

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

SNIŽOVÁNÍ ZÁTĚŽE POVRCHOVÝCH VOD ZDROJI PLOŠNÉHO ZEMĚDĚLSKÉHO ZNEČIŠTĚNÍ PŘI UPLATNĚNÍ REGULACE DRENÁŽNÍHO ODTOKU

Zbyněk Kulhavý

Petr Fučík

Igor Pelíšek

Svatopluk Matula

Kamila Bátková

Markéta Miháliková

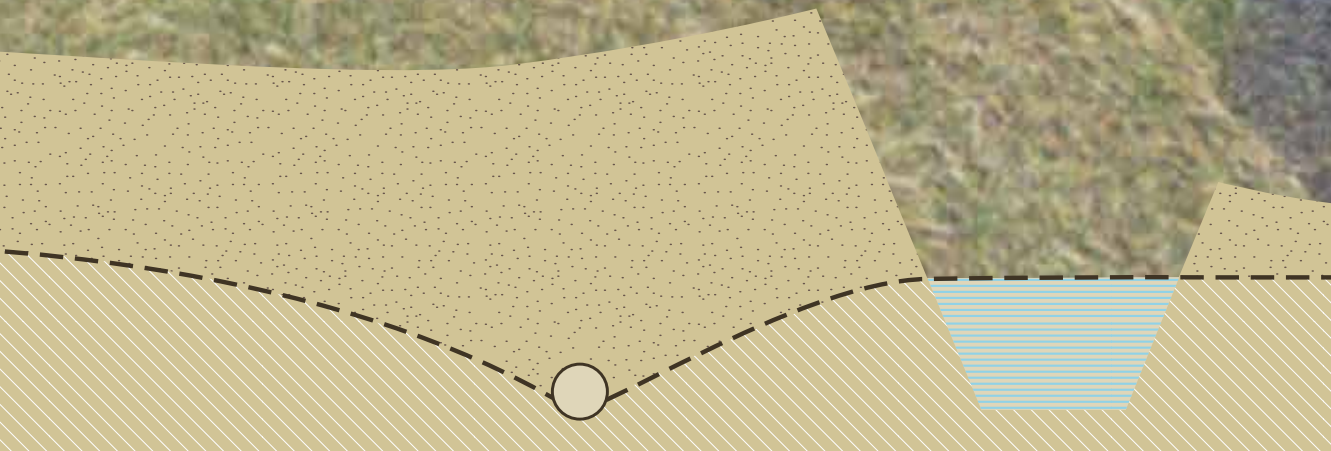
Milada Šťastná

Jana Kozlovsky Dufková

Petra Oppeltová

Tomáš Mašíček

Jaroslav Jakoubek



Snížení zátěže povrchových vod zdroji plošného zemědělského znečištění při uplatnění regulace drenážního odtoku na stavbách zemědělského odvodnění

Zpracovali:

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

Žabovřeská 250, 150 00 Praha 5 – Zbraslav

(podíl 40 %, řízení týmu zpracovatelů)

Z. Kulhavý

P. Fučík

I. Pelíšek



**Výzkumný ústav meliorací
a ochrany půdy, v.v.i.**

Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, katedra vodních zdrojů

Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchdol

(podíl 25 %, kapitoly 2.3.2, 2.5)

S. Matula

K. Bátková

M. Miháliková



Mendelova univerzita v Brně, Ústav aplikované a krajinné ekologie

Zemědělská 1, 613 00 Brno

(podíl 30 %, kapitoly 2.1.1, 2.5, 2.5.1)

M. Šťastná

J. Kozlovsky Dufková

P. Opelťová

T. Mašíček



Agroprojekce Litomyšl, spol. s r.o.

Rokycanova 114, 566 01 Vysoké Mýto

(podíl 5 %, kapitoly 2.2.4, 2.3.4)

J. Jakoubek



Citace:

Kulhavý Z., Fučík P., Pelíšek I., Matula S., Bářková K., Miháliková M., Šťastná M., Kozlovsky Dufková J., Oppeltová P., Mašíček T., Jakoubek J. (2023): Snižování zátěže povrchových vod zdroji plošného zemědělského znečištění při uplatnění regulace drenážního odtoku na stavbách zemědělského odvodnění. Certifikovaná metodika. 93 str., ISBN 978-80-88323-83-9 (tištěná verze), 978-80-88323-84-6 (online pdf), osvědčení č. MZE-646/2024-15113

Oponovali:

prof. Ing. Ľuboš Jurík, PhD. – Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre (SK), Ústav krajinného inžinierstva (FZKI), Trieda Andreja Hlinku 2, 949 76 Nitra

prof. Ing. Tomáš Kvítek, CSc. – Povodí Vltavy, státní podnik, Holečkova 3178/8, 150 00 Praha 5 – Smíchov

Ing. František Pavlík, Ph.D. – Státní pozemkový úřad, Odbor půdní služby, Husinecká 1024/11a, 130 00 Praha 3 – Žižkov

Poděkování:

Certifikovaná metodika vznikla jako plánovaný výstup projektu QK1910086 s názvem „Snižování zátěže povrchových vod zdroji plošného zemědělského znečištění při uplatnění regulace drenážního odtoku na stávajících stavbách zemědělského odvodnění“ v rámci Programu aplikovaného výzkumu Ministerstva zemědělství na období 2017-2025 – ZEMĚ, řešeného v letech 2019-2023.

Děkujeme paní Michaele Tiché za práci v terénu spojenou s odběry vzorků drenážních vod a vyhodnocování sledovaných ukazatelů kvality vod v laboratoři v počátečních fázích projektu, Ing. Milanu Čmelíkovi a Lukáši Krejzkovi za zabezpečení provozu modelových ploch včetně přístrojového vybavení a za realizaci odběrů a transportu vod do laboratoře. Dále děkujeme Ing. Janě Maxové za administrativní podporu související s řešením projektu.

Poděkování si zaslouží také doc. Ing. Jakub Štibinger, CSc., který se podílel na řešení konzultacemi efektů hydromelioračních opatření a přístupů ke zpracování datových řad a Ing. Václav David, Ph.D. za uplatnění technik dálkového průzkumu Země, oba z ČZU v Praze.

Rádi bychom také poděkovali Ing. Michalu Krátkému z podniku Povodí Vltavy, státní podnik, který inicioval toto téma v návaznosti na v r. 2019 dokončený projekt „Příprava listů opatření typu A lokalit plošného zemědělského znečištění pro plány dílčích povodí (2015–2019)“, zadaný a financovaný Povodím Vltavy, státním podnikem.

Zejména děkujeme oponentům za pečlivé posouzení čístopisu a za jejich podporu zpracovanému tématu, které vyústilo k certifikaci metodiky a distribuci do praxe.

Metodiku schválilo pro využití v praxi Ministerstvo zemědělství ČR, osvědčením čj. MZE-646/2024-15113.

V roce 2023 vyšlo v nákladu 300 ks

Tisk: Powerprint, s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6,

Vydání: první, 2023

ISBN 978-80-88323-83-9 (tištěná verze), 978-80-88323-84-6 (online pdf)

© VÚMOP, v.v.i. – ČZU v Praze – Mendelova univerzita v Brně – Agroprojekce s.r.o.

OBSAH

1. Cíl metodiky	6
2. Vlastní popis metodiky	7
2.1 Přehled poznatků o souvislostech regulace množství a jakosti vod	7
2.1.1 Charakteristika procesů tvorby jakosti drenážních vod	9
2.1.2 Rešerše zahraničních pramenů	11
2.1.2.1 Efekty regulace drenážního odtoku na jakost vod	12
2.1.2.2 Efekty regulace drenážního odtoku na výnosy plodin	13
2.1.2.3 Závěry srovnání tradičního odvodňovacího systému a systému s regulací odtoku	14
2.1.3 Zásady uvedené v normách a principech státní podpory	16
2.2 Přehled způsobů řešení úprav staveb zemědělského odvodnění	19
2.2.1 Kritéria vhodnosti stavby k modernizaci	19
2.2.2 Hlavní typologie regulačních prvků vhodných pro tento typ staveb	24
2.2.3 Zásady manipulace na stavbách odvodnění	28
2.2.4 Specifika manipulačního řádu staveb s regulací odtoku	30
2.2.5 Možnosti biotechnických opatření pro zlepšování jakosti drenážních vod	33
2.3 Popis vhodných přírodních a technických podmínek k regulaci	35
2.3.1 Stanovení indexu DR – plošného dosahu regulace	35
2.3.2 Hydropedologické podklady	36
2.3.3 Funkce makropórů a erozivita půdy při uplatnění drenážního podmoku	42
2.3.4 Vliv intenzity kapilárního vztlínání	48
2.3.5 Hydrogeologický aspekt regulace staveb odvodnění	50
2.3.6 Hydraulika drenážního potrubí	52
2.4 Výpočtové nástroje pro kvantifikaci efektu regulace	57
2.4.1 Model REGULACE	59
2.4.2 Model JAKOST	60
2.5 Shrnutí poznatků výzkumu realizovaného na modelových lokalitách projektu	68
2.5.1 Souhrn hlavních poznatků z oblasti jakosti drenážních vod, odvozených z experimentů na modelových plochách projektu	72
2.5.2 Poznátky ze stavby regulační drenáže v Uherčicích	76
2.5.3 Analýza četnosti dosažených úrovní řízené hladiny v drenážním systému	82

3. Srovnání novosti postupů.	84
4. Popis uplatnění metodiky.	86
5. Ekonomické aspekty	88
6. Závěr	90
7. Seznam publikací, které předcházely metodice	92
8. Seznam použitých podkladů	98
9. Abstrakt (český jazyk, anglický jazyk)	111

1. Cíl metodiky

Cílem metodiky je shrnutí poznatků o vlivu regulace drenážního odtoku na retenci a akumulaci vod a zejména na zlepšení jakosti vod recipientů těchto staveb, zaměřené na využití v oblasti zemědělství a vodního hospodářství. Metodika poskytuje návody na kvantifikaci efektů aplikace různých metod řízení drenážního odtoku v podmínkách ČR, na způsoby pořízení vstupních podkladů o přírodních podmínkách lokality, na technické způsoby úprav (modernizací¹) stávajících staveb zemědělského odvodnění a na provozní podmínky regulace.

¹ Modernizace je změnou dokončené stavby, která zajišťuje přizpůsobení stavby nejnovějším potřebám a požadavkům na ní. Ve výstavbě představuje stavební zásahy, které odstraňují morální opotřebení staveb, při kterých se může měnit hmotová a prostorová skladba a účel stavby. Znamená zlepšení původního stavu podle současných požadavků na kvalitu, zvýšení vybavenosti, zlepšení funkčních a užitkových vlastností stavby. Při modernizaci se používají nová technická, technologická a materiálová řešení, odpovídající současnému stupni poznání a technického rozvoje. V teorii inovací představuje modernizace pátý stupeň inovace.

2. Vlastní popis metodiky

2.1 Přehled poznatků o souvislostech regulace množství a jakosti vod

Vybudování jednofunkčního drenážního systému způsobuje snížení hladiny podzemní vody, zkracuje období, po které je půda v zimě převlhčená, snižuje v aerobních podmínkách denitrifikaci, zvyšuje mineralizaci půdní organické hmoty a vyplavování dusičnanů.

Pokud zemědělské hospodaření s dusíkatými látkami nemůže zajistit uspokojivé snížení látkových odnosů, resp. koncentrací nitrátů ve vodách, a to ani za přispění všech prostředků dostupných v polních podmínkách (např. střídání plodin, krycí plodiny, aplikace hnojiv s využitím nejlepších postupů řízení, obdělávání půdy), je třeba uvažovat o alternativních strategiích k odstranění NO_3 z podpovrchového odvodnění a/nebo povrchové vody. Metody odstraňování NO_3 zahrnují výměnu iontů, biologickou denitrifikaci a asimilaci, chemickou denitrifikaci, reverzní osmózu, elektrodialýzu, katalytickou denitrifikaci (Kapoor a Viraraghavan 1997) a další. V zemědělských oblastech a povodích se však jako nejvhodnější metoda pro odstraňování NO_3 z podpovrchové drenáže jeví obvykle biologická denitrifikace a asimilace. K těmto procesům přispívá i omezení odtoku drenážních vod uplatněním principů regulace, kdy jednak drenážní vody vůbec z drenážního systému do recipientu neodtékají, resp. drenážní odtok je transformován do akumulace v půdním profilu a do svahového podpovrchového odtoku, tudíž do jeho výrazného zpoždění, což kromě zvýšení zásob vody v povodí umožňuje uplatnění výše zmíněných procesů souvisejících s jakostí vod. Ve vodném období jsou pak přebytky nadále odváděny do recipientu, tehdy však dochází k naředění s dalšími vodami odtékajícími z povodí ostatními cestami odtoku.

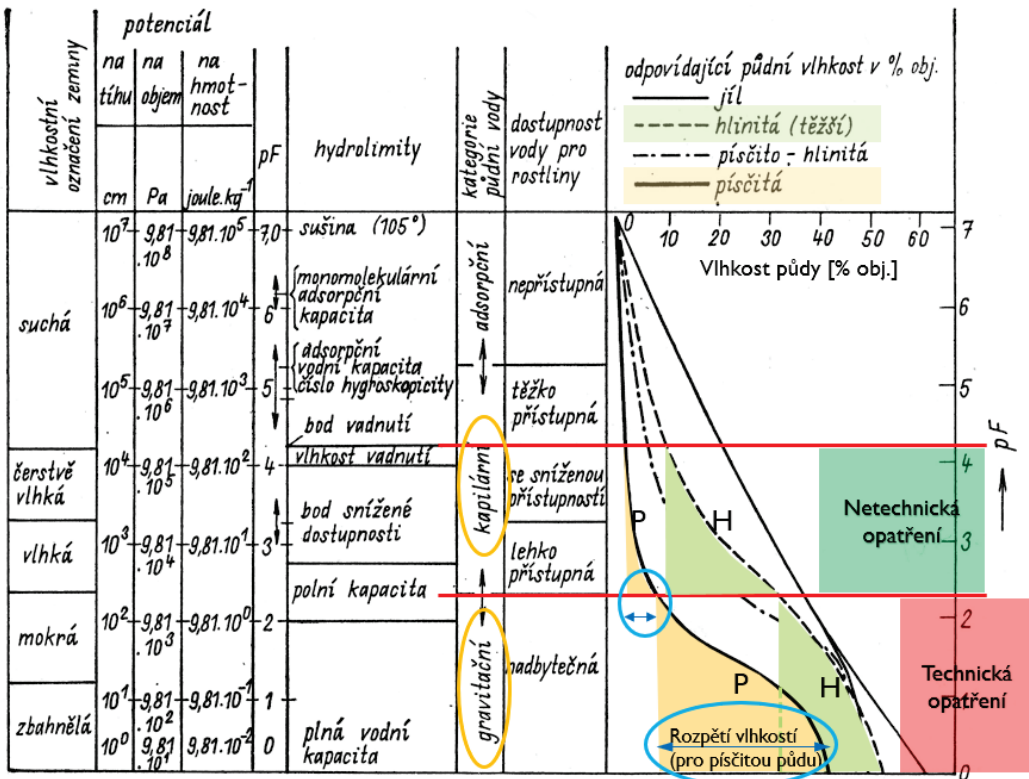
Snahu o víceúčelové využití drenážních soustav lze registrovat již ve druhé polovině 19. století například v podobě Petersonovy drenáže (1860, Šlesvicke), nebo drenážního podmoku podle Krauze, podle Wichully apod. – viz (Kulhavý F., Kulhavý Z. 2008). Velmi intenzivně pak byla drenážní regulace vyvíjena a testována v 70. letech 20. století na řadě lokalit a zařízeních v Čechách, na Moravě i Slovensku (Starý Kolín, Kolesa-Vápno, Živanice, Podivín, Bohdaneč, Bulhary-Přítluky, Uherčice, Michalovce, Pavčina Lehota, Malé Leváre a další). Po roce 1990 však výstavba regulovaných odvodňovacích systémů ustala společně s celkovým útlumem melioračních aktivit u nás.

Ve vhodných stanovištních podmínkách, především v mírně svažitých lokalitách, je z vodohospodářského hlediska vhodné zajistit retardaci (zpomalení) odtoku srážkové i podzemní vody. Principy a různé varianty technického provedení jsou popsány například v TNV 75 4221 nebo také v Kapitole 2.2 této metodiky. Například se podle systému podzemní retardace drenážního odtoku (PRO) instalují speciální regulační prvky přímo na drenáži, prvky jsou 333 mm dlouhé, takže jsou zaměnitelné za vyjmutou drenážní trubku

z pálené hlíny. Jiný způsob regulace odtoku spočívá v instalaci regulačních prvků do šachtic, které umožňují manipulaci s výškou hladiny podzemní vody (HPV), a tím mohou ovlivňovat zadržení vody v půdním profilu (viz Obr. 2.1.1), její převody do jiných míst využití atd.

Oproti tomu, regulační drenáž (RD) disponuje kromě vody vlastní také vodou „cizí“, která může představovat v optimálním případě gravitační přítok jakékoli vody z výše položených stanovišť – tedy vodu povrchovou, vodu z jiné drenážní skupiny nebo z vhodného vodního zdroje. Přívod vody může být zajištěn také čerpáním. Regulační drenáž je uspořádána jako ovladatelný systém drénů, který umožňuje regulaci úrovně hladiny podzemní vody. Regulační drenáž se využívá ve fázi odvodňovací, zavlažovací nebo udržovací. Je-li půda zamokřená nadbytkem vody, uplatňuje se fáze odvodňovací a voda se odvodňovacím systémem odvádí do recipientu. Při zavlažovací fázi se drény naplňují vodou přiváděnou závlahovým přiváděčem a potrubími při současném uzavřeném odtoku. Tím je vyvolán hydraulický gradient, umožňující infiltraci vody z drénů (spárami či perforací) do půdy.

Pro zavlažovanou plochu je třeba zajistit dostatečný zdroj vody, kterým může být vodní tok nebo vodní nádrž. Podrobná drenážní síť je tvořena drény sběrnými (zavlažovacími) a svodnými (rozváděcími), v síti jsou také rozmístěny speciální objekty jako náпустný a výпустný objekt, regulační a kontrolní šachtice, příp. čerpací stanice (viz TNV 75 4221).



Obr. 2.1.1 Porovnání efektů řízené retence vody v půdě na příkladu pF-čar vlhkosti Využito ČB podkladu Kutílek M., 1978

Odhaduje se (Fučík a kol. 2021), že klasickou drenáž lze na drenáž regulační (tj. s funkcí podpovrchové závlahy) přebudovat na zhruba 150 tis. ha odvodněných půd v ČR (podmínkou je sklon pozemku do 1 %) a na cca 450 tis. ha odvodněné půdy lze odtok regulovat (sklon do 5 %).

2.1.1 Charakteristika procesů tvorby jakosti drenážních vod

Podpovrchové drenážní odvodnění zemědělských půd je v různých částech světa široce rozšířeno na produktivních zemědělských pozemcích. Původním účelem odvodnění byla a je optimalizace vodního režimu zemědělských půd, zlepšení, resp. homogenizace časoprostorových podmínek pro zemědělské zpracování půdy a zvýšení, resp. stabilizace výnosů plodin (Kulhavý F. a Kulhavý Z. 2008; Lennartz et al. 2011; Vašků a kol. 2011). Vliv jednofunkčního drenážního odvodnění (v angličtině free drainage – FD) na jakost vod lze popsat z dlouhodobého a také krátkodobého (epizodního) hlediska. Obecně procesy tvorby jakosti drenážních vod souvisejí jednak s původem a cestami přítoku vody do drenáží, počasím, dále s fyzikálně chemickými vlastnostmi půdního prostředí a látek vyplavovaných do vod a způsobem využití odvodněného a hydrologicky souvisejícího pozemku (Doležal and Kvítek, 2004; Fučík et al. 2015; Gramlich et al. 2018; Opeltová et al. 2022). V rovinatých podmínkách je podpovrchovou drenáží odváděna mělká podzemní voda přímo z odvodněného pozemku; ve svažitéjších polohách je původ drenážní vody často také mimo samotnou odvodněnou plochu; tj. v geomorfologicky výše situovaných částech svahu s propustnějšími půdami (Doležal and Kvítek, 2004), jejichž zemědělský management (louka / pícniny / okopaniny), díky konektivitě mělkých podpovrchových vod, zásadně ovlivňuje kvalitu vod drenážních (Fučík et al. 2015).

Fosfor (partikulovaný i rozpuštěný) je v drenážních vodách díky svým pevným vazbám a nižším obsahům ve fosforem průměrně zásobených až deficitních půdách ČR nacházen v běžných odtokových podmínkách obecně v nízkých koncentracích (medián P-PO₄ kolem 0,025 mg.l⁻¹; medián Ptot kolem 0,045 mg.l⁻¹) (Fiala a kol. 2013; Fučík et al. 2015; Zajíček a kol. 2019). Rovněž v zahraničí není zpravidla P v drenážních vodách považován za chronický problém (King et al. 2015). Odlišná situace může nastávat u odvodněných organozemí, kde odvodněním dochází k výrazné změně půdního redox potenciálu, v důsledku čehož může být P vyplavován ve vyšších koncentracích (Menberu et al. 2017). Rovněž během srážko-odtokových epizod, trvajících na drenážních systémech zpravidla desítky minut až jednotky hodin, však mohou koncentrace P krátkodobě narůst až stonásobně (Fučík et al. 2017; Gramlich et al. 2018; Nazari et al. 2020), když část drenážní vody mohla předtím téci povrchově (Michaud et al. 2019; Gaillot et al. 2023). V zahraničí, v zemích s intenzivně odvodněnými regiony a s vyššími aplikacemi fosforu v hnojivech (USA, Kanada, Spojené království, Dánsko, aj.), je epizodním odnosům fosforu drenážemi věnována značná pozornost, zejména ve vazbě na zpracování půdy a hnojení, půdní podmínky (zastoupení a aktivace makropórů) v souvislosti s počasím (Carstensen et al. 2020; Christianson et al. 2016; Nazari et al. 2020).

Dusík, zejména anorganický, je naopak drenážními systémy vyplavován trvale a intenzivně, což souvisí s jeho vysokou rozpustností ve vodě a nízkou afinitou k půdním částicím. Celosvětově se odhaduje, že ztráty NO_3 ze zemědělských systémů představují 19 % celkového množství celosvětově využívaného N (Lin et al. 2001). Vyplavování dusíku drenážemi souvisí jednak s mineralizací půdní organické hmoty, která trvale probíhá v aerobních podmínkách odvodněného půdního profilu, dále s hnojením minerálními hnojivy (resp. efektivitou jejich využití), způsobem využití půdy (louky, ozimy, jařiny mají různou vegetační dobu a různě čerpají dusík z půdy) a konečně s hydrologickými faktory drenáže (původ a cesty přítoku vody do drénů), opět ve vazbě na počasí (Doležal and Kvítek 2004; Fučík et al. 2015). U dusičnanového dusíku (který tvoří 95-99 % anorganického dusíku ve vodách zemědělských drenáží) se koncentrace v drenážích pod ornou půdou v ČR dle 30-ti letého kontinuálního monitoringu VÚMOP, v.v.i., pohybují v rozpětí 14 – 56 mg.l^{-1} ; průměrně kolem 25 mg.l^{-1} (tj. 60 – 250; resp. 110 mg.l^{-1} NO_3). Specifický látkový odnos dusíku drenážemi z orné půdy se pohybuje ve vazbě na vodnost drenážního systému v hodnotách 10 – 70 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, průměrně cca 30 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. V případě trvalých travních porostů je průměrná koncentrace NO_3 v drenážních vodách kolem 35 mg.l^{-1} (8 mg.l^{-1} N- NO_3); specifický látkový odnos je potom mezi 0,6 do 6,8 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ N- NO_3 (Kopáček a kol. 2013; Zajíček a kol. 2019).

Uhlík je do drenážních vod vyplavován a analyzován v rozpuštěné (dissolved organic carbon – DOC) a nerozpuštěné formě (particulate organic carbon – POC). POC je stanovován spolu s DOC jako total organic carbon (TOC). Hodnoty koncentrací DOC jsou v drenážních vodách v ČR, pocházejících z minerálních půd při běžných odtocích, nízké, s průměrem cca do 8 mg.l^{-1} . Vyšší hodnoty koncentrací DOC v drenážních vodách (až 20x) nastávají ve srážko-odtokových epizodách (Fučík – nepublikovaná data). Zcela jiná je situace u odvodněných organozemí. Zde rovněž dochází vlivem provzdušnění půdního profilu odvodněním k vyplavování organických látek a dále ke zvýšené půdní respiraci a produkci CO_2 (Urbanová et al. 2011). Čím zaklesnutější je mělká hladina podzemní vody v odvodněných organozemích, tím rozsáhlejší je provzdušnění a vyplavování uhlíku (Gibson et al. 2009; Tiemeyer et al. 2014). Koncentrace DOC v drenážních vodách z odvodněných organozemí pak mohou dosahovat hodnot 20 – 70 mg.l^{-1} , specifické látkové odnosy – ve vazbě na vodnost systémů potom 35–65 $\text{kg.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ (Tiemeyer et al. 2014; Turner et al. 2013; Williams et al. 2017).

Prostředky na ochranu rostlin (pesticidy). Koncentrace a látkové odnosy prostředků na ochranu rostlin (POR) v drenážních vodách mohou být poměrně významné, jak dokládají studie ze zahraničí i ČR (Gramlich et al. 2018; Lefrancq et al. 2017, Zajíček et al. 2018). Pro vyplavování pesticidů podpovrchovým odtokem jsou podstatné půdní charakteristiky, 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. 2012) a v případě krystalických hornin v podloží také trhliny a pukliny. Metabolity POR jsou v drenážním odtoku přítomny permanentně; mateřské (rodičovské) látky jsou naproti tomu vyplavovány výhradně během srážko-odtokových epizod (Zajíček et al. 2018). Rychlost, resp. intenzita preferenčního proudění

během srážko-odtokových epizod (SOE) může být natolik vysoká, že fyzikálně-chemické vlastnosti pesticidů ztrácejí z hlediska jejich vyplavování (resp. poutání v půdách) v těchto situacích význam. Zrychlený odtok (jakéhokoli typu) významně snižuje čas na reakci pesticidu s prostředím (sorpci nebo degradaci) a může vést k přímému a bezprostřednímu vyplavování mateřské látky do povrchových vod. Podrobné informace k tématu uvádí článek Zajíček a kol. (2019).

2.1.2 Rešerše zahraničních pramenů

Regulace drenážního odtoku, resp. řízení úrovně HPV, umožňuje reagovat na aktuální či déletrvající průběh počasí, k čemuž využívá retenční a akumulární potenciál půdních pórů – viz Obr. 2.1.1 (dokumentuje rozdílné role gravitačních a kapilárních půdních pórů). Přispívá k prodloužení doby zdržení vody v půdě (s efektem snížení zemědělského znečištění půdní, resp. drenážní vodou), a ve vhodných přírodních podmínkách umožňuje zvýšením intenzity vsaku do hlubších vrstev také zvětšení zásob podzemních vod prvních zvodní. Výzkumné práce na toto téma (USA, Kanada, Dánsko, Švédsko, Německo, Nizozemí, Polsko, Pobaltské země, Velká Británie, Itálie, Čína, Egypt, Blízký a střední východ, aj.) dokladují, že lze – ve vazbě na přírodní a zemědělské podmínky lokality – zvýšit pomocí regulace drenážního odtoku úroveň mělké hladiny podzemní vody o 20 – 70 cm, oddálit okamžik kulminace drenážního průtoku o 50 – 90 % a snížit celkový drenážní odtok o cca 15 – 40 %. Z hlediska zlepšení jakosti odtékající vody fungují mechanismy regulace staveb odvodnění zvýšením využití živin plodinami, snížením odtoku (a tudíž odnosu látek) a posílením samočisticích procesů v půdě (např. denitrifikace ve vodou nasyceném, anaerobním prostředí). V průměru je snížení látkového odnosu v drenážní vodě pro dusík dokladováno o 20 – 50 %, pro látkový odnos fosforu potom 30 – 50 % při zachování či mírném zvýšení výnosu plodin. Meliorační praxe výše uvedených států tyto systémy regulace odtoku zná, výzkumně rozvíjí a řadu let praktikuje (Bonaiti et al. 2010; Carstensen et al. 2019; Kaur et al. 2018; Poole et al. 2018; Povilaitis et al. 2018; Ross et al. 2016; Shedekar et al. 2021; Sojka et al. 2019; Sunohara et al. 2016; Wesström et al. 2014).

Optimalizace vláhových režimů půd pomocí regulace drenážního odtoku (RDO) vytváří předpoklad i pro efektivnější využití živin zemědělskými plodinami, které jsou pěstovány v rámci precizního zemědělství. Aplikace hnojiv v rámci precizního zemědělství je založena na plošné půdní heterogenitě a výnosovém potenciálu půdního bloku (Lukas a kol. 2018) a na základě toho jsou dávky hnojiv diferencovány. Při nedostatku půdní vláhy nemají náročné postupy variabilní aplikace hnojiv (zejména dusíkatých) v precizním zemědělství adekvátní pozitivní dopad na výnos a efektivitu využití živin porostem. Zvýšení vláhy kořenového balu pěstovaných plodin kapilárním vztláním z regulované hladiny první zvodně může zlepšit využití optimálně aplikovaných živin z hnojiv a zvýšit (stabilizovat) výnosy (Duffková a kol. 2019).

2.1.2.1 Efekty regulace drenážního odtoku na jakost vod (N a P)

Regulace drenážního odtoku různými metodami je řadou studií a experimentů, realizovaných v různých podmínkách a měřících, potvrzována jako efektivní z hlediska snížení drenážního odtoku a snížení látkového odnosu, popř. koncentrací látek dusíku a fosforu v drenážních vodách. Snížení látkových koncentrací je připisováno zvýšení doby zdržení vody vlivem regulace v půdě, dále zvýšení využití rozpuštěných látek plodinami (Helmers et al. 2022; Sunohara et al. 2016), popř. v případě $\text{NO}_3\text{-N}$ podpoře denitrifikace v půdě díky regulací nastoleným anaerobním podmínkám. Podrobná šetření však významnější denitrifikaci $\text{NO}_3\text{-N}$ při regulaci drenážního odtoku spolehlivě neprokazují (Carstensen et al. 2019; Wesström et al. 2014). Možnými důvody jsou nedostatečné podmínky pro denitrifikaci v regulaci ovlivněných, nižších půdních horizontech (absence vhodných organických látek a denitrifikačních bakterií, nízká teplota v nevegetační sezoně, popř. nedostatečné anaerobní podmínky; Lavaire et al. 2017; Saadat et al. 2018; Williams et al. 2015). Vliv regulace drenážního odtoku na koncentrace fosforu v drenážích, což je problém v některých zahraničních zemích, nikoli ČR, je zjišťován často neprůkazný. Výjimkou ve variantě s regulací není zvyšování koncentrací jak celkového, tak rozpuštěného reaktivního fosforu, mimo jiné vtokem vody z povrchového či mělkého podpovrchového odtoku do drenáže z lokalit bohatých na fosfor vlivem přehnojování či eroze půdy či remobilizace rozpustných forem fosforu ve vodou nasycených půdách se sníženým redox potenciálem (Saadat et al. 2018; Wesström et al. 2014; King et al. 2022).

Jako zásadní – a na tomto poznatku je jednoznačná shoda mezi zpracovými studii – je na snížení zátěže drenážních vod, přesněji látkových odnosů, uváděn efekt snížení drenážního odtoku prostřednictvím jeho regulace. Pro $\text{NO}_3\text{-N}$ je průměrné snížení látkového odnosu z drenáže s kontrolovaným odtokem vůči tradiční drenáži reportováno v rozsahu 10–75 % (tj. přibližně snížení o 3 až 22 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ $\text{NO}_3\text{-N}$), ve vazbě na meteorologické, půdní, pěšební a další podmínky (Bonaiti et al. 2010; Carstensen et al. 2019; Helmers et al. 2022; Kesicka et al. 2023; Poole et al. 2018; King et al. 2022; Wesström et al. 2014). Látkové odnosy P z drenáže jsou regulací drenážního odtoku ovlivněny v rozpětí: -5 až +40 % (tj. zvýšení /znaménko -/ resp. snížení /znaménko +/ kolem -10 až 60 $\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ P; Carstensen et al. 2019; Sunohara et al. 2016; Wesström et al. 2014).

Srovnáním účinnosti tradičních a regulačních drenáží se zabývalo několik studií. Už výzkumy ze 70. let minulého století (např. Baker et al. 1975; Gambrell et al. 1975) analyzovaly vliv drenáží na jakost povrchových vod. Od konce minulého století se dopady na kvalitu povrchových vod staly jedním z cílů výzkumných metod pro snížení ztrát dusíku (Skaggs et al. 2012).

Jako příklad lze uvést snahu o snížení ztrát dusíku z drenážních systémů obhospodařovaných ploch ve Spojených státech amerických. Snížení ztrát souvisí, jak již bylo uvedeno, jednak s ekonomickou stránkou, kdy je mnoho živin z plochy odplaveno a musí být doplněno hnojivem, a také s kvalitou vody v recipientech, do nichž jsou drenáže zaústěny. Kvalita vody je

pak ovlivňována jak v místním, tak globálním měřítku. Příkladem jsou vysoké obsahy sloučenin dusíku v Mexickém zálivu, jež jsou přisuzovány právě ztrátám živin z orné půdy, neboť v mořích a oceánech je N rovnocenným spouštěčem projevů eutrofizace spolu s P, na rozdíl od vnitrozemských (sladkých) vod (Skaggs et al. 2012).

Z výsledků studií (např. Yupu et al. 2019) vyplývá, že jednou z možností snížení ztrát dusíku, především dusičnanového, je právě využití regulačních drenáží. Bylo zjištěno, že v souvislosti s využitím těchto regulačních systémů došlo ke snížení ztrát dusíku do povrchových vod v rozmezí 18 až 75 % (Skaggs et al. 2012). Dalším faktorem pro snížení odnosu živin, nejenom dusíkatých, ze zemědělských ploch, je optimalizace a forma hnojení.

Důležitým a současně zobecnitelným poznatkem je, že optimálně lokalizované a řízené regulovatelné drenáže tak mohou, na rozdíl od tradičních drenáží, snížit množství vyplavovaných živin do recipientu až o 30 % (Strock et al. 2010).

2.1.2.2 Efekty regulace drenážního odtoku na výnosy plodin

Vliv regulace drenážního odtoku (RDO) na výnos plodin je intenzivně studován zejména v USA, Kanadě, Dánsku, Švédsku a dalších zemích (vč. ČR). Principiálně je předpokládán vyšší výnos, resp. jeho optimalizace, vyrovnanost, na plochách s RDO, neboť vyšší (optimální) vlhkost půdy zajišťuje efektivnější využití hnojiv a snižuje nástup plodinyvého vodního stresu v sušším období (Willison et al. 2021). Vliv RDO na výnos je nicméně významně ovlivněn sezónními podmínkami, zejména srážkami a teplotami a jeho efekt je dokladován jako variabilní pro „vlhké“ a „suché“ sezony. Meta analýza ze středozápadu USA s daty ze 13 lokalit s pěstovanou kukuřicí na tradiční odvodněné půdě a půdě s RDO (Youssef et al. 2023) dokládá pro suché periody 4 – 14 % zvýšení výnosu na RDO, oproti 4 – 10 % snížení výnosu na plochách s RDO ve vlhkých obdobích. Obdobné výsledky pro vlhčí období dokládají Deichmann et al. (2019) z Dánska; Kaur H. et al. (2021) s až 26 % zvýšením výnosu kukuřice na hlubokých hlínách v nivách Missouri a Tolomio et al. (2019) s až o 27 % vyšším výnosem kukuřice na zrno na úživných fluvických kambizemích v SV Itálii. Naproti tomu Wesström et al. (2014) dokládají 6 – 10 % zvýšení výnosu u brambor, 19 % u pšenice ozimé, ale neprůkazné u ječmene jarního při RDO na hlinitých a písčítých půdách jižního Švédska. Duffková et al. (2022) zjistili během jedné sušší sezony vyšší výnos na hlinito-písčítých kambizemích s RDO u jarního ječmene o 4 %.

Všechny studie dokládají převažující pozitivní vliv RDO jak na snižování odnosu zejména $\text{NO}_3\text{-N}$ v drenážních vodách a současně zvyšování výnosu plodin, s tím, že klíčové je buď pečlivé nastavení pasivních parametrů regulace či v případě manipulovatelných systémů načasování zavlažovací fáze v drenáži tak, aby nedocházelo k převlhčování pozemků nebo k jejich přesoušení vlivem příliš časného, resp. pozdního nastavení retardace

odtoku a adekvátní akumulace vody v půdě. Toho lze dosáhnout zejména aktivní manipulací či spíše prostřednictvím automatizovaných systémů regulace, což platí zejména ve stále rozkolísanějších klimatických podmínkách.

Fisher et al. (1999) srovnával závlahu regulovaným drenážním podmokem s běžným, neregulovaným podpovrchovým odvodněním v polních podmínkách s rotací plodin kukuřice-soja. Regulací drenáže byla hladina podzemní vody udržována v hloubce 0,4 m. Autoři zjistili, že průměrné koncentrace NO_3 v půdě nebyly regulací ovlivněny v hloubkách 0 – 15 a 15 – 30 cm, avšak v rozmezí hloubek 30 – 75 cm snížila tato regulace 2-leté průměry půdních koncentrací NO_3 ve srovnání s běžnou podpovrchovou drenáží o 46 %. Ve srovnání s podpovrchovým odvodněním se rovněž zvýšil průměrný příjem N kukuřicí o 13 % a její výnos o 19 %. Průměrný příjem N sójou se zvýšil o 62 % a její výnos o 64 %. Výzkumníci tak došli k závěru, že vhodná implementace regulované drenáže vede za daných podmínek ke stabilizaci výnosů a účinnosti příjmu N zemědělskými rostlinami. Výrazně přitom snižuje koncentrace NO_3 hlouběji v půdním profilu – ve srovnání s běžnou, neregulovanou podpovrchovou drenáží – což vede k celkovému snížení odnosu NO_3 v důsledku jeho eluce z půdního profilu.

