měřena teplota drenážní vody. Schéma odběru vzorků se lišilo podle aktuální hydrologické situace. V období převažujícího základního a pomalého svahového odtoku byly vzorky odebírány manuálně v pravidelném 14denním kroku. V průběhu srážko-odtokových epizod byly vzorky odebírány pomocí automatických vzorkovačů v kroku od 20 minut (letní epizody) do 1 hodiny (zimní epizody). Pro analýzu všech parametrů byl v certifikované laboratoři VÚMOP, v.v.i. použit automatický přístroj „SKALAR“ za pomoci metod CFA a FIA (Flow Injection Analysis, Continuous Flow Analysis); ISO Metody č. 13395 pro NO₃-N a č. 15681-2 pro P-PO₄ a Pcelk.

Výzkum dynamiky vyplavování pesticidů probíhal na některých výše zmíněných pokusných lokalitách (subpobodích a půdních blocích) VÚMOP, v.v.i., charakterizovaných výše. Vlastní měrné profily byly vybírány tak, aby byly pokryty drenážní systémy pod různým způsobem využití půdy. Na pokusné lokalitě Dehtáře byly sledovány drenážní skupiny KL (29 ha) se zatravněnou půdou v celém subpovodí této skupiny a drenážní skupina KP (28 ha) s ornou půdou s tradičním sedmi-honným osevním postupem. Na lokalitě Černičí (skupina Š2, 4 ha) byla sledována drenáž pod ornou půdou s osevním postupem s převažujícím zastoupením současných plodin (pšenice ozimá, řepka ozimá, kukuřice). Na lokalitě Vepříkov (28 ha) byl sledován odvodněný půdní blok s opakovaným pěstováním kukuřice pro bioplynovou stanici Kombinace pěstování kukuřice s výraznými srážkami krátce po aplikaci pesticidních látek

byla dobrým předpokladem sledování vyplavování pesticidů v průběhu srážko-odtokových epizod (SOE).



Obr. 1: Přehled experimentálních lokalit VÚMOP, v.v.i.

Tab. 1: Základní charakteristiky pokusných lokalit

Lokalita	Drenážní skupina	Plocha odvodnění (ha)	Plocha Plocha mikropovodí (ha)	Převažující využití půdy	Průměrný roční průtok (l/s)	Specifický odtok (l/s/ha)	Průměrné srážky ve sledovaném období (mm/rok)	Sledované období
Dehtáře	KL	6,51	29,6	TTP	0,219	0,007	540	2012-2016
Dehtáře	KP	9,51	28,3	omá	1,265	0,044	540	2012-2016
Kop. pot.	P53	5,46	14,86	omá	0,045	0,003	620	2012-2016
Kop. pot.	P6	9,85	15,73	omá	0,559	0,036	620	2012-2016
Podmokly	PD1	1,92	13,42	omá	0,307	0,023	465	2014-2016
Podmokly	PD2	2,31	6,98	omá	0,244	0,035	465	2014-2016
Černiči	Š2	1,21	3,82	omá	0,256	0,067	590	2012-2016
Veselá	V1	5,85	37,9	pastva	0,993	0,026	630	2012-2014
Vepříkov	VP1	8,68	19,95	omá	0,57	0,028	700	2014-2016
Vepříkov	VP2	21,32	28,25	omá	0,705	0,025	700	2014-2016

Výsledky

Vyplavování dusíku zemědělskou drenáží

Dusičnanový dusík je jedním z nejrozšířenějších polutantů v povrchových i podzemních vodách. Novotny (2009) uvádí, že koncentrace fosforu a dusíku v klíčových přítocích vodárenských nádrží již přesáhly limity hypertrofie (10 mg/l N-NO₃).

Dalším hlediskem je ekonomické, kdy vyplavené neefektivní množství N způsobuje nemalé finanční ztráty zemědělců. V České republice bylo stanoveno pomocí pokusů s izotopicky značeným dusíkem, že v našich půdně klimatických podmínkách je pro výživu rostlin využito jen 30-60 % dusíku z hnojiv, 20-40 % dusíku přechází do půdní organické hmoty a 10-30 % představují jeho ztráty denitrifikací, volatilizací amoniaku, vyplavováním nitrátů, erozí a povrchovým smyvem (Růžek a Klír, 1995). V současné době, s rostoucím počtem a účinností čistíren odpadních vod a budováním spolehlivých septiků klesá význam bodových zdrojů znečištění vod a nabývá na významnosti plošné zemědělské znečištění. Dusičnany jsou hlavními zdroji plošného znečištění vod a jsou spojovány zejména se zemědělsky využívanou půdou. Významnou cestou vstupu dusičnanů do povrchových vod je podpovrchový odtok, velmi často reprezentovaný právě vodou ze zemědělských drenáží.

Na pokusných lokalitách VÚMOP, v.v.i. se koncentrace N-NO₃ se v období běžných průtoků pohybovaly od 1,0 do 91,5 mg/l (medián 19,4). V průběhu SOE se koncentrace N-NO₃ pohybovaly od 0,452 do 144,9 mg/l (medián 14,9). Na zatravněných lokalitách byly změřeny podstatně nižší koncentrace N-NO₃ oproti lokalitám zorněným, což opět potvrdilo schopnosti TTP redukovat odnos N z povodí. Za běžných průtoků obecně docházelo k mírnému ředění koncentrací N-NO₃ s rostoucím průtokem.

V průběhu SOE docházelo v případě N-NO₃ ve většině případů k ředění jejich koncentrací, na TTP výraznějšímu. Výjimkou byly některé SOE na orné půdě, které nastaly krátce po aplikaci minerálních hnojiv a také lokalita Podmoky, kde díky přehnojování (neleží v oblasti Zranitelné dusičnany dle Nitrátové směrnice) koncentrace N-NO₃ v průběhu SOE pravidelně rostly. V případě dusičnanového dusíku se roční odnos pohyboval v rozmezí od 0,42 do 60,5 kg/ha, průměrná hodnota byla 19,0 kg/ha/rok. Nejnižší hodnoty odnosu N-NO₃ byly ze zatravněných mikropovodí KL (TTP) a V1 (pastva), na kterých se roční ztráta pohybovala od 0,6 do 6,8 kg/ha/rok. Velmi nízké hodnoty odnosu byly také na skupině P53, jejíž mikropovodí je sice celé zorněno, ale vyznačuje se nízkým odtokem (tab. 1), který často probíhá pouze v epizodách. Typický odnos N-NO₃ z drenážních skupin pod ornou půdou byl okolo 30 kg/ha/rok.