2.1.2.3 Závěry srovnání tradičního odvodňovacího systému a systému s regulací odtoku

Řízením odtoku z drenážního systému, ve srovnání s tradiční drenáží, lze snížit ztráty vody o 15 až 35 % (www.sswm.info). Mezi pozitivní účinky RDO tak patří zvýšení zásob mělkých vod, podzemních vod i hlubších zvodní. Dostatkem vláhy je současně podpořena evapotranspirace rostlin, která nepřímo ovlivňuje vodní bilanci rostlin. Půda působí jako filtr a zpomalením odtoku lze zmírnit intenzitu vyplavování živin (dusíku, fosforu, uhlíku aj.), popř. jiných nežádoucích látek. Navíc pokud roztok půdní vody, tedy i té drenážní, obsahující rozpuštěné živiny a další látky, delší dobu v půdě zdržíme, má rostlina více času živiny odčerpat a využít a cizorodé látky mají více času se rozložit. Tímto procesem přispíváme ke zvýšení jakosti vody v tocích a současně ke snížení potřeby aplikace hnojiv. Spojením zmíněných poznatků tradiční drenáže a regulačních prvků, tak mohou být drenážní systémy, z hlediska agronomického i ekonomického, velmi efektivní.

Schopnost takto modernizované stavby odvodnění zvýšit akumulační schopnost půd (dlouhodobější akumulace vody v půdních pórech) tak zmírňuje dopady období sucha, nebo naopak v období přebytku vody umožňuje její část z půdního profilu odvádět (Kulhavý, 2019). Naopak klasické drenáže s funkcí pouze odvodňovací mohou vláhový deficit v půdě prohlubovat díky jednostrannému, rychlému snižování hladiny k úrovni uložení drénů (v době přisušku pak pokles hladiny pokračuje pod tuto úroveň už bez dalšího přispění drenáže).

Srovnáním účinnosti tradičních a regulovaných drenáží se zabývalo několik studií. Už výzkumy ze 70. let minulého století (např. Baker et al. 1975; Gambrell et al. 1975) analyzovaly vliv drenáží na jakost povrchových vod. Od konce minulého století se dopady na kvalitu povrchových vod staly jedním z cílů výzkumných metod pro snížení ztrát dusíku (Skaggs et al. 2012).

Jako příklad lze uvést snahu o snížení ztrát dusíku z drenážních systémů obhospodařovaných ploch ve Spojených státech amerických. Snížování ztrát souvisí, jak již bylo uvedeno, jednak s ekonomickou stránkou, kdy je mnoho živin z plochy odplaveno a musí být doplněno hnojiv, a také s kvalitou vody v recipientech, do nichž jsou drenáže zaústěny. Kvalita vody je pak ovlivňována jak v místním, tak globálním měřítku. Příkladem jsou vysoké obsahy sloučenin dusíku v Mexickém zálivu, jež jsou přisuzovány právě ztrátám živin z orné půdy (Skaggs et al. 2012).

Z výsledků studií (např. Yupu et al. 2019) vyplývá, že jednou z možností snížení ztrát dusíku, především dusičnanového, je právě využití drenáží s regulací odtoku, resp. regulací úrovně HPV. Bylo zjištěno, že v souvislosti s využitím těchto regulačních systémů došlo ke snížení ztrát dusíku do povrchových vod v rozmezí 18 až 75 % (Skaggs et al. 2012). Dalším nástrojem pro snížení odnosu živin, nejenom dusíkatých, ze zemědělských ploch, je optimalizace a forma hnojení.

Důležitým a současně zobecnitelným poznatkem je, že optimálně lokalizované a řízené regulovatelné drenáže tak mohou, na rozdíl od tradičních drenáží, snížit množství vyplavovaných živin do recipientu až o 30 % (Strock et al. 2010).

Z poznatků současně vyplývá, že regulace drenážního odtoku přímo nemusí vždy způsobovat snížení obsahu živin v drenážní vodě. Např. v průběhu závlahové fáze, kdy je odtok uzavřen nebo alespoň omezen, může naopak docházet ke zvýšení obsahu živin v drenážní vodě, ovšem je eliminován její odtok do povrchových vod (Yupu et al. 2019). Oproti tomu voda z tradiční drenáže odtéká i s živinami z plochy průběžně a nekontrolovatelně. Vyšší koncentrace živin se tedy mohou vyskytovat na regulované části, což potvrzuje i výzkum prováděný na regulační drenáži v Uherčicích na jižní Moravě (Svobodová, 2023). U neregulované (tradiční) drenáže může být obsah živin více ovlivněn průběhem srážek, přičemž mohou nastat dvě možnosti. Buď je voda v drenáži zředěna přitékající vodou, čímž se koncentrace živin sníží, nebo se naopak zvýší v důsledku jejich vyplavení z půdního profilu.

Ke snížení ztrát živin je možné využít několika opatření – kromě regulace odvodnění a správné aplikace hnojiv, také pěstování krycích plodin nebo odvádění drenážních vod přes mokřady a biofiltry (Skaggs et al. 2012), podrobněji viz Kapitola 2.2.5.

Lze tedy shrnout, že modernizace drenážních systémů zaměřené na řízení režimu odtoku instalací regulačních prvků, umožňujících podle potřeby vodu zadržovat (zahrazením odtoku a volbou výšky přelivné hrany), ale podle potřeby také její přebytky odvádět (přechodem na odvodňovací fázi stavby případně převáděním vody do míst vhodných pro její akumulaci nebo dočištění například v biofiltrech, mokřadech apod. – viz Fučík a kol. 2021) se uplatňuje z hlediska ochrany jakosti vod recipientu snížením emisí

dvěma hlavními mechanismy: omezením odtoku znečištěných drenážních vod a odbouráváním znečištění déletrvajícím zadržením vody v půdě. První z uvedených efektů regulace se projeví zpravidla ve všech případech, kdy je dosaženo vzduší hladiny podzemní vody (HPV) regulačním prvkem (Carstensen et al. 2019).

Efekt druhého typu se uplatní:

- a) v závislosti na podílu plochy vymezené dosahem regulace k celkové ploše ovlivněné drenážní skupiny, což je dáno sklonitostí území, resp. drénu a charakterem modernizace stavby – viz definovaný index DR (index plošného dosahu regulace), popsany dále v Kapitole 2.3.1,
- b) v souvislosti s charakteristikami půdního prostředí, které je ovlivněno intenzitou souvisejících procesů a zemědělským managementem, tj. použitou agrotechnikou, pěstovanými plodinami a vstupy živin (Shedekar et al. 2021; Wang et al. 2020).

Ztráty živin prostřednictvím drenážního odtoku jsou pro zemědělce ekonomickou ztrátou, což by měl být další argument podporující úvahy o modernizacích těchto staveb. V úvahu lze brát i snahu státních podniků Povodí či subjektů ochrany přírody zmírňovat příspěvky difuzních zdrojů znečištění, pocházejících ze zemědělství.

Výsledky experimentů, realizovaných na modelových lokalitách projektu (Kulhavý a kol. 2022) korespondují se závěry zahraničních autorů (např. Carstensen et al. 2019; Schipper et al. 2015), kteří největší efekt druhého typu (tj. asimilace živin atd.) popisují při dlouhé době zdržení vody v půdním profilu a při významnějším zvýšení úrovně HPV.

2.1.3 Zásady uvedené v normách a principech státní podpory

Norma ČSN 75 4200 „Hydromeliorace – Úprava vodního režimu zemědělských půd odvodněním“ se tematiky regulovaných odvodňovacích systémů (odst. 5.2.9 a 5.2.10), včetně jejich modernizace (odst. 7.21) dotýká v oblasti návrhu technického řešení a technologie výstavby.

Odvětvová technická norma TNV 75 4221 „Regulace a retardace odtoku na pozemcích odvodněných trubkovou drenáží“ poskytuje podrobnější přehled podkladů pro posouzení návrhu, výstavbu a provoz modernizovaných systémů nebo novostaveb, v přílohové části jsou uvedeny optimální úrovně řízené HPV pro různé typy kultur, Tabulka 1 tohoto podkladu je převzata ze směrnice ROS (1985).

Parametrům jakosti vody, přenesitelné i pro stavby regulační drenáže (tj. pro vodu „cizí“, do systému uměle dodávanou), se věnuje ČSN 75 7143 (757143) „Jakost vody pro závlahu“.

Z hlediska kvantitativních podmínek podpory provozu staveb s regulací drenážního odtoku (zejména tedy s platností pro stavby regulační drenáže, která je typem závlahové stavby) je v normě ČSN 75 0434 „Meliorace –

Potřeba vody pro doplňkovou závlahu“ popsáno v kapitole 4.2.8 využitelné množství vzlinající vody – v souvislosti s úrovní hladiny podzemní vody. Uveden je zde také ztrátový součinitel pro výpočet závlahového množství při uplatnění závlahy drenážním podmokem (viz kapitola 8.3 normy).

Ze starších směrnic MZe (Směrnice ROS, 1985) se problematice jakosti vod, přiváděných do regulovaných odvodňovacích systémů, věnuje Tabulka č. 2 na str. 28 citovaného materiálu – viz Tab. 2.1.1.

Tab. 2.1.1 Orientační kritické hodnoty jakosti vody přiváděné do regulovaných odvodňovacích systémů. Zdroj: Směrnice ROS, 1985

pol.	Vlastnosti vody	Jednotka	Hodnota
1	<u>Fyzikální vlastnosti</u> Mechanické znečištění zrnitostí nad 0,05 mm/*	mg.l ⁻¹	50
2	Celkem nerozpuštěné látky	mg.l ⁻¹	250
3	Teplota	°C	35
4	Měrná elektrická vodivost /***		
	lehké půdy	μS.cm ⁻¹	2 000
	střední půdy	μS.cm ⁻¹	1 000
	těžké půdy	μS.cm ⁻¹	700
5	<u>Chemické vlastnosti</u> Rozpuštěné látky /*		
	lehké půdy	mg.l ⁻¹	1 500
	střední půdy	mg.l ⁻¹	800
	těžké půdy	mg.l ⁻¹	650
6	Chloridy (Cl ⁻) /*	mg.l ⁻¹	300
7	Sírany (SO ₄ ²⁻) /*	mg.l ⁻¹	250
8	pH	-	6,5 až 9
9	Rozpuštěný kyslík	mg.l ⁻¹	nad 5
10	Železo celkem /*	mg.l ⁻¹	3
11	Dusičnany (NO ₃ ⁻) /*	mg.l ⁻¹	50
12	<u>Biologické vlastnosti</u> Koliformní bakterie	v 1 ml	100
13	<u>Radiochemické vlastnosti</u> /*** Celková alfa – aktivita	Bq 1 l	0,1
14	Celková beta – aktivita	Bq 1 l	1,0

Poznámky:

- * Pokud je hodnota vyšší, je nutné zařadit u odběru mechanické čištění (usazovací nádrže, filtry apod.)
- ** Nutno vždy stanovit v oblastech s nebezpečím zasolení půd
- + Hodnota je závislá na obsahu solí v půdě zájmového území a na období aplikace vody. Při vyšší hodnotě (než je uvedena v tabulce) je nutno provést podrobnou analýzu vlivu jednotlivých komponentů na půdu
- ++ Rozbor se provádí jen v případech, kdy je nebezpečí zvýšené radioaktivity vody

V rámci gesce MŽP a v souvislosti s dotačním programem Operační program Životní prostředí (OPŽP) na léta 2021-27, specifickým cílem 1.3 „Podpora přizpůsobení se změně klimatu, prevence rizika katastrof a odolnosti vůči nim s přihlédnutím k ekosystémovým přístupům“, budou podporována opatření v krajině, mimo jiné „odstranění či eliminace negativních funkcí odvodňovacích zařízení v krajině“. Dokument v opatření 1.3.5

odkazuje na typy úprav staveb odvodnění, uvedené v metodice (Kulhavý a kol. 2013), s cílem zlepšení retenční a akumulární schopnosti vody v řešené lokalitě a zaměřené na posílení ekosystémových funkcí. Podporovány budou projekty, které kladou důraz na zpomalení odtoku a zadržení vody v krajině.

V gesci MZe vznikal v rámci „Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR“ v letech 2015-2016 dotační titul „4.4.2 Regulace odtoku z melioračních odvodňovacích zařízení“ zahrnující program na podporu rekonstrukce, oprav a modernizace odvodňovacích zařízení, schválený usnesením vlády č. 479 ze dne 30. května 2016 (Usnesení č. 479/2016, strana 9).

Navržený dotační titul má následující parametry:

- a) Podpora přípravných a projekčních prací na obnovu a rekonstrukci odvodňovacích systémů
 - zpracování studií odtokových poměrů, studií proveditelnosti, dopadových studií
 - zpracování posouzení optimalizace provozu čerpacích stanic
 - zpracování průzkumu a projektu modernizace stavby zemědělského odvodnění s uplatněním principu regulace drenážního odtoku
 - zpracování nebo aktualizace manipulačních a provozních řádů, kategorizace vodních nádrží
 - zpracování projektové dokumentace ve stupni DUR, DSP, PPS
 - zpracování dokumentace skutečného provedení, pasportů
- b) Podpora realizace vlastní obnovy, rekonstrukce a modernizace
 - čerpacích stanic vč. souvisejících objektů
 - kanálů vč. souvisejících objektů
 - vodních nádrží vč. souvisejících objektů
 - podrobného odvodňovacího zařízení (obnova a zřízení drenážních šachtic včetně zřízení úseku neperforovaného potrubí, instalace regulačních prvků, oprava poškozených úseků drenážního potrubí)
- c) Podpora majetkoprávního vypořádání
 - zpracování geometrických plánů (na zřízení věcného břemene, práva stavby, rozdělení pozemků)
 - zpracování znaleckých posudků
 - výkupy pozemků, zřízení věcného břemene či práva stavby

Dosud nebyl dotační program otevřen (v pozičních zprávách za léta 2018-22 je jako důvod uváděn: nedostatek finančních zdrojů a zejména obtížnost vodoprávního projednání změn nakládání s vodami, související s vysokou členitostí vlastnictví těchto staveb – viz Kulhavý, Pelíšek, 2017), přesto zde uvádíme koncept podpor proto, že vhodně vystihují strukturu činností umožňujících nastartování procesů při úpravách staveb odvodnění nejen s cílem zlepšení bilance vod, ale i souvislostí s jakostí vod drenážních i povrchových.

V přílohové části Usnesení č. 354/2023, strana 50–51, aktualizované Konceptce ochrany před následky sucha pro území České republiky na období let 2023-2027 jsou podmínky pro širší uplatnění regulace specifikovány následujícími činnostmi:

- digitalizovat archivní projektové dokumentace včetně realizovaných průzkumů jako nástroj pro inventarizaci těchto staveb v ČR,
- využít podkladů dálkového průzkumu Země pro identifikaci skutečného provedení,
- zpracovat generel odvodňovacích staveb pro identifikaci vhodných odvodněných ploch k regulaci odtoku,
- dobudovat a provozovat Informační Systém Melioračních Staveb (ISMS) aktualizovaný v ročním kroku po definovaných katastrálních územích (vybíraných MZe, SPÚ, příp. podniky Povodí).

Dalším dokumentem, vzniklým v gesci MZe byl v roce 2020 zpracovaný „Plán opatření pro řešení sucha prostřednictvím pozemkových úprav a adaptací hydromeliorací v horizontu 2030“ (MZe, SPÚ, VÚMOP, 2020). Dokument rozšiřuje proces pozemkových úprav o zajištění dostupné projektové dokumentace a předpokládá, že prostřednictvím dálkového průzkumu Země se zmapuje skutečný rozsah a umístění odvodňovacích zařízení, posoudí technický stav, vyhodnotí potřebnost a v případě potřeby se navrhne opatření na úpravu funkce těchto staveb – součástí by měla být i regulace drenážního odtoku.

Tento dokument propojuje adaptace hydromeliorací a pozemkové úpravy. To je dáno nejen potřebou komplexně řešit vodohospodářskou infrastrukturu (např. v rámci plánu společných zařízení) pro minimalizaci dopadů hydrologických extrémů (povodně, vodní eroze, sucho), ale zejména s vědomím členitosti vlastnictví hydromelioračních staveb a aktuální obtížnosti jiných způsobů řešení jejich úprav/modernizací. Tato cesta by však neměla být jedinou a jeví se nanejvýš žádoucí přistoupit i k legislativní podpoře údržby, oprav, rekonstrukcí a modernizací staveb zemědělského odvodnění umožňující podchytit individuální zájmy zemědělců a vlastníků pozemků.

2.2 Přehled způsobů řešení úprav staveb zemědělského odvodnění

2.2.1 Kritéria vhodnosti stavby k modernizaci

V reakci na probíhající a očekávané změny klimatu se celosvětově doporučuje zavádět vhodná inovační opatření, mimo jiné vytvářet nové strategie pro zajištění trvale udržitelného rozvoje krajiny při optimálním hospodaření s vodními zdroji a ochraně její jakosti. Provoz stávajících staveb k vodohospodářským melioracím pozemků, které jsou a budou nadále jedním z hlavních nástrojů k dosažení plánované zemědělské a lesnické produkce, vyžaduje v těchto podmínkách zajistit ekologickou stabilitu krajiny. Nejdůležitějším úkolem bude, spolu s uspokojivým řešením složitých vlastnických práv k pozemkům a těmto vodním dílům, nacházet optimální prostorové i časové polyfunkční využití všech půdních, živinných i vodních zdrojů

ve stávajícím, hydromeliorační stavbou ovlivňovaném, zájmovém území (Kulhavý, 2018). Cestou k naplnění tohoto cíle je zajištění racionálního provozu. Jakost i množství vodní komponenty krajiny jsou přitom v řadě lokalit podmíněny vhodným hospodařením (managementem).

Úvahám o modernizaci stávající stavby odvodnění by měla předcházet analýza (posouzení) přírodních, zemědělských, environmentálních, vodohospodářských, ale zejména technických podmínek konkrétní lokality a stavby. Vhodným nástrojem pro rozhodování mezi několika alternativami je multikriteriální analýza. Předpokladem jejího použití je větší počet kvantifikovatelných kritérií, která zahrnujeme do rozhodování. Pro optimalizaci krajinné struktury tento postup popsal a početně formalizoval do pracovního postupu tým VÚMOP, v.v.i./ČZU (Kulhavý, Štibinger a kol. 2010) a v této podobě nalezne využití i při analýze vhodnosti modernizace stavby. Podrobný návod je uveden na adrese

http://www.hydromeliorace.cz/sw/mka_skp/popup/navod_mka.php

Cílem posuzovacího procesu je doporučit a vybrat z různých navrhovaných možností, z různých variant či soustav (souborů) krajinných prvků a vodních děl konkrétní řešené oblasti, takovou variantu, jejíž působení a vliv v určitém typu krajiny je optimální. Zároveň bude ale také splňovat nároky ostatních hledisek (tj. kritérií):

- vodohospodářských,
- ekologických,
- sociálních,
- ekonomických (zejména zemědělských),
- zdravotních,
- popř. dalších kritérií, která jsou charakteristická pro daný typ krajiny.

Mezi zemědělské podmínky patří např. intenzita zemědělství, charakter půdních bloků, uživatelsko-vlastnické vztahy, vláhové poměry půd a možnost závlah. Vodohospodářské poměry oblasti popisuje např. dostupnost vodními zdroji pro efektivní dotaci drenážních vod. Technické podmínky stavby lze pak charakterizovat např. členitostí drenážních skupin, provedením a stavem drénů apod.

V celostátním měřítku byl zpracován dokument, obsahující vedle metodického postupu i výsledky prezentované v digitální formě mapy (Fučík a kol. 2021), vycházející ze dvou hlavních kritérií:

1. sklonitost území, která předurčuje dosah regulačních prvků, a tím efektivitu investice a provozu stavby s regulací,
2. hydro-pedologické poměry, zejména blízkost HPV k povrchu a významnost pedogenetických procesů souvisejících s dostatkem vody (která mohla být v minulosti záměrně odváděna, nyní poskytuje dostatečnou schopnost řízení vodních režimů těchto půd).

Tento dokument se zaměřuje na jediný typ opatření na stavbách zemědělského odvodnění – na regulaci drenážního odtoku. Pro návrh, realizaci

a efektivní fungování všech způsobů regulace drenážního odtoku je z hlediska půdních charakteristik možné uvažovat o skupinách hydromorfních a semihydromorfních půd. Tento předpoklad je dán vodním režimem a fyzikálními vlastnostmi těchto půd, které umožňují návrh a případnou realizaci některého ze způsobů regulace drenážního odtoku (Kaur et al. 2018; Kulhavý a kol. 2015).

Kritéria hydromorfních a semihydromorfních půd splňují následující HPJ dle BPEJ (Novotný, Vopravil a kol. 2013), viz Tab. 2.2.1 a Tab. 2.2.2:

Tab. 2.2.1 Hlavní půdní jednotky (HPJ) splňující kritéria hydromorfizmu půd

15, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 52, 53, 64, 67, 68, 69, 72, 73, 74, 75, 76

Tab. 2.2.2 Hlavní půdní jednotky s charakteristikou vláhových poměrů „mírně převlhčené půdy“ a „periodicky převlhčené půdy“

03, 06, 07, 08, 11, 12, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 29, 34, 35, 36, 48, 60, 61, 62, 70, 71

Pro analýzu sklonitosti území z hlediska vymezení potenciálně vhodných lokalit k regulaci odtoku z odvodňovacích systémů v ČR byl použit Digitální model reliéfu ČR (v případové studii, zpracované pro SPÚ /Fučík a kol. 2021/, byl použit DMR 4G). Vhodné je pro klasifikaci sklonu použít pěti stupňovou škálu sklonu terénu, viz Tab. 2.2.3.

Tab. 2.2.3 Kategorie sklonitosti pro vymezení potenciálně vhodných lokalit k regulaci drenážního odtoku

Kategorie	Průměrný sklon terénu (%)
1	nad 12,1
2	5,01 až 12,0
3	3,01 až 5,0
4	1,01 až 3,0
5	do 1,0

Výsledkem těchto analýz je kategorizace vhodnosti staveb odvodnění pro uplatnění principu regulace drenážního odtoku (viz Tab. 2.2.4, lokalizovaná na konkrétní pozemky – viz. Obr. 2.2.1), zpracovaná pro celé území ČR ve škále podle Tab. 2.2.5.

Tab. 2.2.4 Plošné zastoupení jednotlivých kategorií vhodnosti staveb odvodnění (podklad evidence dle ZVHS) z hlediska uplatnění regulací drenážního odtoku v jednotlivých krajích

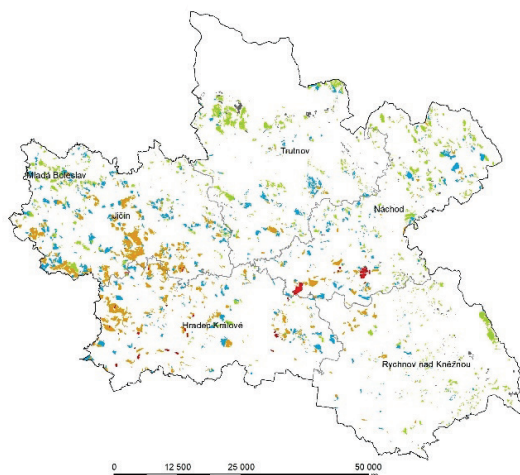
Kraje	celková výměra ZVHS	kategorie 1	kategorie 2	kategorie 3	kategorie 4	kategorie 5
	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
Hlavní m. Praha	4 782	6	719	1 677	1 562	2
Jihočeský kraj	219 139	4 589	80 501	82 536	45 585	323
Jihomoravský kraj	53 660	1 425	12 423	9 213	13 949	1 781
Karlovarský kraj	34 109	551	13 566	11 405	5 891	0
Kraj Vysočina	106 594	1 812	54 796	35 805	9 806	8
Královehradecký kraj	59 296	1 474	11 256	10 219	12 648	925
Liberecký kraj	24 713	1 986	14 383	4 708	1 112	6
Moravskoslezský kraj	79 702	2 829	42 492	17 842	7 099	869
Olomoucký kraj	63 544	2 791	24 757	8 212	7 035	1 738
Pardubický kraj	70 597	1 215	20 746	15 789	15 421	599
Plzeňský kraj	96 051	1 854	46 345	31 503	11 277	83
Středočeský kraj	161 302	1 561	42 448	43 520	47 343	3 531
Ústecký kraj	32 703	1 543	15 505	5 577	4 098	32
Zlínský kraj	47 737	8 491	19 689	2 729	1 252	422
CELKEM	1 053 929	32 127	399 626	280 735	184 078	10 319

Tab. 2.2.5 Kategorizace vhodnosti staveb odvodnění z hlediska uplatnění regulací drenážního odtoku

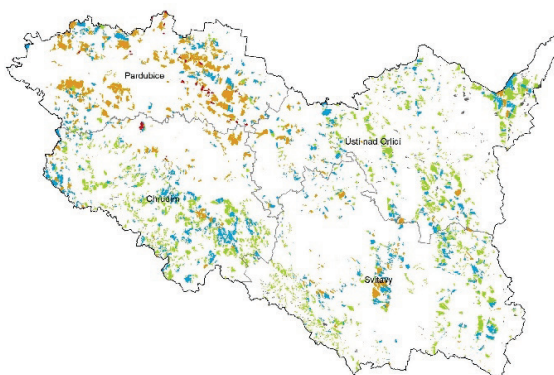
Kategorie	Barva	Slovní popis
0		Bez návrhu
1		Nevhodné
2		Výjimečně vhodné
3		Potenciálně vhodné
4		Vhodné
5		Velmi vhodné

Při doplňkovém hydro-pedologickém průzkumu pro modernizaci drenážních systémů je nutné zohlednit pedologická rizika zvyšující potenciál k zanášení drenážního systému. Vzhledem k dostupnosti digitálních mapových podkladů charakterizujících půdní pokryv zemědělských půd ČR (bonitační mapování), byly jednotlivé půdní typy a subtypy sjednoceny do skupin v rámci konkrétní hlavní půdní jednotky (dále jen „HPJ“). Výsledkem analýz je tedy kategorizace HPJ podle potenciálů k negativnímu ovlivnění drenážního systému daným faktorem.

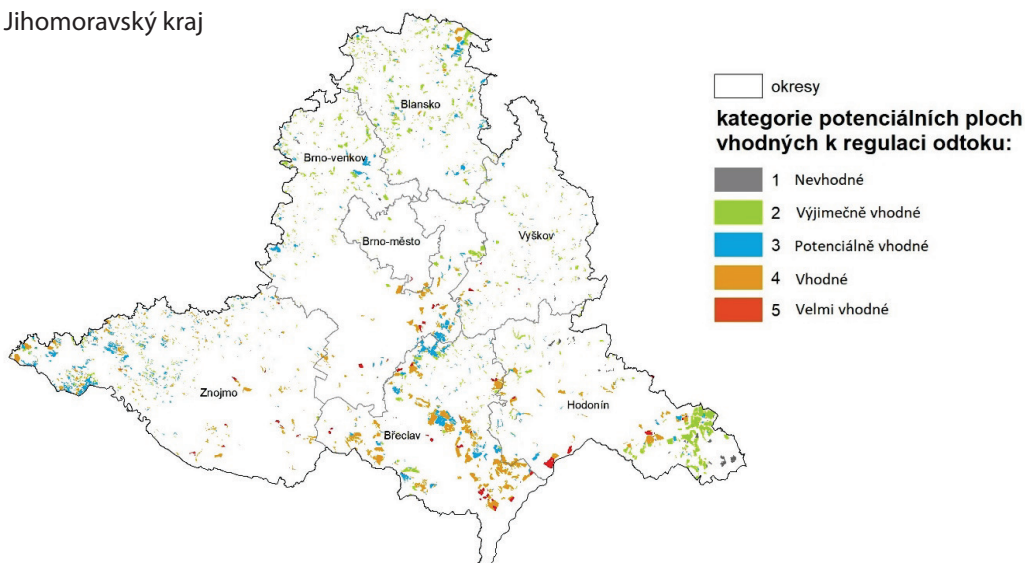
Královéhradecký kraj



Pardubický kraj



Jihomoravský kraj



Obr. 2.2.1 Plošné zastoupení jednotlivých kategorií vhodnosti staveb odvodnění (rozsah ploch odvodnění dle evidence bývalé ZVHS) z hlediska uplatnění regulace drenážního odtoku pro Královéhradecký, Pardubický a Jihomoravský kraj

Kritéria a limity pro vyloučení půd náchylných k zanášení:

- kritérium: půdy s vyšším obsahem III. zrnitostní kategorie; (limit: >30 % obsahu částic 0,05 – 0,25 mm)
- kritérium: půdy s vyšším zastoupením siltu (frakce 0,002 – 0,01 mm) a II. zrnitostní kategorie a (často hodnoceno společně pro rozmezí částic 0,002 – 0,05 mm); (limit: >40 % obsahu částic 0,002 – 0,05mm)
- kritérium: půdy náchylné k rozplavování (NKR); (limit: je-li obsah prachových částic (0,002 – 0,05 mm) dvojnásobkem obsahu fyzikálního jílu (<0,002 mm)

Pokud hodláme nepřímo posuzovat nefunkčnost odvodňovacího systému na podkladě zrnitostního složení půdy, můžeme vycházet z výše uvedených kritérií pro zrnitostní charakteristiky horizontů nacházejících se v hloubce uložení drenáže (0,6-1,0 m), jejichž charakter nejvíce ovlivňuje její funkčnost, tj. náchylnost k poškození (zanesení, destrukci) drenážního systému. Při návrhu modernizace je však nutnou podmínkou provést popis/inspekci aktuálního stavu drenážního systému nejen z hlediska jeho funkčnosti a případného vymezení příčin výskytu lokálních poruch, ale i z hlediska stupně zanesení potrubí sedimenty půdních částic s přihlédnutím k době poslední prováděné údržby.

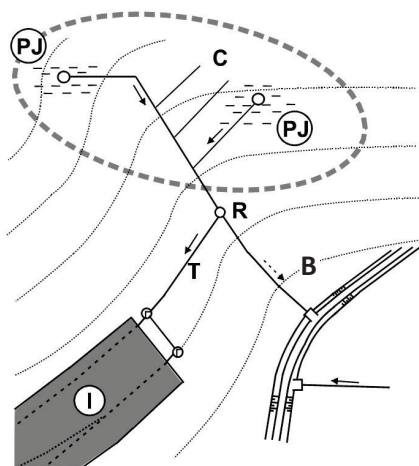
Podobně jako zrnitost půdy je obsah a forma železa v půdě dalším limitním faktorem ovlivňujícím funkčnost drenáže. Při zvětrávání primárních Fe-nerostů velmi snadno přechází Fe^{2+} na Fe^{3+} , jehož sloučeniny jsou stálejší, a tudíž málo pohyblivé (hydratované oxidy). Sloučeniny Fe^{2+} jsou pohyblivé zejména v komplexu s organickými sloučeninami půdy (kyselé Fe-fulváty). Z roztoků mohou železité bakterie vysrážet železo i ve formě Fe^{3+} . Důležitými půdními faktory při hodnocení železa v půdě je hodnota půdní reakce, iontová síla půdního roztoku, oxidačně-redukční potenciál a obsah humusových látek. Od těchto faktorů se odvíjí vznik stabilních či méně stabilních komplexů Fe-fulvátů a jejich pohyb profilem. Trendy pohybu železa jsou popsány v mnohých vědeckých pracích. Při znalostech celkového pohybu Fe částic v půdním profilu je možné předpovídat i možné důsledky vzniku usazenin v drenážním systému.

2.2.2 Hlavní typologie regulačních prvků vhodných pro tento typ staveb

V praxi mohou přicházet v úvahu následující technická řešení modernizace stávajících staveb zemědělského odvodnění, která vedle hydrologických aspektů mohou v konkrétních podmínkách splňovat i další, s ohledem na zaměření publikace na jakost povrchových vod, zejména vodohospodářské efekty:

- převod drenážních vod na úrovni podrobných odvodňovacích zařízení (zpravidla v rámci jednoho dílčího povodí) – příklad demonstrován společně s příkladem využití těchto vod k infiltraci – viz Obr. 2.2.2; dalším účelem převodu však může být třeba zásobení vodní nádrže či mokřadu drenážní vodou,

- regulace odtoku drenážních vod na úrovni hlavních otevřených odvodňovacích zařízení,
- eliminace funkce odvodňovací čerpací stanice například úpravou spínací úrovně čerpadel; obě tato opatření předpokládají zvýšení hladiny vody v recipientu, která se zpětně promítne do přilehlé/ovlivněné odvodněné plochy,
- regulace odtoku z pramenných jímek,
- regulace drenážního odtoku na úrovni podrobného odvodňovacího zařízení (projevující se na svodných a sběrných drénech); opatření ovlivňuje odtok autochtonních vod řešené plochy odvodnění a zahrnuje následující tři typy technických řešení,
- drenáž s regulovaným odtokem; s využitím statických či nastavitelných regulačních prvků,
- drenáž s pulsním režimem odtoku; vhodná např. k omezení zanášení drénů vodou unášenými zemitými částicemi,
- regulační drenáž doplněná o cizí zdroj vody pro závlahu drenážním podmokem,
- vsakovací drenáž pro různé účely uplatnění.

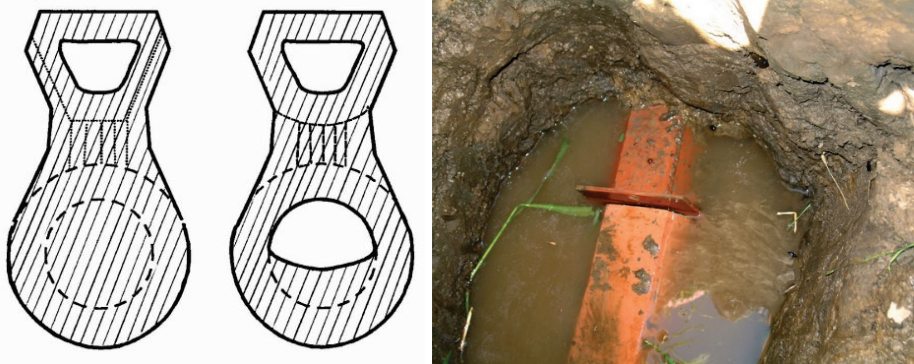


Obr. 2.2.2 Příklad uspořádání objektů pro převod drenážních vod. Zdroj: TNV 75 4221
LEGENDA: PJ – pramenná oblast s pramenní jímkou; C – systematické odvodnění drenáže – horní část s přebytkem vod; R - rozdělovací objekt (úlohu plní např. regulační prvek); T – transferové potrubí (např. propojka drenážních skupin); I - oblast vhodná pro infiltraci přivedených drenážních vod; B – zachovaná část svodného drénu odvádějící vodu za extrémních odtokových epizod (plní funkci bezpečnostního „obtoku“)

Se zvoleným konceptem technického řešení přímo souvisí i volba typu a parametrů regulačního prvku. Příklady technického řešení uvádí Obr. 2.2.3 až Obr. 2.2.5, optimální provozní podmínky a návrhové parametry pak podrobněji uvádí např. TNV 75 4221 nebo metodické příručky (Kulhavý, Fučík, Tlapáková a kol. 2013; Kulhavý a kol. 2015a; Kulhavý a kol. 2015b).

Nejjednodušší způsoby změny intenzity odvodnění reprezentují statické regulační prvky – záslepky či clony (viz Obr. 2.2.3), dodatečně instalované na stávající drenážní potrubí po jeho obnažení a poté následuje zpětné zasypání a zhutnění výkopu zeminou tak, aby prvek nenarušoval povrch pozemku. Důrazně je doporučeno zaměřit polohu prvku nejlépe s přesností na 10 cm, aby jej bylo možné kdykoli v budoucnu vytyčit za účelem kontroly funkce, údržby, oprav, či vyjmutí v případě, kdy nebyl návrh instalace vhodný. Vždy je třeba před návrhem přihlídnout ke splaveninovému režimu konkrétní drenážní skupiny, aby se buď proces sedimentace v místě instalace využil (v případě záslepky, která zcela přerušuje drenážní průtok v potrubí; nadále je třeba počítat s obtokem vod drenážní rýhou a okolním rostlým terénem), nebo naopak aby nezpůsobil zvýšení uvažovaného efektu (např. zanášení regulačního prvku – clony).

Průtočná plocha clony je menší než plocha průtočného průřezu potrubí a drenážní odtok je tím redukován zejména při vyšších průtocích. Regulační prvky se osazují na sběrné drény nejlépe před zaústěním do svodného drénu. Zejména v případě aplikace těchto prvků na svodný drén, musí být posouzen sklon drénu a půdní prostředí tak, aby nedocházelo k výraznému zvýšení intenzity obtékání prvků půdním profilem. Toto riziko je možné eliminovat zvýšením počtu instalací regulačních prvků na drénu a návrhem vhodné délky úseků mezi prvky. Záslepky by měly být použity jen tam, kde je funkce odvodnění navržena ke zrušení. Použití clon a záslepek mění funkci zemědělských staveb odvodnění a proto musí být jejich návrh projednán a schválen příslušným vodoprávním orgánem s ohledem na funkční změnu dané vodohospodářské stavby. Podrobný detail odvodnění je ve vlastnictví vlastníků půdy. Doporučené parametry uvádí TNV 75 4221 nebo užitečný vzor č. 21754.



Obr. 2.2.3 Příklady konstrukčního řešení záslepky a clony; provedení s drždlem pro manipulaci

zdroj: TNV 75 4221; vpravo: fotografie z realizace po instalaci (foto: M. Soukup)

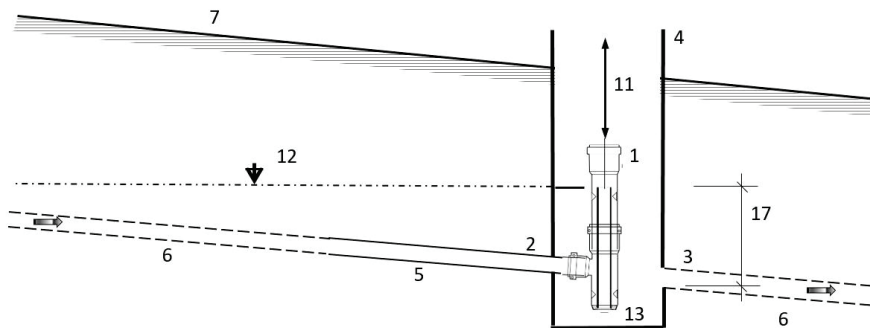
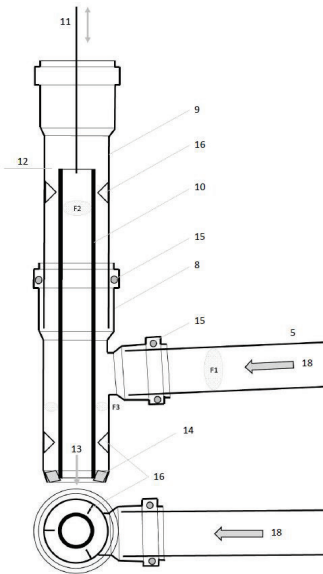
Další alternativou je použití podzemního regulačního prvku systému PRO s pevně nastavenou přelivnou hranou, umožňující kontrolovatelné dosažení vzduté HPV a podle konstrukčního řešení případně po odkopání dočasné vyhrazení hradítka – viz Obr. 2.2.4 a nebo parametry uvedené v TNV 75 4221. Obvyklá výška regulace je 0,25 až 0,45 m.