Podíl SOE na ročním odnosu dusičnanového dusíku se pohyboval od 2 do 86 %, průměrně byl 24 %. Relativně nižší podíl na ročním odnosu N-NO₃ je způsoben zejména ředěním koncentrací dusičnanů v drenážním odtoku v průběhu většiny SOE, ke kterému dochází zejména na zatravněných lokalitách, ale také na orné půdě, která nebyla přehnojena. Ředění koncentrací relativně neznečištěnou vodou převážně z příčinné srážky tak z hlediska odnosu N kompenzuje zvýšení odtoku v průběhu SOE. Vyšší podíl SOE na ročním odnosu N-NO₃ byl často zaznamenán na lokalitě Podmoky (PD1, PD2 – až 61 %), která byla hnojena vyšší dávkou dusíku a na drenážní skupině P53 (průměrně 51 %) s velkým podílem epizodního odtoku. Nízké podíly byly na zatravněném mikropovodí KL a také na Š2, která se obecně vyznačovala po celou dobu sledování malým podílem SOE na odtoku i odnosu. Tyto výsledky byly prezentovány v pracích Duffková et al., 2014, Fučík et al., 2015, Fučík et al., 2017, Zajíček et al., 2017.

Vyplavování fosforu zemědělskou drenáží

Fosfor ze zemědělských půd je považován za významný faktor urychlující eutrofizaci vodních nádrží a toků (Bomans et al. 2005, Madison et al., 2014). Největším zdrojem eutrofizace je rozpuštěný P, který je pro řasy a sinice okamžitě dostupný ve srovnání s nerozpuštěným - partikulárním P (PP) vázaným na půdní koloidní částice o velikosti 1nm – 1 µm s vysokou sorpční kapacitou (Heathwaite et al. 2005). Rozpuštěný P v minerální formě (ortofosfát, <0,025 µm) je označován jako rozpuštěný reaktivní fosfor - RRP (tj. kolorimetricky detekovatelný molybdenanem) na rozdíl od rozpuštěného organického P, který je nereaktivní. Vysoký eutrofizační potenciál a riziko vyplavení představují půdy silně satureované P a náchylné k urychlenému, zejména tzv. saturačnímu, povrchovému a podpovrchovému odtoku vody a erozi. Zvýšené riziko odnosu P do povrchových vod je spojeno také s průběhem počasí (půdní vlhkost, SOE) a s faktory, které zvyšují hydrologickou spojitost dané lokality (Gächter et al. 2010).

Drenážní odtok, zejména z těžkých z těžkých hlinitojílovitých odvodněných půd s výskytem makropórů, může představovat významný zdroj partikulárního fosforu vázaného na půdní koloidy (Ulén et al. 2011), naopak v podpovrchovém odtoku z půdní matrice (bez nebo s minimálním výskytem makropórů), podchyceném během SOE drenážními systémy, převažuje RRP (Reid et al. 2012). Vliv odvodnění na znečištění vody P je v některých půdních a geomorfologických podmínkách závažný.

Dlouhodobé měření koncentrací obou sledovaných forem fosforu potvrdilo jejich značnou variabilitu v rámci sledovaných profilů, i v různých hydrologických letech. Extrémně významná variabilita koncentrací byla též mezi obdobími běžných průtoků a v průběhu SOE. Na pokusných lokalitách VÚMOP. v.v.i. se koncentrace rozpustného reaktivního fosforu (RRP) pohybovaly mezi 0,001 – 0,424 mg/l (medián 0,020), v průběhu SOE P-PO₄ byly v rozmezí 0,001 až 2,174 mg/l (medián 0,043). Koncentrace celkového fosforu za běžných průtoků se pohybovaly v rozmezí 0,001- 0,747 mg/l (medián 0,046). V průběhu SOE byly hodnoty koncentrací P_{celk} vyšší a pohybovaly se od 0,001 do 3,231 mg/l (medián 0,120).

Odnos rozpustného reaktivního fosforu se pohyboval od 0,64 do 132 g/ha/rok, průměrná hodnota na všech sledovaných skupinách byla 32 g/ha/rok, na skupinách s ornou půdou a běžným odtokem (mimo P53) byla průměrná ztráta 56 g/ha/rok. Pro velikost odnosu P-PO₄ měla větší význam velikost odtoku než využití půdy, například z pasené lokality Veselá (V1) byl odnos na stejné úrovni jako ze zorněných mikropovodí. Naopak na lokalitách s nejmenším odtokem (KL, P53) byly ztráty P-PO₄ velmi nízké, v jednotkách g/ha/rok. Podíl rozpuštěného reaktivního fosforu na celkové ztrátě fosforu se pohyboval od 13 do 89 %, v průměru byl 40%. Z hlediska sezón byl nejvyšší odnos v HR 2016 - tj. v relativně vlhkém roce, který následoval po roce extrémně suchém.

Odnos celkového fosforu se pohyboval v rozmezí 1,2 – 304 g/ha/rok. Stejně jako v případě P-PO₄ měla pro jeho velikost větší význam velikost odtoku než využití půdy [18]. Průměrná hodnota byla 80 g/ha/rok, na mikropovodích s odtokem typickým pro zájmové území (bez KL a P53) byla průměrná roční ztráta P_{celk} okolo 100 g/ha/rok. Ve vlhčích letech je z orné odvodněné půdy vyplavováno 200 – 250 g celkového fosforu z hektaru ročně.

Významný podíl na celkovém odnosu sledovaných látek měly srážko-odtokové epizody. Velikost podílu SOE závisela na jejich počtu, délce trvání, hydrologické konektivitě daného mikropovodí. Na jednotlivých drenážních skupinách se za dobu sledování tento podíl pohyboval od 2 do 98 %, průměrně dosahoval 42 %. V jednotlivých letech sledování se podíly pohybovaly od 28 % (HR 2015) do 55 % (HR 2013) dle jejich vodnosti a podílu epizod

na odtoku. Vyšší podíl SOE na odnosu P-PO₄ oproti N-NO₃ byl způsoben chováním koncentrací fosforečnanového fosforu v drenážní vodě, které na všech sledovaných drenážních skupinách s rostoucím průtokem prudce rostly. Tato skutečnost se nejvíce projevila na drenážních skupinách s velkým podílem SOE na odtoku. Na P53 byl podíl SOE na ročním odnosu P-PO₄ průměrně 73 %, ve vlhčích letech potom téměř veškerá ztráta byla způsobena epizodami.

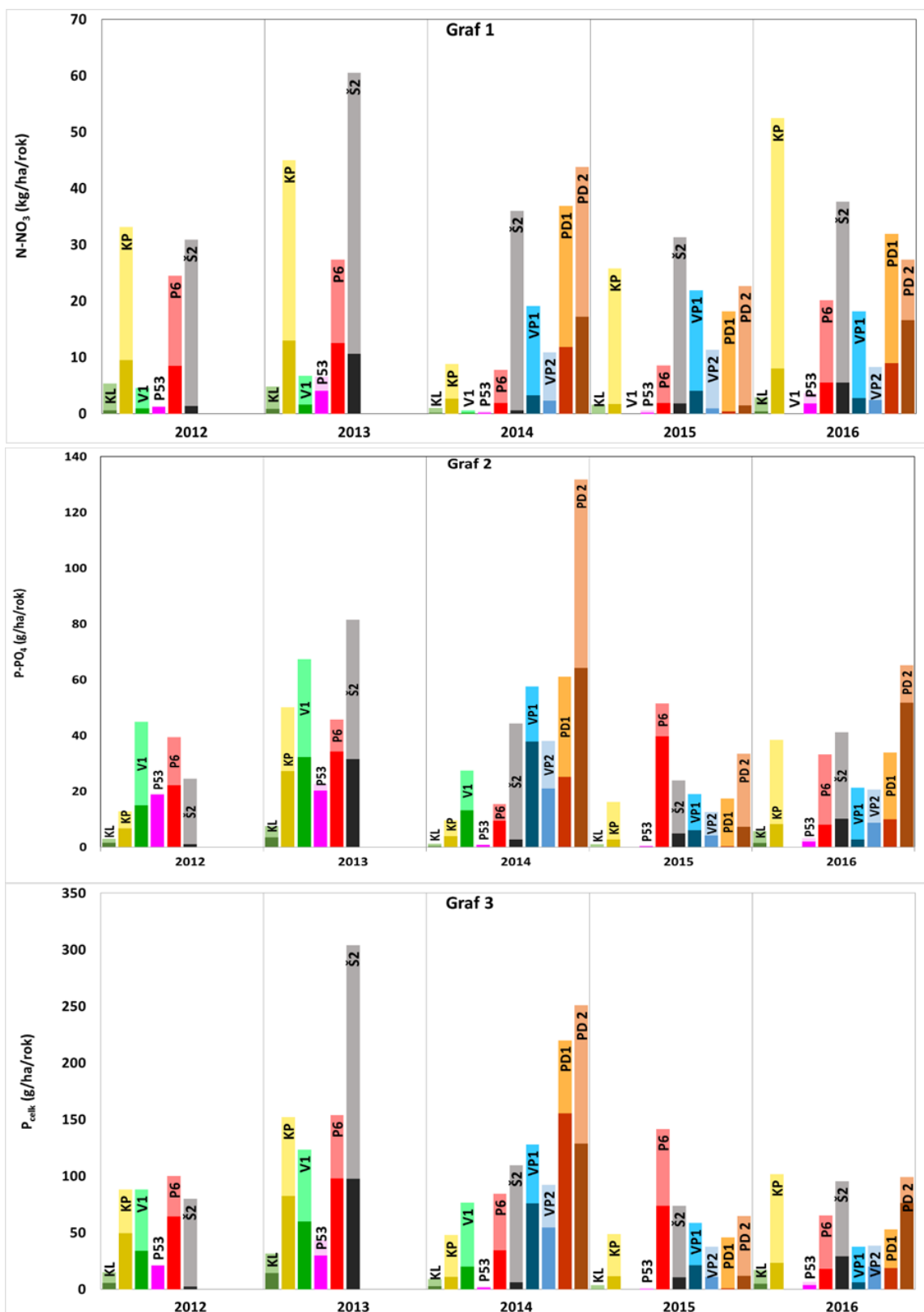
V případě obou forem P nebyly zjištěny žádné rozdíly v koncentracích ani velikosti odnosu způsobené odlišným využitím půdy. Za běžných průtoků neměla v případě P_{celk} i P-PO₄ velikost průtoků na jejich koncentrace vliv. Koncentrace obou sledovaných forem fosforu ale v naprosté většině případů rostly v průběhu SOE s rostoucím průtokem, což je typické chování v malých odvodněných povodích.



Obr. 2: Pokusná lokalita Dehtáře



Obr. 3: Pokusná lokalita po srážko-odtokové epizodě, červen 2016



Graf 1 - 3: Roční odnos N-NO₃ (Graf 1), P-PO₄ (Graf 2) a P_{celk} (Graf 3) na experimentálních lokalitách. Tmavý odstín sloupce zobrazuje odnos během srážko-odtokových epizod (v daném hydrologickém roce) a světlý odstín zobrazuje hodnotu celkového odnosu v daném hydrologickém roce