Obr. 2.2.4 Konstruční provedení a realizace prefabrikovaných prvků PRO podle technického návrhu VÚMOP v.v.i. (foto: Z. Kulhavý)

LEGENDA

- 1 – regulační prvek
- 2 – vtokové potrubí
- 3 – výtokové potrubí
- 4 – drenážní šachtičky
- 5 – drenážní potrubí neperforované
- 6 – drenážní potrubí perforované
- 7 – terén
- 8 – T-kus
- 9 – trubka
- 10 – středová hradící trubka
- 11 – táhlo ovládání
- 12 – horní úroveň hladiny
- 13 – odtok z regulačního prvku
- 14 – těsnění dosedací plochy
- 15 – těsnící O-kroužek
- 16 – distanční výstupky
- 17 – hradící výška
- 18 – přítok do regulačního prvku



Obr. 2.2.5 Příklady řešení drenážních regulačních prvků vhodných pro automatizaci provozu a instalaci do drenážní šachtičky:
 (vlevo) provedení se středovou hradící trubkou podle užitého vzoru č. 36538 pro plovákové nebo nízkoenergetické řešení manipulace,
 (vpravo) ovládání PVC šoupěte Valterra elektrickým aktuátorem (lineárním motorem),
 (dole) vyjádření dosahu regulace v podélném profilu terénu (znázorněn pouze svodný drén, na který napříč navazují drény sběrné).

Pokud je k dispozici stávající drenážní šachtice (normální, tj. podzemní, nebo kontrolní, tj. nadzemní), je možné ji využít k instalaci komplexnějšího typu regulačního prvku, umožňující snadnější příležitostnou manipulaci buď manuální, nebo automatizovanou. Předností existence nadzemní šachtice je kromě možnosti kontroly funkce také existence usazovacího prostoru, snižující rizika zanášení regulačního prvku a zjednodušující údržbu. Nevýhodou je omezení provozu na ploše, což vede ke snaze o snížení počtu regulačních prvků na odvodněné ploše. Pro automatizaci manipulace (založené na plovákovém principu či na ovládání elektrickými servopohony) je omezující potřebná síla, překonávající nejen konstrukční hmotnost hradítka, ale dále třecí odpory těsnění nebo odpory pohybových mechanismů, dále hydrostatické či hydrodynamické síly působící kolmo na hradítko (při jeho pohybu) atd.

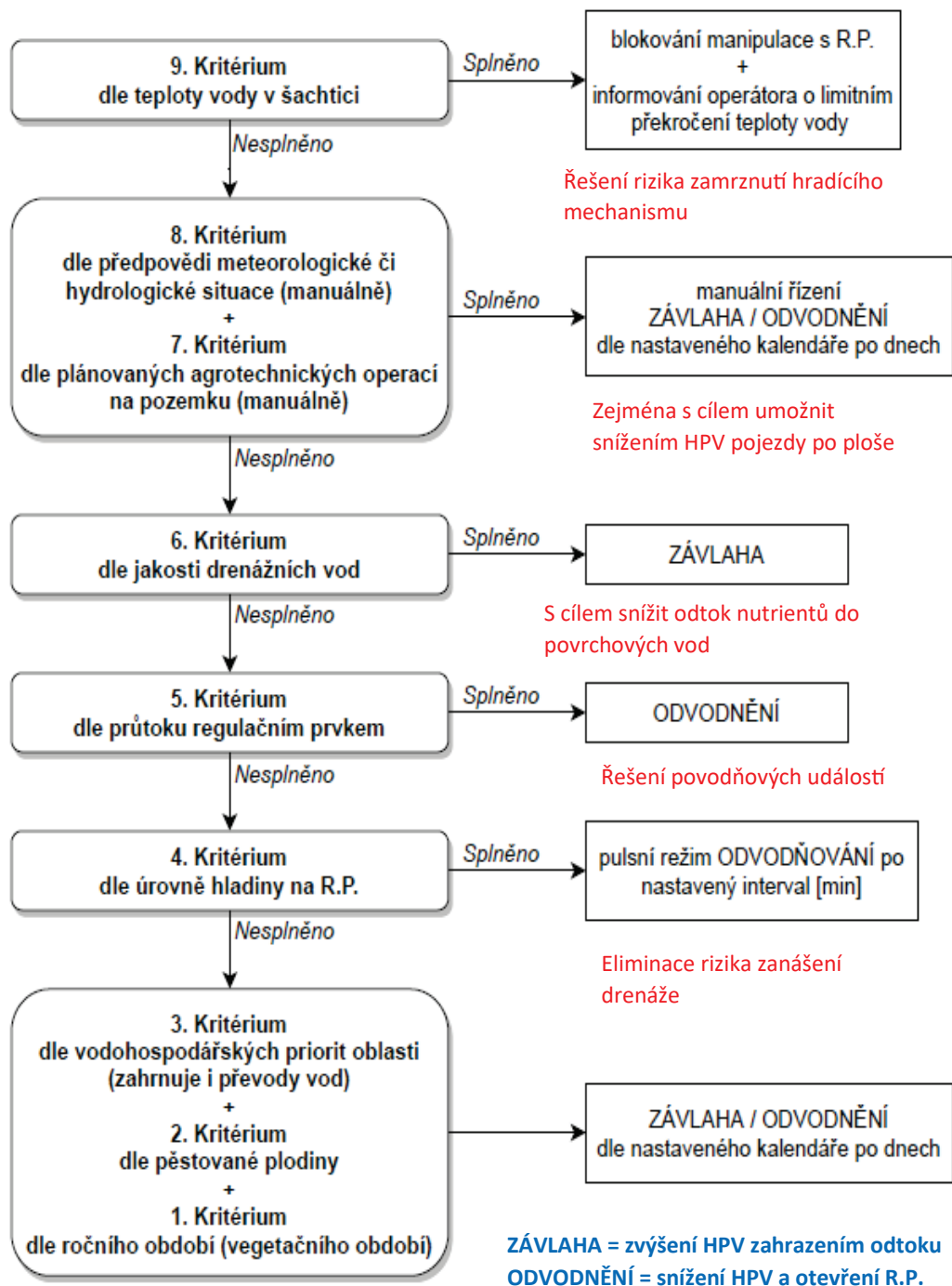
Nároky na konstrukční řešení zvyšuje skutečnost, že drenážní vody mohou obsahovat plaveniny/splaveniny (půdní částice, odumřelé kořeny rostlin a těla drobných živočichů), sedimentující v místech snížení unášecí síly proudící vody. Výše uvedené nedostatky odstraňuje například provedení podle užitého vzoru č. 36538 – viz Obr. 2.2.5., kdy hydrostatické i hydrodynamické síly působí na hradící prvek radiálně a odpadají třecí odpory bočního těsnění hradítka. Případně v dolní části T-kusu usazené sedimenty jsou odplaveny hned v první fázi otevření hradícího mechanismu a současně dochází k samočištění dosedací plochy hradítka proudící vodou, což snižuje riziko netěsnosti při následném uzavření. Materiálové provedení středové hradící trubky z tenkostěnného PVC snižuje současně konstrukční hmotnost pohyblivých částí regulačního prvku. Technické řešení využívá typizované odpadní PVC tvarovky, což umožňuje modulovou prefabrikaci pro velkou škálu světlostí potrubí a snižuje výrobní náklady.

2.2.3 Zásady manipulace na stavbách odvodnění

Pro řízení funkce regulovatelných systémů zemědělského odvodnění lze v zásadě uplatňovat analogické postupy, jako u závlahových staveb – lišit se bude dosažený efekt regulace (mimo zemědělského dále také vodohospodářský, environmentální atd.) a dynamika ovladatelnosti systému. Rozlišujeme manuální a automatizované systémy řízení/manipulace. Použité modely pro automatické řízení provozu budou zpravidla jednodušší (složitější případně jen v části výpočtu šíření vody v půdním prostředí), mohou být provozovány v dispečerských režimech, jaké jsou koncipovány pro provoz složitějších vodohospodářských systémů, nebo mohou být pro delší období provozu naprogramovány autonomními algoritmy s konkrétními provozními parametry. Pro praxi schůdnou variantou bude úprava vzorových schémat podle diagramu na Obr. 2.2.6, přizpůsobených konkrétní lokalitě a podmínkám provozu. Vymezena zde bude regulační funkce v závislosti na vstupech (např. průběhu meteorologické situace, úrovních HPV apod.) a cílovém stavu systému (např. závlahový režim, dotace podzemních zdrojů vod, převod zimních zásob vláhy, nebo zpřístupnění ploch pro zemědělskou

Blokové schéma priorit kritérií

jako podklad automatizace manipulací s regulačním prvkem



Obr. 2.2.6 Obecný algoritmus automatizace manipulace s hradícím mechanismem regulačního prvku

mechanizaci, ale i ochrana ovládacího a hradícího mechanismu před poškozením apod.).

Na Obr. 2.2.6 uvedený algoritmus specifikuje kritéria pro zahájení regulace (míněno závlahové fáze), její míru a intenzitu (nastavení regulačních prvků a trvání manipulace) i kritéria pro setrvání a ukončení této fáze. Uvedeny by měly být základní dynamické charakteristiky půdního prostředí a hydraulického systému jako celku i jednotlivých objektů. Řešený musí být i extrémní situace (období dlouhodobého sucha a povodňové stavy). Složitost dokumentace jednotlivých variant bude záviset na významu stavby a účelu regulace.

Z hlediska charakteru regulované stavby zemědělského odvodnění bude třeba zpracovat manipulační a provozní řád každého takového vodního díla a v něm budou výše uvedené obecné zásady konkretizovány.

Při návrhu a posouzení vhodnosti stavby k zavedení principu regulace drenážního odtoku a při nastavování zásad manipulace je třeba přihlídnout ke specifickým oblastem z hlediska klimatických, zemědělských a vodohospodářských podmínek. Například zranitelnost území ČR z hlediska výskytu zemědělského sucha nejnověji popisuje dokument („Koncepce“ v rámci Usnesení vlády č. 354/2023), kdy nejextrémnější oblasti jsou na jihu Moravy, následuje Lounsko a střední Polabí (viz str. 10, Obr. 4 Přílohy III. citovaného dokumentu).

Zemědělská kritéria budou korespondovat s aktuálně pěstovanou plodinou (jejími agrotechnickými lhůtami a plánovanými termíny polních prací). Důležitým hlediskem bude úroveň běžné HPV a rozsah její fluktuace (na základě hydrogeologického posudku), případně riziko ohrožení jakosti podzemních vod, popsané v Kapitole 2.3.5. Navržen bude způsob řešení extrémních situací a havárií (viz manipulační řád, popsany v Kapitole 2.2.4).

Velmi vhodným podkladem pro hodnocení hydroopedologických poměrů pozemku a původních příčin zamokření (které se i v současnosti mohou považovat za zdroj vody pro regulaci) jsou výsledky pedologického průzkumu jako součást původní projektové dokumentace meliorační stavby, jsou-li k dispozici. Pokud v archivech již k dohledání nejsou, může být vodítkem vrstva zamokření jako výstup z KPP (dostupná na adrese <https://kpp.vumop.cz/?core=app>) nebo mapové vyjádření relevantních půdních vlastností, publikovaných na adrese <https://mapy.vumop.cz/>.

2.2.4 Specifika manipulačního řádu staveb s regulací odtoku

Manipulační řád je soubor pravidel pro manipulaci a nakládání s vodou na vodních dílech. Povinnost vlastníka vodního díla mít schválený manipulační řád je dána zákonem č. 254/2001 Sb., o vodách. Skladba a obsah manipulačního řádu jsou dány technickou normou TNV 752910 (2004). Manipulační řád schvaluje příslušný vodoprávní úřad a obsah upravuje

vyhláška Ministerstva zemědělství č. 216/2011 Sb., o náležitostech manipulačních řádů a provozních řádů vodních děl. Specifika staveb k vodohospodářským melioracím pozemků s možností regulovat drenážní odtok, resp. umožňující realizovat závlahu drenážním podmokem, jsou dokladovány na následujícím příkladu. Každá stavba bude individuálně zpracována projektantem s cílem vymezit zásady pro manipulaci s vodou k jejímu účelnému a hospodárnému využití podle povolení k nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami, ke snižování nepříznivých účinků povodní či sucha, k ochraně a zlepšení jakosti vody, jakož i k zajištění bezpečnosti, stability a spolehlivosti vodního díla.

Je-li vodní dílo rozděleno na ucelené, funkčně oddělené části nebo podílí-li se na manipulacích na vodním díle více vlastníků nebo uživatelů, může být v rámci manipulačního řádu vypracován pro každou ucelenou část vodního díla nebo pro každého jednotlivého vlastníka nebo uživatele příslušný oddíl manipulačního řádu v přiměřeném rozsahu samostatně.

Odvodňovací fáze

Při odvodňovací fázi probíhá odtok vody z plochy do recipientu gravitačně a při vyšších stavech případně čerpáním. Při provozu odvodňovací fáze musí být otevřená šoupátka/uzávěry regulačních prvků.

Odvodňovací fáze by měla probíhat v časném jaře na začátku vegetačního období. Výjimečně v extrémně vlhkém období během pokročilé vegetace.

Závlahová fáze

Závlahová funkce bude umožněna napouštěním drenážního systému vodou (z řeky, z jiného zdroje vody, přítokem z horních částí drenážní skupiny jako projev zachycení spadlých a vsáknutých srážek). Přebytková voda bude přepadat přes přelivnou hranu regulačního prvku a gravitačně odtékat do následující části odvodňovacího systému nebo do recipientu.

Provoz závlahy nastane např. otevřením šoupátek v nápustném objektu a uzavřením regulačních prvků. Napouštění je gravitační (výjimečně tlakové s čerpáním) a po průtoku vody drenážním systémem odeče přebytek vody zpět do recipientu.

Po dosažení úrovně hladiny poskytující požadovanou intenzitu závlahy (drenážním podmokem), je na této úrovni hladina udržována. Plnění drenáže je postupné tak, jak probíhá infiltrace do přilehlého půdního profilu a současně odčerpávání vody na pokrytí evapotranspirace.

Manipulovat s objekty na regulačních drenážích smí pouze osoba k tomu určená. Důležité je včasné nastavování odvodňovací a závlahové fáze, aby nedocházelo k přemokřování nebo naopak k vysušování daného území. Popsána mají být také kritéria manipulace k ochraně jakosti povrchových vod. Řešena má být i manipulace za povodní a v době zimního období. Havarijní situace na stavebním nebo technologickém zařízení vodního díla hlásí obsluha vlastníkov (uživatel) drenážního systému a správci příslušného recipientu.

Havarijním zhoršením jakosti vod je mimořádně závažné zhoršení, popř. ohrožení jakosti vod. Je zpravidla náhlé, nepředvídané a projevuje se zejména závadným zabarvením, zápachem, vytvořením usazenin, olejovým povlakem hladiny nebo pěnou, popřípadě úhynem ryb a jiných organismů. Za mimořádně závažné ohrožení jakosti vod se považuje ohrožení vzniklé neovladatelným vniknutím závadných látek, popřípadě odpadních vod v jakosti nebo množství, které může způsobit havárii, do prostředí souvisejícího s povrchovou nebo podzemní vodou. Dále případy technických poruch a závad, které takovému vniknutí předcházejí a případy úniku ropných látek ze zařízení k jejich zachycování, skladování, dopravě a odkládání.

Z provozních poměrů se podle provozních podmínek stavby sledují úrovně hladin vody (zejména v kontrolních vrtech na ploše, případně před náпустným objektem, v nádrži apod.), dále jakost přiváděných vod (pokud hrozí riziko jejího znečištění), jakost drenážních vod, případně vlhkosti půdy při požadavcích optimalizace řízení závlahového režimu.

Osvědčilo se situovat monitoring do míst instalace hlavních regulačních prvků (např. v šachtici), kam lze podle požadavků na řízení provozu umístit hladinoměr, průtokoměr a čidlo měření elektrické konduktivity vody jako sdružený ukazatel jakosti drenážních vod. Kvalitu závlahové i podzemní vody je třeba posuzovat podle ČSN 75 7143 „Jakost vody pro závlahu“.

Měření a pozorování v plném rozsahu by mělo probíhat po dobu 3 roků po předání stavby s regulací drenážních vod do užívání. Potom by mělo být provedeno komplexní vyhodnocení výsledků pozorování a měření, které doporučí další postup sledování kvality vody, efektivity provozu, případně omezení nebo zastavení pozorování a měření. Revize manipulačního řádu jsou doporučeny provádět jedenkrát za 5 let.

Kontroly vodního díla

1 x měsíčně – běžné vizuální kontroly objektů (vtokový objekt, regulační šachtice), případně v jiných intervalech závislých na počasí (např. v zimním období). Při obchůzce se dále sleduje celkově vodní dílo a jeho blízké okolí, průtokové poměry, pravidelnost chodu všech mechanismů, výskyt trhlin a viditelných deformací, posunů a sesuvů, čistota a stav česlí na vtokovém objektu, škody způsobené zvěří a nepovolanými osobami, velkým průtokem vody, splaveninami, výskyt nežádoucích předmětů atd. Výsledky pochůzek se zapisují do hlášení.

1 x ročně provést celkovou revizi vodního díla a plánovat běžné a generální opravy.

Práce spojené s provozem a údržbou

Vlastník vodního díla zajistí odstranění závad – vyspravení trhlin, netěsností, nátěry kovových částí, opravu mechanismu regulačních prvků, odstranění předmětů v potrubí. Provede nátěry proti agresivním vlivům vody, odstraňuje připravené předměty. Odstraňuje nánosy před vtokovým objektem, pokud je objekt součástí stavby. Podrobnosti uvádí TNV 75 4922 – „Údržba odvodňovacích zařízení“, podle řešení stavby případně také TNV

75 4933 – „Údržba závlahových zařízení“. Podle charakteru meliorační stavby může být vodoprávním úřadem vyžadováno zpracování provozního řádu – dle TNV 75 2920 „Provozní řády vodních děl“.

2.2.5 Možnosti biotechnických opatření pro zlepšování jakosti drenážních vod

Biotechnická, strukturní opatření jsou vedle organizačních a agrotechnických intervencí další možností, jak zlepšovat jakost drenážních vod. Principiálně se zpravidla jedná o zemní (stavební) objekty, které různým způsobem kombinují a zajišťují vodoretenční a samočisticí procesy znečišťujících látek. Přestože tato opatření (či jejich systémy) bývají zpravidla situována ve středních či dolních částech svahů či až v návaznosti na zemědělské pozemky (a drenáž), pokud jsou vhodně navržena, zrealizována a provozována, mohou být při relativně malé ploše (objemu) velmi účinná z hlediska odbourávání polutantů z drenážních vod. Procesy odbourání látek jsou různé dle charakteru objektu, pohybu vody, přístupnosti kyslíku a substrátu. Čištění vod v mokřadním prostředí s makrofyty tvoří procesy fyzikální, zejména sedimentace a filtrace, probíhající v porézním prostředí. Z fyzikálně chemických procesů se jedná především o adsorpci. Chemické procesy spočívají ve srážení sloučenin a rozkladu méně stabilních látek, oxidaci a redukci. Biologické procesy zabezpečují mikroorganismy; tvoří je rozklad dusíkatých organických látek proteolytickými a amonizačními bakteriemi, nitrifikace bakteriemi nitrifikačními, denitrifikace bakteriemi denitrifikačními. Pro odbourávání POR jsou potom důležité fotodegradace a fytoakumulace (Fučík a kol. 2021; Langergraber et al. 2020).

Umělé mokřady

Umělé mokřady se v souvislosti s charakterem toku vody v mokřadu dělí na mokřady s volnou hladinou, horizontální, vertikální a kombinované. Intenzivní umělé mokřady určené k remediaci drenážních vod jsou ve vazbě na dominující znečištění drenážních vod dusičnanovým dusíkem zpravidla navrhovány s podpovrchovým horizontálním tokem vody, kde je smyslem co nejdéle zdržení v anaerobním prostředí, se substrátem bohatým na uhlík jako zdroj energie pro denitrifikační bakterie. Jako substrát je doporučováno použití levných a dostupných materiálů v podobě dřevní štěpky, biouhle apod. (Antoš a kol. 2021; Christianson et al. 2016; Fučík a kol. 2021, Schrimpelová a kol. 2017, Tanner et al. 2010). Podstatná je role vegetace v umělých mokřadech, kdy jednak posiluje dekompozici polutantů a dále zajišťuje přísun uhlíku prostřednictvím odumírajících organických látek po jejich vyčerpání ze substrátu. Nejčastěji používané druhy jsou rákos obecný (*Phragmites australis*) a orobínek širokolistý (*Typha latifolia*).

Účinnost odstraňování dusičnanů v umělých mokřadech je velmi variabilní (20-80 %) v závislosti na vstupních koncentracích a zatížení, typu mokřadu a sezoně (s poklesem účinnosti v zimě). Průtok má zásadní vliv na

odstraněné množství dusičnanů; typické množství odstraněného dusíku se v provozních podmínkách intenzivních mokřadů s podpovrchovým tokem pohybuje mezi 0,27 – 0,55 g N.m⁻².d⁻¹ (1 000 – 2 000 kg.ha⁻¹.rok⁻¹); vztaheno k ploše umělého mokřadu. U mokřadů s volnou hladinou či v tůních je intenzita odstranění N průměrně o 30-50 % nižší. (Bruun et al. 2016; Land et al. 2016; Vymazal a Dvořáková Březinová 2018; Vymazal et al. 2020). Mokřady pro odstraňování P jsou konstruovány pro podporu adsorpce a bývají navrhovány s vertikálním tokem. Jako substráty jsou používány např. na vápník bohaté písky či železitá slévarenská struska. Pro podmínky ČR nicméně umělé mokřady k odstraňování fosforu z drenážních vod nemají příliš opodstatnění.

Mokřad musí mít dostatečnou plochu a musí zaručovat dostatečnou dobu zdržení vody (průměrně 2-3 dny), a to i v době zvýšených průtoků. Crumpton et al. (1995) uvádějí, že pro dostatečné vyčištění drenážních vod ze 100 ha kukuřice je zapotřebí plocha mokřadu (s volnou hladinou) přibližně 1 ha. Dinnes et al. (2002) ovšem dodávají, že při intenzivních odtokových událostech je čistící účinnost takového mokřadu podstatně snížena, pokud není mokřad navržen jako retenční (Fučík a kol. 2021, Langegraber et al. 2020). Řada studií a metodik doporučuje velikost mokřadu vztahovat k přispívající ploše povodí. Toto Wetland-Catchment Ratio (WCR) se pohybuje mezi 1–3 % (Tanner et al. 2010, Tournebize et al. 2017) a obvykle platí pro mokřady s volnou hladinou s argumentem dodržení tohoto poměru pro dosažení požadované doby zdržení vody v mokřadu a zajištění jeho účinnosti. To jistě platí pro případy, kdy je k takovému dimenzování prostor a možnosti. V současnosti jsou v zemích s intenzivním výzkumem těchto opatření (Dánsko, USA, Nový Zéland, aj.) doporučovány právě specializované (intenzivní), kombinované mokřady (s podpovrchovým, nejčastěji horizontálním tokem) s plochou 0,2-0,25 % z plochy přispívajícího subpovodí (Hoffmann et al. 2020). Klíčové je zohlednění dynamiky drenážního (popř. i povrchového) odtoku jak z hlediska umístění, tak i dimenzování a tvaru umělého mokřadu (Fučík a kol. 2021).

Biofiltry/bioreaktory

Biofiltry jsou zemní či podzemní objekty, určené k čištění kontaminovaných drenážních vod. V případě biofiltrů pro čištění drenážních vod je výhradně podpovrchové umístění výhodou, jak z hlediska provozu, tak účinnosti, neboť je zapotřebí zajistit anaerobní podmínky. Základní součástí každého bioreaktoru je redukující látka – zdroj elektronů, která je umístěna ve vhodném kontejneru či zemní jámě, skrze kterou prochází čištěná voda. Redukující látka je uhlíkatá a organická a denitrifikaci zprostředkovávají tzv. chemo-organotrofní bakterie. Jako náplň lze využít dříve doporučovanou obilnou slámu, nebo v současnosti preferované různé dřevní štěpky, kůry, popř. v kombinaci s anorganickým substrátem (písek, šterk), obdobně jako v umělých mokřadech pro omezení utužování substrátu. Biofiltr se umísťuje na svodných drénech, paralelně se svodným drénem nebo může být situován pod drenážní výustí. Průměrná účinnost denitrifikačních bioreaktorů se u dusičnanového dusíku pohybuje mezi 60-75 %, u pesticidů mezi 25–60 % (Povilaitis et al. 2018; Zajíček a kol. 2021).

2.3 Popis vhodných přírodních a technických podmínek k regulaci

Při modernizaci odvodňovací stavby je třeba rozsah průzkumné činnosti přizpůsobit velikosti, složitosti a stanovištním podmínkám původní stavby i charakteru modernizace. Obecně platí, že paralelně hodnotíme současný stav (případně také stav uvedený v původní projektové dokumentaci) a stav nově plánovaný. Návrh optimální technické koncepce modernizace stavby by měl odpovídat novým stanovištním podmínkám a požadavkům majitelů či uživatelů pozemku.

V rámci podmínek ČR lze zobecnit následující poznatky:

- stáří stavby není zásadním ukazatelem stavu funkčnosti stavby (uplatňují se aspekty jako kvalita provedení původní stavby, režim údržby a oprav, stanovištní podmínky atd.),
- aktuální stav objektů s dostatečnou věrohodností dokresluje dlouhodobé podmínky působící na stavbu a lze z nich usoudit na vhodnost jednotlivých typů opatření (rozsah výskytu poruch, stav zanesení potrubí a objektů sedimenty, míra degradace stavebních materiálů atd.),
- lokální diference aktuální funkčnosti (výskyt závad) je třeba zhodnotit v kontextu celé stavby (po odstranění lokální závady bývá funkčnost stavby jako celku nebo části systému obnovena a připravena k modernizaci),
- pro návrh modernizace je zásadní dobrá motivace vlastníka či uživatele odvodněného pozemku (pro údržbu, opravy i následné investice při modernizaci).

2.3.1 Stanovení indexu DR – plošného dosahu regulace

Tento parametr dokumentuje účinnost modernizace stavby s ohledem na její zlepšující funkce v krajině (potenciál objemu retence a akumulace vod v půdním prostředí, zlepšující aspekty z pohledu ochrany jakosti povrchových vod atd.).

Lineární závislost mezi průměrnou sklonitostí terénu drenážní skupiny a indexem dosahu regulace DR, vypočítaného podle Rovnice 1, dosahovala pro zpracované stavby (Kulhavý a kol. 2022) dobrou shodu, což může být dále využito při zobecnění této závislosti pro posouzení vhodnosti modernizace staveb odvodnění. Je zde třeba připomenout, že plochu dosahu regulačního prvku (R.P.) i velikost drenážní skupiny (tedy index DR) lze vyjádřit až na základě detailní situace odečtené z projektové dokumentace.

$$DR = \frac{\text{plocha dosahu regulace [ha]}}{\text{plocha drenážní skupiny či souřadu k místu předmětného R.P. [ha]}} \quad (1)$$

Plošný dosah regulace je pro jednotlivé plochy různý a byl odvozen ze statické hladiny, odpovídající přelivné hraně regulačního prvku. Ve sklonitém území je pro dosažení vyšší hodnoty tohoto indexu na stávajících stavbách odvodnění potřeba instalovat složitější regulační systém (např. vyšší počet regulačních prvků, zpravidla podzemních, neomezujících provoz na povrchu). V rovinném území je dosažení vyšších hodnot indexu DR sice snazší, omezující však bývá zabezpečení zdroje vody, zejména pokud je současným cílem realizovat závlahu a podchyceny jsou pouze srážky spadlé na odvodněnou plochu a zpravidla jen doplňkově průsaky alochtonních vod (Doležal a kol. 2004).

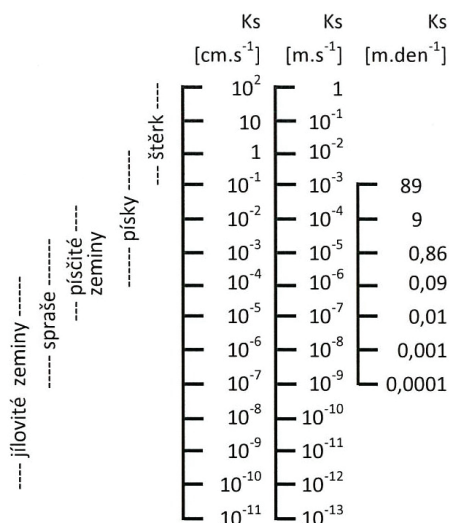
2.3.2 Hydropedologické podklady

Schopnost půdy transportovat vodu půdním profilem je charakterizována hydrofyzikálním parametrem každé půdy, který se nazývá hydraulická vodivost. Podle aktuálně platné normy ČSN EN ISO 772 (259300) (s účinností od 03/2023) je hydraulická vodivost definována jako objem vody při stávající kinematické viskozitě, který proteče za jednotku času na jednotku hydraulického sklonu jednotkou plochy měřené kolmo ke směru proudění. Tato definice předpokládá izotropní médium (půdu), ve kterém jsou všechny póry zaplněny vodou. Hydraulická vodivost se vyjadřuje v jednotkách rychlosti; nejčastěji v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{cm}\cdot\text{den}^{-1}$ nebo $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Pokud je část půdních pórů vyplněna vzduchem, parametr se nazývá nenasycená hydraulická vodivost a vyjadřuje se jako funkce půdní vlhkosti nebo potenciálu půdní vody. Pokud jsou veškeré půdní póry při proudění vyplněné vodou, jedná se o nasycenou hydraulickou vodivost, zpravidla označovanou jako K_s . V přírodě se vyskytují obě situace, v závislosti na počáteční vlhkosti půdy, a také na intenzitě a délce trvání srážky. Infiltrace srážky obvykle začíná jako proces nenasyceného proudění až do tzv. času výtopy, odkdy je množství vody ze srážky větší, než zasakované množství do půdy a dochází k akumulaci vody na povrchu půdy, tedy k výtopě a k nasycenému proudění půdním profilem. Vzhledem k tomu, že hydraulická vodivost je charakteristika určující množství vody, které je půda schopna zasáknout a transportovat do hlubších vrstev půdy, je také rozhodující pro případnou akumulaci vody na povrchu, délku jejího výskytu a případnou tvorbu povrchového odtoku. Problematika infiltrace srážkové vody a jejího zadržení (retence) v půdě se stává v současné době prioritou nejen v České republice, ale v podstatě na celém světě.

Potřebná podrobnost popisu tematiky v předložené metodice je dána přímou souvislostí vlivu existující stavby drenážního odvodnění na transport vody půdou, následně na jakost drenážních vod, jak je popisováno v dalších kapitolách metodiky. Nasycená hydraulická vodivost je tak hlavním vstupním parametrem výpočtových nástrojů, uvedených v Kapitole 2.4.

Teoretický základ a příklady využití vybraných základních metod pro stanovení hydraulické vodivosti jsou uvedeny například v práci Štibingera (2014). V praxi ke stanovení nenasycené hydraulické vodivosti dochází jen

zřídka, tento parametr je předmětem především vědeckých a výzkumných prací. Následující text bude zaměřen na nasycenou hydraulickou vodivost K_s , která je jedním z nejdůležitějších půdních parametrů, běžně používaným v řadě geotechnických, environmentálních a vodohospodářských studií a modelů (Schaap et al. 2001, Araya a Ghezzehei 2019). Její přímé stanovení, ať už v laboratoři nebo v terénu, není tak úplně bezproblémové. Hned na začátku je třeba uvést, že pro její stanovení existuje celá řada metod, avšak alespoň prozatím neexistuje žádná referenční metoda, ke které by bylo možno data naměřená různými metodami vztáhnout a standardizovat. Je tedy potřeba vhodně zvolit metodu měření na základě vyhodnocení konkrétní lokality a účelu zjišťování tak, aby byly výsledné hodnoty reprezentativní. K_s nabývá odlišných hodnot pro různá místa daného území (nehomogenita), a zároveň nabývá i různých hodnot v různých směrech (anisotropie). Navíc je K_s proměnlivá v čase, nelze ji tedy brát jako konstantu pro delší časový úsek. Krátkodobé změny K_s jsou popsány např. ve studii Nishiwaki a Horton (2020) a Singh et al. (2022). Sezónní i dlouhodobější porovnání hodnot K_s je publikováno např. v pracích Schwen et al. (2011), Kreiselmeier et al. (2020), Bářková et al. (2020), Abebrese et al. (2023). Orientační hodnoty nasycených hydraulických vodivostí pro jednotlivé typy zemin uvádí Císlarová a Vogel (1998); Obr. 2.3.1. případně další autoři – viz Tab. 2.3.1 (Poznámka: Odvozenou hodnotu drenážní pórovitosti lze využít při výpočtu dle Kapitoly 2.4.2).



Obr. 2.3.1 Orientační hodnoty nasycených hydraulických vodivostí pro jednotlivé typy zemin (upraveno podle Císlarové a Vogela 1998)

Na hodnotu K_s má vliv celá řada faktorů: klimatické faktory, zrnitostní složení půdy a zastoupení jílových minerálů, přítomnost půdních živočichů, přítomnost rostlin, jejich růst a změny v jejich kořenovém systému. Jakýkoliv zásah do prostorového uspořádání půdy, především agrotechnické zásahy (jako je: orba, předseťová příprava, pojezd mechanizace a následné utužení půdního povrchu) ovlivní, alespoň dočasně nebo i trvale, hodnotu K_s . Orba například způsobí výrazné změny v povrchové půdní vrstvě, kde

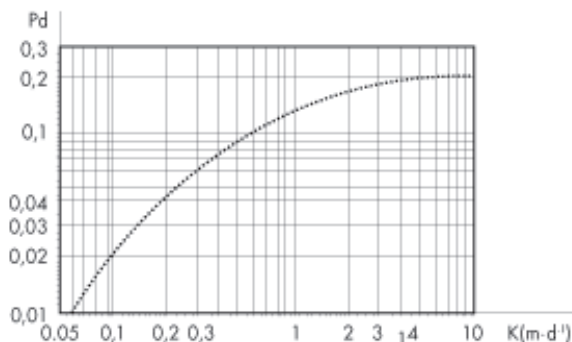
potom nastupuje proces konsolidace této půdní vrstvy. Konsolidací se rozumí deformace zeminy v čase účinkem vnějšího zatížení. Jak uvádí Vaniček (1996), tato deformace probíhá jak vlivem postupného vytlačování pórové vody, tak i vlivem reologických procesů v půdě. Znamená to tedy, že K_s se v průběhu roku mění, a to různě u různých půd. V ideálním případě by se hodnota K_s mohla sledovat průběžně v rámci celého roku; to je ovšem časově a finančně velmi náročné. Jak je uvedeno v metodice Kodešové et al. (2015), je potřeba stanovení K_s naplánovat do etap tak, aby v první etapě byla půda dostatečně konsolidována po zasetí plodiny (odstup cca 1 měsíc od zasetí) a v druhé etapě byla dostatečně vyvinuta půdní struktura (co nejdříve po sklizni). Pokud nelze stanovení provést v obou termínech, doporučuje se K_s stanovit v rámci druhé etapy, tedy po sklizni plodiny.

Tab. 2.3.1 Typické hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (K_s) a drenážní pórovitosti (P_d)

Půdní druh	Typická hodnota K_s [m.d ⁻¹] / ^{*1}	Odvozená hodnota P_d [-] / ^{*2}
Písek	7,15	0,200
Hlinitopísčítá	3,50	0,188
Písčitohlinitá	1,06	0,135
Hlína	0,30	0,063
Hlinitojílovitá	0,25	0,054
Jílovitohlinitopísčítá	0,30	0,063
Jílovitohlinitá	0,06	0,010
Jíl	0,01	0

^{*1} Hodnota převzata z práce Váška a kol. 2000: HYDROMELIORACE, Technická knižnice autorizovaného inženýra a technika, TK16, ČSSI rok 2000, ISBN 80-86426-01-7, autorský kolektiv: J. Váška, P. Dvořák, F. Hrádek, P. Kovář, F. Kulhavý, V. Kuráž, J. Říha, K. Vrána, tabulka Tab. 3-4, str. 65

^{*2} viz Obr. 2.3.2



Obr. 2.3.2 Hodnoty závislosti drenážní pórovitosti P_d [-] na součinitele hydraulické vodivosti K [m.d⁻¹] převzaty z U.S. Bureau of Reclamation

V zásadě existují dvě skupiny metod stanovení K_s ; metody přímé (měření v laboratoři nebo v terénu) a metody nepřímé (odhad K_s na základě snadněji dostupných a měřitelných charakteristik jako je zrnitostní složení, objemová hmotnost suché půdy či obsah organické hmoty). Nejpreferovanější, ovšem také nejnákladnější (časově i finančně), bývají terénní metody, kdy dochází k měření přímo na zvolených místech charakteristických pro dané území. Čím více je území variabilní, tím více míst je třeba zvolit tak, aby byla variabilita území zohledněna. Největší výhodou terénních metod je skutečnost, že při měření nedochází k porušení půdního profilu, zůstává zachována návaznost jednotlivých půdních horizontů a není přerušena přirozená kontinuita půdních pórů. Vzhledem k většímu objemu proměřované půdy jsou tato měření méně ovlivněna půdní heterogenitou.

Pro charakteristiku hydraulických parametrů zvodněného půdního a horninového prostředí (včetně K_s) se využívají hydrodynamické zkoušky, které poskytují podklady pro stanovení optimálního a maximálního odebíraného množství vody ze zdroje (čerpací zkouška, stoupací zkouška, nálevová zkouška). Pro účely zacházení se srážkovými vodami nebo projektovou dokumentaci čistírny odpadních vod se provádí tzv. vsakovací zkouška, při které se sleduje rychlost vsakování vody ve vrtu nebo sondě. Pokud se na území nachází hladina podzemní vody tak, že je podzemní voda přítomna ve vrstvě půdy, pro kterou je potřeba hodnotu K_s určit, je možné pro stanovení K_s použít tzv. modifikovanou jednosondovou metodu s použitím aproximace Hooghoudta (1936), která je založena na měření úrovně stoupající hladiny podzemní vody ve vyvrtané sondě v závislosti na čase. Pro vyhodnocení naměřených dat je možno použít popsané příklady v práci Štibinger a Pešková (2013) nebo Bátková et al. (2013).