Vyplavování pesticidů a jejich metabolitů zemědělskou drenáží

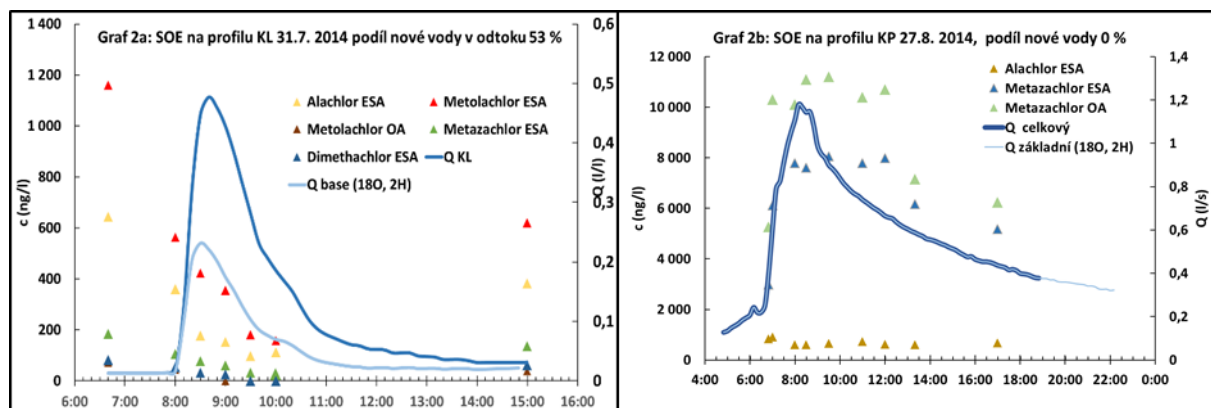
Vyplavování pesticidních látek je dlouhodobým a v současné době jedním z nejdůležitějších problémů k řešení v oblasti ochrany vod. Rezidua přípravků na ochranu rostlin mohou způsobovat závažné ekotoxikologické problémy jak u terestrické, tak u vodní (nebo na vodu vázané) bioty a zhoršovat jakost vody samotné. Pesticidní látky se do vod dostávají z bodových i plošných zdrojů znečištění, přičemž plošné zdroje (odtok ze zemědělské půdy) mají na kontaminaci vod významný podíl (Brown a van Beinum, 2009). Starší studie předpokládaly, že pro transport pesticidů do vod je rozhodující povrchový odtok (Kladivko et al., 2001), nicméně v současné době společně se zlepšenými možnostmi monitoringu se ukazuje také velký význam mělkého podpovrchového odtoku, jehož součástí je odtok drenážní. Velikost vyplavování pesticidů je závislá na složité a dosud ne zcela prozkoumané kombinaci faktorů, jako jsou vlastnosti pesticidů, půdní vlastnosti, vlastnosti pesticidu, typ odvodnění a hydrologické podmínky v povodí v době krátce po aplikaci těchto látek. Významnou roli v transportu pesticidů hrají preferenční cesty, např. makropóry (Kodešová et al. 2009) a v podmínkách krystalinika také trhliny a pukliny. Vzhledem ke skutečnosti, že pro povrchový i podpovrchový odtok jsou v našich podmínkách významné až rozhodující srážko-odtokové epizody (Zajíček et al., 2016, Fučík et al., 2017), je nutné věnovat pozornost preferenčnímu proudění. Jeho rychlost během epizod může být natolik vysoká, že fyzikálně-chemické vlastnosti pesticidů ztrácejí z hlediska jejich vyplavování v těchto situacích význam (Lefrancq et al. 2017). Zrychlený odtok (jakéhokoli typu) významně snižuje čas reakci pesticidu s prostředím (sorpci nebo degradaci) a může vést k přímému a bezprostřednímu vyplavování mateřské látky do povrchových vod. Přítomnost pesticidů v drenážních i povrchových vodách bývá rozložena v průběhu sezóny nerovnoměrně (Müller et al., 2003), s vysokými koncentracemi v průběhu aplikačního období.

Podrobný monitoring prokázal značnou variabilitu a dynamiku koncentrací pesticidů v drenážních vodách v závislosti na hydrologické situaci (srážky, momentální složení drenážního odtoku) a na časové vzdálenosti od aplikace.

Metabolity jsou v drenážním odtoku přítomny permanentně, často ve velmi vysokých koncentracích. Na pokusné lokalitě Dehtáře se vyskytovaly na zorněném (KP) i zatravněném (KL) mikropovodí v průměrné souhrnné koncentraci 5 759 ng/l (967 - 12 726 ng/l) na KP a 3 834 ng/l (1 241 - 7 325 ng/l) na KL. Z jednotlivých látek byly na Dehtářích detekovány zejména metabolity chloracetanilidových herbicidů jako zejména Alachlor ESA, v koncentracích převážně ve stovkách ng/l, Metazachlor ESA (ve stovkách až tisících ng/l), Metolachlor ESA (v tisících ng/l). Častý byl také výskyt Dimetachloru ESA (v desítkách ng/l). Z méně stabilních OA forem metabolitů se vyskytovaly pouze Metazachlor OA a Metolachlor OA. Na pokusné lokalitě Černíčí převažovaly v drenážním odtoku (mikropovodí Š2) opět metabolity chloracetanilidových herbicidů. Byly to zejména Acetochlor ESA, Alachlor ESA a Metazachlor ESA. Průměrná koncentrace sumy všech metabolitů byla 1 726 ng/l (472 - 7 544 ng/l).

V průběhu SOE dochází k významným změnám koncentrací metabolitů. Tento jev souvisí se složením drenážního odtoku v průběhu epizody. Vzhledem ke skutečnosti, že metabolity jsou perzistentní látky setrvávající v povodí delší dobu, jsou vázány na pomalejší složky odtoku (Zajíček et al., 2018, 2018). Pokud se do odtoku v průběhu SOE pronikne voda z příčinné srážky (Zajíček et al., 2016), dojde významnému ředění jejich koncentrací. Taková epizoda je znázorněna v grafu 4a. Zachycena byla na profilu KL 31. 7. 2014 po 19 mm srážce. Drenážní průtok se prudce zvýšil z 0,1 l/s na 0,5 l/s za 40 minut. „Nová“ voda měla 53% podíl na celkovém odtoku. Tato složka odtoku způsobila „ředění“ koncentrací metabolitů v

drenážním odtoku. Suma koncentrací metabolitů poklesla z hodnoty 1 098 ng/l před epizodou na 336 ng/l v jejím průběhu. Po odeznění SOE se koncentrace rychle vrátily na předchozí úroveň. Naopak pokud je drenážní odtok v průběhu SOE tvořen pouze starší vodou (rychle mobilizovaný podpovrchový odtok) koncentrace metabolitů se v průběhu SOE zvyšují. Příkladem je epizoda zachycená na profilu KP ze dne 27. 8. 2014 (graf 4b). Drenážní průtok se pohyboval v rozmezí 0,13 - 1,2 l/s. Koncentrace metabolitů významně rostly spolu s rostoucím průtokem. V době okolo kulminace drenážního průtoku byly koncentrace těchto látek nejvyšší, např. v případě Metazachloru OA se blížily hodnotě 12 000 ng/l.



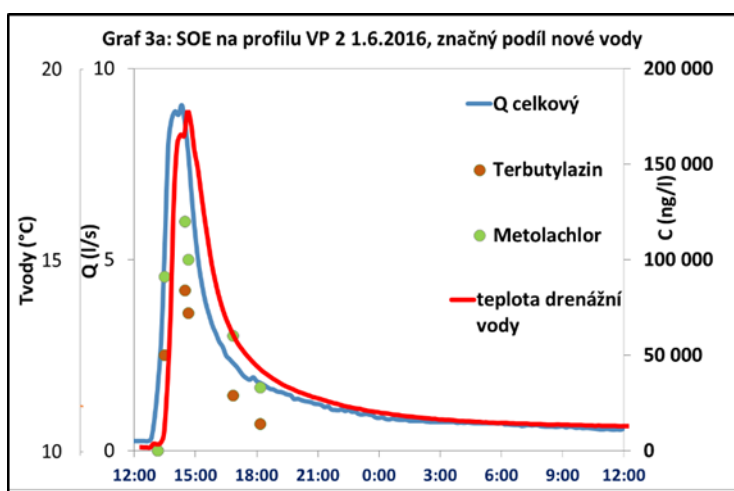
Graf 4a (vlevo): Průběh odtoku a koncentrací metabolitů při srážko-odtokové epizodě 31. 7. 2014 na pokusné lokalitě Dehtáře