V blízkosti povrchu terénu v profilech bez přítomnosti podzemní vody je K_s měřena infiltračními zkouškami pomocí infiltrometrů (permeametrů, propustoměrů). Tato zařízení mají různou konstrukci a rozměry, vždy však umožňují sledovat množství zainfiltrované vody přes danou infiltrační plochu infiltrometru v závislosti na čase. Mezi nejčastěji používané patří dvouválcový infiltrometr (Parr a Bertrand 1960), jednoválcový infiltrometr s proměnnou nebo konstantní tlakovou výškou (např. tlakový infiltrometr Matula a Kozáková (1997) nebo SATURO od spol. METER Group Inc.) a permeametry pro vrtané sondy, např. Guelphský permeametr (Soilmoisture Equipment Corp., CA, USA) nebo Borehole infiltrometer (Soil Measurement Systems, CA, USA). Nejen pro stanovení K_s , ale i pro monitoring povrchového odtoku a vodní eroze jsou vhodné dešťové simulátory (např. rainfall simulator FEL3 od spol. Armfield, nebo Mini rainfall simulator od spol. Eijkelkamp). V České republice se vývojem dešťového simulátoru zabýval Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy v.v.i. ve spolupráci se společností Adcis s.r.o., kde byl vyvinut automatizovaný simulátor deště umožňující dálkové řízení (patent CZ 307 090, užit. vzor č. 33692). Nejčastěji se pro stanovení K_s v terénu používají válcové infiltrometry. Přestože dvouválcový infiltrometr proměřuje poměrně velký objem půdy, od jeho používání se ustupuje, vzhledem k relativně obtížné manipulaci (vzhledem k jeho rozměrům) a velké spotřebě vody pro měření. Guelphský permeametr umožňuje měření nejen na povrchu půdy, ale i v hloubce ve vyvrtané sondě a je tedy možné ho použít i ve svažitějším terénu.

Pokud z jakéhokoliv důvodu nelze provádět měření přímo v terénu, je potřeba zvážit schéma vzorkování a počet odebíraných neporušených půdních vzorků tak, aby byla výsledná stanovená hodnota reprezentativní. Pro laboratorní stanovení se používají půdní vzorky o různém objemu; Kopecského váleček o objemu 100 cm³, případně 250 cm³ či více. Čím je váleček větší, tím je velikost vzorku reprezentativnější, ale zároveň se tím obtížněji odebírá. Z jednoho z řady předem naplánovaných vzorkovacích míst doporučuje Valla et al. (2000) odebrat 3-5 válečků. Ve výjimečných případech se pro stanovení Ks používají uměle hutněné vzorky z odebraného porušeného vzorku dané půdy, ale to je velmi nepřesný postup, především proto, že se nepracuje se skutečným reálným porézním systémem, který by mohl testované půdní prostředí reprezentovat. Tento postup rozhodně nelze doporučit. Laboratorní stanovení probíhá na válečcích s nasycenou půdou, které jsou umístěny do měřicího zařízení (flow cell), přičemž voda je do systému přiváděna s konstantním nebo proměnným spádem. Měří se množství vody proteklé přes průtočnou plochu válečku za jednotku času. Volba metody závisí na testované půdě; půdy s vyšší hodnotou Ks (řádově 10⁻⁵ m.s⁻¹ a více) je možné měřit na přístrojích s konstantním spádem, zatímco u půdy s nižší hodnotou Ks (řádově 10⁻⁶ m.s⁻¹ a méně) by měření na přístroji s konstantním spádem trvalo příliš dlouho a je proto vhodné použít přístroj s proměnným spádem. Existují komerčně dostupné přístroje pro stanovení Ks v laboratoři; např. Aardvark permeametr (ENVCO Comp.) nebo propustoměr spol. Eijkelkamp pro měření až 10 vzorků současně. Stanovení s automatizovaným záznamem a vyhodnocením založené na obou principech umožňuje např. přístroj KSAT (METER Group. Inc.) nebo Chameleon (Soilmoisture Equipment Corp., CA, USA). Přístroj KSAT využívá válečky o objemu 250 cm³, což je vhodnější vzhledem k většímu objemu proměřované půdy. Lze k němu však zakoupit redukci na válečky o objemu 100 cm³. Metoda proměnného spádu je při použití přístroje KSAT preferována z důvodu uživatelsky přívětivějšího provedení i pro půdy s vyšší hodnotou Ks.

Základem pro vyhodnocení naměřených dat je Darcyho zákon, který popisuje lineární vztah mezi rychlostí proudění vody a hydraulickým gradientem, kde nasycená hydraulická vodivost je koeficientem této úměry. Darcyho zákon je platný pouze pro laminární proudění, které je považováno za vhodnou aproximaci proudění reálných kapalin půdním prostředím při malých rychlostech. Každá uvedená metoda má svůj pracovní postup a doporučený postup zpracování dat popsany v manuálu daného přístroje. Laboratorní zkoušení zemin – stanovení propustnosti je předmětem ČSN EN ISO 17892-11 (721007) účinné od 08/2019. Termín propustnost býval v minulosti chybně používán v souvislosti s Ks, a i zde je nesprávně uveden. Nasycená hydraulická vodivost Ks je charakteristikou vztahu půda – voda, zatímco propustnost charakterizuje pouze vlastnosti půdy a její jednotkou je jednotka plochy (Kutílek 1978). Metody vyhodnocení měření pro stanovení Ks vycházejí zpravidla z dat ustáleného proudění, existuje však možnost vyhodnocení měření za podmínek transientního proudění např. pomocí programu HYDRUS 2D (Šimůnek et al. 1999).

Pokud není možné stanovení Ks některou z přímých metod, lze alespoň orientačně hodnotu Ks odhadnout. Existuje řada metod odhadu Ks. Jedna z těchto metod je metoda aplikace pedotransferových funkcí. Tedy funkcí,

kteře na základě dostupných nebo lehce měřitelných půdních vlastností (půdní druh nebo poměrný obsah písku, prachu a jílu, objemová hmotnost suché půdy, obsah organických látek, ...) odhadnou potřebnou hydraulickou charakteristiku, tedy K_s . Jak uvádí Wösten et al. (2001), odhady byly zpočátku založeny na lineární či nelineární regresi, nyní je využíváno neuronových sítí nebo klasifikačních a regresních stromů. Využití metod odhadu je umožněno existencí a dostupností národních a mezinárodních databází. V roce 1996 byla zveřejněna databáze UNSODA (Leij et al. 1996), která byla inovována Nemesem et al. (2001) na verzi 2.0 a byla začleněna do programů Rosetta, RETC a HYDRUS, kde je možno na základě různých úrovní dostupných půdních vlastností odhadnout hodnoty K_s získat. Programy jsou volně ke stažení na stránkách USDA, tedy Ministerstva zemědělství Spojených států amerických (<https://data.nal.usda.gov/>). Data evropských půd byla také inventarizována a shromážděna do databáze HYPRES (Wösten et al. 1998, 1999). Půdy české republiky nebyly v této databázi zahrnuty, nicméně na základě této databáze vznikla samostatná česká databáze HYPRESCZ (Miháliková et al. 2013). V roce 2015 byla publikována databáze EU-HYDI obsahující data z 18 evropských zemí včetně České republiky (Tóth et al. 2015).

Základní informace o rozsahu hodnot K_s lze získat z mapy hydrologických skupin půd, případně z tzv. „Mapy infiltrace a propustnosti půd“ Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy, v.v.i. Mapy jsou dostupné přes geoportál SOWAC GIS (<https://geoportál.vumop.cz>). Např. v sekci „eKatalog BPEJ“ je možno kliknutím do mapy pro zvolenou lokalitu zobrazit dostupné informace včetně hydrologické charakteristiky, tedy i hodnotu K_s , která je zde obsažena pod obecným názvem „Infiltrace a propustnost“. Takto zjištěnou hodnotu K_s je třeba brát jako orientační hodnotu, kterou je třeba zpřesnit měřením. Hlavní půdní jednotky v databázi BPEJ jsou kategorizovány do skupin A, B, C, D podle minimální rychlosti infiltrace do nasycené půdy bez pokryvu. Na mapě infiltrace a propustnosti půd jsou hodnoty získány kombinací výše uvedené kategorizace s údaji z datové banky fyzikálních, chemických a morfologických charakteristik a vlastností půd ČR, výsledků vlastních měření Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy, v.v.i., a literárních podkladů (VÚMOP, nedatováno, dostupné z adresy <https://www.vumop.cz/poskytovani-dat>).

Zkušenosti s odhadem K_s pomocí pedotransferových funkcí pro půdy v České republice lze nalézt např. v publikacích Bátková et al. (2022, 2023). Přestože použití nepřímých metod pro určení K_s je rychlé a levné, je třeba výsledek brát s rezervou a pokud možno je ověřit některou z přímých metod.

Výzkumem strukturálních pórů pro vznik preferenčního proudění v nenasycených půdách se zabývali Kung et al. (2005), kteří kvantifikovali spektrum pórů, podílejících se na preferenčním toku. Autoři provedli řadu polních experimentů. Spektrum distribuce velikosti (průměru) pórů může být použito k výpočtu půdní hydraulické vodivosti pro preferenční proudění, neboť představuje parametr, který charakterizuje a je schopen kvantifikovat pohyb vody jako nosného média i transport rozpuštěných látek. Autoři docházejí k závěru, že podíl snižování koncentrace dusičnanů jejich biochemickou denitrifikací a jejich prostým ředěním je zásadním způsobem závislý na průběhu preferenčního proudění.

Pokud je k dispozici retenční čára půdní vlhkosti (pF-čára) lze pro odvození ekvivalentu půdních pórů využít model kapilár různého poloměru a Kutilek (1978) pro tento případ uvádí Rovnici 2, resp. Kosil (1973) do vztahu mezi sacím tlakem P [vyjádřeným výškou vodního sloupce v barech] a průměrem ekvivalentních kapilár d [mm]:

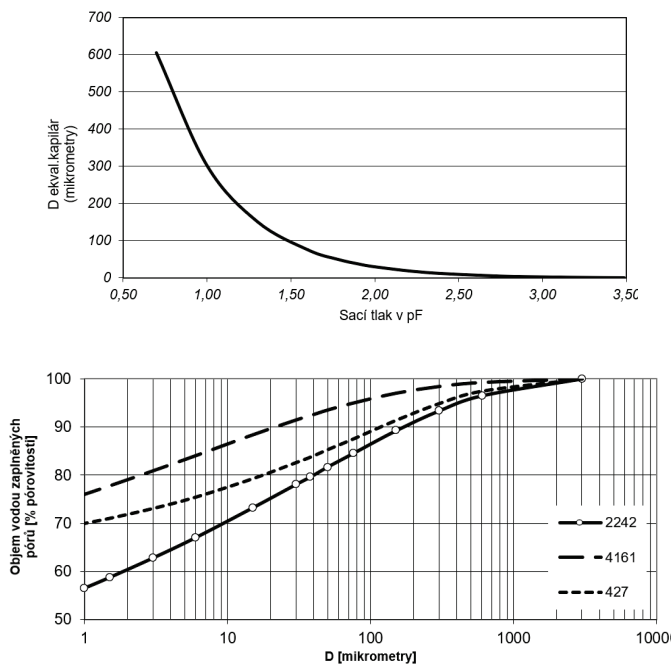
$$P = \frac{2 \cdot a^2}{10^4 \cdot d} \quad (2)$$

kde

$a^2 = 14,82$ pro vodu při 20°C

d = průměr ekvivalentních kapilár [mm]

Tento funkční vztah je graficky znázorněn na Obr. 2.3.3.



Obr. 2.3.3 Nahoře: Vztah mezi sacím tlakem a průměrem ekvivalentních kapilár dle Rovnice 2
Dole: Příklad integrální křivky rozdělení půdních pórů (pro tři různé vzorky půd), odvozeno s použitím Rovnice 2 z měřených pF-čar

2.3.3 Funkce makropórů a erozivita půdy při uplatnění drenážního podmoku

Preferenční cesty jsou jedním z faktorů ovlivňujících šíření znečišťujících látek v půdách, neboť ovlivňují zjevné/měřitelné hydro-pedologické charakteristiky půd. Pro posouzení účinnosti detailních opatření na pozemcích a pro správné projektování úprav staveb zemědělského odvodnění anebo pro návrh nových staveb či dalších opatření na pozemcích je potřebné mít

k dispozici dostatečně přesné informace o výskytu, proměnlivosti a hydrologické účinnosti preferenčních cest.

Co se týče účinnosti preferenčních cest ve vztahu k přenosu znečišťujících látek, jsou významné, spolu s uměle provedenými drenážními zásahy (zejména stabilními drenážními systémy, tj. zde především, co se účinnosti týče, vlastního drenážního potrubí a drenážní rýhy), také systémy různě trvalých a různě se vyvíjejících makropórů – od prostých puklin až po složitě větvené sítě v půdním a horninovém prostředí, které obklopuje trubkovou drenáž.

Podkapitola se proto z pohledu vazby preferenčních cest a drenážních systémů zaměřuje na základní souvislosti hydrologických charakteristik a hydrologických procesů jako základních podmínek přesunů, šíření, akumulace a změn znečišťujících látek v zemědělských půdách.

Vedle přednostního proudění makropóry je třeba brát v potaz také kontrastní podmínky pro proudění a retenci vody mezi sousedícími dílčími plochami, resp. trojrozměrnými tělesy. Zejména na zemědělských půdách se setkáváme se značnou variabilitou parametrů půdní matrice, či obecně půdního a horninového prostředí, danou přírodními procesy i umělými zásahy (např. přirozenou stratifikací, kontrasty mezi půdními okrsky, návážkami, heterogenitou způsobenou výkopy a následnými zásypy) a z uvedeného vyplývající i řádově rozdílnými hodnotami hlavních hydrologických parametrů, zejména nasycené hydraulické vodivosti.

Definice a souvislosti preferenčního proudění v půdách podrobně popisuje rozsáhlá a specializovaná odborná literatura (např. Kutílek a Nielsen 1994; Kodešová 2005). Z uvedených zdrojů i z vlastních šetření ovlivnění hydrologických charakteristik, cíleně zaměřených na vztahy k drenážním systémům (např. Kulhavý, Pelíšek, Čmelík 2013; Pelíšek 2018) je sestaven text, popisující základní logiku procesů a míry ovlivnění.

Pro účely řešeného úkolu je podstatná stálost sítě makropórů, dynamika jejich vzniku a zániku, a tedy i související dynamika hydrologických charakteristik. Zobecnění směřuje k použitelným parametrům, které dostatečně charakterizují půdní prostředí (prostorové a morfologické parametry sítě, hustota sítě preferenčních cest, charakteristické rozměry a jimi ovlivněné charakteristiky pohybu vody / K_s , K_i /).

Podle konkrétního půdního typu a druhu dochází k různě velkým a různě rychlým změnám preferenčních cest v průběhu času, a to vlivem řady procesů, včetně umělých zásahů. Výsledkem jsou různé typy makropórů (plánární, tubulární, kombinované – viz např. Vašků 2008) a lze mluvit i o určité logice vývoje (vývojových řadách) sítě makropórů podle typu lokality. V různé míře se proto liší charakter této mikrohydrologické sítě jak mezi různými místy (lokalitami), tak i mezi půdními horizonty. Po určité období mohou existovat přímá hydrologická spojení skrze celou mocnost půdního profilu, přičemž tato spojení mohou periodicky zanikat a obnovovat se.

Z uvedeného stručného popisu vyplývá, že ovlivněné a proměnlivé budou jak mechanicko-fyzikální procesy, tak i procesy chemické a biologické, tj. od prostého mechanického rozpadávání větších bloků půdní matrice i menších agregátů, jejich přesunů vlivem gravitace anebo proudící vodou až po opětovné stmelování nebo jejich přemísťování a chemickou přeměnu vlivem

edafonu apod. To vše s již obsaženými nebo průběžně se přidávajícími nepůvodními látkami či jejich druhotnými sloučeninami apod.

Význam zoogenních makropórů

Pro preferenční proudění je klíčový vliv vybraných druhů, které jsou na zemědělských půdách početností a velikostí významné v mezo- až makro-měřítku variability vtoku a vzestupu vody skrze makropóry v půdním profilu a distribuce vody v půdní matrix. Pozornost je přednostně zaměřena na vertikální nory žížalovitých, přestože významný vliv na makropórovitost půd v konkrétních podmínkách mohou mít i další druhy zoedafonu (hmyz, savci), a nevertikální makropóry, obdobně jako se z pohledu ovlivnění pohybu vody podílejí i makropóry vytvářené rostlinami. Významný je zejména vliv žížal (čeleď žížalovití, Lumbricidae) k utváření fyzikálních vlastností půd (k tvorbě půdních makropórů), včetně tmelícího efektu (vlivem kutikulárního slizu, tvořeného především polysacharidy), který pozitivně působí k utváření půdní struktury. Samotná přítomnost (resp. nepřítomnost) žížal v půdním profilu je jistým indikátorem schopnosti půd k infiltraci vody do půdy a významně tak může ovlivnit srážko-odtokové procesy v krajině, stejně jako pohyb živin v půdě.

S cílem upřesnit vybrané hydrofyzikální parametry půd (zejména změny nasycené hydraulické vodivosti půd a pórovitosti) ve vztahu k jejich významnosti při uplatňování principů regulace drenážního odtoku, resp. retardace odtoku z odvodněné plochy, byla upřesněna hydraulická účinnost vertikálních tubulárních zoogenních makropórů (pedohydatod) anecických druhů žížal, včetně analýzy změny hydraulické vodivosti stěn makropórů vlivem velikosti průměru makropóru.

Řadou autorů je potvrzen dlouhodobý výskyt vertikálních tubulárních makropórů lumbricidů v hlubších půdních horizontech, a tedy i v dosahu změn HPV. Provedené vlastní experimentální činnosti přispěly k definici míry odolnosti povrchu přirozených makropórů žížal vůči účinkům stagnující vody, i vůči účinkům vody proudící shora. Vliv opakovaného vzestupu a stagnace hladiny vody (opakované promývání makropórů při více cyklech navlážení drenážním podmokem) si žádá další upřesnění.

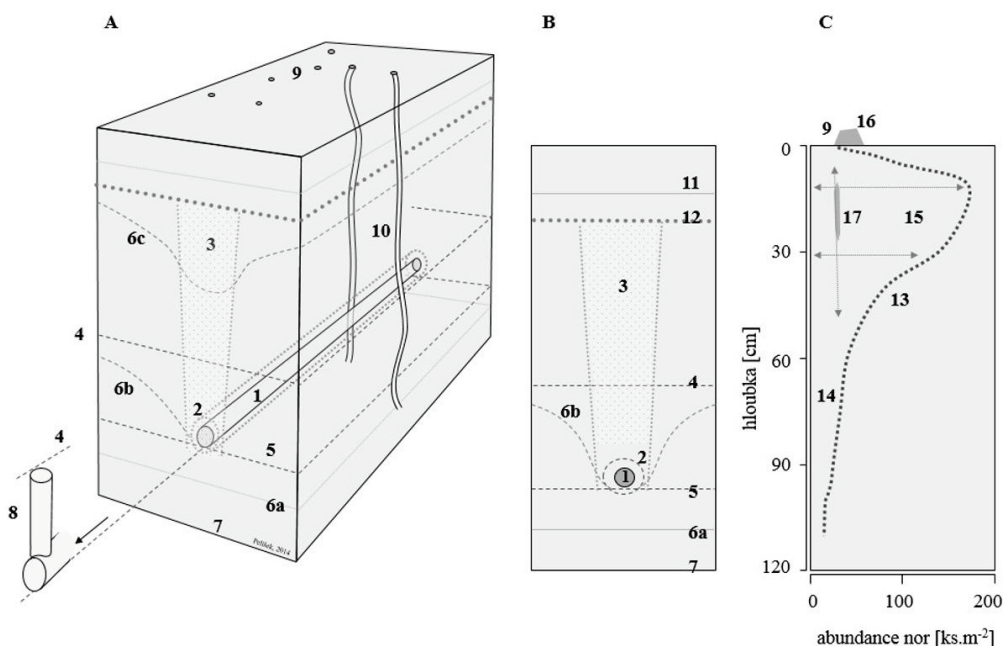
Lumbricidace (zvýšení počtu žížal – např. Beran a kol. 1991: str. 26) je jedním z možných agromelioračních opatření (dále např. metodika Kulhavý a kol. 2015: str. 107). Prokázané účinky žížalích nor jsou popsány v řadě publikací. Příkladem účinku přítomnosti zoogenních makropórů je také zlepšení účinnosti drenážního odvodnění na těžkých půdách (např. ve Východoslovenské nížině, na půdách Holicka a Rychnovska), kde by bez existence preferenčních cest a biogenních makropórů byla efektivní infiltrace i účinnost melioračního opatření nižší.

Z hlediska environmentálních souvislostí je významný pozitivní jev, kdy zřízením trubkové drenáže a souvisejícím zlepšením vodního a vzdušného režimu půd dochází ke vzniku příznivého prostředí pro řadu druhů edafonu, který dále působí na makropórovitost půd. Pro žádoucí výskyt a hustotu zoogenních makropórů lze využít určité samovolnosti procesů v návaznosti na bioturbační aktivitu živočichů (zejména žížal, hmyzu a krt-

ků), dále na dlouhodobost působení, resp. přítomnosti makropórů (vlivem ztuhnutí, cementace a uhlazení stěn makropórů žížalovitých, dále vlivem víceletého přežívání a aktivity živočichů) a biologické vazby (mikrobiální aktivita, posun živin, provzdušnění a dekompozice).

Přítomnost, parametry a vývoj zoogenních pedohydatod nelze oddělovat od výskytu podpovrchových kanálek a kavern, vznikajících převážně působením abiotických činitelů a vykazujících určité vlastnosti v závislosti na klimatických a georeliéfových podmínkách (podrobně např. Conacher a Dalrymple 1977). Obdobně např. Stuyt (1992: str. 202) zmiňuje vazbu výskytu a charakteru nezoogenních makropórů na vertikální růst kořenů rostlin a na horizontální vrstevnatost půdy.

Zooedafon, zejména žížaly, vytvářejí síť nor, trubicovitých makropórů. Podle druhu žížal a podmínek půdního prostředí zasahují nory do různé hloubky. Typy systémů makropórů se liší intenzitou vtoku vody do půdy, a tedy hydrologickým účinkem. Dokladován je nárůst rychlosti infiltrace vody do



Obr. 2.3.4 Souvislosti tématu v měřítku drénu s regulovaným odtokem

LEGENDA k obrázku:

- A. Celková situace hlavních prvků:** 1 – drén; 2 – hydraulicky účinný obvod drénu; 3 – výplň drenážní rýhy; 4 – úroveň HPV při regulaci odtoku; 5 – niveleta drénu; 6 (a, b, c) – příklady úrovně HPV; 7 – úroveň nevětrálního podloží; 8 – schematizovaný regulační prvek a regulovaná výška vzdutí HPV v místě regulačního prvku; 9 – vyústění zoogenních makropórů na povrchu půdy; 10 – vertikální zoogenní makropór
- B. Vertikální řez – hlavní hydrické a antropogenní vlivy:** 11 – hloubka kořenové zóny TTP; 12 – hloubka orby
- C. Přirozená distribuce zoogenních pedohydatod v půdním profilu (mimo drén):** 13 – křivka abundance (ZPHD); 14 – zóna převážně vertikálních nor hlubinných žížal; 15 – zóna převážně horizontálních nor žížal; 16 – materiál vynášený zooedafonem na povrch půdy; 17 – materiál vnášený do zoogenních makropórů

půdy po 3 až 15 hodinách od začátku povrchové výtopy (Vašků 2008; Peříšek 2018), což je zapříčiněno mj. aktivitou půdních organismů. Zde platí podmínka, že vsak vody (např. při dešťové srážce) probíhá do nenasyceného půdního prostředí. Souvislosti tématu v měřítku drénu s regulovaným odtokem zachycuje Obr. 2.3.4.

Prověřeno je několik variant vazby typu zoogenních makropórů na kompakci, propustnost a erodovatelnost půdy: míra změny hydraulické vodivosti půdy ve stěnách zoogenních makropórů vlivem zhutnění, míra tohoto zhutnění a stabilita stěn makropórů vůči působení protékající a stagnující vody. Přednostně byl testován proces infiltrace vody zdola (přitékající do půdních horizontů proti směru působení gravitace, například z úrovně uložení trubkové drenáže při závlaze drenážním podmokem), na rozdíl od tradiční vertikální infiltrace shora, nejčastěji z povrchu půdy po dešťové srážce.

V přirozených podmínkách je síť makropórů pod vlivem dlouhodobější přítomnosti a aktivity organismů. Například v průběhu jednoho roku lze předpokládat pro tuzemské klimaticko-půdní podmínky pro horizont B v dosahu regulace HPV cca 7 a více měsíců aktivity. Po tuto dobu se aktivita žízal kombinuje s řádově desítkami možných výrazných změn vlhkosti půdy vlivem srážek a oscilace (změn úrovně) hladiny podzemní vody. Makropóry jsou dále ovlivňovány řadou faktorů mimo období hlavní aktivity žízal.

Hlavní sledované ovlivněné parametry

Propustnost, stabilita, kapacita a reverzibilita změn makropórů při infiltraci vody z půdního povrchu anebo při retardaci podpovrchového odtoku mají význam při distribuci vody v půdním profilu. Pórovitost, ale i druh, velikost a propojení pórů, je možné ovlivnit řadou zásahů (agrotechnických, biologických, organizačních). Parametry pórovitosti lze tedy do určité míry cíleně upravovat. Pro dosažení infiltračních, navlažovacích a spojených žádoucích chemických efektů lze ovlivnit jak efektivní hydraulickou vodivost půdního prostředí, tak rychlost vsaku povrchových, resp. srážkových vod, ale i redistribuci drenážní vody při uplatnění drenážního podmoku (transport vody směrem z drénu do půdního profilu).

Optimální funkčnost celého „drenážního systému“ na zemědělské půdě je zajištěna dodržováním agromelioračních a agrotechnických opatření. Drenážní systém na zemědělské půdě zahrnuje nejen technické prvky (odvodňovací příkopy, drenážní potrubí atd.), ale také právě agromeliorační opatření (např. hloubkové kypření, orba pluhu s podrýváký, krtkování atd.) anebo následná opatření po odvodnění a při závlaze (např. Jůva a kol. 1964) pro úpravu a stabilizaci odvodňovacích schopností drenáže, resp. zajištění hydraulické spojitosti v půdním profilu.

Pro účely řešení projektu se pozornost zaměřila především na ovlivnění nasyčené hydraulické vodivosti K_s a zjištění hodnot zjevné hydraulické vodivosti K_i , která je ovlivněná preferenčním prouděním (informativní rozmezí naměřených hodnot K_i je cca 0,50 až 2,0 m.hod⁻¹)

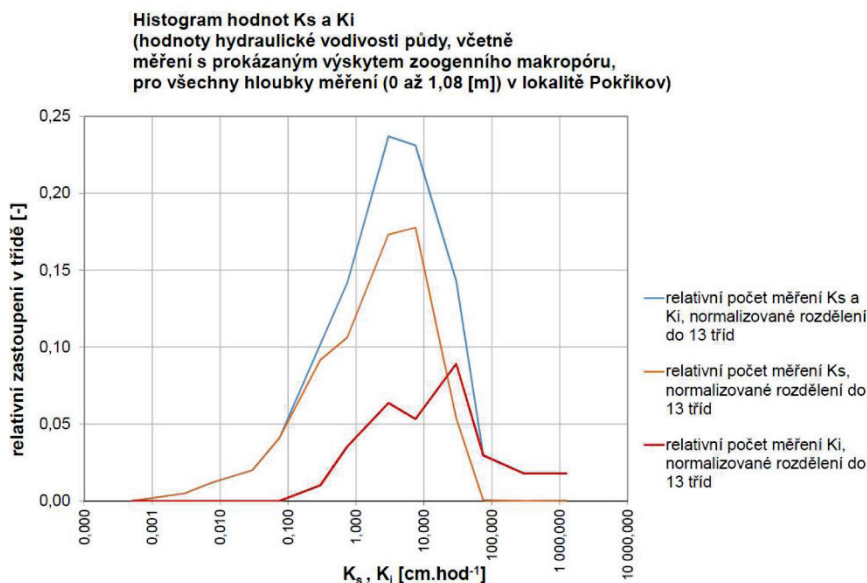
Zpřesněny jsou detaily influkčně-infiltračních procesů v měřítku jednotlivých zoogenních pedohydatod a jejich přesně definovaných úseků. Zjištěna je za konkrétních podmínek efektivní nasyčená hydraulická vodivost

půdního horizontu (zahrnující vertikální plošnou infiltraci a influkční vtok do půdy prostřednictvím makropórů s následnou radiální infiltrací) K_i , nasycená hydraulická vodivost stěn zoogenních makropórů K_{sw} , relativní míra kompakce C_c , intenzita eroze stěn makropórů.

Nasycená hydraulická vodivost stěn makropórů K_{sw} byla zjištěna u některých zoogenních pedohydatod a umělých makropórů nižší oproti K_s matrice až o řád desítek procent. Trendy však nejsou dostatečně jednoznačné, což platí také pro relativní míru kompakce, vyjádřenou pomocí pracovního parametru koeficientu kompakce (C_c), kdy v některých případech činí navýšení hodnoty objemové hmotnosti zeminy v okolí makropórů až 25 %. Intenzita eroze stěn makropórů byla ověřována pro variantu rozplavování půdy vlivem vzestupu vody ve vertikálních makropórech a případné stagnace vody v řádu minut až hodin.

Výsledky, zejména zjištěnou variabilitu K_s , K_i přehledně dokumentuje graf na Obr. 2.3.5. Zjištěna je variabilita hydraulické vodivosti půdy, daná zčásti vlivem influkce prostřednictvím zoogenních pedohydatod (pro další srovnání byly využity také výsledky souvisejících studií). Údaje jsou získány ze 4 základních poloh na pozemcích s odvodněním trubkovou drenáží, tj. ve dvou půdních horizontech, v dosahu agrotechnických zásahů a v dosahu regulace HPV, v místě drenážní rýhy a mezi drény, kombinace pro sečenou louku a orané pole.

V přirozeném prostředí probíhá řada navzájem se ovlivňujících procesů – vysychání, navlhčování a bobtnání půdy, bioturbační procesy a procesy v planárních makropórech řádově větších rozměrů, které mohou protínat trasu zoogenní nory. Uvolněný materiál se může v makropóru usazovat



Obr. 2.3.5 Vyjádření variability naměřených hodnot hydraulické vodivosti K_s resp. K_i pro všechny hloubky měření na experimentální ploše (modrá křivka zahrnuje také hodnoty z měření, která byla dominantně ovlivněna influkcí; červená křivka pro měření s prokázáním výskytem zoogenních makropórů o průměru $d > 2,5$ mm)

v příhodných úsecích, dočasně přilnout k povrchům, být zcela odplaven nebo pozvolna posouván v suspenzi, akumulovat v prostorách fyto- genní výstelky stěn apod. Roli hraje také tvarová proměnlivost makropórů vlivem proudící vody a změn vlhkosti půdy, zejména po každé srážkové epizodě anebo epizodě manipulace s HPV. Zřejmě se projeví také pružnost výstelky, tvořené zataženými rostlinnými zbytky. Ve vertikálních norách anecických druhů ve větších hloubkách nebyly zbytky zaznamenány.

Při relativně krátkodobém (řádově minuty až dny) procesu vtoku vody shora do půdního profilu skrze zoogenní makropóry platí zřejmě předpoklad, že infiltrace stěnami makropóru je v porovnání s rychle se pohybující vodou v makropóru malá, a následně i difuze látek rozpuštěných ve vodě skrze stěny makropóru do půdní matrix je velmi pomalý proces.

2.3.4 Vliv intenzity kapilárního vztlínání

Existence odvodnění snižuje dotaci kořenové zóny vodou z kapilárního vztlínání z HPV, naopak regulace drenážního odtoku a zvýšení úrovně HPV zvyšuje intenzitu kapilárního vztlínání z HPV ke kořenovému balu, což současně zvyšuje intenzitu transportu půdního roztoku (a živin) ke kořenům pěstovaných rostlin a zvyšuje potenciál asimilace těchto látek rostlinami. Proto je důležité věnovat pozornost i tomuto procesu. U plodin s kořenovou biomasou v hloubkách blízkých hloubce uložení drénů bude projev malý, naopak větší efekt bude mít pro plodiny mělčeji kořenicí – viz Tab. 2.3.4.

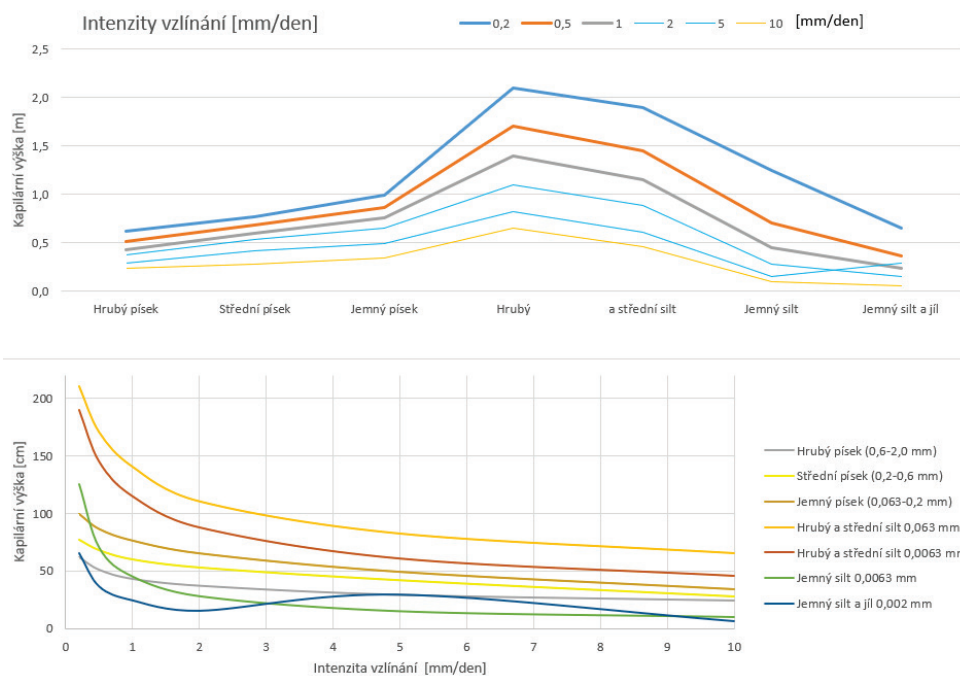
Intenzitu kapilárního vztlínání popisuje řada autorů. Hlavním parametrem bude velikost půdních pórů (viz také Kapitola 2.3.2), resp. půdní druh, příp. půdní typ. Toto členění využívá také norma TNV 75 4221, viz Tab. 2.3.2 a z ní odvozené hodnoty numerické aproximace v Tab. 2.3.3.

Tab. 2.3.2 Orientační hodnoty kapilární výšky a množství vztlínající vody (TNV 75 4221) včetně názorného grafického vyjádření (na následující straně)

Půdní druh		Zrnitost [mm]	Kapilární výška [m] při vztlínajícím množství [mm.d ⁻¹]						Ψ [cm]
			0,2	0,5	0	2	5	10	
Hrubý písek		2,0-0,6	0,62	0,51	0,43	0,37	0,29	0,24	100
Střední písek		0,6-0,2	0,77	0,68	0,6	0,53	0,42	0,28	100
Jemný písek		0,2-0,06	0,99	0,86	0,76	0,65	0,49	0,34	100
Hrubý	střední n ^x	0,063	2,1	1,7	1,4	1,1	0,82	0,65	300
a střední silt	velká n ^x	0,0063	1,9	1,45	1,15	0,88	0,61	0,46	300
Jemný silt	střední n ^x	0,0063	1,25	0,7	0,45	0,28	0,15	0,1	700
Jemný silt a jíl	velká n ^x	0,002	0,65	0,36	0,24	0,15	0,29	0,06	700

Poznámky: n^x = pokračuje text „... náchylnost ke zhutnění“

Ψ = odpovídající sací napětí na úrovni spodní hranice kořenové zóny



Tab. 2.3.3 Odvozené rovnice vztahu kapilárních výšek a hodnot intenzit kapilárního vztlínání

Půdní druh	Kapilární výška [cm] =
Hrubý písek (0,6-2,0 mm)	= 42,769 * Intenzita vztlínání [mm.d ⁻¹] exp (- 0,243)
Střední písek (0,2-0,6 mm)	= -12,13 * Ln (Intenzita vztlínání [mm.d ⁻¹]) + 59,323
Jemný písek (0,063-0,2 mm)	= -16,45 * Ln (Intenzita vztlínání [mm.d ⁻¹]) + 74,479
Hrubý a střední silt 0,063 mm	= 134,47 * Intenzita vztlínání [mm.d ⁻¹] exp (- 0,305)
Hrubý a střední silt 0,0063 mm	= 110,48 * Intenzita vztlínání [mm.d ⁻¹] exp (- 0,366)
Jemný silt 0,0063 mm	= 44,176 * Intenzita vztlínání [mm.d ⁻¹] exp (- 0,653)
Jemný silt a jí 0,002 mm	= 24,177 * Intenzita vztlínání [mm.d ⁻¹] exp (-0,597)

Pozn.: „Ln“ vyjadřuje přirozený logaritmus čísla, v tomto případě intenzity vztlínání [mm.d⁻¹], „exp“ vyjadřuje exponenciál, tj. základ přirozeného logaritmu umocněný daným číslem

Tab. 2.3.4 Hloubka uložení hlavní kořenové biomasy (zdroj: TNV 75 4221, tabulka 3)

Plodina	Hloubka [m]
Obilnina	0,40 – 0,60
Kukuřice	0,40 – 0,80
Okopaniny	0,40 – 0,80
Olejniny	0,30 – 0,40
Luskoviny	0,30 – 0,70
Zelenina	0,30 – 0,40
Brambory	0,40 – 0,60
Vojtěška	0,60 – 1,00
Víceleté travní porosty	0,10 – 0,40

2.3.5 Hydrogeologický aspekt regulace staveb odvodnění

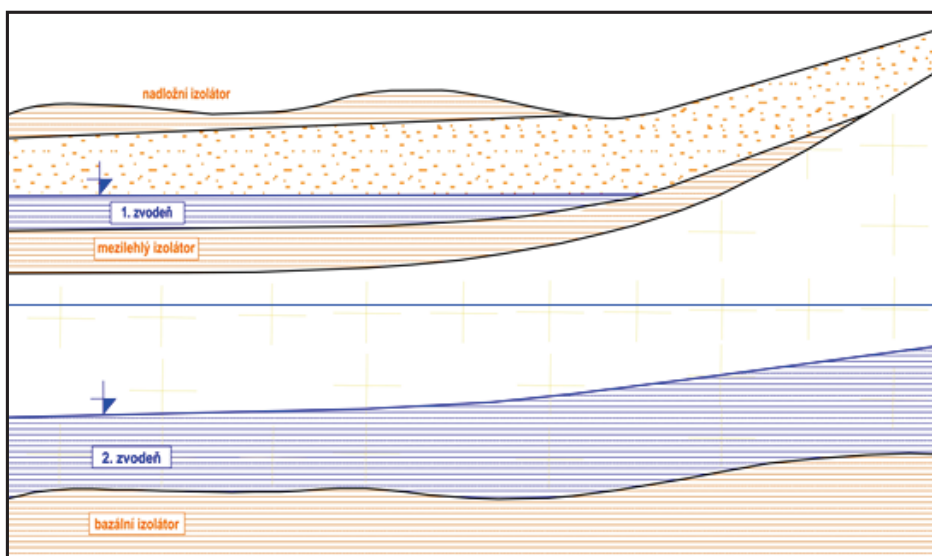
Podkladem pro tuto kapitolu je vyžádané stanovisko hydrogeologa, RNDr. Svatopluka Šedy (2018) s cílem principiálně vymezit rizikové oblasti uplatnění regulace drenážního odtoku, a tedy zvýšení složky infiltrace drenážních vod do horninového prostředí, z hlediska možnosti ohrožení jakosti podzemních vod, jakkoli i toto v konkrétních místních podmínkách souvisí s vodami povrchovými.