Graf 4b (vpravo): Průběh odtoku a koncentrací metabolitů při srážko-odtokové epizodě 27. 8. 2014 na pokusné lokalitě Dehtáře

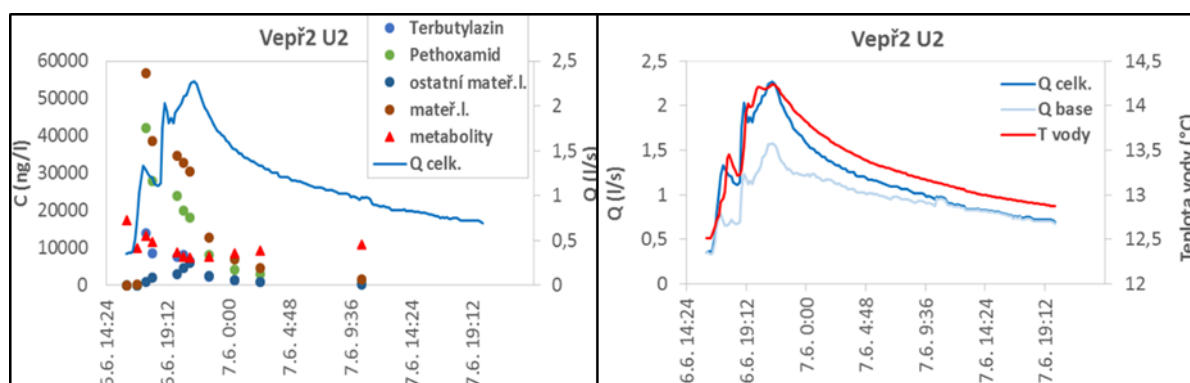
Vyplavování mateřských látek drenážním odtokem je, na rozdíl od metabolitů, vázáno téměř výhradně na srážko-odtokové epizody. Aby došlo k jejich vyplavení, musí SOE nastat krátce po aplikaci pesticidů, nejdéle do 2 měsíců, přičemž s časovou vzdáleností SOE od data aplikace se koncentrace mateřských látek rychle snižují. Další podmínkou k vyplavení mateřských látek je přítomnost „nové“ vody pocházející z příčinné srážky v drenážním odtoku. Tato voda, která rychle proniká preferenčními cestami vyplavuje z povrchu půdy a z její svrchní vrstva dosud nezmetabolizované pesticidy. Typickým příkladem je SOE na lokalitě Vepříkov, která nastala 1. 6. 2016 (graf 5). Epizoda nastala tři týdny po časné emergentní aplikaci na kukuřici. Způsobena byla 20mm srážkou. Drenážní průtok vzrostl z 0,25 l/s na 9,0 l/s za pouhých 90 minut. Náhlá změna teploty drenážní vody (11,3 °C - 14,3 °C) opět indikovala značný podíl „nové“ vody. Zaznamenány byly extrémně vysoké koncentrace mateřských látek i metabolitů pesticidů z poslední aplikace, tj. Metazachloru (až 120 000 ng/l) a Terbutylazinu (až 92 033 ng/l). Hodnota C_{fw} mateřských látek byla 154 140 ng/l, souhrnné koncentrace mateřských látek se pohybovaly od 14 ng/l do 434 135 ng/l dosažených těsně před kulminací průtoku. Zaznamenáno bylo také celkem dvanáct metabolitů v souhrnné hodnotě C_{fw} 192 272 ng/l, převažoval Metolachlor ve formě ESA i OA a různé metabolity Terbutylazinu, pocházející velmi pravděpodobně z poslední aplikace. Celkový odnos pesticidních látek za tuto 24 hodin trvající epizodu byl vypočítán na 33 gramů, z nichž 14,6 g byly mateřské látky (5,5 g Terbutylazin a 8,9 g Metolachlor) a 18,4 g byly metabolity.

Souvislost mezi přítomností „nové“ vody v drenážním odtoku a zvýšeným vyplavováním, mateřských látek potvrzuje též SOE, která nastala na Vepříkově 6. 6. 2017, 23 dní od aplikace Pethoxamidu a Terbutylazinu. Vysoký podíl „nové vody dokumentuje graf 6b, průběh koncentrací pesticidů je zobrazen v grafu 6a. Ačkoli tato SOE nebyla příliš významná z hlediska průtoku (kulminační průtok byl 2,3 l/s), koncentrace mateřských látek v drenážním odtoku dosahovaly až 56 804 ng/l, přičemž převažovaly nedávno aplikované Pethoxamid (maximálně 42 000 ng/l) a Terbutylazin (max. 14 000 ng/l). Odnoš mateřských látek za tuto epizodu činil 1,5 g, z toho 1 g představoval Pethoxamid a 0,33 g Terbutylazin.

Společnými charakteristikami epizod s vysokým odnosem mateřských látek jsou relativně krátká doba od aplikace pesticidů (v řádech týdnů), dále přítomnost vody pocházející z příčinné srážky v odtoku a také plodina. Jako nejvíce riziková plodina z hlediska vyplavování pesticidů se jeví kukuřice, dále brambory, popřípadě holá půda (strniště, čerstvě zasetá plodina). Z hlediska časového převažuje rok 2016, což je způsobeno relativně vyšší vodností zejména oproti vegetační sezóně 2015. V roce 2014 byly na většině sledovaných lokalit pěstovány převážně obiloviny, které pravděpodobně nejsou z hlediska vyplavování mateřských látek tolik rizikové.