Jednouúčelové odvodňování zemědělsky využívaných ploch představuje obvykle negativní zásah do režimu podzemních vod. Dochází především ke snížení podílu srážkové vody vsáklé až k hladině podzemní vody, a to způsobuje zmenšení jejich zásob. Negativní ovlivnění jakosti podzemní vody jednouúčelovou (tradiční) drenáží nemusí být tak jednoznačné a nepochybně existují i příklady, kdy drenážní systém tvoří určitý „filtr“ nad zvodnělým horninovým prostředím a příznivě ovlivňují jakost podzemní vody tím, že živiny jsou odváděny drenážním systémem do povrchového recipientu a „nevsakují“ do podzemní vody (Kulhavý Z. 1985).

Drenážní systém s prvky regulace odtoku lze z hlediska tvorby podzemní vody považovat za prvek, způsobující, až na výjimky, zvětšení zásob podzemní vody. Vliv takové stavby na jakost podzemních vod, kdy dochází k částečnému „přelivu“ znečištěné drenážní vody z půdní vrstvy přes nenasycenou zónu do podzemní vody v území, které se nenachází v infiltračních oblastech zdrojů vyhrazených pro odběr vody pro lidskou spotřebu, bude zpravidla nevýznamný. Naopak v některých infiltračních územích, především v krasových a pseudokrasových strukturách, případně ve strukturách se zvýšenou pórovitou nebo puklinovou propustností, při zachování běžného zemědělského využívání pozemků, může být potenciálně rizikové. Jestliže by však instalace regulované drenáže v rizikových lokalitách byla doplněna omezením dosud běžného zemědělského využití pozemku ve prospěch ochrany jakosti podzemní vody (změna kultury, změna hnojení a aplikace pesticidů aj.), navrácí se hodnocení vlivu regulované drenáže na podzemní vody opět jako pozitivní.

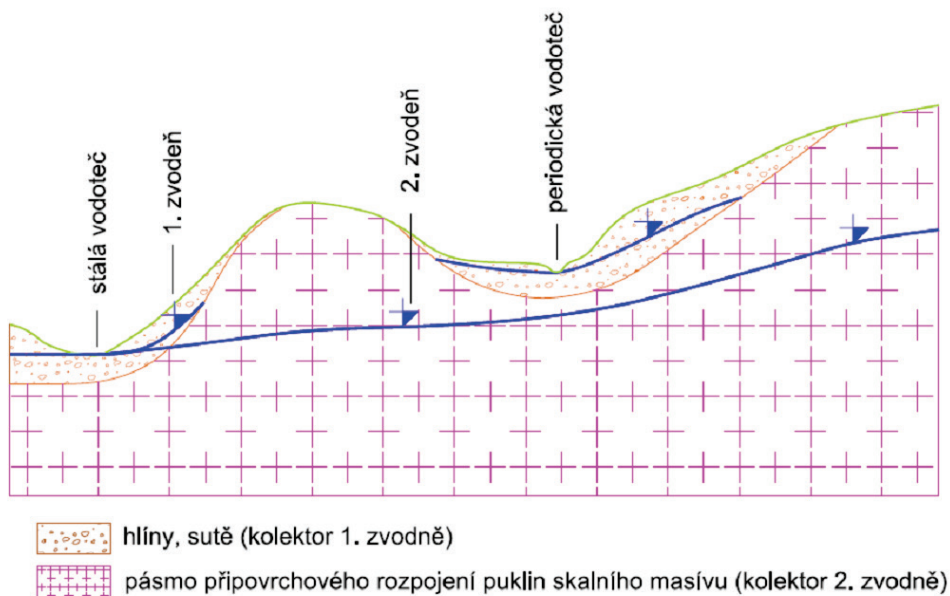
Částečná transformace horizontální složky odtoku na složku vertikální, tedy propojení podpovrchové vody s vodou podzemní, je možná pouze za určitých podmínek. Ty nastávají tehdy, jestliže mezi dočasně akumulovanou podpovrchovou vodou a volnou hladinou podzemní vody neexistuje významnější izolátor, tedy pro vodu nepropustná nebo pouze polopropustná vrstva. Vliv oddělení dvou zvodní mezilehlým izolátorem dokumentuje Obr. 2.3.6.

Přirozená hydrogeologická stratifikace je jev, který definuje místa výskytu určitého významnějšího množství podzemní vody, pro které se používají různé, i když ne zcela identické názvy (zvedeň, zvodnělý kolektor, obzor či horizont podzemní vody, nádrž podzemní vody, vodní útvar podzemní vody, vodní zdroj podzemní vody apod. – ČSN 75 0110). Tato místa jsou vzájemně oddělena slabě propustnými nebo nepropustnými horninami nebo zeminami (poloizolátory, resp. izolátory). Hydrogeologická nauka popisuje přirozenou spojitost nebo nespojitost těchto významnějších množství podzemní



Obr. 2.3.6 Schématické vyjádření hydrogeologické stratifikace dvoukolektorového zvodnělého systému

Schéma prostorového režimu podzemních vod v oblasti krystalinika



Obr. 2.3.7 Reálný řez hydrogeologické struktury v oblasti Českomoravské vrchoviny

vody v horninovém prostředí a charakterizuje vlastnosti jak kolektorské horniny, tak vlastní podzemní vody, to vše vždy ve srovnání s okolním významnějším množstvím podzemní vody – viz Obr. 2.3.7.

Z výše uvedených důvodů je žádoucí v případě úvah o zavedení principu regulace drenážního odtoku posoudit přírodní/hydrogeologické podmínky každé konkrétní lokality.

2.3.6 Hydraulika drenážního potrubí

Pro popis/posouzení funkce drenážního potrubí je vhodné použít výpočetní nástroje založené na hydrodynamických principech proudění vody ve větevné síti. Umožňuje to charakterizovat chování drenážního systému jak při odvodňovací, tak při závlahové fázi a identifikovat kritická místa systému a následně zvolit vhodný postup adaptace stavby.

Jedním z ověřených nástrojů je model nekonzervativního (přesněji řečeno po úsecích konzervativního) ustáleného proudění vody ve větevné drenážní síti bez okruhů, nazvaný **DRAINET** (Kulhavý a kol. 2002). Model je vhodný pro stanovení priorit údržby a hodnocení hydrologického potenciálu odvodňovacích staveb při zvládnání extrémních i běžných srážkových a odtokových situací. Je implementován v prostředí GIS a předpokládá tedy existenci digitalizované podrobné situace stavby odvodnění.

Z hlediska definování jednotkového přítoku do drénu, odpovídajícího zvoleným zátěžovým stavům, je vhodné použít další numerické modely. Například komplexnější, ale uživatelsky náročnější DRAINMOD (Skaggs 1980; <https://www.bae.ncsu.edu/agricultural-water-management/drainmod/>; Youssef 2005) nebo jednodušší, pro daný účel dostačující a uživatelsky přístupnější model (Štibinger, Kulhavý 2010; [https://hydromeliorace.vumop.cz/resp. https://nastroje.hydromeliorace.cz/regulace/](https://hydromeliorace.vumop.cz/resp.https://nastroje.hydromeliorace.cz/regulace/)).

Hydraulický výpočet předpokládá v jednotlivých úsecích potrubí existenci ustáleného, rovnoměrného a konzervativního proudění. Toto zjednodušení je při podobných výpočtech sítí běžné a není v příkrém rozporu se skutečným charakterem proudění vody v drenážní síti. Předpoklad ustálenosti proudění je oprávněný s ohledem na silné tlumení filtračními odpory při vstupu vody do drénu. Vliv reálné nerovnoměrnosti proudění v potrubí lze ve většině případů analýz tradičního jednofunkčního odvodnění oprávněně zanedbat. Nekonzervativnost proudění lze zanedbat, nejsou-li definované úseky příliš dlouhé, což lze ošetřit vhodným rozčleněním sítě.

Výpočet je rozdělen na proudění beztlakové (o volné hladině) s užitím Colebrook-Whiteova vzorce a na tlakové proudění (použito je zjednodušeného postupu, který extrapoluje rovnice použité pro popis beztlakového proudění). Výpočet předpokládá neprovzdušený vodní proud o známé teplotě a respektuje dále změnu viskozity vlivem (zadaného) obsahu unášených zemních částic.

Hydraulický výpočet je prováděn postupně pro jednotlivé úseky trubní sítě v posloupnosti určené topologií sítě, tj. od koncových větví směrem k výusti. V opačném pořadí je pak stanovována doba doběhu vodních částic k uzávěrovému profilu větevného systému. Zadávané hodnoty drsnosti potrubí se řídí zkušenostmi, získanými při předchozích výzkumech (viz

Tab. 2.3.5 a Tab. 2.3.6), případně jsou přejímány z literatury (podrobnosti jsou uvedeny např. v práci Kulhavý a kol. 2002).

Tab. 2.3.5 Doporučené absolutní drsnosti k (mm) drenážního potrubí z pálené hlíny

v dobrém stavu	0,610
v normálním stavu	1,524
ve špatném stavu	3,048

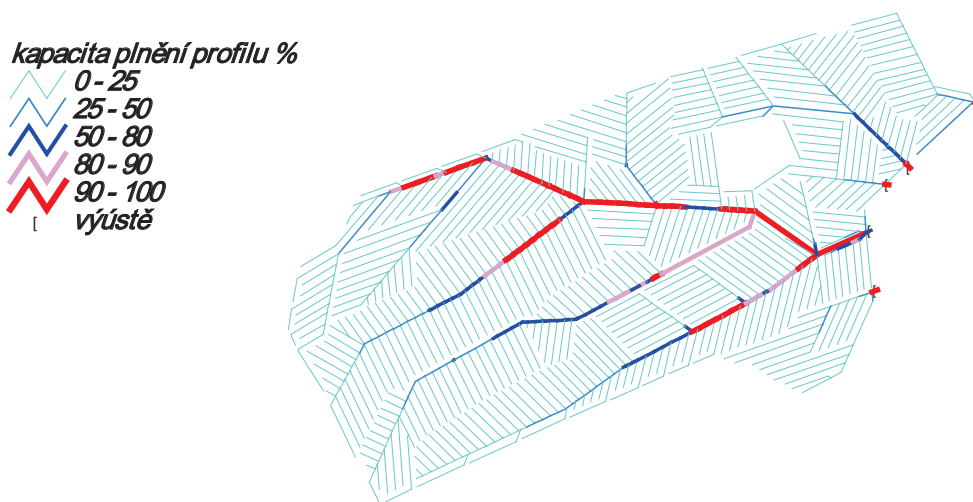
Tab. 2.3.6 Doporučené hodnoty absolutních drsností k (mm) drenážního potrubí z plastických hmot

hladké drény z PVC	0,1
jednoduše zvlněné flexibilní drény	1,4
spirálně zvlněné drény	2,2

Využití nástrojů GIS umožňuje efektivní vyhodnocení výsledků. Datové výstupy modelu jsou pro zobrazení v GIS předávány prostřednictvím databázové tabulky, navázané pomocí identifikátorů úseků sítě na grafický podklad.

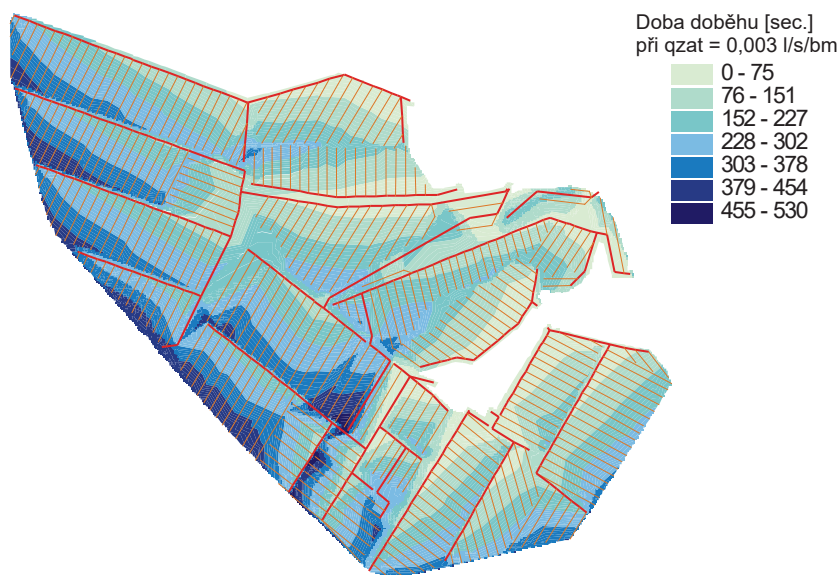
Uvedeným postupem lze ve zvolených třídách intervalech zobrazit zejména:

- rychlosti vody v potrubí odpovídající uvažovanému hydrologickému zatížení,
- stupeň naplnění potrubí, případně tlakové poměry v síti (Obr. 2.3.8),
- dobu zdržení vody v drenážním systému, resp. doby doběhu k výusti (Obr. 2.3.9),
- charakteristiku drenážního systému pomocí hydrogramů odtokových vln nebo čar četnosti dob doběhu vody do drenážní výusti (Obr. 2.3.10 a Obr. 2.3.11).

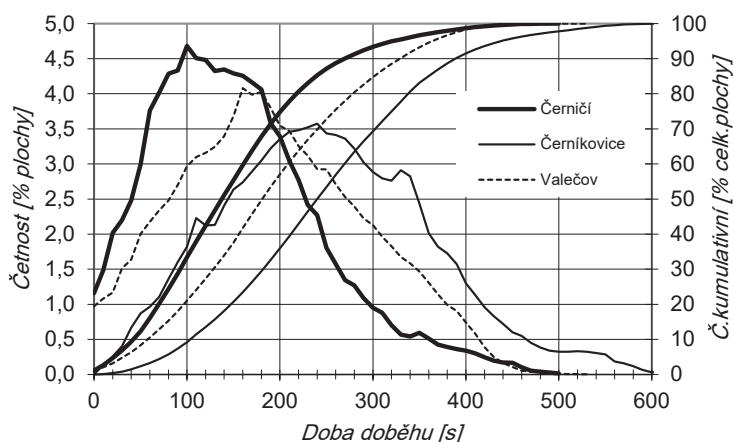


Obr. 2.3.8 Stupeň kapacity plnění potrubí v trubní síti (stavba Černíkovice, specifický přítok $0,003 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, což při rozchodu drénů 10 m odpovídá specifickému drenážnímu odtoku $3 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$, který byl v době návrhu zemědělského odvodnění doporučován jako maximální hodnota); červené čtverečky označují celkem 5 drenážních výustí

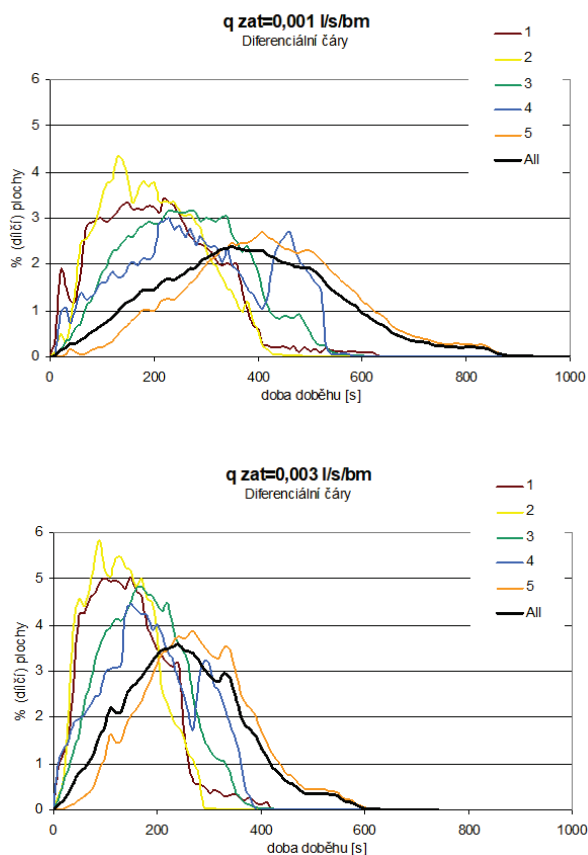
Představený model je součástí komplexního hydrologického modelového systému pro popis tvorby drenážního odtoku. Původně byl tento systém navržen pro analýzu funkce odvodnění za mimořádně vysokých srážek a pro odhad příspěvku odvodnění k průběhu povodňových průtoků. Dosažené výsledky však vytvářejí předpoklad pro uplatnění téhož systému při hodnocení průtoku za běžných situací, resp. při odvození hydrogramů drenážního odtoku v časových řadách (reálných či syntetických) a pro následné zpracování. Dodatečný výpočet drenážních systémů, ač s určitou mírou nejistoty, poskytuje dobrý podklad pro objektivní hodnocení jejich funkce případně vymezení rizikových částí pro usměrnění údržby, ale zejména i pro posouzení efektu jejich modernizace či rekonstrukce atd.



Obr. 2.3.9 Drenážní systém s izoliniemi dob doběhu k drenážní výusti [sec.] (stavba Valečov, specifický přítok $0,003 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)



Obr. 2.3.10 Čáry četnosti a součtové čáry prostorové analýzy dob doběhu pro tři vybrané drenážní systémy (specifický přítok $0,003 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)



Obr. 2.3.11 Čáry četnosti dob doběhu vody do drenážní výusti pro dvě různé hodnoty drenážního přítoku, stavba Černíkovice, pro 5 samostatně řešených drenážních skupin a pro soustavu jako celek (propojenou prostřednictvím HOZ) – silná čára: (nahore) $q = 1,18 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (tj. $0,001 \text{ l.s}^{-1}.\text{bm}^{-1}$), (dole) $q = 3,53 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (tj. $0,003 \text{ l.s}^{-1}.\text{bm}^{-1}$).

Pozn.: Hodnoty q [$\text{l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$] odpovídají konkrétnímu rozchodu drénů, odečtenému z projektové dokumentace.

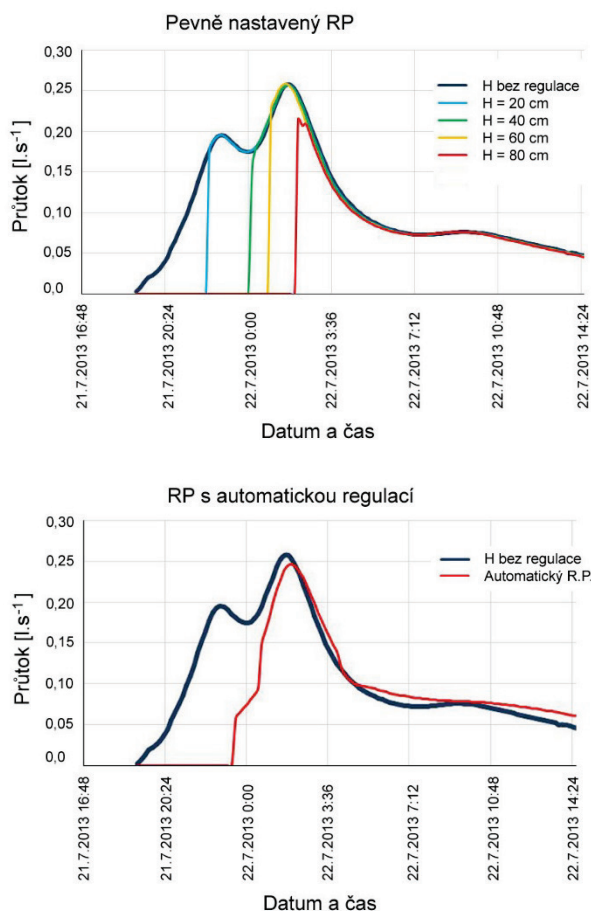
Využití modelu SiteFlow pro drenážní systém s instalovanými regulačními prvky

Hydraulický numerický model trubních sítí SiteFlow (<https://www.aquion.cz/software/siteflow>) umožňuje použít několik funkcí, které mohou regulovat průtok v trubním systému. V rámci projektu TAČR-TA02020384 byl v uplynulém období fy. Aquion, s.r.o. vyvinut výpočtový modul „regulační prvek na drenáži“ (viz Macek, Kulhavý, 2016). Objekt lze definovat jako funkci závislosti průtoku (odtoku) na výšce hladiny ve vstupním uzlu – Obr. 2.3.12. Simulační výpočty mohou být provedeny pro různé výšky H [m] hrany přepadu, například jako přepad s ostrou přepadovou hranou přes celou šířku drenážní šachty.

Jedno z kritérií pro posouzení rizik zanášení potrubí drenážní vodou unášenými sedimenty je rychlost vody přitékající k regulačnímu prvku, resp. obtékající regulační prvek vzestupným proudem směrem k přelivné hraně.

V případě dosažení kritických hodnot je třeba volit typ regulačního prvku, který je vybaven usazovacím prostorem, kontrolovaným a čistitelným v pravidelných intervalech.

ČSN 75 4200 kapitola 5.2.5.13 doporučuje největší profilovou rychlost při návrhovém průtoku ve svodných drénech z trubek z pálené hlíny $1,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, u trubek z plastů $2,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Toto kritérium by mělo být posuzováno u modernizovaných staveb s ohledem na posouzení důsledků změn manipulace (tj. při přechodu ze závlahové na odvodňovací fázi, kdy se vyhradí regulační prvek a dochází k intenzivnímu průtoku úseků potrubí s rizikem eroze drenážní rýhy, tvorby kaveren a následného posunutí drenážního potrubí).



Obr. 2.3.12 Grafické vyjádření efektu regulace pomocí hydrogramu drenážního odtoku, vypočteného v programu SiteFlow:
 nahoře: pro pevně nastavitelný regulační prvek, zde pro 4 úrovně regulace
 dole: pro regulační prvek s automatickým vyhrazením, kdy až do dosažení hladiny 0,50 m je regulační prvek zahrazen, pokud se hladina horní vody dále zvyšuje, dojde k vyhrazení hrádítka.

Pozn.: Hydrogram drenážního odtoku neovlivněného regulací znázorňuje tmavě modrá linka u obou grafů. Zpracováno pro srážko-odtokovou událost na drenážní skupině u obce Kladno (okr. Chrudim) probíhající ve dnech 21. – 22. 7. 2013.

V těže normě (ČSN 75 4200) je v kapitole 5.2.5.14 doporučeno, že nejmenší průměrná profilová rychlost ve svodných drénech nemá klesnout při návrhovém průtoku u těžkých půd pod $0,20 \text{ m.s}^{-1}$, u lehkých půd a v lokalitách s rizikem vyplavování železitých částic pod $0,30 \text{ m.s}^{-1}$ až $0,35 \text{ m.s}^{-1}$. Jiná oborová norma (pro navrhování stokových sítí – ČSN 75 6101) uvádí minimální samočisticí rychlosti $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ (tečné napětí musí být $\geq 4,0 \text{ Pa}$, pro plastové potrubí $\geq 3,0 \text{ Pa}$) – s platností pro malé průměry potrubí do DN 300 mm.

Pro tečné napětí τ_u v jednotkách [Pa] platí:

$$\tau_u = \rho \cdot g \cdot R \cdot I \quad (3)$$

kde ρ – hustota protékající vody, zpravidla [kg.m^{-3}]

g – gravitační zrychlení [m.s^{-2}]

R – hydraulický poloměr [m]

I – sklon dna potrubí, podíl [m.m^{-1} ; –]

Hydraulický poloměr [m] vypočteme dle:

$$R = S/O \quad (4)$$

kde S – plocha průtočného profilu [m^2]

O – omočený obvod [m]

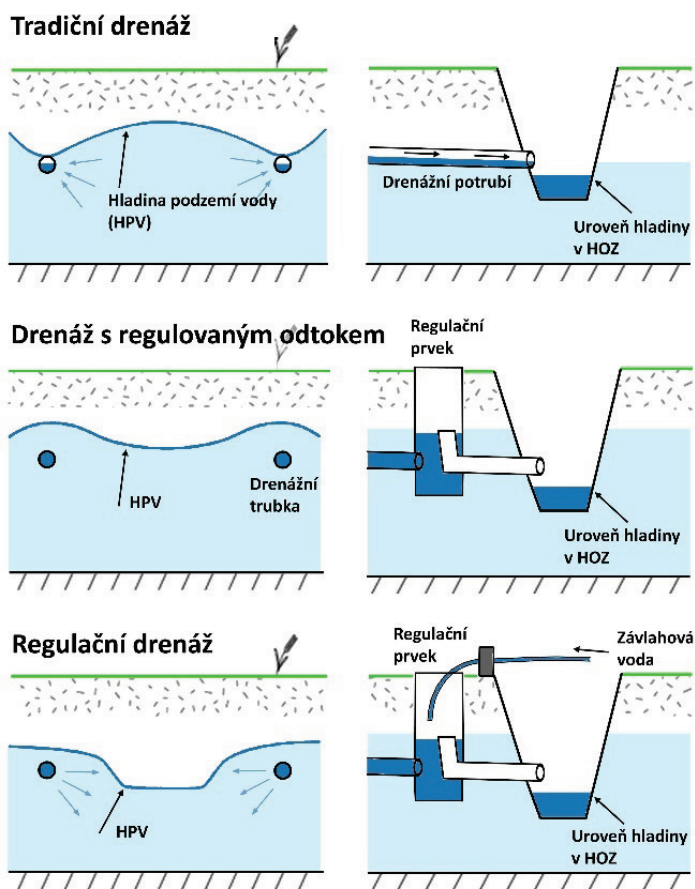
Z řady realizovaných průzkumů lze shrnout poznatek, že již „konsolidované“ stavby odvodnění (tj. zpravidla stáří 20 a více let po výstavbě) poskytují při prohlídce reprezentativních objektů dostatečně věrohodnou informaci o splaveninovém režimu drenážního odtoku. Neboli – pokud tyto objekty nevykazují známky zanesení (s přihlédnutím ke stavu údržby), bude stavba vhodná pro modernizaci na systém s regulací odtoku a výše uvedené posouzení může být jen doplňkovým podkladem pro projektování. U staveb nově budovaných, kdy teprve probíhá proces konsolidace drenážní rýhy, nebo u opravovaných staveb, u nichž došlo k odkrytí a opravě/úpravě významné části potrubí, je toto posouzení třeba provést. V případě, kdy může docházet k riziku usazování zemitých částic před regulačním prvkem a není možné prvek vybavit usazovacím prostorem (např. u prvků PRO, budovaných jako podzemní na drenážním potrubí), je řešením využití pulzní regulační prvek (mechanický, plovákový – např. podle patentu 305 921 nebo jinak zajistit manipulaci v období se zvýšenou vodností – viz Kapitola 2.2.3 metodiky). Mezi objekty, na nichž je patrný proces transportu a sedimentace vodou unášených zemitých částic, patří drenážní výusti, drenážní šachtice a drenážní potrubí, pokud bylo v reprezentativní části stavby obnaženo a jeho stav byl kontrolován.

2.4 Výpočtové nástroje pro kvantifikaci efektu regulace

Kritéria očekávané účinnosti opatření na zlepšení jakosti vod byla na základě přízpusobení zahraničních poznatků národním podmínkám ČR publikována v Příloze P-4 metodického návodu (Kulhavý, Fučík, Tlapáková

a kol. 2013). Zohľadňovala dosah provedených opatrení, resp. počet regulačných prvků vůči celkové ploše dotčené stavby odvodnění, dobu zdržení vody a způsob využití pozemku.

Pro hodnocení vlivu meliorační stavby na jakost vody v recipientu je rozhodující typ stavby (viz Kapitola 2.2.2, resp. Obr. 2.4.1) a zásady manipulace s regulačními prvky.



Obr. 2.4.1 Hlavní principy regulace drenážního odtoku, resp. řízení úrovně HPV

Pro dosažení největšího efektu (zlepšení jakosti drenážní vody nebo pro minimalizaci negativního vlivu na recipient) by měly platit zásady (viz Kapitola 2.5.1):

- uplatnit regulaci odtoku po co nejdelší dobu,
- dosahovat co možná nejvyšší výšku regulace (vzdutí vody v místě R.P.),
- drenážní vodu vypouštět v období zvýšené vodnosti, kdy dochází k ředění dalšími vodami,
- do systému regulační drenáže napouštět pouze vodu splňující kvalitativní kritéria (viz Tab. 2.1.1)

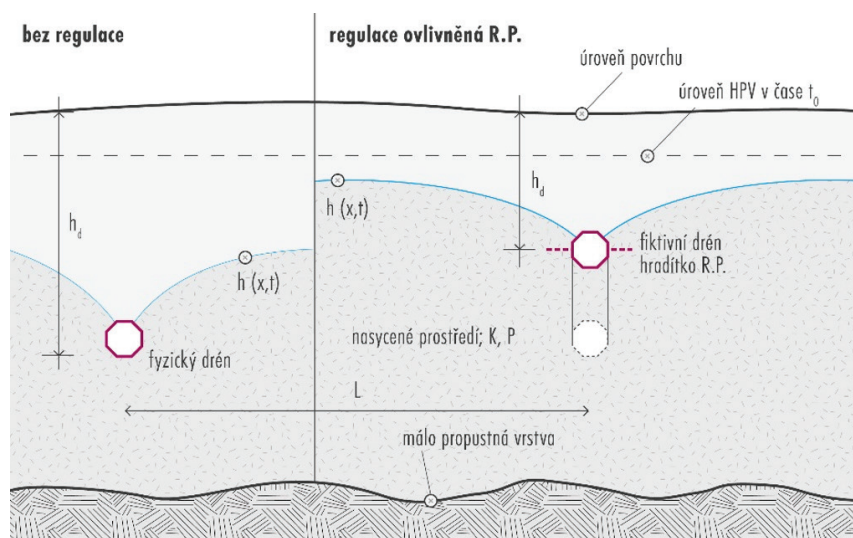
2.4.1 Model REGULACE

Výpočet efektu regulačního opatření na odvodňovacích prvcích, jakými je otevřený odvodňovací příkop nebo drén, je založen na kalkulátoru, publikovaném na adrese <https://hydromeliorace.vumop.cz>, jeho modifikací pro vyjádření diferencí drenážního odtoku vlivem regulace v konkrétních místních podmínkách konkrétní stavby odvodnění. Novější alternativa uživatelského zpracování je na adrese <https://nastroje.hydromeliorace.cz/regulace/>.

Řešení vychází z popisu dosahu vzduť, daného sklonem potrubí a výškou vzduť vody regulačním prvkem. Dále respektuje vrstevnatost půdního profilu a jeho hydrofyzikální parametry. Umožňuje volit různé metody výpočtu, odpovídající přírodním a technickým podmínkám fungování systému odvodnění.

Výsledkem je kvantifikace vlivu regulace odtoku na množství odtékajících vod, a tedy nepřímo stanovení změny retenční schopnosti odvodněného pozemku. Při zachování stejných návrhových parametrů drenážního systému a stejných požadavků na hydraulickou účinnost drenáže, způsobí toto zmenšení zvodnělé vrstvy jednoznačné snížení drenážních odtoků z odvodňovaného prostředí. Zároveň ale drenážní systém splňuje veškeré vodohospodářské požadavky a kritéria, pro která byl navržen.

Z analýzy matematicko-fyzikálního popisu proudění podzemní vody k drénům, a to v podmínkách ustáleného, neustáleného a transientního drenážního proudění vyplývají v souvislosti s řízenou regulací odvodňovací báze (fiktivního drénu, volné hladiny vody v drenážním příkopu, hloubky drénů – viz Obr. 2.4.2) následující skutečnosti. Instalace regulačního prvku při nepodstatném zjednodušení teorie proudění podzemní vody působí stejně



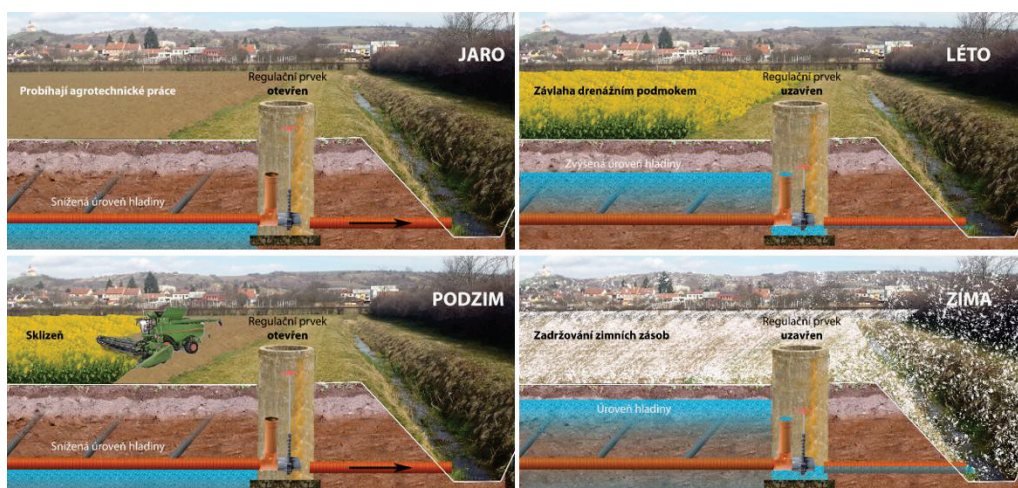
Obr. 2.4.2 Změna báze odvodnění ovlivněná regulací hladiny na regulačním prvku

jako snížení hloubky uložení drénu, s čímž přímo souvisí i změna úrovně odvodňovací báze (fiktivního drénu, či volné hladiny vody v drenážním příkopu – viz Kulhavý, Štibinger 2014). Vlivem takto realizovaného snížení hloubky uložení drénu se zvýší mocnost ekvivalentní nepropustné vrstvy, zároveň ale dojde ke snížení mocnosti nasyceného prostředí nad úrovní drénu a celková mocnost zvodnění, která reprezentuje zvodnělé vrstvy v průběhu drenážního procesu, bude menší. Za předpokladu zachování platnosti rovnice kontinuity, Darcyho zákona, návrhových parametrů drenážního systému a vodohospodářských požadavků způsobí (řízené) snížení hloubky drénu snížení drenážního odtoku.

2.4.2 Model JAKOST

V rámci této kapitoly je představen nástroj pro výpočet snížení látkových odnosů do recipientu uplatněním regulace drenážního odtoku. Internetová aplikace včetně manuálu s řešeným příkladem je k dispozici na adrese <https://nastroje.hydroimeliorace.cz/jakost/> a pomocí videosekvence obrázků představuje na úvodní stránce vhodný způsob manipulace s regulačním prvkem během ročních období, resp. v závislosti na pěstované plodině a potřebné agrotechnice – viz Obr. 2.4.3. Zadržování vody v půdním profilu, resp. řízení drenážního odtoku, je v této souvislosti kromě způsobu realizace závlahy pěstované plodiny zejména nástrojem pro snížení zátěže vodních toků přítokem znečištěných drenážních vod.

Látkové odnosy vypočítává tento nástroj s využitím hydraulických modelů proudění vody do drenáže popsanych výše a bilancí objemů drenážního odtoku v době bez regulace a v době s regulací, tj. při definovaném zvýšení úrovně HPV a dosahu vzduť promítnutého do plochy pozemku.



Obr. 2.4.3 Hlavní principy manipulace na stavbě odvodnění, umožňující regulaci drenážního odtoku

Mezi vstupní parametry výpočtu patří:

h_d – průměrná hloubka uložení (sběrných) drénů [m]

H_{VZ} – výška vzdutí hladiny na regulačním prvku [m]

L_{VZ} – průměrný dosah vzdutí vody regulačním prvkem [m]

i – sklon drénu (jako alternativa k L_{VZ} , kdy se dosah vzdutí L_{VZ} vypočítá z H_{VZ} a i) [‰]

N – počet výpočtových úseků dle Obr. 2.4.4 (profilů, resp. výpočtových úseků bude $N+1$)

R – rozchod sběrných drénů [m]

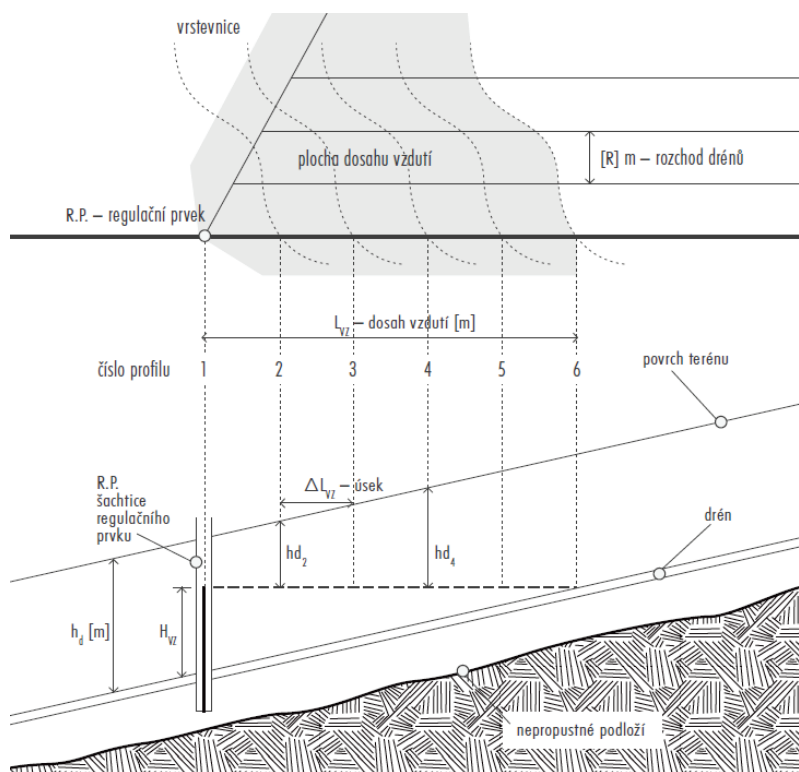
Pozornost si při návrhu zaslouží průměrná výška vzdutí na regulačním prvku (H_{VZ}), daná provedením a konstrukčním uspořádáním regulačního prvku, případně manipulačními zásadami. Optimální hodnoty uvádí Tab. 2.4.1.

Tab. 2.4.1 Optimální hloubky hladin podzemní vody během vegetačního období (viz TNV 75 4221)

Kultura	Druh půdy											
	písečná		hlinito-písečná		písečno-hlinitá		hlinitá		jílovito-hlinitá		jílovitá	
	HPV	ΔH	HPV	ΔH	HPV	ΔH	HPV	ΔH	HPV	ΔH	HPV	ΔH
Obiloviny	0,80	-	0,85	0,50	1,10	0,60	1,00	0,50	0,95	0,40	0,90	-
Okopaniny (bez brambor)	0,70	-	0,80	0,50	0,90	0,60	0,90	0,50	0,90	0,40	0,90	-
Brambory	0,60	-	0,70	0,50	0,80	0,60	0,80	0,50	0,90	0,50	1,00	-
Jednoroční krmoviny	0,60	-	0,70	0,50	0,90	0,50	0,90	0,50	0,90	0,50	0,90	-
Jetel	0,70	-	0,80	0,50	1,00	0,60	1,00	0,50	0,90	0,50	0,90	-
Vojtěška	0,80	-	0,90	0,50	1,20	0,60	1,10	0,50	1,00	0,50	1,00	-
Trvalé travní porosty	0,40	-	0,50	0,30	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	0,20	0,60	-
Zelenina	0,60	-	0,70	0,40	0,90	0,50	0,90	0,50	0,80	0,40	0,90	-
Sady a vinice	0,70	-	0,90	0,50	1,20	0,60	1,10	0,50	1,00	0,50	1,00	-

Pozn.: HPV – Hladina podzemní vody [m]; ΔH – Výška regulace [m] – tj. rozdíl piezometrických úrovní hladin před a za regulačním prvkem (příčemž HPV má ležet uprostřed tohoto intervalu). Půda písčitá a jílovitá není primárně vhodná pro regulaci odtoku, proto hodnoty nejsou uvedeny.

Jednotlivé parametry jsou ve formuláři slovně popsány včetně měrných jednotek a na schématu také interaktivně graficky zvýrazněny. V této fázi zadání se jedná o dvourozměrný popis problému. Třetí rozměr – půdorys drénů (Obr. 2.4.4 nahoře) pouze dokumentuje souvislost topologie drenážní sítě s plochou dosahu regulace (tj. příklad vazeb svodného a sběrných drénů). Třetí rozměr je v této fázi do výpočtu promítnut prostřednictvím rozchodu R , vyjadřujícího vzdálenosti souběžně vedených (paralelních) drénů, jak je tomu u tradičních systémů zemědělského drenážního odvodnění. Na schématu je také znázorněno působení regulovaných drénů vně plochy drenážního souřadu. Dosah se bude v praxi lišit a v čase měnit; ve výpočtech je zpravidla uplatňována polovina rozchodu.



Obr. 2.4.4 Geometrické schéma stavby odvodnění s regulací odtoku, vyjádřené v podélném profilu drénu

Dále se předpokládá, že podélný sklon drénu kopíruje průměrný sklon terénu (tj. drén je po celé délce dosahu vzdutí přibližně stále ve stejné hloubce). Pokud by bylo třeba toto změnit (z praktického důvodu by se však jednalo o výjimečné případy), lze postup výpočtu manuálně dále členit na úseky.

Formulář umožňuje dva způsoby zadání sklonu drénu:

- buď odvozením z maximální výšky vzdutí na regulačním prvku H_{VZ} a z dosahu vzdutí L_{VZ} za předpokladu promítnutí vodorovné roviny dosahu vzdutí (nepředpokládá se uplatnění zpětného vzdutí v rámci hydrodynamiky proudění drenážní vody, a tedy ani prodloužení dosahu vzdutí).

Platí zde rovnice:

$$i [\%] = 1000 \cdot \frac{H_{VZ} [m]}{L_{VZ} [m]} \quad (5)$$

- nebo zadáním přímo hodnoty sklonu drénu $i [\%]$ např. odečtením ze situačního výkresu projektové dokumentace.

Z tohoto sklonu a výšky vzdutí na regulačním prvku $H_{VZ} [m]$ je stanoven dosah vzdutí $L_{VZ} [m]$.

Možné je zvolit jeden nebo druhý způsob zadání. Budou-li zadány všechny hodnoty, upřednostněn je dosah vzduť L_{VZ} . Výpočet je prováděn po zaokrouhlení sklonu na jedno desetinné místo (XXX.X [%]). Stanovený nebo aplikací vypočtený dosah vzduť L_{VZ} lze členit na dílčí výpočtové úseky (jejich maximální počet je 10), v nichž je efekt regulace vyjádřen vzhledem k profilu mimo dosah regulace. Interpretace těchto výsledků výpočtu bude popsána dále.

Platí zde rovnice:

$$L_{VZ}[m] = \frac{H_{VZ}[m]}{N} \quad (6)$$

kde N je zvolený počet úseků.

V jednotlivých výpočtových profilech (viz Obr. 2.4.4) bude výpočtem stanoven efekt regulace, tj. o kolik méně vody oteče z půdního profilu oproti tradiční drenáži bez regulace. Důvodem této změny je měnící se výška báze odvodnění, která je nejvyšší v místě, kde končí dosah regulačního prvku a výše až do místa případného situování dalšího regulačního prvku. Prvním profilem výpočtu je místo instalace regulačního prvku, tedy také s nejvyšší výškou vzduť vody² (depresní křivky HPV zde budou nejplošší a parciální přítok vody do drénu nejmenší). Posledním profilem je místo na drénu, kde se již efekt regulace přímo neprojeví (na demonstračním schématu na Obr. 2.4.4 uveden jako profil č. 6) a drén zde má plnou odvodňovací schopnost (depresní křivka HPV zde bude mít největší vzepjetí a parciální přítok vody do drénu bude největší).

Výpočtových profilů je tedy o jeden více než je zvolený počet úseků: $N+1$.

Hloubka uložení drénů h_d reprezentuje vzdálenost dna drenážního potrubí nebo dna odvodňovacího příkopu od povrchu terénu. Výška vzduť H_{VZ} reprezentuje vzdálenost mezi dnem drenážního potrubí (příkopu) v místě přerušení a přelivnou hranou regulačního prvku. Z této hodnoty a z hloubky uložení drénu se pro každý požadovaný výpočtový profil stanovuje výška h_{dj} (neboli hloubka ovlivněné HPV).

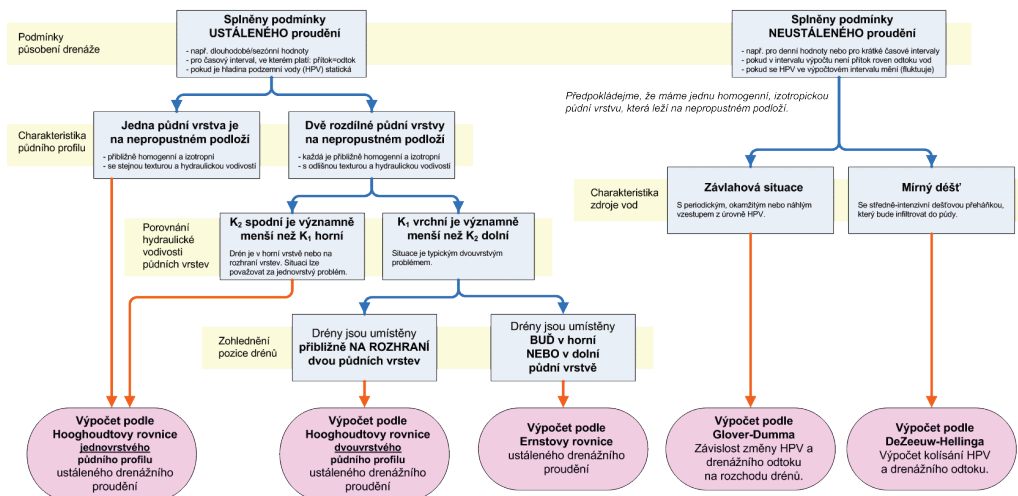
Platí zde rovnice:

$$h_{dj}[m] = (h_d - H_{VZ}) + (j - 1) \cdot \frac{H_{VZ}}{N} \quad (7)$$

kde j = pořadové číslo výpočtového profilu,
ostatní proměnné byly popsány výše.

² Předpokládá se, že provedení regulačního prvku a opatření v jeho bezprostřední blízkosti (tj. před nebo za místem instalace) je konstrukčně ošetřeno tak, aby nedocházelo k nepřiměřenému zvýšenému obtoku okolní půdou nebo netěsností prvku vlivem vytvoření kaskády (hydraulického gradientu) před a za regulačním prvkem. Toho lze dosáhnout vložením neperforovaného úseku drénu s délkou v závislosti na hydraulické vodivosti půdního prostředí, nebo instalací svislé bariéry v okolním půdním prostředí.

Následuje volba metody výpočtu. Na základě zhodnocení hydrologických podmínek (převládajícího charakteru přítoku vody do drenáže) a podmínek pedologických a geologických (vrstevnatost půdního prostředí) je třeba vybrat vhodné schéma. Volba se provádí poklepáním na jeden z modelů, uvedených na Obr. 2.4.5.



Obr. 2.4.5 Použitá výpočtová schémata existence drenáže v podmínkách řešené lokality. Podrobněji viz (Štibinger, Kulhavý 2010).

V podmínkách výskytu napjatých podzemních vod

Podzemní vody s napjatou hladinou mohou být přímou příčinou plošného zamokření, převyšuje-li rovina tlakových čar hloubku cca 1 m pod povrchem terénu. Rozhodujícím předpokladem vzniku zamokření je přítom úroveň piezometrické výšky odvodňované půdní vrstvy, překračující optimální hloubku hladiny podzemní vody a její časový průběh.

V tomto případě lze při modernizaci stavby zvažovat gravitační převod vody do blízké stávající drenážní soustavy a tuto modernizovat doplněním regulace odtoku, nebo vybudovat akumulaci nádrž s využitím vody pro úprava na regulační drenáž s uzavřeným koloběhem vody.

V podmínkách ustáleného drenážního proudění

Při ustáleném drenážním proudění se předpokládá rovnováha mezi nepřetržitým rovnoměrným a konstantním zásobováním půdy vodou (např. konstantní přítok podzemní vody při stálém přítoku svahových podzemních vod, stálé infiltraci z ohrázkovaných toků či břehovou infiltraci z nadsedlaných nádrží, při dlouhodobém tání sněhu nebo při dlouhodobém regionálním dešti o konstantní intenzitě apod.) a hydraulickou funkcí plošné trubní drenáže nezávislé na čase (tj. s konstantním odtokem v delším časovém úseku).

V tomto případě lze při modernizaci zvažovat provozování podle principů retardační drenáže ve svažitéjším území, nebo regulační drenáže ve

vhodných stanovištních podmínkách (s dostupným zdrojem vody pro závlahu a dostatečným plošným významem vyrovnaného dosahu regulace).

V podmínkách neustáleného drenážního proudění

Při tomto typu drenážního proudění dochází v prostoru i čase ke snižování hladiny podzemní vody v půdním profilu s následnou změnou úrovně, tvaru depresní plochy i drenážního odtoku. Z uvedeného vyplývá, že v praxi se toto proudění vody v pórovitém prostředí půdy vyskytuje nejčastěji. V tomto případě lze při modernizaci uvažovat provoz podle principů retardační drenáže nebo regulační drenáže (tj. s cizím zdrojem cíleně dodávané závlahové vody) v závislosti na sklonu terénu a plánovaném využití území.

V podmínkách transientního drenážního proudění

Pokud dojde při snižování hladiny podzemní vody plošnou trubkovou drenáží k dalšímu zásobování nasyceného pórovitého propustného prostředí vodou (obvykle infiltrací atmosférických srážek), nastane složitý kmitavý pohyb hladiny podzemní vody a v odvodňovaném prostředí vznikne transientní drenážní proudění.

V tomto případě lze při modernizaci uvažovat impulzní provoz retardační drenáže nebo regulační drenáže (v souladu s podmínkami, uvedenými výše).

Zadávací formulář se liší pro jednotlivá výpočtová schémata. Nasycená hydraulická vodivost je přitom jedním z hlavních, a pro všechny modely společným, parametrem a je proto doporučeno ji stanovit v rámci podrobného hydropedologického, případně také podpůrného hydrogeologického průzkumu stanoviště. Tomuto stanovení je věnována v metodice Kapitola 2.3.2 a 2.3.3.

Poznámka:

Univerzálnější postup dle Ernsta lze použít pro uložení drenážního potrubí pod nebo nad rozhraním půdních vrstev. Těto skutečnosti je možné využít v případě, že svrchní půdní vrstvy budou mít výrazně nižší hydraulickou nasycenou vodivost, např. v důsledku používání nevhodných zemědělských mechanizačních prostředků. Anebo naopak, vlivem agrotechnického zpracování horních půdních vrstev na zemědělských lokalitách (podrývání, hloubková orba) může být hodnota hydraulické nasycené vodivosti svrchních vrstev řádově mnohem vyšší.

Pro model dle Ernsta jsou zde přidány ještě parametry detailněji popisující charakter drenážní rýhy či dna odvodňovacího příkopu.

Postup podle Glover-Dumma je vhodný pro situace, kdy vždy po závlaze, výtopě, záplavách či povodních dojde k okamžitému vzestupu hladiny podzemní vody až na úroveň h_0 .

Postup podle DeZeeuw-Hellingy je vhodný pro běžné srážkové situace vyskytující se nepravidelně a v různých denních srážkových úhrnech v průběhu delšího období.

Podrobnosti k výběru a použití jednotlivých výpočtových schémat uvádí publikace Štibinger J., Kulhavý Z. (2010), kterou lze stáhnout na adrese <http://www.hydromeliorace.cz/sw/knihovna/>

Pro vyhledání zadejte např. „monografie 2010“.

Po vyplnění tohoto formuláře lze zahájit iteraci průtoků pro daný rozchod odvodňovacích prvků, přitom hodnoty q_i reprezentují drenážní odtok generovaný při uplatnění regulace v daném místě drénu (profil i). Hodnoty h_{di} [m] uvádí profilovou vzdálenost úrovně HPV od povrchu terénu. Nejmenší drenážní odtok q_i [mm.den⁻¹] je generován v místě nejvyššího vzdutí (tedy v profilu č. 1 – viz Obr. 2.4.4) a největší hodnota drenážního přítoku pak odpovídá místům na konci nebo mimo dosah vzdutí, neboli uvádí intenzitu odvodňovací funkce konkrétního drenážního systému. Pokud jsou použity jednotky, vyjadřující denní odtokovou výšku, lze ji následně snadno převádět na objem odtoku drenážní vody v řešené ploše.

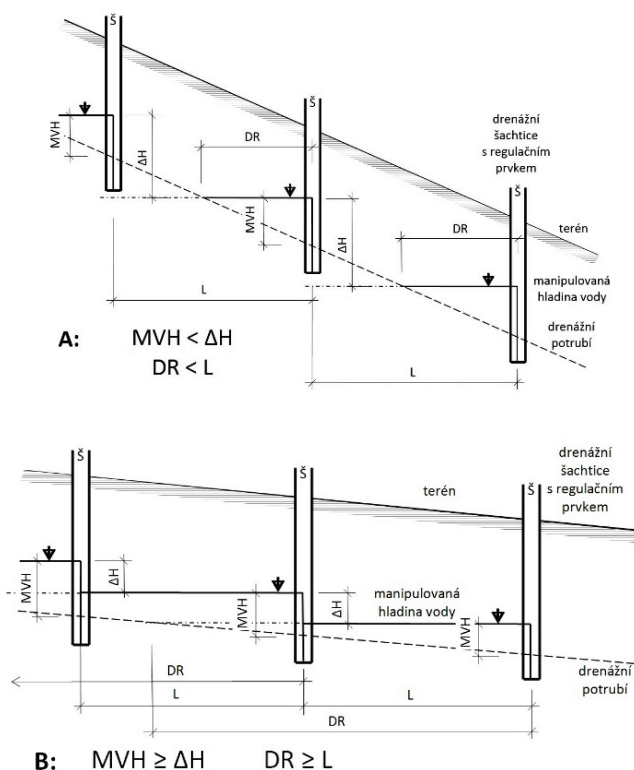
Profilové hodnoty REG_i reprezentují výsledek rozdílu mezi generovaným profilovým přítokem do drénu v případě, že není HPV zvýšena vlivem regulace, a druhou hodnotou, která je regulací naopak ovlivněna. Největší účinek regulace se tudíž projeví v profilu č. 1 (tj. v místě instalace regulačního prvku).

Hodnota q_{AVG} pak reprezentuje průměrnou účinnost regulace a hodnota q_{MAX} reprezentuje maximální intenzitu přítoku drenážních vod. Obě veličiny jsou následně využity při výpočtu efektu regulace uplatňující se při vyjádření objemu látkového odnosu.

Pro určení plošného dosahu regulace je třeba disponovat alespoň mapovým podkladem (např. <https://meliorace.vumop.cz/>) nebo lépe výkresem z původní projektové dokumentace, případně jiným vhodným způsobem, např. zákresem z leteckých snímků, doměřených geodetických podkladů atd.

Plocha dosahu regulace F [ha] má odpovídat půdorysnému dosahu navrhované či realizované regulace. Jednat se může buď o plochu celé stavby, pokud dosah regulace jednotlivých instalovaných regulačních prvků tuto celou plochu vykrývá, nebo se bude jednat jen o část plochy, vymezenou dosahem regulace (viz Obr. 2.4.6). V rovinném území může efekt regulace (tj. profilové úrovně zvýšené HPV) jedním regulačním prvkem dosahovat několika desítek až stovek metrů, ve svažitém území se jedná spíše jen o jednotky až několik desítek metrů, pokud nebyl použit větší počet regulačních prvků (např. zcela podzemních), vzájemně se plošně vykrývajících (viz Soukup a kol. 2001, Příloha 2 až 7). Pro v minulosti projektované stavby regulační drenáže (v rovinných územích, pozemky intenzivně zemědělsky využívané) se plocha F bude rovnat ploše celé stavby.

Pro stanovení **obvodu O [m]** předmětné plochy ovlivněné regulací lze použít obdobné nástroje jako při stanovení plochy. Může se tedy jednat o obvod celé stavby nebo jen o obvod dosahu uplatněné regulace. Cílem stanovení tohoto parametru je zohlednit tvar předmětné části odvodňovací stavby. Hodnota je použita pro případnou redukci plochy efektivní regulace. Vychází z předpokladu, že vně dolní poloviny obvodu předmětné stavby s uplatněním regulace funguje přirozené nebo technické odvodnění a HPV je díky tomu ve vnější části obvodu (ve vzdálenosti blízké polovině až celému



Obr. 2.4.6 Dva typy vyjádření dosahu regulace (DR) jednotlivých regulačních prvků v podélném profilu drénu. Pokud se DR překrývají (B), lze předpokládat, že je pod vlivem regulace celá stavba/drenážní skupina.

LEGENDA: ΔH – diference regulovaných hladin; MVH – maximální výška hladiny v šachtici; L – vzdálenost regulačních prvků; DR – dosah regulace; i – sklon terénu resp. sklon drenážního systému [-], [%]

rozchodu drénů) zaklesnuta až na úroveň uložení drénů (h_d). Pokud je však v dolní části okolí stavby naopak vysoká úroveň HPV (zjištěná průzkumem, blízkostí vysoké hladiny ve vodním toku, vodní nádrži, v přilehlém mokřadu apod.), není třeba redukovat plochu F . Ve formuláři aplikace je za tímto účelem použit **zaškrťovací box**, jehož pomocí lze uplatnit korekci zadané plochy dosahu regulace (box není zaškrtnut) či korekce nebude uplatněna (box zaškrtnut).

Při nezaškrtnutém dialogovém okně se původně zadaná plocha sníží o plochu stanovenou jako součin poloviny obvodu O a poloviny rozchodu drénů R . Tedy:

– pokud není políčko zaškrtnuto, bude platit:

$$F_{NEW} = F - O \cdot R / 4 \quad \text{nebo také} \quad F_{NEW} = \frac{O}{2} \cdot \frac{R}{2} \quad (8)$$

– pokud bude dialogové okno zaškrtnuto, bude platit:

$$F_{NEW} = F \quad (9)$$

Pro výpočet látkových odnosů je do výpočtu zadána typická hodnota zvoleného **ukazatele jakosti drenážní vody J** [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$]. Jako použitý ukazatel jakosti J je standardně zvolena koncentrace látek udávaná v [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$]. Ke stanovení této hodnoty je doporučeno použít buď výsledků přímých měření (expedičních či laboratorních) nebo převzetí hodnoty z vhodné literatury.

Například pro obsah nitrátů na středně intenzivně nebo intenzivně zemědělsky využívaných pozemcích bude platit rozpětí hodnot

$$J = 50 - 100 - 350 \text{ [mg} \cdot \text{l}^{-1}] \quad (10)$$

Látkový odnos zvolené znečišťující látky drenážních vod v denním vyjádření je pro celou plochu regulace (F_{NEW}) uváděn v jednotkách [$\text{kg} \cdot \text{den}^{-1}$] resp. po převodu na specifický látkový odnos za jeden den a jeden hektar, uváděn v kilogramech, tedy [$\text{kg} \cdot \text{den}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$].

Výpočty jsou realizovány podle vzorců:

$$A/ \text{ODNOS}_{\text{REGULOVANÁ DRENÁŽ}} = (10\,000 * F_{\text{NEW}} [\text{ha}]) * (q_{\text{AVG}} [\text{mm}]/1000) * (J [\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]) \quad (11)$$

$$B/ \text{ODNOS}_{\text{TRADIČNÍ DRENÁŽ}} = (10\,000 * F_{\text{NEW}} [\text{ha}]) * (q_{\text{MAX}} [\text{mm}]/1000) * (J [\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]) \quad (12)$$

$$C/ \text{Odhad efektu regulace} = \text{ODNOS}_{\text{TRADIČNÍ DRENÁŽ}} - \text{ODNOS}_{\text{REGULOVANÁ DRENÁŽ}} \quad (13)$$

$$\text{Respektive po početní úpravě: ODNOS} = 10 * F * q * J \quad (14)$$

$$\text{Vyjádřený v kg: ODNOS} [\text{kg} \cdot \text{den}^{-1}] = 0,01 * F * q * J \quad (15)$$

$$\text{a také jako specifická hodnota: ODNOS} [\text{kg} \cdot \text{den}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}] = 0,01 * q * J \quad (16)$$

Úspěšnost konceptuálních modelů (např. jednoduchého regresního apod.) pro podporu zavádění nových drenážních praktik potvrzuje např. studie ze Severní Karolíny [Negm et al. 2016].

2.5 Shrnutí poznatků výzkumu realizovaného na modelových lokalitách projektu

Experimenty probíhaly na sedmi vybraných stavbách zemědělského odvodnění, lokalizovaných ve čtyřech geomorfologických oblastech: Polabská nížina v rámci České tabule, Českomoravská vrchovina na pomezí České tabule a Česko-moravské soustavy, podhůří Orlické oblasti Krkonošsko-jesenické soustavy a sníženiny Pomoraví Západních Karpat. Cílem bylo provádět experimenty na dostatečně variabilním vzorku staveb odvodnění co do způsobu zemědělského hospodaření, podmínek pedologických (viz Obr. 2.5.1), klimatických a vodohospodářských, ale i co do potenciálu uplatnění regulace při modernizacích těchto staveb na systémy s regulací. Přehled vybraných charakteristik lokalit uvádí tabulka Tab. 2.5.1. Dvě ze staveb byly již v době realizace navrženy jako regulační drenáž (Kolesa-Vápno

a Uherčice – od devadesátých let minulého století však v tomto režimu nebyly provozovány). Před zahájením experimentů bylo třeba regulační prvky opravit a dotčenou část stavby zprovoznit. Další lokality byly nově vybaveny regulačními prvky, situovanými v šachticích. Každá lokalita je členěna na oblast s regulací a oblast kontrolní, tj. bez uplatnění regulace (to se týká i staveb regulační drenáže, kdy byly příslušné regulační prvky dlouhodobě vyhrazeny).

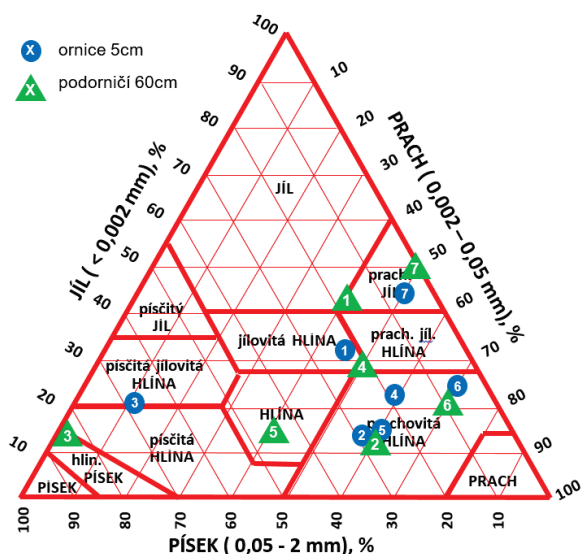
Tab. 2.5.1 Přehled charakteristik modelových lokalit s cílem vyjádření podílu plochy s dosahem vzduší hladiny monitorovaným regulačním prvkem (seřazeno dle hodnot indexu DR)

Lokalita/ okres	Typ odvodňovací stavby	Využití pozemku/ průměrný výnosový potenciál /*2 [%]/ plodina v r. 2021	Plocha [ha] drenážní skupiny/ souřadu	Plocha [ha] dosahu regulačního prvku	Sklonitost drenážní skupiny [%]	Index DR /*1 [-]
Bzenec okr. Hodonín	klasická	orná půda / 100,6 / vojtěška	3,704	2,167	0,10	0,585
Kolesa- Vápno okr. Pardubice	regulační drenáž	orná půda / 103,3 / slunečnice	5,971	3,407	0,26	0,571
Uherčice okr. Břeclav	regulační drenáž	orná půda / 101,0 / kukuřice	25,784	11,553	0,06	0,448
Helvíkovice okr. Ústí n.O.	klasická	louka / 104,1	1,034	0,143	3,48	0,138
Pokřikov okr. Chrudim	klasická	orná půda / 100,7 / řepka	5,457	0,452	3,33	0,083
Za Kněžourem okr. Chrudim	klasická, doplněná břehovou infiltrací	orná půda / 97,1 / kukuřice	3,337	0,084	5,00	0,025
Louka- Pokřikov okr. Chrudim	klasická	louka / 97,8	2,675	0,041	3,75	0,015

Pozn.: /*1 Index dosahu regulace DR [-] – viz Kapitola 2.3.1

/*2 Výnosový potenciál zpracoval pro lokality V. Lukas (Mendelu) dle metodiky (Lukas a kol. 2018) – průměrná hodnota v tabulce je stanovena z čtvercového rastru hodnot

Pro každý regulovaný profil byl na těžbě stavbě vybrán profil podobný (stejně zemědělské využití, podobné přírodní podmínky), který je však provozován v režimu tradiční drenáže, tj. působící trvalým snižováním úrovně HPV



Obr. 2.5.1 Klasifikace půdního druhu modelových lokalit s využitím trojúhelníkového diagramu

LEGENDA k použitému číselnému označení lokalit: 1 – Helvíkovice, 2 – Za Kněžourem, 3 – Kolesa-Vápno, 4 – Louka-Pokřikov, 5 – Pokřikov, 6 – Uherčice, 7 – Bzenec

k hloubce uložení drénů. Plošný dosah regulace je pro jednotlivé plochy různý a byl odvozen ze statické hladiny, odpovídající přelivné hraně regulačního prvku. Porovnáním profilu s regulací a bez regulace je v projektu popisován efekt řízení provozu stavby jak z hlediska množství vod, tak z hlediska její jakosti. Vzorky vod byly odebírány z uzavěrových profilů těchto drenážních skupin/souřadů (automatickými vzorkovači a manuálními odběry) a také z HPV přilehlých půdních profilů (manuálním odběrem z vystrojených mělkých vrtů). Pozornost byla zvláště věnována uplatnění elektrod pro kontinuální měření elektrické konduktivity vody v roli indikátoru koncentrace rozpuštěných, iontově aktivních látek, a tedy celkové mineralizace ve vodách, z čehož lze vyhodnocením dovozovat intenzitu promývání půdního profilu, resp. podmínky tvorby drenážního odtoku vlivem propustnosti půdní matrix zahrnující projev preferenčních cest v půdních horizontech.

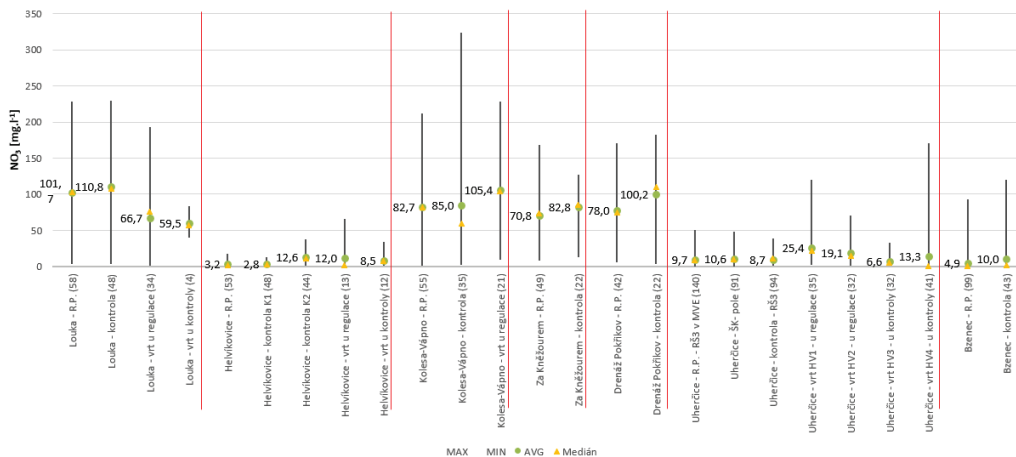
Obr. 2.5.2 Statistické vyjádření výsledků laboratorního testování obsahu nitrátů, amoných iontů a konduktivity (elektrické vodivosti) odebraných vzorků drenážních vod experimentálních lokalit za období let 2019-23.

Poznámka k obrázku: Číslo v závorce uvedené za jménem odběrného místa udává celkový počet zpracovaných vzorků vody.

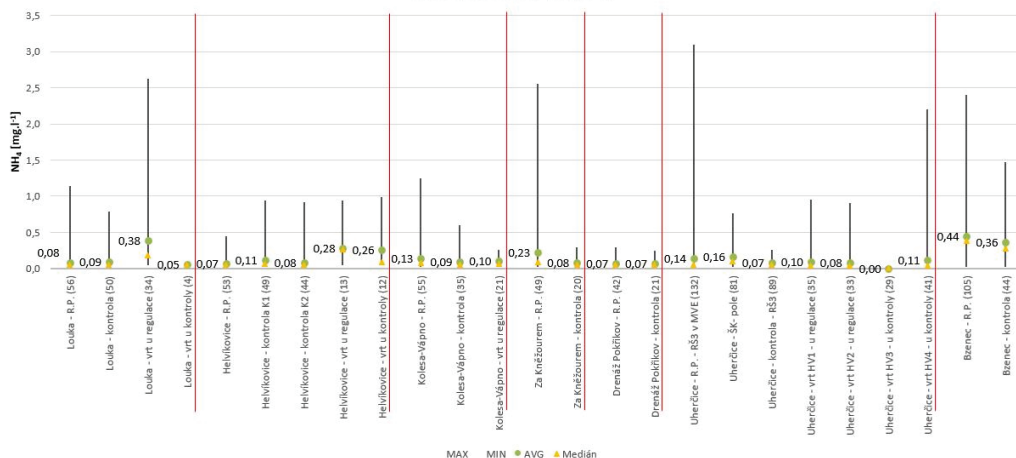
Použité zkratky: RŠx – regulační šachta (x = číslo šachtice); R.P. – odběr na regulačním prvku; MVE – objekt malé vodní elektrárny (Uherčice); kontrola – odběr na kontrolním profilu (bez regulace); ŠK – šachta kontrolní, nadzemní; AVG – aritmetický průměr

Červené čárkované čáry u konduktivity vody korespondují s červeně, římskými číslicemi značenými rozsahy kategorií tříd kvality vod I. až V. dle ČSN 75 7221 „Jakost vod. Klasifikace jakosti povrchových vod“

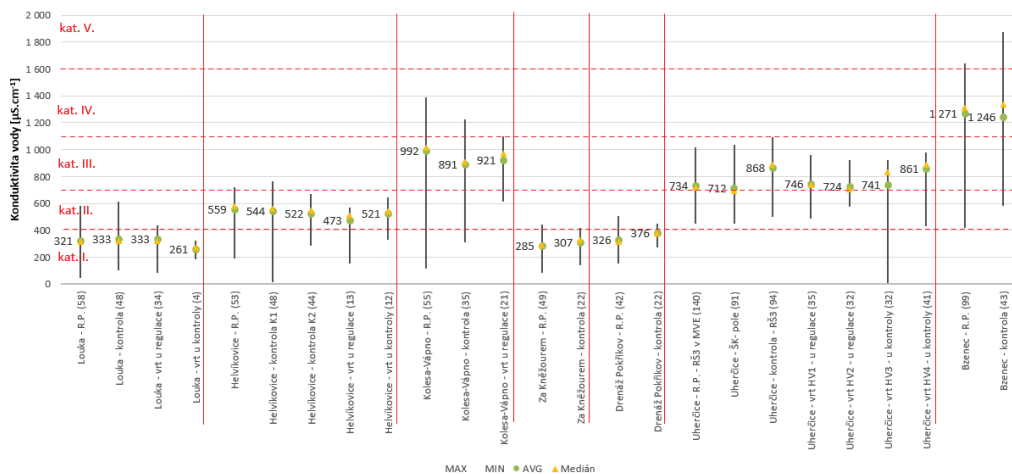
Nitráty [mg.l⁻¹]



Amonné ionty [mg.l⁻¹]



Konduktivita vody [μS.cm⁻¹]



2.5.1 Souhrn hlavních poznatků z oblasti jakosti drenážních vod, odvozených z experimentů na modelových plochách projektu

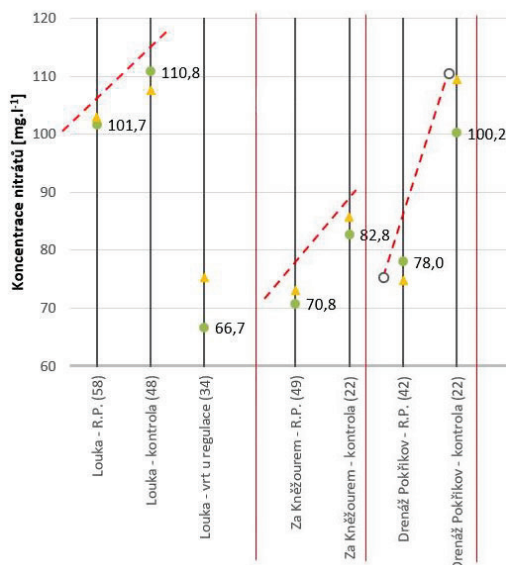
Z výsledků čtyřletého monitoringu (od druhé poloviny roku 2019 do července 2023), znázorněných na Obr. 2.5.2, lze vyvodit několik charakteristik modelových případů a dosažených efektů regulace:

- na objektu Louka u Pokřikova bylo potvrzeno, že zvýšení HPV u regulačního prvku způsobilo zvýšení anaerobních procesů v půdě a obsah amonných iontů ve vrtech je vyšší než v drenážní vodě protékající potrubím v kontrolním profilu bez uplatnění regulace a obráceně, obsah nitrátů je v drenážních vodách vyšší než ve vodě půdní, vzorkované ve vrtech; důvodem je pravděpodobně vliv dynamiky přítoku vody drénem a její ředění v místě instalace regulačního prvku, resp. odběru vody;
- nejvyšší koncentrace nitrátů jsou měřeny na stavbě Kolesa-Vápno, na lehkých půdách Polabí; nejnižší koncentrace na objektech Helvíkovice v podhůří Orlické oblasti, kde jsou zdrojem vod přítoky z lesních partií povodí, přitom mineralizace drenážní vody je zde střední (dle ČSN 75 7221, tab. 3 kategorie 2 = mírně znečištěná voda).

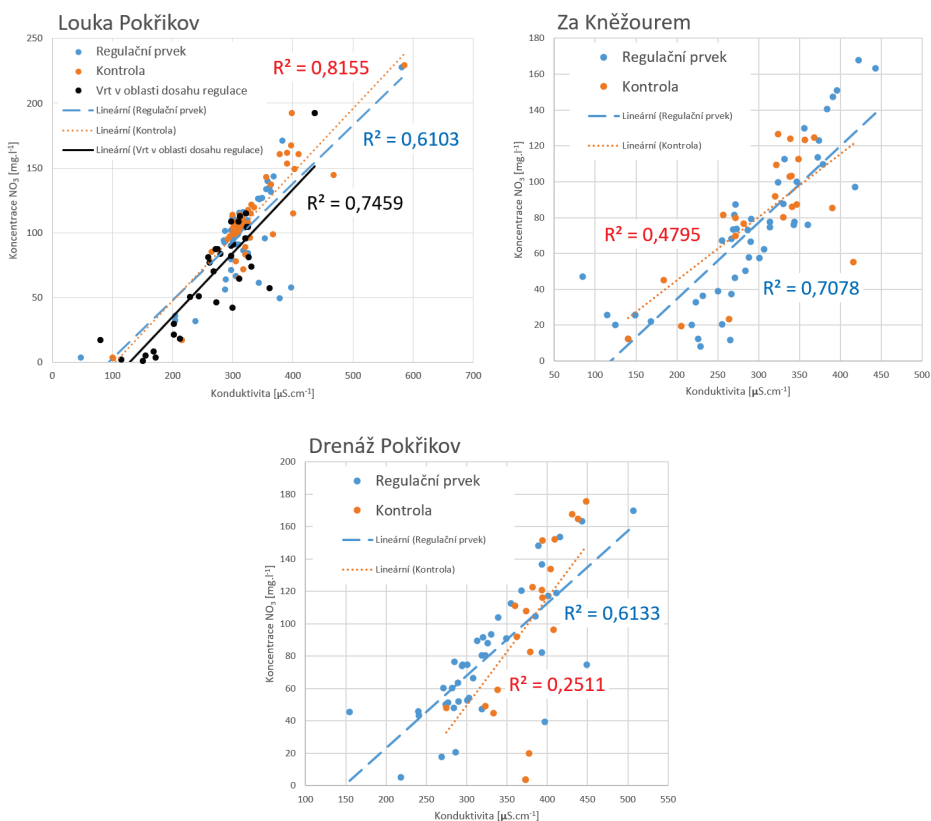
Použitý ukazatel konduktivity vody vyjadřuje přibližnou míru koncentrace elektrolytů ve vodě. Vyjadřuje tedy nepřímě obsah minerálních látek („solí“), které se ve vodě nacházejí. Nejnižší hodnoty konduktivity vod byly měřeny na lokalitách Českomoravské vrchoviny (objekty Louka, Za Kněžourem a Drenáž Pokřikov). Naopak nejvyšší hodnoty na lokalitě Bzenec (Pomoraví Západních Karpat) a Kolesa-Vápno (Polabí). Pokud použijeme klasifikaci dle Tabulky 3 podle ČSN 75 7221 „Kvalita vod – Klasifikace kvality povrchových vod“, pohybují se mediány drenážních vod lokalit Českomoravské vrchoviny v kategorii I. neznečištěná voda ($<400 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$), naměřená maxima hodnot se vejdou do meze kategorie II. mírně znečištěná voda ($<700 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$), kam je možné přiřadit i lokalitu Helvíkovice. Nejhorší kvalitu vody měříme u lokality Bzenec, která se mediány pohybuje v kategorii IV. silně znečištěná voda a v maximech přesahuje do kategorie V. velmi silně znečištěná voda.