Graf 5: Průběh průtoku, teploty drenážní vody a koncentrací pesticidů při srážko-odtokové epizodě na lokalitě Vepříkov 1. 6. 2016



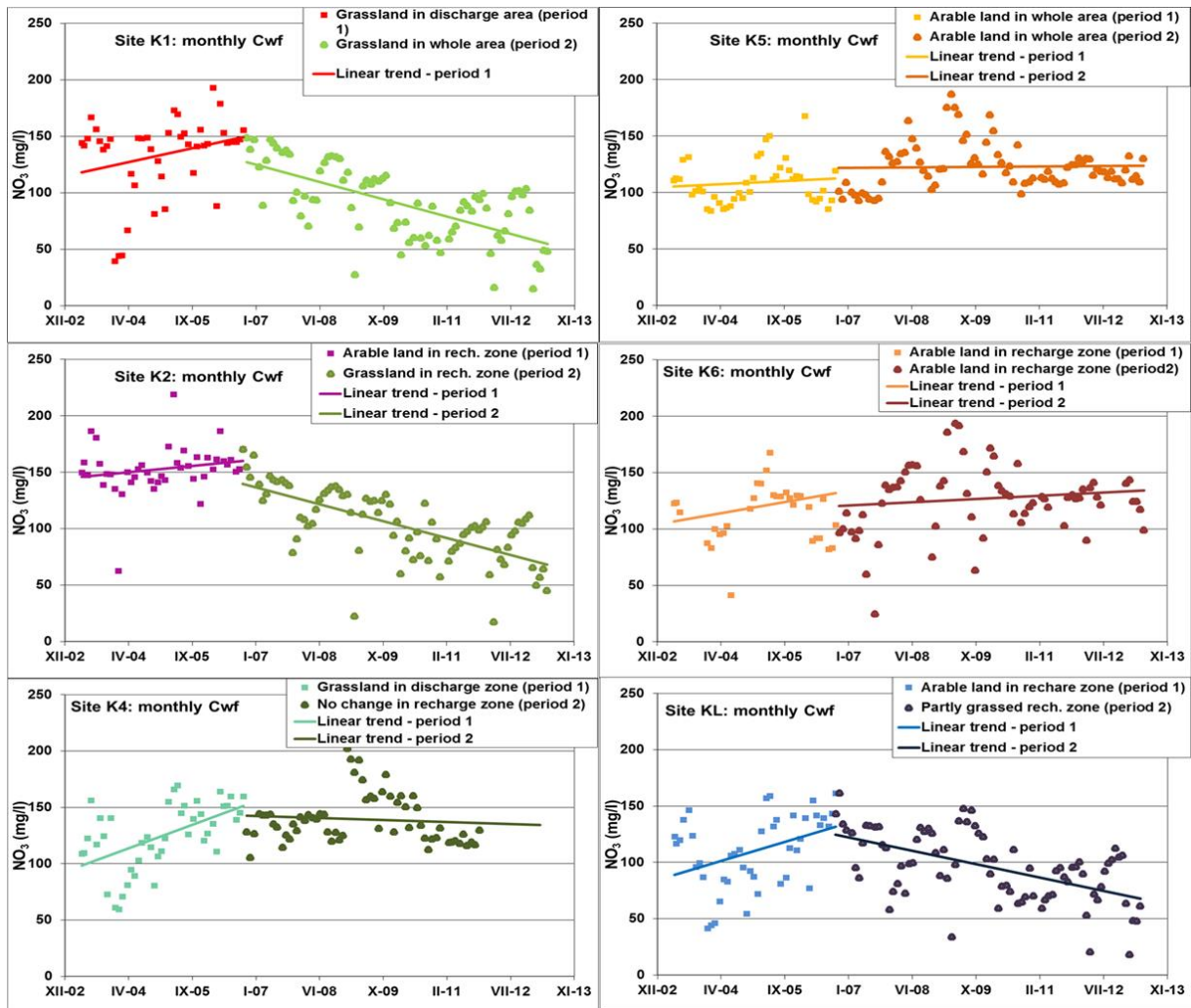
Graf 6: Průběh složení odtoku a koncentrací pesticidů a jejich metabolitů při epizodě zachycené 7. 6. 2017 na lokalitě Vepříkov

Diskuse a návrhy řešení

Jak vyplývá z výše uvedených výsledků, podpovrchové plošné zdroje zemědělského znečištění představují významné riziko pro jakost povrchových i podzemních vod, zejména z hlediska dusičnanového dusíku a někdy i fosforu. Drenážní systémy zároveň představují významný zdroj vyplavování metabolitů i mateřských látek. Za běžných a nízkých průtoků se v drenážních vodách vyskytují téměř výhradně metabolity. Vyplavování mateřských látek je téměř výhradně spjato se srážko – odtokovými epizodami. Podmínkou k vyplavování je epizoda krátce po jejich aplikaci a přítomnost „nové“ vody v odtoku. Pokud nastane větší SOE s významným podílem „nové“ vody, koncentrace mateřských látek může být až ve statisících ng/l, odnos v desítkách g za den.

Problémy podpovrchovými zdroji znečištění vod jsou jen obtížně řešitelné agrotechnickými opatřeními. Proto v současné době probíhají práce na návrzích technických a přírodě blízkých opatření, která by významně snížila riziko znečištění vodních zdrojů podpovrchovým odtokem. Lokality vhodné pro návrhy těchto opatření jsou vybírány na základě analýzy území ohroženosti podpovrchovým plošným zemědělským znečištěním. Ohroženost lokalit podpovrchovým plošným znečištěním byla stanovena metodou Souhrnného indexu potřebnosti opatření (SIPO). Metoda byla vyvinuta v rámci řešení zakázek povodí Vltavy, státní podnik („Přírodě blízká a technická opatření na zemědělské půdě v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce“ a „Příprava listů opatření typu A“). Index kombinuje negativní charakteristiky území z hlediska jakosti vod (jako jsou podíl orné půdy, podíl odvodněných ploch, podíl půd s nízkou retencí pro vodu a živiny) s charakteristikami pozitivními (podíl vodních ploch, podíl zatravněných půd s nízkou retencí pro vodu a živiny). V nejvíce ohrožených lokalitách jsou potom navrhována opatření. Vlastní opatření jsou vybírána ze vzorového katalogu opatření.

Mezi nejúčinnější opatření na snížení vyplavování zejména dusičnanů a mateřských látek pesticidů patří zatravnění infiltrační (zdrojové oblasti drenážního systému). Zdrojové oblasti jsou části povodí, kde do povodí infiltrují srážky, které mohou být využity pro doplnění regionální zvodně. Z tohoto důvodu se také často pro tyto lokality používá termín „infiltrační“ oblast. Obecně se zdrojové oblasti nacházejí v horních partiích území (zejména tam, kde není povrchový odtok) poblíž rozvodnice, kde jsou také mělké a kamenité půdy s nízkou retencí pro vodu a velkou hodnotou nasycené hydraulické vodivosti, převážně vyšší než 1m/den). V rámci poloprovazního pokusu byla účinnost tohoto opatření testována na pokusné lokalitě Dehtáře (obr. 2). Statistická analýza dat vývoje koncentrací dusičnanů měřených na drenážních subpovodích s různým využitím půdy před a po odvodnění prokázala pokles mediánu koncentrací v období po zatravnění o 26 - 32 % na subpovodích, jejichž zdrojová oblast byla zatravněna celá. V rámci celé drenážní skupiny (zatravněno 20 % zdrojové oblasti) byl zaznamenán pokles mediánu koncentrací o 11 %. Za stejné období bylo zaznamenáno také snížení odnosu dusičnanového dusíku o 23 %. Tyto výsledky mohou být zevšeobecněny na svažitá zemědělská povodí s podložím krystalických hornin. Tyto výsledky jsou prezentovány v grafu 7.