Na všech třech lokalitách Českomoravské vrchoviny se v rámci průměrů a mediánů laboratorně měřených hodnot obsahu nitrátů na odebraných vzorcích vod prokázal nevýrazně efekt snížení koncentrací v profilu s regulací oproti profilu bez regulace – viz Obr. 2.5.3.

Na těchto třech lokalitách je možné využít úspěšně vycházející lineární korelaci mezi laboratorním měřením obsahu nitrátů a konduktivitou vody, jak dokládá Obr. 2.5.4. Tato závislost má význam proto, že je praktické používat pro kontinuální monitoring spíše elektrodu konduktivity než iontové selektivní elektrodu pro stanovení koncentrací nitrátů. V projektu používaná elektroda konduktivity (typ ESV11 – snímač pro měření vodivosti a teploty vody výrobce Fiedler AMS s.r.o.) je pro použití v drenážních systémech velmi vhodná díky své malé velikosti a robustnosti (umožňuje instalaci buď uvnitř regulačních prvků, vložením do průtočného profilu drenážního potrubí nebo instalaci na vyústění drenáže do šachtice, případně na drenážní

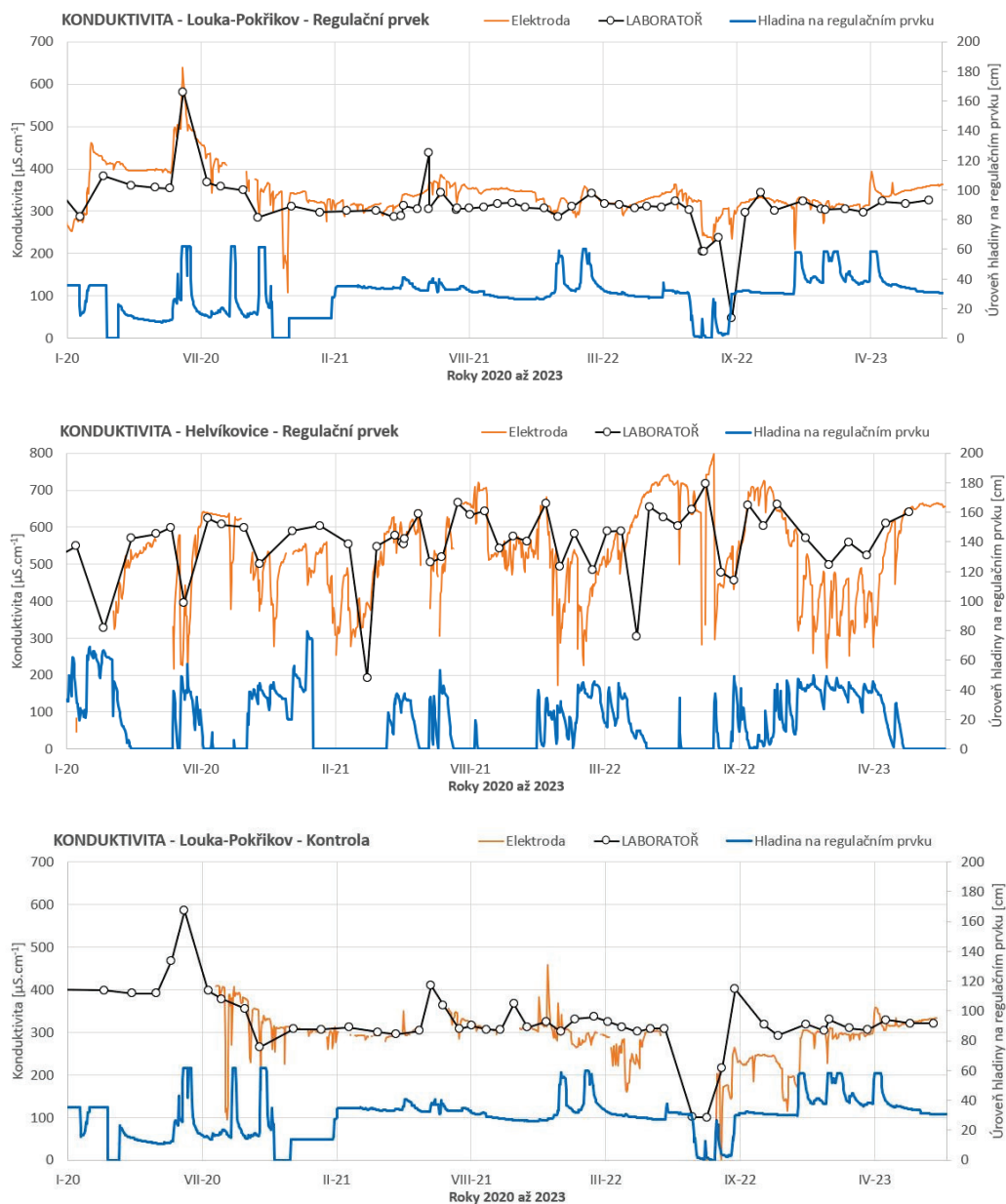


Obr. 2.5.3 Výseky grafu Obr. 2.5.2 v části nitráty pro tři lokality při zvýraznění měřítek Y-ové osy. Použitá data korespondují s Obr. 2.5.2, tedy vyjadřují časovou řadu měření 2019 – 2023



Obr. 2.5.4 Stanovené korelační závislosti mezi výsledky laboratorních měření konduktivity vody a koncentrací nitrátů pro trojici modelových lokalit v oblasti Českomoravské vrchoviny. Použitá data korespondují s Obr. 2.5.2, tedy pracují s časovou řadou měření 2019 – 2023

výusti) na rozdíl od testované kombinované skleněné elektrody ISE (typ ISE 485-NO3 stejného výrobce). Lze tedy doporučit pro lokality, kde jsou tyto vztahy potvrzeny, používat pro kontinuální monitoring jakosti vod spíše elektrodu konduktivity.



Obr. 2.5.5 Příklady souběhu kontinuálního měření konduktivity vody elektrodou ESV11 a výsledků laboratorních zkoušek vzorků vod odebraných vzorkovačem LISA.

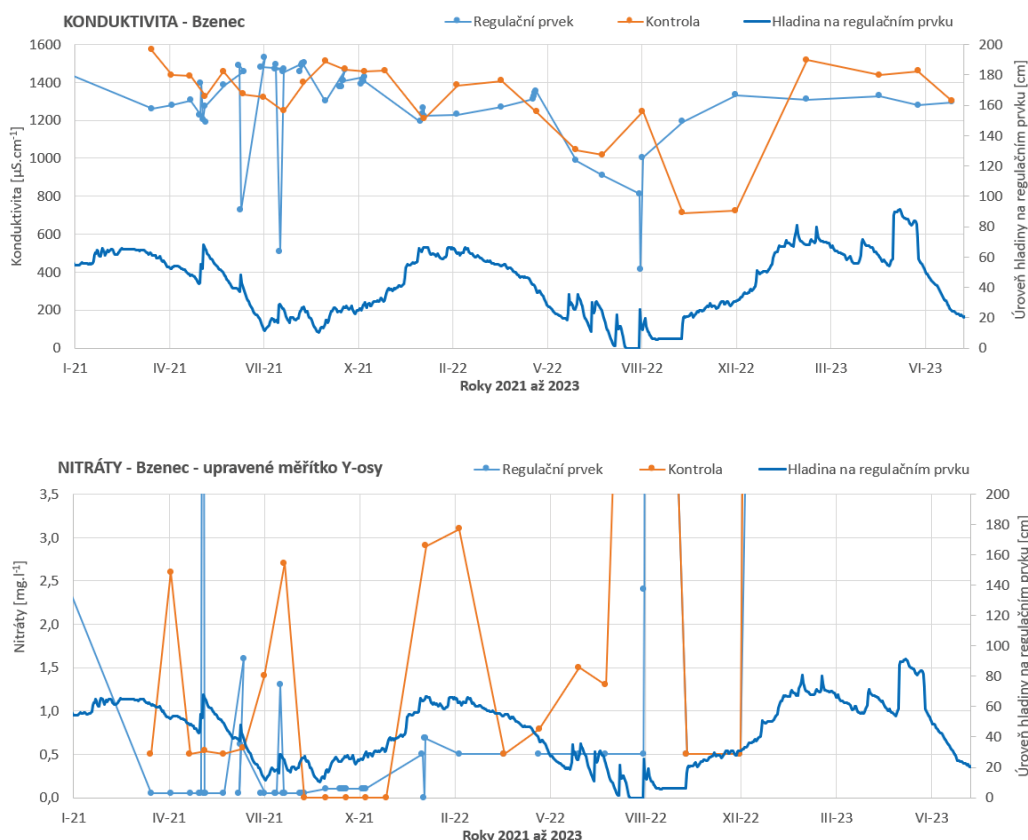
Nahore a uprostřed: Měření na regulačním prvku Louka-Pokřikov a Helvíkovice.

Dole: Měření v kontrolním profilu Louka-Pokřikov v místě vyústění drenáže do šachtice.

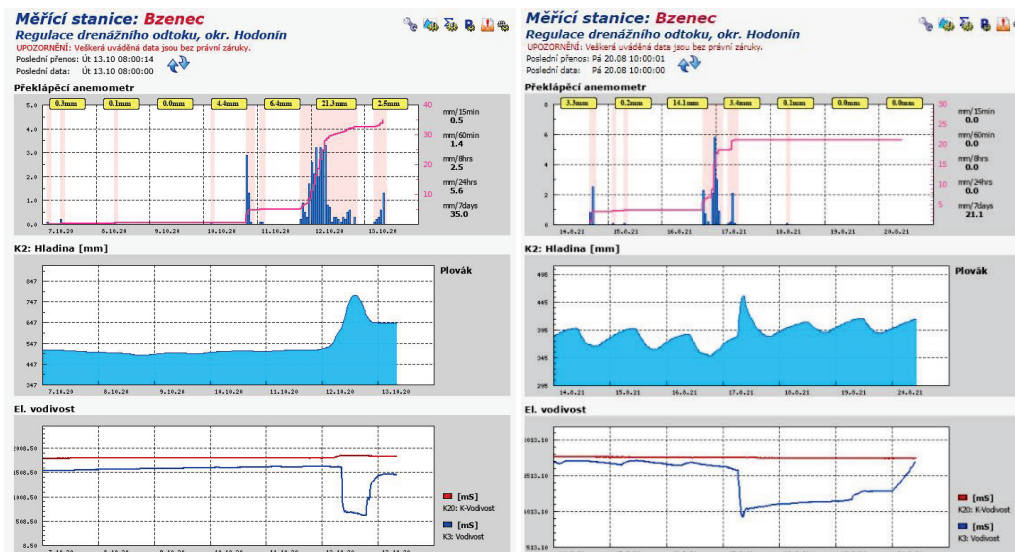
Pozn.: Kontinuální měření prováděné v 10-ti minutových intervalech je v grafech vyjádřeno průměrnými denními hodnotami elektrické vodivosti.

Porovnání kontinuálního monitoringu konduktivity vod s výsledky laboratorních rozborů vzorků drenážních vod po jejich odebrání manuálně, od roku 2022 dálkově ovládaným vzorkovačem LISA (výrobce ADCIS s.r.o.) dokumentuje pro vybrané tři monitorovací profily modelových lokalit Obr. 2.5.5.

Mechanismus ředění drenážní vody vodou srážkovou je patrný např. na objektu Bzenec, kdy se v profilu s regulačním prvkem projevuje po vydatné srážce, která způsobí zvýšení HPV; to se projeví i na hodnotách konduktivity drenážní vody jejím výrazným poklesem. Dokumentováno to je jak na grafu laboratorně měřených hodnot po řízeném odběru vzorku vody (Obr. 2.5.6a), tak na okamžitých desetiminutových datech měřených stanicí M4032 (výrobce Fiedler AMS s.r.o.) – viz Obr. 2.5.7. Projev dokladovaný hodnotami koncentrací nitrátů (Obr. 2.5.6b) je opačný, tj. koncentrace se během kulminace odtoku zvyšují, výrazně však více na profilu kontrolním než na profilu s instalovaným regulačním prvkem.



Obr. 2.5.6 a/ Výsledky vzorkování drenážních vod v místě s regulací a v profilu kontrolním, na pozadí vývoje regulované HPV na regulačním prvku při retenci autochtonních, převážně srážkových vod. Porovnání hodnot laboratorně stanovené konduktivity vod.
b/ Dtto, porovnání laboratorně stanovených koncentrací nitrátů. Y-ové měřítko osy je upraveno s cílem ve větším detailu popsat běžné kolísání hodnot bez zobrazení naměřených maxim.



Obr. 2.5.7 Příklad odezvy regulačního systému na výraznější srážko-odtokové události na podzim a v létě na objektu Bzenec. Měření konduktivity vod v intervalu po 10 minutách. V dolních grafech popisuje modrá čára profil s regulací, červená čára profil kontrolní, mimo dosah regulace
 Vlevo: událost z 13.10.2020 (srážka 27,5 mm/24 hod).
 Vpravo: Událost z 20.8.2021 (srážka 17,5 mm/24 hod)

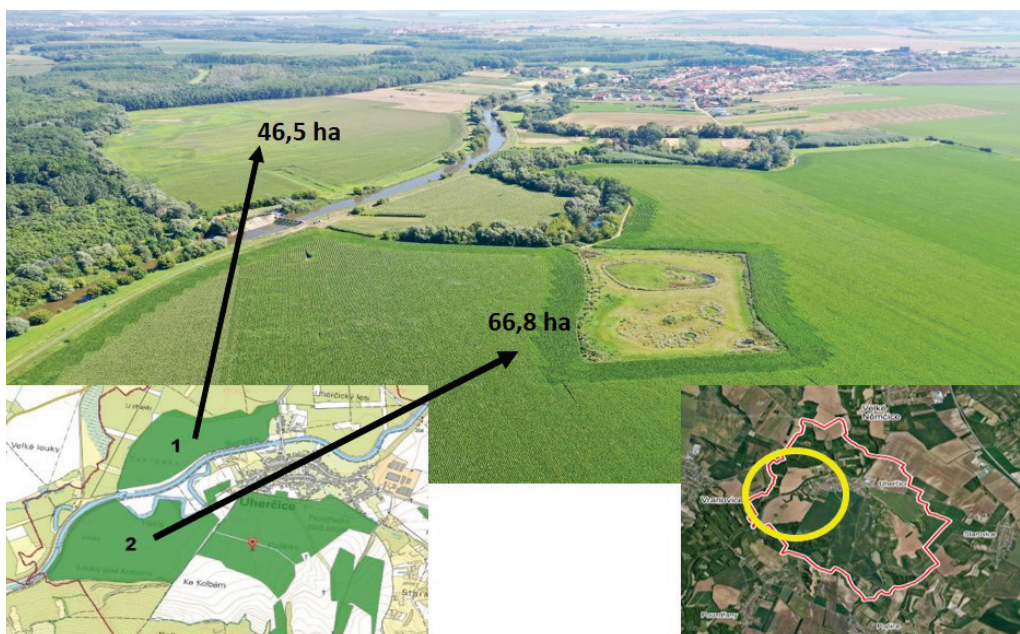
Zdroj: Vybrané části obrazovek aplikace „Web prohlížeč naměřených dat“ fy Fiedler AMS (<https://stanice.fiedler-magr.cz/>)

Na odezvě dílčí plochy s dosahem regulace HPV se podílí i přispívající vyšší retenční schopnost odvodněné půdy, kdy se uplatní předvyprázdnění gravitačních půdních póru předcházející srážce, sníží/utlumí průtokovou odezvu v drenáži. Tento efekt je třeba brát při úvahách o regulaci v potaz.

2.5.2 Poznatky ze stavby regulační drenáže v Uherčicích

Role odvodnění zemědělských půd patří v současnosti mezi často diskutovaná témata nejen v oblasti zemědělství, ale také v souvislosti s problematikou klimatické změny. Obecně je v dnešní době na odvodnění zemědělských půd, přispívající k zrychlenému odtoku vody z půdního profilu, pohlíženo spíše jako na negativní prvek v krajině, a to i v lokalitách, kde v minulosti v důsledku vlhkého klimatu bylo odvodnění pozemků nutností, aby mohly být zemědělsky obhospodařovány.

Stavba regulační drenáže v Uherčicích je názorným příkladem toho, jak lze na zemědělsky využívaném pozemku vodu akumulovat stejně, jako to umožňují vodní nádrže nebo mokřady – při regulaci úrovně HPV v dostatečné hloubce pod povrchem půdy se vytváří podzemní vodní nádrž nebo

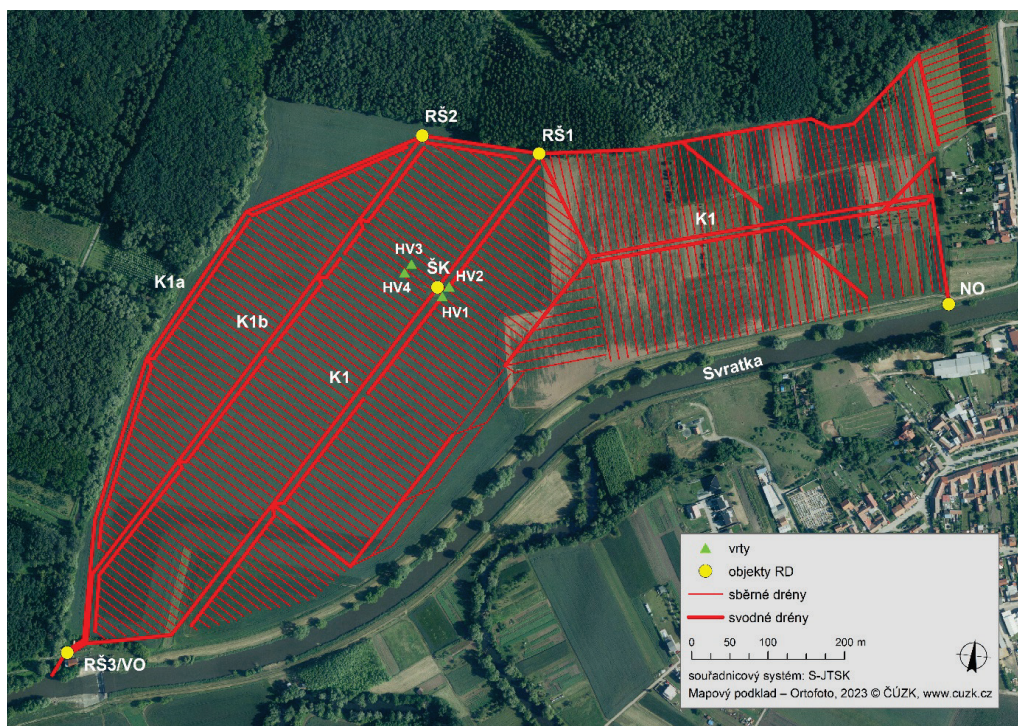


Obr. 2.5.8 Situování regulační drenáže Uherčice

kaskáda podzemních nádrží, která ale zároveň neomezuje hospodářské využití pozemku, a navíc při možnosti řízení úrovně HPV a s tím související intenzitou kapilárního vztlínání vody ke kořenovému balu umožňuje závlahu tzv. drenážním podmokem.

Stavba RD, rozkládající se na obou březích řeky Svratky, byla kolaudována v r. 1991 a je realizována na celkové ploše 113,3 ha. Skládá se ze dvou částí o rozloze 46,5 ha (severní část, pravý břeh Svratky, na Obr. 2.5.8 označeno jako "1") a 66,8 ha (jižní část, levý břeh Svratky, na Obr. 2.5.8 označeno jako "2"). Aktuálně je funkční pouze část RD na pravém břehu Svratky, na levém břehu byla RD v letech 2014-15 zásadně ovlivněna vybudováním mokřadů. RD využívá gravitační princip pro odvodnění i pro závlahu. Stavba nahradila původní závlahu postřikem provozně efektivnější závlahou drenážním podmokem.

Stavba RD na pravém břehu Svratky sestává z několika trubních, rozvodných kanálů, z nichž je voda drenážními objekty, svodnými a sběrnými drény rozváděna po ploše (Obr. 2.5.9). Kanál K1 je napojen na náпустný objekt NO (Obr. 2.5.10), v regulačních/rozdělovacích šachticích RŠ1 (Obr. 2.5.11) a RŠ2 se poté rozděluje na větve K1a a K1b. Na větvi K1 v regulované části plochy se nachází kontrolní šachtice ŠK. Všechny větve pak vyústí do sdruženého regulačního objektu RŠ3 (s napojením na výпустný objekt VO) v areálu malé vodní elektrárny (elektrárna se stavbou RD přímo nesusvisí, společně však využívají výškový stupeň/jez na řece Svratce). Kanál K1 a objekty NO, RŠ1, RŠ3 jsou v majetku státu a ve správě Státního pozemkového úřadu. Ostatní části stavby jsou majetkem jednotlivých vlastníků dotčených pozemků.



Obr. 2.5.9 Schéma funkční části regulační drenáže Uherčice – lokalita na pravém břehu Svatky s vyznačením drénů a objektů

LEGENDA: (NO – náпустný objekt; RŠ1, RŠ2, RŠ3 – regulační šachtice; ŠK – kontrolní šachtice; VO – výпустný objekt; K1, K1a, K1b – kanály; HV1, HV2, HV3, HV4 – pozorovací mělké vrty)



Obr. 2.5.10 Náпустný objekt NO



Obr. 2.5.11 Regulační/rozdělovací šachtice RŠ1

Závlahová funkce pokrývá evapotranspiraci v maximech až $5 \text{ mm} \cdot \text{den}^{-1}$ (to odpovídá odběru vody z řeky Svatky $65,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$). Dosahováno je akumulace vody v půdním profilu jednorázově o objemu až cca $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (pro zvýšení HPV o 40 cm, v doporučeném maximálním kolísání úrovní HPV 80–120 cm pod terénem).

Při provozu RD nastávají tři fáze:

- fáze závlahová – postupně dochází k plnění půdních pórů, nejprve pod úrovní drénů, pokud byla HPV zaklesnutá pod tuto úroveň, poté do úrovně nastavené na regulačních prvcích – tato fáze může trvat několik dní,
- fáze udržovací – udržuje se poloha HPV a doplňuje se pouze množstvím vody odpovídající evapotranspiraci,
- fáze odvodňovací – volena při potřebě snížit HPV (souvisí s předepsanou manipulací na vodním díle).

Závlahy je v RD Uherčice dosahováno otevřením šoupat NO na břehu řeky a uzavřením dolních výpustí regulačních prvků v RŠ3. Po ploše je voda rozváděna systémem drénů s rozchodem 10–13 m a hloubkou uložení 0,8–1,0 m. Rozvod vody v ploše pozemku je možno ještě částečně regulovat pomocí šoupat regulačních prvků v RŠ1 a RŠ2. Odvodňovací fáze probíhá po uzavření NO a otevření šoupat dolní výpusti v RŠ3, resp. RŠ1 a RŠ2, kdy voda odtéká do podjezí.

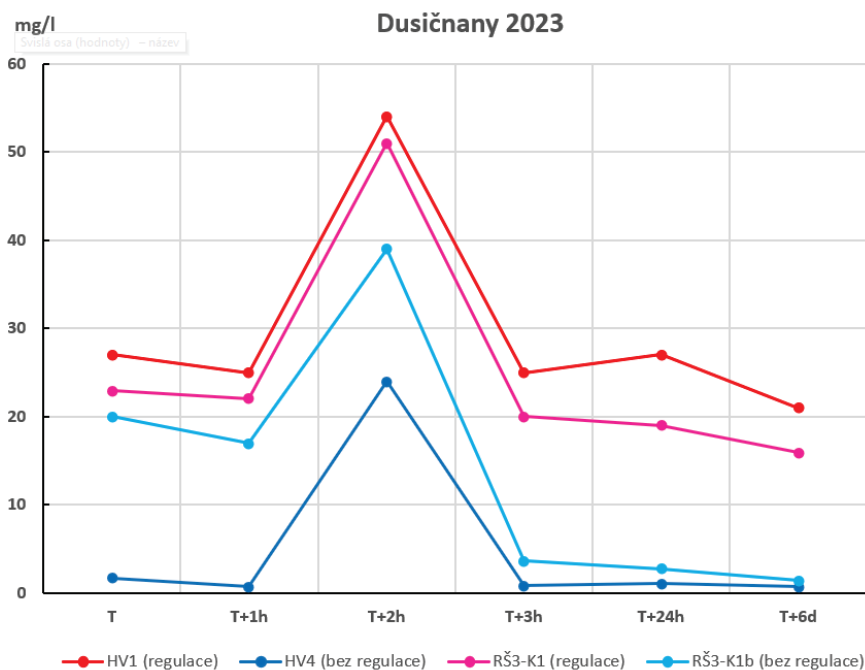
Za účelem porovnání účinku regulované a neregulované (tradiční) drenáže byla plocha stavby situovaná pod šachtou RŠ1 rozdělena na dvě části, z nichž jedna je regulována – větev K1 (lze na ní snižovat či zvyšovat úroveň HPV, a tím odvodňovat či zavlažovat) a druhá regulována není – větev K1a, K1b (plní pouze odvodňovací funkci). V obou částech byly instalovány mělké vrty (2 m) vypažené PVC trubkou o průměru 50 mm, z kterých se v pravidelných intervalech odebíraly vzorky podzemní vody a měřeny úroveň HPV. V regulované části jsou to vrty s označením HV1 a HV2, v neregulované vrty HV3 a HV4 (Obr. 2.5.9).

Odvodňovací experiment

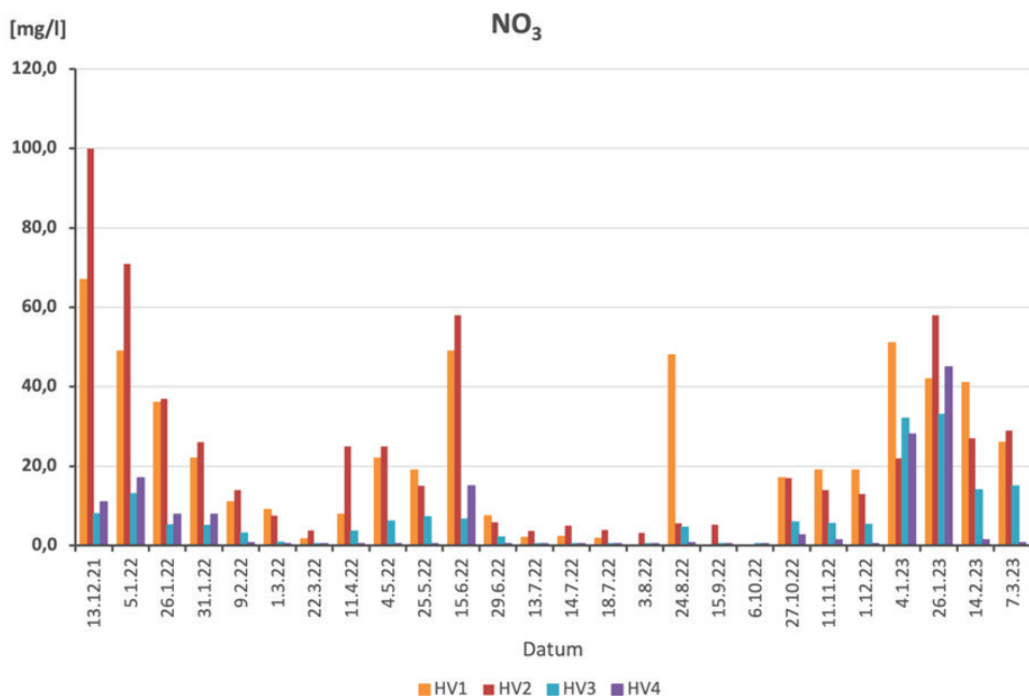
V termínech 13.–18.7.2022 a 28.3.–3.4.2023 proběhl na regulované a neregulované ploše regulační drenáže Uherčice v rámci podrobných odvodňovacích experimentů (Obr. 2.5.15) odběrové kampaně vzorků vod. Cílem experimentu bylo popsat průběh odvodňovací fáze, včetně změn jakosti vod. Měřena byla také rychlost změny HPV na ploše při odvodňovací fázi. Před experimentem i po něm byl sledován režim úrovní hladin, průtoků i kvality vod.

Experiment spočíval ve změně závlahové fáze stavby na fázi odvodňovací, kdy dochází k odtoku akumulované vody v půdním profilu. Průběžně byly měřeny výšky HPV ve vrtech HV1–HV4 a odebírány vzorky vody jak z vrtů, tak z rozdělovací šachtice RŠ1, kontrolní šachtice ŠK na větvi K1 (plocha s regulací) a regulační šachtice RŠ3 před výtokem do podjezí řeky Svatky, konkrétně z plovákové zdrže před hradícím prvkem na větvi K1 a z vyústí větve K1b odvádějící vodu z kontrolní, neregulované plochy.

Sledování změn výšek HPV a odběry vzorků probíhaly ve vrtech HV1, HV2, HV3 a HV4 v určeném časovém režimu. Výchozím časem byl čas T, kdy byl zastaven v NO přítok vody ze Svatky a v RŠ3 otevřeno šoupe na výtoku. Odběry vzorků vod a měření výšek HPV proběhlo bezprostředně před zahájením odvodňovacího experimentu a poté v časech T+1 h, T+2 h, T+3 h, T+24 h (resp. T+25 h) a T+5 dnů (resp. T+6 dnů). Výšky hladin byly



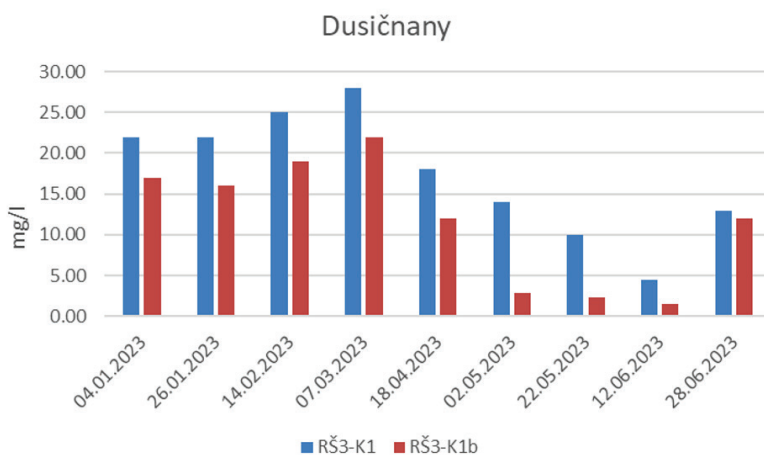
Obr. 2.5.12 Srovnání hodnot koncentrací dusičnanů během odvodňovacího experimentu v r. 2023 na regulované a neregulované části drenáže



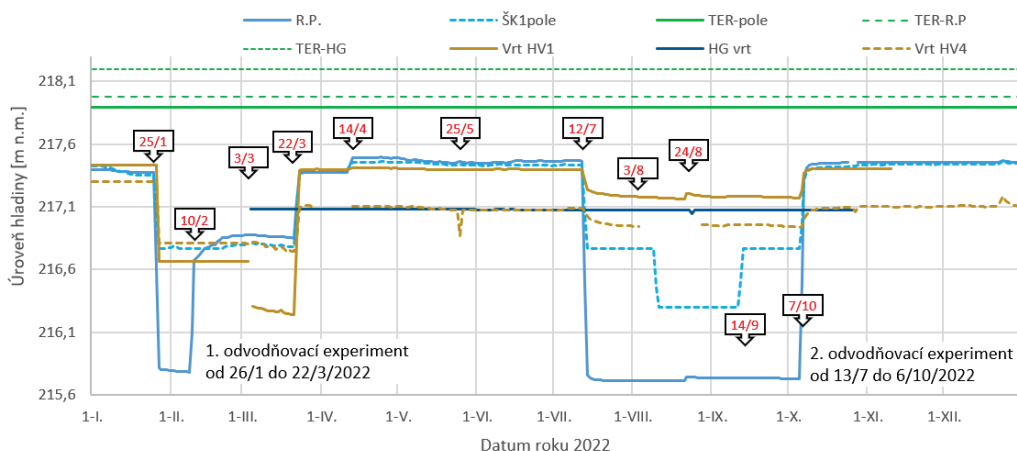
Obr. 2.5.13 Koncentrace dusičnanů v podzemní vodě na regulované ploše (vrty HV1 a HV2) a neregulované ploše (vrty HV3 a HV4)

souběžně monitorovány v kontrolní šachtici ŠK a RŠ3 pomocí instalovaných plovákových hladinoměřů.

Lokalita Uherčice, jako jedna z pilotních staveb řešeného projektu, ukazuje rozdíly koncentrací živin ve vzorcích vod mezi regulovanou a neregulovanou drenáží. Na ukázkou jsou na Obr. 2.5.12 prezentovány výsledky koncentrací dusičnanů z odvodňovacího experimentu realizovaného v roce 2023. Tyto hodnoty jsou vyšší u regulované části drenážní soustavy, a to jak ve vrtech, tak v regulační šachtici RŠ3. Tuto skutečnost dokazují jak výsledky



Obr. 2.5.14 Koncentrace dusičnanů ve sdruženém regulačním objektu z regulované plochy (RŠ3-K1) a neregulované plochy (RŠ3-K1b)



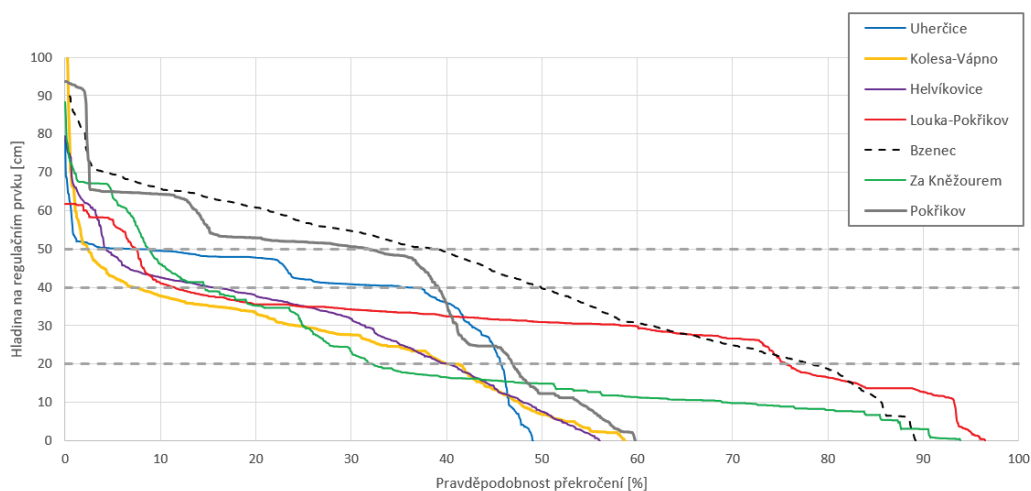
Obr. 2.5.15 Měření úrovně hladin na stavbě regulační drenáže Uherčice v rámci střídání závlahové a odvodňovací fáze v roce 2022

LEGENDA: R.P. = hladina na regulačním prvku; ŠK1pole = hladina v kontrolní šachtici ŠK1 nacházející se přibližně uprostřed pole mezi šachticemi RŠ1 a RŠ3; TER-pole = kóta terénu v místě ŠK1; TER-R.P. = kóta terénu v místě regulační šachtice RŠ3 nacházející se v areálu malé vodní elektrárny; TER-HG = kóta terénu u lesa poblíž šachtice RŠ1; Vrt HV1 = hladina ve vrtu HV1 v části regulované HPV; HG vrt = hladina v hydrogeologickém vrtu poblíž šachtice RŠ1 u lesa; Vrt HV4 = hladina ve vrtu HV4 v části kontrolního drenážního souřadu

z průběhu tohoto odvodňovacího experimentu (Obr. 2.5.12), tak i výsledky pravidelného celoročního monitoringu jakosti podzemní vody – vrty HV1 až HV4 (Obr. 2.5.13) i jakosti drenážní vody v RŠ3 (Obr. 2.5.14). Jak vyplývá z uvedených výsledků, na plochách s regulační drenáží jsou vyšší koncentrace dusičnanů z důvodu delšího zdržení vody a polní plodiny tak mohou lépe využívat aplikované živiny. S tím souvisí i možnost ovlivňovat jakost vody odtékající z drenáží do vodních toků. V případě, že bude možná regulace, může zemědělec uzavřít výpusť ze systému a živiny rozpuštěné ve vodě zůstanou delší dobu využitelné pro polní plodiny a nebudou trvale a nekontrolovaně odtékat do povrchových vod. Regulací na drenážích tak lze ovlivnit nejen retenci, resp. akumulaci vody, ale také snížit vyplavování živin, případně i dalších látek (např. pesticidy a jejich metabolity). Samozřejmě je nezbytné mít neustále na zřeteli, že kvalita půdní a drenážní vody je ovlivněna hydrologickými podmínkami, půdním prostředím, způsobem hospodaření či druhem a vitalitou pěstovaných plodin (Kulhavý a kol. 2020).