Graf 7: Změna koncentrací dusičnanů na sledovaných měrných profilech na plošné systematické drenáži s různým využitím půdy v období před zatravněním části zdrojové oblasti (period 1) a po zatravněním části zdrojové oblasti (period 2)

Vzhledem k nutnosti zachovat zemědělskou výrobu a nejasným účinkům agrotechnických opatření (Zajíček et al., 2017) jsou pro eliminaci vyplavování znečišťujících látek drenážními systémy vhodná následní opatření, jako umělé mokřady, retenční nádrže a drenážní biofiltry. Často jsou vhodná do lokalit, ve kterých je podstatná část pesticidů odnášena odtokem podpovrchovým, reprezentovaným zejména drenážními systémy. Jako následná opatření se však mohou uplatnit pro všechny cesty odtoku.

Umělé mokřady se v mnoha zemích staly nejčastěji používaným opatřením pro redukcí pesticidů pocházejících z plošných zemědělských zdrojů (Vymazal a Březinová, 2015) v podpovrchovém (drenážním) odtoku. Nejčastěji se používají mokřady s volnou hladinou vertikální i horizontální, méně časté jsou mokřady podpovrchové. Dosavadní studie prokázaly obecně vysokou účinnost umělých mokřadů pro odbourávání pesticidních látek, nicméně tato účinnost je značně variabilní pro různé látky. Odbourávání pesticidů v mokřadu probíhá prostřednictvím vícero různých procesů, jako jsou hydrolýza, fotolýza, sedimentace, adsorpce, mikrobiální degradace, příjem rostlinami, nicméně rozsah těchto procesů závisí na lokálních podmínkách daného mokřadu. Přítomnost mokřadní vegetace posiluje retenci

pesticidu. Největší účinnost mokřadů byla prokázána pro organo-chlorované pesticidy, organo-fosfáty, Pyrethroid a Strobilin, naopak nejnižší pro Triaziny a deriváty kyseliny močové. Odbourávání pesticidu obecně roste s rostoucí hodnotou adsorpčního koeficientu (K_{oc}), nicméně tato závislost není lineární a příliš silná. V podmínkách České republiky je praktické užití tohoto opatření zatím ve stádiu pokusu. Příklad umělého mokřadu založeného pro pokusné účely v lokalitě Velký Rybník je uveden v obr. 4.



Obr. 4. Pohled na nově založený pokusný umělý mokřad (čerstvě zasazené rostliny)

V lokalitách, kde drenážní odtok není příliš velký, lze uvažovat o využití drenážního biofiltru. Principem je, že znečištěná drenážní voda pomalu prochází přes filtr s organickou náplní popř. aktivním uhlíkem a pesticidy jsou touto náplní sorbovány. Účinnost opatření je závislá na době zdržení, jakou se podaří v reaktoru zajistit. Výhodou opatření je malá prostorová náročnost, umístění pod povrchem půdy a relativně nízké náklady na vybudování. Nevýhodou je naopak malá účinnost při vyšších průtocích a také nedostatek praktických zkušeností s odbouráváním pesticidů. Vysoká účinnost byla zatím prokázána pouze v případě dusičnanů. Příklad jednoduchého biofiltru na pokusné lokalitě Černičí je uveden na obr. 5.



Obr. 5. Drenážní biofiltr na pokusné lokalitě Černičí

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory výzkumného záměru MZE-RO0218.

Literatura

BOMANS E., FRANSEN K., GOBIN A., MERTENS J., MICHIELS P., VANDENDRIESSCHE H., VOGELS N. 2005. Addressing phosphorus related problems in farm practice. Final report to the European Commission.

BROWN, C.; VAN BEINUM, W. (2009): Pesticide transport via sub-surface drains in Europe. *Environmental Pollution*, 157: 3314–3324.

CÍSLEROVÁ, M. 2003, Preferenční proudění ve vadózní zóně a formování hydrogramu odtoku. In: *Hydrologie půdy v malém povodí*, Praha, ÚH AV ČR, 2003, 103-109.

DOLEŽAL, F.; KVÍTEK T. 2004. The role of recharge zones, discharge zones, springs and tile drainage systems in peneplains of Central European highlands with regard to water quality generation processes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 775–785.

DUFFKOVÁ, R., ZAJÍČEK, A., FUČÍK, P. 2014. Vyplavení dusíku a fosforu z malých zemědělských odvodněných povodí s aplikací různých hnojiv. *Vodní hospodářství* 62 (12): 1-6.

DUŠEK J., VOGEL T., ŠANDA M. 2012. Hillslope hydrograph analysis using synthetic and natural oxygen-18 signatures. *Journal of Hydrology*, 475 (19), p. 415-427.

FAUSER, P., THOMSEN, M., SØRENSEN, P. B., PETERSEN, S. 2008. Predicted concentrations for pesticides in drainage dominated catchments. *Water, Air, and Soil Pollution* 187 (1-4), pp. 149-156.

FUČÍK, P., ZAJÍČEK, A., DUFFKOVÁ, R., KVÍTEK, T. 2015. Water Quality of Agricultural Drainage Systems in the Czech Republic — Options for Its Improvement. In book: *Water Quality*. Edited by Prof. Teang Shui Lee. InTech Publishing. ISBN 978-953-51-4129-7.

FUČÍK, P., ZAJÍČEK, KAPLICKÁ, M., DUFFKOVÁ, R., PETERKOVÁ, J., MAXOVÁ, J., TAKÁČOVÁ, Š. 2017. Incorporating rainfall-runoff events into nitrate-nitrogen and phosphorus load assessments for small tile-drained catchments. *Water*, 9, 712-785.

GÄCHTER R., STEINGRUBER S.M., REINHARDT M., WEHRLI B. 2010. Nutrient transfer from soil to surface waters: Differences between nitrate and phosphate. *Aquat Sci*, 66: 117 – 122.

HEATHWAITE, A. L., HAYGARTH, P. M., MATTHEWS, R., PREEDY, N., BUTLER, P. 2005. Evaluating colloidal phosphorus delivery to surface waters from diffuse agricultural sources. *Journal of Environmental Quality*, 34(1), 287–298.

HERRMANN, A.; DUNCKER, D. 2008. Runoff Formation in a Tile-drained Agricultural Basin of the Harz Mountain Foreland, Northern Germany. *Soil & Water Res.*, 3, 83–97.

HRNČÍŘ, M., ŠANDA, M., KULASOVÁ, A. AND CÍSLEROVÁ, M. 2010. Runoff formation in a small catchment at hillslope and catchment scales. *Hydrological Processes* 24 (16): 2248 – 2256. doi: 10.1002/hyp.7614.

JŮVA, K. *Odvodňování půdy*. 1957 Praha, 526 s.

KLADIVKO, E. J.; BROWN, L. C.; BAKER, J. L. (2001): Pesticide Transport to Subsurface Tile Drains in Humid Regions of North America, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 31:1:1-62, DOI: 10.1080/20016491089163.

- KRISHNAPPAN, B. G., MARSALEK, J. 2002. Modelling of flocculation and transport of cohesive sediment from an on-stream stormwater detention pond *Water Research* **36** (15): 3849-3859.
- KULHAVÝ, Z a kol. Zemědělské odvodnění drenáží. Racionalizace využívání, údržby a oprav. *Uplatněná metodika. VÚMOP, v.v.i., Praha, 2007. ISBN 978-80-254-0672-4.*
- KULHAVÝ, Z., FUČÍK, P., 2015- Adaptation Options for Land Drainage Systems towards Sustainable Agriculture and the Environment: A Czech Perspective. *Polish journal of environmental studies* **24**(3): 1085-1102.
- LEFRANCQ, M.; JADAS-HÉCART, A.; LA JEUNESSE, I.; LANDRY, D.; PAYRAUDEA, S. (2017): High frequency monitoring of pesticides in runoff water to improve understanding of their transport and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 587–588, 75–86.
- MADISON A.M., RUARK M.D., STUNTEBECK T.D., KOMISKEY M.J., GOOD L.W., DRUMMY N., COOLEY E.T. 2014. Characterizing phosphorus dynamics in tile-drained agricultural fields of eastern Wisconsin. *Journal of Hydrology*, 519: 892-901.
- MULLER, K.; DEURER, M.; HARTMAN, H.; BACH, M.; SPITELLER, M.; FREDE, H. G. (2003): Hydrological characterisation of pesticide loads using hydrograph separation at different scales in a German catchment. *Journal of Hydrology*, 273, 1-17.
- NOVOTNY, V. 2009. Kvetení sinic a hypertrofie vodních nádrží se zvláštním zřetelem na řeku Želivku. *Vodní hospodářství. Mimo pravidelná čísla.*
- REID D.K., BALL B., ZHANG T.Q. 2012. Accounting for the Risks of Phosphorus Losses through Tile Drains in a Phosphorus Index. *J Environ Qual*, 41 (6): 1720 – 1729.
- RŮŽEK, P., KLÍR, J. 1995. Hnojení dusíkem se zřetelem na ochranu životního prostředí. *Úroda*, **10**: 26–27.
- ŠANDA, M., KULASOVÁ, A., CÍSLEROVÁ, M. 2009. Hydrological processes in the subsurface investigated by water isotopes and silica. *Soil and Water Research* **4** (SPECIAL ISSUE 2): 83-92.
- ŠANDA, M., VITVAR, T., KULASOVÁ, A., JANKOVEC, J., CÍSLEROVÁ, M. 2013. Run-off formation in a humid, temperate headwater catchment using a combined hydrological, hydrochemical and isotopic approach (Jizera Mountains, Czech Republic). *Hydrological Processes* **28** (8), 3217-3229.
- ŠVIHLA, V. 1985. Vliv odvodnění na hydrologickou bilanci v malém povodí, *Meliorace*, **21**: 81-94.
- TESAŘ, M., ŠÍR, M. 1995. Metodika studia vlivu plošného odvodnění na pohyb dusíku v půdě s aplikací modelu ANIMO. *Stavební obzor*, **8**: 247 - 250.
- TLAPÁK, V., PRUDIL, S. 1983. Frekvence drenáže ve vztahu k podpovrchové vodě. *Meliorace*, **19** (2): 81-86.
- ULÉN B., DJODJIC F., ETANA A., JOHANSSON G., LINDSTRÖM J. 2011. The need for an improved risk index for phosphorus losses to water from tile-drained agricultural land. *Journal of Hydrology*, 400: 234–243.
- VYMAZAL, J., BŘEZINOVÁ, T. (2015): The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: A review. *Environment International*, 75, 11 – 20. DOI: 10.1016/j.envint.2014.10.026.

ZAJÍČEK A., DUFFKOVÁ R., FUČÍK P., HABERLE J., LIŠKA M., KAPLICKÁ, M. (2017): Technologie šetrné aplikace pesticidů v odvodněných zemědělských povodích. Ověřená technologie. VÚMOP v.v.i., 40 s. ISBN: 978-80-87361-79-5

ZAJÍČEK A., FUČÍK P., KAPLICKÁ M., LIŠKA M., MAXOVÁ, J., DOBIÁŠ J. (2018): Pesticide leaching by agricultural drainage in sloping, mid-textured soil conditions – the role of runoff components. *Water Science and Technology*, 77(7-8): 1879-1890. doi: 10.2166/wst.2018.068.

ZAJÍČEK A., FUČÍK P., KAPLICKÁ, M., MAXOVÁ, J. (2017): Vyplavování pesticidních látek zemědělskou drenáží. *Rostlinolékař* 4 (2017), 24 – 28.

ZAJÍČEK, A., KAPLICKÁ, M., FUČÍK, P., PETERKOVÁ, J., DUFFKOVÁ, R., MAXOVÁ, J. 2017. Vyhodnocení podílu srážko-odtokových epizod na celkovém odnosu dusíku a fosforu z odvodněné zemědělské půdy. *Vodní hospodářství* 67(10), 1 – 6.

ZAJÍČEK, A., KVÍTEK, T., KAPLICKÁ, M. 2009. Teplota drenážní vody jako indikátor formování odtoku. *Vodní Hospodářství*, 59 (9): 372 – 376.

ZAJÍČEK, A.; POMIJE, T.; KVÍTEK, T. (2016): Event water detection in tile drainage runoff using stable isotopes and a water temperature in small agricultural catchment in Bohemian-Moravian Highlands, Czech Republic. *Environ Earth Sci*, 75, 838. DOI 10.1007/s12665-016-5561-1.