2.5.3 Analýza četnosti dosažených úrovní řízené hladiny v drenážním systému

Schopnost ovlivňovat či manipulovat s hladinou podzemní vody v dosahu působnosti regulačního prvku (Obr. 2.5.17) byla v rámci řešeného projektu prokázána jak na vytipovaných stavbách, na nichž byla regulace obnovena (původně stavby regulační drenáže), tak na stavbách nově vybavených regulačními prvky (realizováno úpravou tradičních jednofunkčních staveb odvodnění) – viz popis lokalit v Kapitole 2.5. Na Obr. 2.5.16 je vyjádřena



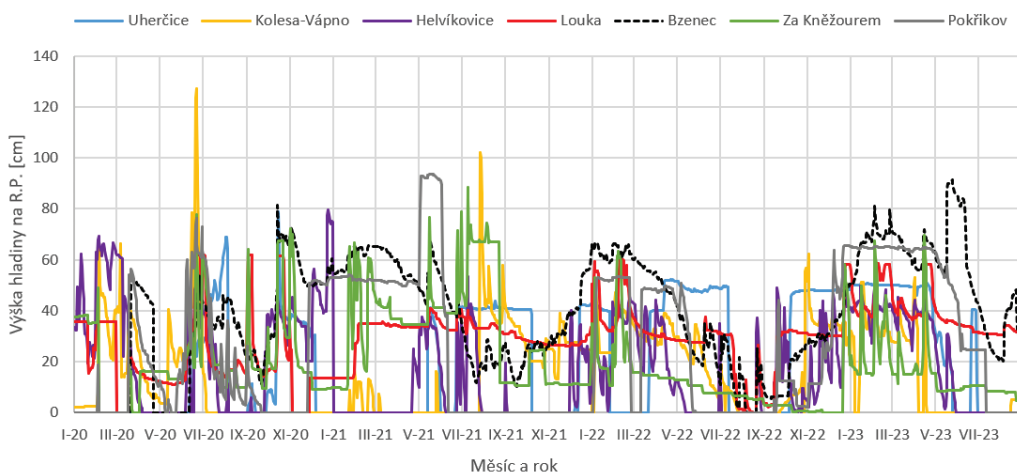
Obr. 2.5.16 Čáry překročení dosažených úrovní hladin na regulačním prvku stanovená pro trvání experimentů v letech 2019–2023 (4 roky)

Pozn.: Stavby „Louka-Pokřikov“ a „Pokřikov“ jsou lokality v rámci jednoho katastru obce Pokřikov (okr. Chrudim), vzdálené vzdušnou čarou 1.7 km, se způsobem využití „louka“ a „orná půda“ – viz Tab. 2.5.1.

celková doba, po kterou vzduť hladiny v místě regulačního prvku dosahovalo nebo překračovalo jednotlivé úrovně 20 – 40 – 50 cm nad niveletou drénu (během odvodňovací fáze zpravidla klesá na nulu, pokud není překročena kapacita svodného drénu; k překročení v praxi dochází jen výjimečně a to na dobu několika minut). V těchto grafech jsou zahrnuta také období, během nichž plánovaně probíhala odvodňovací fáze stavby (tj. snížení hladiny na úroveň nivelety drénu), a to buď s cílem prokázat funkčnost stavby a řízené snížení hladiny v ploše, nebo byly řešeny opravy objektů.

Z grafů vyplývá následující:

- 32 – 47 % z celkové doby měření (tj. z cca 1 200 dní) byla minimálně u všech lokalit (tj. po dobu 384 – 564 dní) HPV zvýšena alespoň o 20 cm; avšak například stavba Louka-Skuteč nebo Bzenec toto zvýšení hladiny dosáhlo po dobu až 840-900 dní (75-78 %),
- pokud byly přelivné hrany regulačních prvků nastaveny průměrně na výšku 60 cm, z grafů vyplývá, že k přetoku vody přes přeliv docházelo v rozpětí 1 – 13 % (Bzenec 20 %) celkové doby, tedy přepočteno na dny po dobu 12ti až 150ti (Bzenec 240ti) dní; po zbytek doby byla uplatněna absolutní regulace/zastavení drenážního odtoku potrubím.



Obr. 2.5.17 Aktivní hladiny na regulačním prvku (tj. výška hladiny od nivelety drenážního potrubí)
Zpracovaná datová řada 1.1.2020 až 31.8.2023

3. Srovnání novosti postupů

Výsledky metodiky přispívají k praktickému ověřování progresivních technologií, jakými regulace drenážního odtoku v podmínkách ČR prokazatelně je. Byla jí i v letech 1970-90, kdy byla řada těchto staveb realizována v zemědělsky produktivních oblastech jako stavby experimentální. Po roce 1990 však došlo k útlumu podpory meliorací obecně a těchto staveb zvláště s ohledem na potřebu zajišťovat manipulaci s regulačními prvky. V projektu využítá modelová stavba RD Uherčice (okr. Břeclav) je takovým příkladem.

Metodika poskytuje komplexní pohled na problematiku modernizace stávajících staveb, případně budování novostaveb systémů zemědělského odvodnění, doplněného o prvky umožňující regulovat drenážní odtok a hladinu podzemní vody. Témata jsou zejména cílena na minimalizaci rizik znečištění povrchových vod živinami, případně dalšími látkami, transportovanými formou drenážního odtoku. Kromě popisu kritérií vhodnosti stavby k realizaci úprav za účelem zvýšení krátkodobé retence a dlouhodobější akumulace vody na odvodněném pozemku poskytuje výpočtový nástroj pro odhad efektu regulace na snížení látkových odnosů, a tak umožňuje kvantifikovat nejen environmentální a vodohospodářské, ale i ekonomické efekty tohoto opatření. Dále seznamuje s poznatky, získanými v rámci experimentů, realizovaných v období let 2019-2023 na sedmi modelových lokalitách: Polabské nížiny v rámci České tabule, Českomoravské vrchoviny na pomezí České tabule a Česko-moravské soustavy, podhůří Orlické oblasti Krkonošsko-jesenické soustavy a sníženiny Pomoraví Západních Karpat.

V těchto letech realizované experimenty potvrdily závěry zahraničních studií, že větší efekt regulace drenážního odtoku na látkové odnosy dusíku bývá připisován snížení objemu odtoku než snížení koncentrací NO_3 v drenážní vodě, což jinak vyžaduje splnění řady doplňujících podmínek hydrologických i zemědělských – jako je např. výběr vhodných staveb odvodnění na základě posouzení přírodních i technických podmínek, doby trvání efektu zvýšení HPV, dle obsahu organických látek v regulaci dotčených horizontech půdy nebo uplatnění zásad cílené aplikace hnojiv, tedy například uplatnění precizního zemědělství. V podmínkách ČR byla proto nově hodnocena také četnost dosažení úrovní regulovaných hladin v systému drenážního odvodnění, resp. v přilehlém půdním profilu modelových staveb.

Byl vyvinut a v provozu otestován nový typ regulačního prvku se středovou hradicí trubkou, kdy hydrostatické i hydrodynamické síly působí na hradicí prvek radiálně, což snižuje energetické nároky na manipulaci (vyhrazení a zahrazení hradicího mechanismu) a řešení je tak vhodné pro automatizaci hydromelioračních staveb s cílem uplatnění na objektech, napájených z lokálních zdrojů energie, např. solárních panelů. Právě operativnost manipulace (automatická nebo dálkově řízená) umožňuje s ohledem na aktuálně probíhající srážko-odtokový proces snižovat negativní dopady odtoku znečištěných drenážních vod do recipientu a uplatnění principu ředění. Další předností navrženého řešení je kompaktnost regulačního prvku, jeho

univerzálnost pro různé světlosti potrubí a snížení pořizovací ceny využitím běžných PVC tvarovek.

Na modelových stavbách bylo prokázáno, že stavby odvodnění i při stáří několika desítek let, umožňují jejich modernizaci doplněním o regulační objekty, samozřejmě při dodržení zásady kritického posouzení aktuálního stavu stavby, které jsou v metodice popsány.

V neposlední řadě metodika syntetizuje dosavadní poznatky melioračního výzkumu v oblasti zemědělského odvodnění a reaguje na potřebu adaptovat tyto stavby na měnící se klima s nutností zlepšit hospodaření s dostupnými zdroji vod na pozemku. Vychází z minulých praktických zkušeností projektování a provozu staveb regulační drenáže, doplněné o srovnání se zahraničními zkušenostmi a experimentálním provozem modelových staveb v podmínkách ČR, provozovaných v rámci tohoto i minulých výzkumných projektů. Tyto poznatky promítá do návrhu zásad manipulace s regulačními prvky, a to nejen s cílem maximalizace využití lokálních zdrojů vody, ale také pro minimalizaci negativních důsledků přítoku znečišťujících drenážních vod do vod povrchových.

4. Popis uplatnění certifikované metodiky

Cílem řešení projektu bylo dokumentovat potenciál snížení zátěže recipientů drenážních systémů realizací konstrukčních úprav staveb odvodnění, založených na vložení nastavitelných regulačních prvků a snížení nejen odtoku drenážní vody, ale i látkových odnosů těmito cestami. Na základě těchto výsledků následně motivovat zájem o modernizace staveb odvodnění na straně vlastníků či uživatelů hydromelioračních staveb (zahrnuje i stavby závlahové, kde snižuje potřebu závlahové vody nebo umožňuje využít zadržanou/převedenou drenážní vodu následně jako vodu závlahovou), správců drobných vodních toků a pracovníků dotčených úřadů/ministerstev s cílem podporovat rozvoj těchto systémů. Diferencuje přitom způsoby manipulace při regulaci podle přírodních podmínek stanoviště (např. s cílem maximalizovat zadržení vod a současně neomezit provoz na pozemku – viz Kapitola 2.2.3; liší se podmínky jednotlivých oblastí: nížiny, vrchoviny; půdy lehké, těžké; vodnost ročníků atd.).

Metodika nalezne uplatnění u zemědělských subjektů, vyžadujících oboustrannou úpravu vláhových režimů obhospodařovaných pozemků a lepší využití srážek. Nesplnění těchto podmínek se projevuje snižováním výnosů plodin (v některých obdobích z důvodů přemokření pozemku, v jiných obdobích naopak nedostatkem vláhy), či zvýšením nákladů na provoz závlahové soustavy, na nákup hnojiv atd. Motivací zemědělce pravděpodobně budou i trendy změny klimatu u nás s tendencí ke zvyšování extremity jevů. Prvotní hledisko ovlivnění kvantity vod bude zřejmě následováno i hlediskem jakosti vod v exponovaných oblastech, kde je zemědělství vnímáno jako významný znečišťovatel vod.

V souvislosti s vymežováním zranitelných oblastí podle Nitrátové směrnice (Směrnice Rady 91/676/EHS o ochraně vod před znečištěním způsobeném dusičnany ze zemědělských zdrojů) lze předpokládat zájem zemědělce o řízení drenážního odtoku z hlediska výhodnosti orientace na prevenci před riziky postihů za znečištění povrchových vod.

Mezi konečnými uživateli budou také pracovníci státní správy na úrovni správců vodních děl a povodí (SPÚ, podniky Povodí s.p.), výkonu státní správy na úrovni ministerstev, krajů, obcí s rozšířenou působností, až samotných obcí. Široké uplatnění lze rovněž specifikovat z pohledu projekčních firem (vodohospodářské projekty, projektování komplexních pozemkových úprav atd.).

Nově získané poznatky naleznou uplatnění při komplexních návrzích opatření v rámci národní i evropské dotační politiky a ve třetím plánovacím období v oblasti vod. Mohou být využity při zpřesňování podmínek dotačních titulů již vypsanych (OPŽP pro roky 2021-27, opatření 1.3.5), nebo připravovaných, a to v souladu s Usnesením vlády č. 620/201 Sb., dále s vyhlášením MZe k využití v programech KoPÚ v horizontu let 2030 (MZe, SPÚ, VÚMOP 2020). Zde publikované výsledky korespondují také s aktivitami podniku Povodí Vltavy, s.p. a jím vydanou certifikovanou metodikou (Zajíček a kol. 2023) k vymezení přispívajících lokalit a návrhů opatření ke

zvýšení infiltrace, retence, akumulace a jakosti vod v zemědělských povodích ČR. Drenážní vody jsou přitom považovány za hlavní zdroje plošného zemědělského znečištění.

V přiměřeném rozsahu jsou v metodice prezentována vybraná související témata s cílem seznámit zájemce o uplatnění principu regulace se správnými zásadami realizace úprav stávajících staveb tak, aby kromě zlepšení vodních režimů území, přispělo toto opatření i ke snížení látkových odnosů ze zemědělských pozemků, což je dáno správnou manipulací s hradítky regulačních prvků, pokud jsou stavby jimi vybaveny.

5. Ekonomické aspekty

Protože tento typ opatření (tj. modernizace stávajících staveb odvodnění, případně novostavba již s navrhovanými regulačními objekty) vylepšuje v první řadě bilanci retence a akumulace vod na předmětném pozemku s efektem zlepšení vláhových poměrů pěstovaných plodin, a jako následný efekt popisujeme ochranu povrchových vod před zemědělským znečištěním, za určitých podmínek také zlepšení jakosti odtékající drenážní vody, je ekonomické hodnocení možno formulovat v těchto dvou aspektech.

Ekonomická efektivita regulace je v oblasti bilance vod popsána podrobně v metodice z roku 2015 (Kulhavý a kol. 2015b: Rekonstrukce staveb odvodnění s uplatněním principu regulace drenážního odtoku). Popsány jsou zde efekty: zvýšení zabezpečení vláhy snižující do určité míry potřebu realizovat závlahu, obojí s cílem snížení dopadů agronomického sucha, a tudíž stabilizace a zvýšení výnosů plodin, dále k vytvoření předpokladů pro udržování agrotechnických lhůt, snížení provozních nákladů (uplatněním gravitačních principů) ve srovnání se závlahami postřikem, případně zvyšující náklady při provozu oddělených melioračních systémů (závlahy a odvodnění). Dále jsou součástí obtížně vyčíslitelné celospolečenské přínosy v oblasti retence a akumulace vod – aspekty environmentální a vodohospodářské. Téma zahrnuje problematiku nadlepšování zásob podzemních vod (v podmínkách neohrožujících jejich jakost) zejména během zimního období a celkově hospodárné využívání vodních zdrojů. Uvedeny jsou zde náklady na vybudování jednoho metru krychlového podzemního akumulacího prostoru (u modernizace stávající stavby zahrnuje průzkum, projektování a instalaci regulačních prvků) částkou 2,50 Kč. Diskutovány jsou zde i negativní dopady majetkové členitosti vlastnictví těchto staveb. Vyšší částku (5 – 10 Kč.m⁻³ akumulacího prostoru v půdě) uvádí Fučík (2021).

Další zpřesnění je možné provést na základě analýz uvedených v certifikované metodice z roku 2023 (Zajíček a kol. 2023: Identifikace kritických bodů odtoku vody a kategorizace jejich přispívajících lokalit z hlediska potřeby návrhů opatření ke zvýšení infiltrace, retence, akumulace a jakosti vod v zemědělských povodích na území České republiky). Citován je zde výstup studie PVL „Příprava listů opatření typu A lokalit plošného zemědělského znečištění pro plány dílčích povodí – vlašimská Blanice“, kde byla aplikována metodika k vyčíslení snížení odnosu dusičnanového dusíku. Případová studie z roku 2021, řešící snížení odnosu dusičnanového dusíku stavbami plošného zemědělského odvodnění na lokalitě Žejbro (okr. Chrudim) o 1 kg dusíku za rok, popisuje úspory v rozmezí 400–500 Kč (Zajíček et al. 2021). Odhadované náklady úpravení vody (regenerační sůl a likvidace odpadní vody) se pohybují na snížení koncentrací dusičnanů z 50 mg.l⁻¹ na 15 mg.l⁻¹ kolem 3,20 Kč a na snížení koncentrací dusičnanů ze 100 mg.l⁻¹ na 50 mg.l⁻¹ dokonce 6,30 Kč na 1 m³ (dle informací z vodárenských podniků).

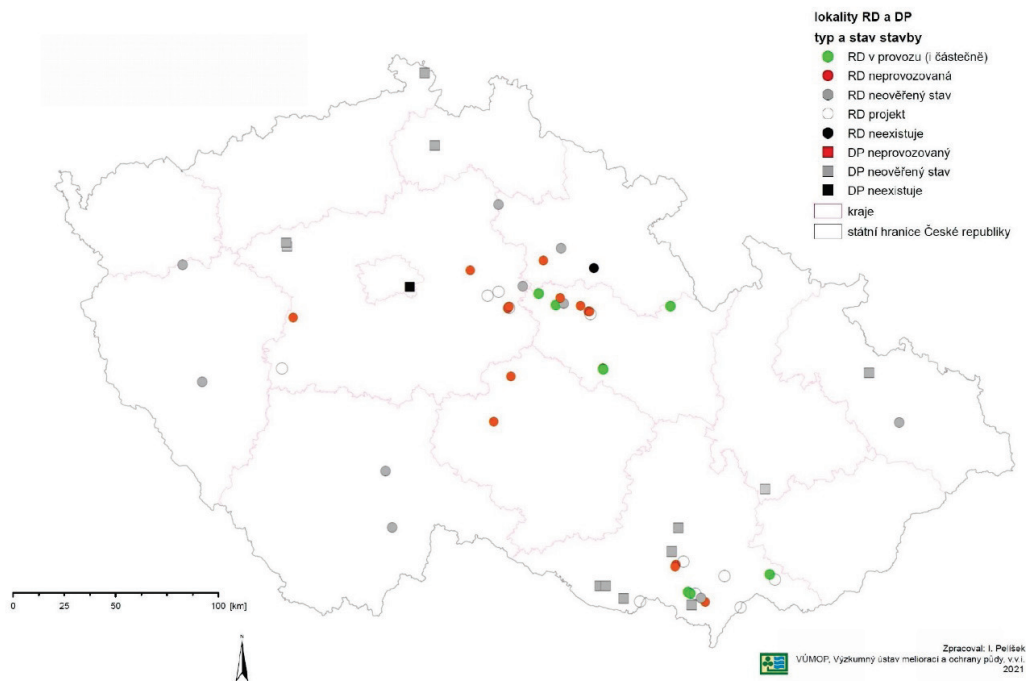
Finanční zhodnocení zlepšení jakosti vod z hlediska ekologie je velmi obtížné, nicméně při zahrnutí konceptu ekosystémových služeb (Seják J. a kol.

2010; Macháč J. 2017) a s ohledem na celospolečenské přínosy těchto opatření vycházejí jejich návrhy a realizace v ekonomické analýze jako efektivní (viz výsledky výše citované studie PVL).

6. Závěr

Z řady možných strategií se metodika zaměřuje na uplatnění regulace pomocí instalace regulačních prvků do systému drenážního odvodnění – tedy modernizací tradičních staveb odvodnění na systémy s regulací drenážního odtoku nebo na obnovu provozu staveb regulační drenáže. Přitom větší efekt regulace na látkové odnosy dusíku bývá připisován snížení objemu odtoku než snížení koncentrací NO_3^- v drenážní vodě, což vyžaduje splnění řady doplňujících podmínek hydrologických i zemědělských (Carstensen et al. 2019; Hamidreza et al. 2018; Wang et al. 2020). Snížení odnosu dusičnanů cestou regulace drenážního odtoku je tedy v souladu se závěry autorů (Kvítek a kol. 2012), kteří konstatují, že větší váhu na snížení zátěže povrchových vod dusičnany má objem odtoku než koncentrace látek.

Při naléhavé potřebě zmírňování dopadů klimatických změn, kdy probíhá intenzivní diskuse k opatřením zlepšujícím hospodaření s vodou přímo v ploše povodí, a tedy nejen v korytech a nivách vodních toků, je problematika modernizace tradičních, původně jedno-funkčních staveb zemědělského odvodnění na stavby vícefunkční – tedy s možností regulovat drenážní odtok a v příznivých podmínkách současně zajišťovat i závlahu, velmi



Obr. 6.1 Zákres lokalizace historických melioračních staveb v ČR s uplatněním principu drenážního podmoku provedený na základě archivních podkladů (Autor: I. Peříšek)

LEGENDA: RD = regulační drenáž; DP = drenážní podmok (tj. uplatnění regulace drenážního odtoku)

aktuální. Efektivní je proto uvádět do provozu i v minulosti vybudované a často následně opouštěné stavby s projektovanou funkcí regulace drenážního odtoku (viz Obr. 6.1), neboť využívaly vhodné přírodní podmínky lokality (pokud nedošlo k jejich změně). V rámci projektu naměřená data na modelových lokalitách Čech i Moravy potvrzují, že je schopnost těchto opatření zvyšovat/řídít úroveň HPV dostatečná, a tedy i vhodná k adaptacím stávajících melioračních staveb a na příkladu stavby regulační drenáže Uherčice i po 30 letech schopná zabezpečovat projektovanou intenzitu závlahy pěstovaných plodin. Současně se také ukazuje, že pouhé „zrušení“ odvodňovací stavby nebývá vždy tím správným východiskem právě s ohledem na potřebu řešit současně se suchem období s přebytkem vod a s dopady na nežádoucí přemokření nadále zemědělsky využívaných pozemků.

Že je problematika drenáží v současné době velmi aktuálním tématem, dokládá i nedávno zpracovaný dokument Ministerstva zemědělství „Plán opatření pro řešení sucha prostřednictvím pozemkových úprav a adaptací hydromeliorací“ (2020), který má za úkol vyvrátit některé mýty o drenážích a ukázat, jak lze naopak drenáže využít v boji proti suchu.

Výzkumný projekt, v rámci něhož je předkládána jako plánovaný výstup tato metodika, byl v předmětu řešení zaměřen na jediný indikátor účinnosti tohoto typu opatření, kterým byl nitratový dusík. Ten je považován za hlavní zdroj plošného zemědělského znečištění a je tak limitujícím kontaminantem drenážních vod z hlediska běžné zemědělské praxe. V logických souvislostech však byla pozornost věnována i několika dalším ukazatelům (pH, konduktivita, teplota, amonné ionty, dusitany, fosforečnany, celkový fosfor), avšak rozsah prováděných rozborů byl limitován vymezenými finančními prostředky a kapacitami řešitelského týmu. Pokud se v budoucí zemědělské praxi budou tyto hydromeliorační systémy ve větší míře uplatňovat, otevírá to velmi širokou oblast navazujícího výzkumu, kterou z uvedených důvodů nemohl mít dokončený projekt ambice řešit, může však být v národním měřítku výchozí aktivitou, poskytující prvotní odpovědi na otázky, související s vývojem jakosti drenážních vod, ovlivněných regulací jejich odtoku.

7. Seznam publikací, které předcházely metodice

Kulhavý Z., Matula S., David V., Tlapáková L., Čmelík M., Fučík P., Pelíšek I., Podhrázská J., Jakoubek J., Miháliková M., Štibinger J., Oppeltová P., 2019: Drenáže na zemědělské půdě – provoz, údržba, modernizace. Způsoby ovlivňování množství a jakosti drenážních vod. Workshop pořádaný v rámci projektu, VÚMOP, v.v.i. Praha, ČZU v Praze, Mendelova univerzita v Brně, Agroprojekce Litomyšl s.r.o.

Výsledky workshopu jsou publikovány na adrese <http://www.hydromeliorace.cz/workshop2019/>

Kulhavý Z., 2019: Mohou meliorace přispět k řešení nedostatku vody? Koncept technických opatření v krajině zlepšujících hospodaření s vodou – příklad z praxe. Agrobases (26. 11. 2019): str. 10-12.

Pelíšek I., Fučík P., Kulhavý Z., 2019: Hydromeliorační opatření na půdách s důrazem na odvodnění a závlahy. In Půda naše bohatství, Vácha, R. a kol., s. 75-94. VÚMOP, v.v.i. Praha, 1. vydání, 228 s. ISBN 978-80-88306-00-9.

Kulhavý Z., 2019: Představení iniciativy k obnově vodních družstev v podmínkách ČR. In. Hospodaření s vodou v krajině. Třeboň, ústní prezentace a příspěvek sborníku konference 13. – 14. 6. 2019, ISBN 978-80-87577-88-2

Kulhavý Z., 2019: Generel odvodňovacích staveb jako nástroj řešení konfliktu zemědělství a požadavků na množství a jakost vody. Ústní prezentace a sborník na konferenci Podzemní vody ve vodárenské praxi 2019, Rychnov nad Kněžnou, 10. – 12. dubna 2019.

Kulhavý Z., Fučík P., Tlapáková L., 2020: Adaptace hydromeliorací jako součást plánu realizace opatření pro zmírňování dopadů změn klimatu. Vodní hospodářství č. 11/2020, str. 13-17, ISSN 1211-0760

Kozlovsky Dufková J., Oppeltová P., Mašíček T., Šťastná M., 2020: Vliv regulační drenáže na jakost vod – případová studie Uherčice. In: Vodní hospodářství č. 12/2020, str. 29-30, příloha Krajinný inženýr. ISSN 1211-0760. (dedikováno na projekt)

Kulhavý Z., 2020: Drenáže z polí je potřeba vykopat! Ekolist.cz ISSN 1802-9019 <https://ekolist.cz/cz/publicistika/nazory-a-komentare/zbynek-kulhavy-drenaze-z-poli-je-potreba-vykopat>

Šťastná M., 2020: Zemědělské drenáže nemusí být jen problém. Když se je naučíme používat, pomohou proti suchu. Ekolist.cz ISSN 1802-9019 <https://ekolist.cz/cz/publicistika/nazory-a-komentare/miladan-stastna-zemedelske-drenaze-nemusi-byt-jen-problem.kdyz-se-je-naucime-pouzivat-pomohou-proti-suchu>

Kulhavý Z., 2020: Hydromeliorace – výzvy pro další desetiletí. Konference Hospodaření s vodou v krajině. 9. – 10. 9. 2020, Kongresové a kulturní centrum Roháč Třeboň, ČBKs, z.s.

Pelišek I., 2020: Příklady celostních adaptačních řešení při zohlednění specifík regionů. Konference Hospodaření s vodou v krajině. 9.– 10. 9. 2020, Kongresové a kulturní centrum Roháč Třeboň, ČBKs, z.s.

Mašíček T., Kozlovsky Dufková J., Oppeltová P., Šťastná M., 2020: Drenáže jako jeden ze způsobů zadržetí vody v krajině. In konference Hydrologie, GIS a životní prostředí 2020, 9. 12. 2020. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství a Katedra geomatiky FSV ČVUT v Praze, Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování, FŽP ČZU v Praze, Katedra fyzické geografie a geoekologie, PřF UK. Sborník ISBN 978-80-01-06800-7, 36 stran

Kulhavý Z., 2020: Možnosti adaptace staveb zemědělského odvodnění na systémy s regulací odtoku. WEBinář – Školení pro agronomy a hospodáře na orné půdě. 24.11.2020 RK Královehradeckého kraje, AK ČR

Kulhavý Z., 2020: Principy regulace drenážního odtoku. WEBinář Možnosti řízené optimalizace vláhových režimů, konaný dne 11.11.2020, Česká technologická platforma pro zemědělství, MZe, ZS ČR <https://www.ctpz.cz/udalost/webinar-moznosti-rizene-optimalizace-vlahovych-rezimu-11-11-2020-225>

Kulhavý Z., 2020: Modernizace staveb zemědělského odvodnění s ohledem na požadavky zvyšování retence a akumulace vody v povodí. Konference Obnova vodohospodářské infrastruktury 2020, 15. a 16. září 2020, Medim, s.r.o., Hotel Myslivna, Brno

Kulhavý Z., 2020: Principy a efekty uplatňování regulace na stavbách zemědělského odvodnění. Konference Hydromeliorace jako nástroj pro zvyšování retence, akumulace a jakosti vod. Dům techniky Pardubice, s.r.o., ČAZV, VÚMOP, v.v.i. Zrušeno těsně před konáním z důvodu opatření vlády proti šíření covid-19. Konference byla plánována na den 8. 10. 2020, s písemným vyjádřením záštity ministra zemědělství.

Kolektiv: MZe ČR, SPŮ, VÚMOP, v.v.i., 2020: Plán opatření pro řešení sucha prostřednictvím pozemkových úprav a adaptací hydromeliorací v horizontu 2030. Příloha tiskové zprávy MZe, červen 2020 http://eagri.cz/public/web/mze/tiskovy-servis/tiskove-zpravy/x2020_ministr-zemedelstvi-mame-plan-na-vyuziti.html

Kulhavý Z., 2020: Meliorace. Problém, nebo pomoc? Seriál. Selská revue ISSN 2533-3607 (dedikováno na projekt):

- 5. díl, 1/2020, str. 46-47: Jak vlastně odvodnění funguje? Kdy odvádí vodu a jakou? Jak se chová při dešti?
- 6. díl, 2/2020, str. 60-62: Co je regulační drenáž a jak funguje? Dokáže tato odvodňovací stavba nahradit také závlahu ?
- 7. díl, 3/2020, str. 67-69: Kdy má smysl meliorační odvodňovací zařízení zrušit? A jak postupovat? Jaké jsou legislativní požadavky na provedení změn odvodňovací stavby?
- 8. díl, 4/2020, str. 38-40: Vodní družstva. (Souvislosti společné údržby, modernizace a využívání melioračních staveb.)

Kulhavý Z., 2021: Změny jakosti drenážní vody vlivem regulace odtoku. In Hospodaření s vodou v krajině. 14.-15. září.2021 v Třeboni, předneseny příspěvek a příspěvek ve sborníku, 15 stran

Fučík P., Kulhavý Z., Duffková R., 2021: Vracejme vodu polím i na odvodnění půdě. Vesmír 100, 5/2021, str. 328-329, ISSN 1214-4029, také online <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2021/cislo-5/vracejme-vodu-polim-odvodnene-pude.html>

Kulhavý Z., Štibinger J., 2020: Drenážní kalkulač – SW zařazen do portfolia nástrojů VÚMOP SOWAC GIS <https://hydromeliorace.vumop.cz>, následovala v roce 2022 aktualizovaná verze na adrese <https://nastroje.hydromeliorace.cz/regulace/> Pozn.: nejedná se o samostatný výsledek, v rámci projektu však došlo k významné inovaci tohoto výpočtového nástroje s cílem zakomponování do plánovaného výstupu typu SW (<https://nastroje.hydromeliorace.cz/jakost/>)

Báfková K., Matula S., Miháliková M., Hružová E., Kara S.R., Almaz C., 2021: Functional evaluation of available up to date pedotransfer functions for estimation of saturated hydraulic conductivity of selected localities in the Czech Republic. International Soil Science Symposium on „Soil Science & Plant Nutrition“, 18 –19 December 2021, Samsun, Turkey. Federation of Euroasian Societies and Erasmus Mundus JMD in Soil Science (emiSS) Programme.

Truneh L.A., Matula S., Báfková K., 2021: An analysis of the responses of different sub-basins with various soil profile in the central rift valley basin in Ethiopia to the impacts of climate change with their water balances, using the SWAT model. International Soil Science Symposium on „Soil Science & Plant Nutrition“, 18 – 19 December 2021, Samsun, Turkey. Federation of Euroasian Societies and Erasmus Mundus JMD in Soil Science (emiSS) Programme.

Kulhavý Z., Fučík P., Kozlovsky Dufková J., Mašíček T., Opeletová P., 2022: Poznatky z provozu staveb zemědělského odvodnění s regulací odtoku a související dynamikou jakosti vod. Vodní hospodářství č. 3/2022, str. 2-7, ISSN 1211-0760

Kulhavý Z., 2022: Způsoby adaptace staveb zemědělského odvodnění na klimatickou změnu. Seminář ČTPZ: České zemědělství v měnících se klimatických podmínkách, 13. 10. 2022 Křtiny <https://www.ctpz.cz/udalost/seminar-ceske-zemedelstvi-v-menicich-se-klimatickych-podminkach-13-10-2022-294>

Kulhavý Z., 2022: Drenážní regulační prvek se středovou hradicí trubkou. Užité vzor č. 36538 https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/39063

Kulhavý Z., Krejzek P., 2022: Drenážní turbínový průtokoměr, užité vzor č. 36109, VÚMOP, v.v.i., ADCIS s.r.o. https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/39107

Kučerová P., 2022: Čeká trubky a skruže v polích nová šance? Rozhovor poskytl Z. Kulhavý, Pardubický deník, <https://pardubicky.denik.cz/udrzi-telnost-a-my/ceka-trubky-a-skruze-v-polich-nova-sance-20220808.html>

<https://nastroje.hydromeliorace.cz/jakost/> Odhad snížení látkových odnosů regulací drenážního odtoku

Bátková K., Matula S., Miháliková M., Hrůzová E., Kara S.R., Almaz C., Abebrese D.K., 2022: Can the Saturated Hydraulic Conductivity K_s of Agricultural Soil Be Predicted with Acceptable Accuracy? Sborník abstraktů International Congress and Workshop on Agricultural Structures and Irrigation, 12 – 15 May, 2022, Diyarbakir, Turkey

Abebrese D.K., 2022: Tarım topraklarının doygun hidrolik iletkenlik (K_s) değerleri kabul edilebilir bir doğrulukla tahmin edilebilir mi? International Congress and Workshop on Agricultural Structures and Irrigation, 12 – 15 May, 2022, Diyarbakir, Turkey

Bátková K., Matula S., Hrůzová E., Miháliková M., Kara S.R., Almaz C., 2022: A comparison of measured and estimated saturated hydraulic conductivity of various soils in the Czech Republic. *Plant, Soil and Environment*, 68, 2022 (7): 338–346, <https://doi.org/10.17221/123/2022-PSE>

Bátková K., Matula S., Miháliková M., Hrůzová E., Kara S.R., Almaz C., 2022: Odhad nasycené hydraulické vodivosti pomocí pedotransferových funkcí využívajících vybrané metody strojového učení. In: Vitková, J., Botyanszká, L. (eds.). *Interdisciplinary Approach in Current Hydrological Research*. IH SAS, E-Book, Bratislava, p. 242. ISBN: 978-80-89139-53-8

Bátková K., Matula S., Miháliková M., Hrůzová E., Abebrese D.K., Kara S.R., and Almaz C., 2023: Prediction of saturated hydraulic conductivity K_s of agricultural soil using pedotransfer functions, *Soil and Water Research*. <https://doi.org/10.17221/130/2022-SWR>

Abebrese D. K., Matula S., and Bátková K., 2022: Relating immediate changes in bulk density to changes in hydraulic properties on a silty clay loam under different tillage systems in the Czech Republic, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01085-3>.

Truneh L.A., Matula S., and Bátková K., 2022: Hydroclimate impact analyses and water management in Central Rift Valley Basin in Ethiopia, *Water*, 15, 18., 1–22

Bátková K., Matula S., Miháliková M., Truneh L.A., Kara R.S., Almaz C., Abebrese D.K., 2022: Soil resistance to vertical penetration and saturated hydraulic conductivity of fine-textured agricultural soil under controlled drainage. In: Kizilkaya, R., Gülser, C., and Dengiz, O. (eds.). *International Soil Science Symposium on Soil Science and Plant Nutrition, 2-3 Dec 2022*, Samsun, Türkiye, Federation of Euroasian Soil Science Societies, p. 292.

A další související publikace řešitelského týmu, cílené na představení řešeného projektu:

Kolektiv: Hydromeliorace – voda pro zemědělství a lesnictví <https://www.ctpz.cz/clanek/hydromeliorace-voda-pro-zemedelstvi-a-lesnictvi-1416> případně https://www.youtube.com/watch?v=Ud_zIP9-R8Q únor 2023

<https://www.listyjm.cz/skolstvi/vedci-na-jihu-moravy-zkoumaji-jak-zadrzet-vodu-ze-zemedelskych-drenazi-v-krajine.html> 28.4.2020

http://www.agris.cz/zemedelstvi/vedci-hledaji-zpusob-jak-udrzet-vodu-z-drenazi-v-krajine?id_a=209319 27.4.2020

<http://www.enviweb.cz/rss/217322> 27.4.2020

<https://www.mrk.cz/bleskovky.php?id=49712> 26.4.2020

<http://www.enviweb.cz/rss/217084> 23.4.2020

<https://brnenska.drba.cz/zpravy/spolecnost/17401-voda-z-drenazi-zhor-suje-kvalitu-povrchove-vody-experti-z-mendelu-ji-chteji-zadrzovat-v-zemedske-krajine.html> 30.4.2020

<http://moravskehosodarstvi.cz/experti-chteji-vodu-ze-zemedelskych-drenazi-zadrzet-v-krajine-a-zlepsit-jeji-kvalitu/> 23.4.2020

<https://www.nase-voda.cz/experti-chteji-v-krajine-zadrzet-vodu-ze-zemedelskych-drenazi/> 23.4.2020

<http://mendelu.cz/32683n-experti-chteji-vodu-ze-zemedelskych-drenazi-zadrzet-v-krajine-a-zlepsit-jeji-kvalitu> 23.4.2020

<https://www.ceskatelevize.cz/porady/10122427178-udalosti-v-regionech-brno/320281381990429-udalosti-v-regionech/video/764947> (vysíláno 29.4.2020 v České televizi; Události v regionech, Brno; 8:20 až 9:13)

<https://program.rozhlas.cz/zaznamy#/plus/19/2020-12-17> (vysíláno 17. 12. 2020 v 6:25 na Českém rozhlasě Plus)

Kulhavý Z., 2021: Hydromeliorace. Přednesený příspěvek a navazující diskuse In Kulatý stůl Zadržování vody v krajině pořádaný Stálou komisí Senátu voda-sucho, 20. 7. 2021, Praha

Kulhavý Z., 2021: Opatření k posílení retence a ke zlepšení jakosti vody na zemědělské půdě. Přednesený příspěvek In Porada vodoprávních úřadů Pardubického kraje. 17. 9. 2021 v Řetově

Fučík P., Kulhavý Z., Hejduk T., Poláková L., 2021: Zpřesnění vrstvy potenciálních ploch vhodných k regulaci odtoku z odvodňovacích systémů v ČR. Podklad zpracovaný pro SPÚ na základě objednávky č. SPU 089885/2021, VÚMOP, v.v.i., květen 2021, 27 stran (výstup má charakter aplikace výsledků výzkumu pro inovace návrhů KoPÚ)

Kulhavý Z., 2022: Soubor objektů břehového odběru vod pro systémy drenážního odvodnění. Užitečný vzor č. 36545 https://isdv.upv.cz/webapp/re-sdb.print_detail.det?pspis=PUV/40091

Výstava Naše pole, 14.–15. 6. 2022, Nabočany (Chrudim) <https://nasepole.cz/> Ve stánku VÚMOP, v.v.i. prezentovány systémy s regulací drenážního odtoku

Truneh L. A., Matula S., and Bářková K. (2022): Hydroclimate impact analyses and water management in Central Rift Valley Basin in Ethiopia, Water, 15, 18., 1 – 22

Bářková K., Matula S., Miháliková M., Truneh L.A., Kara S.R., Almaz C., Ababrese D.K., 2022: Soil resistance to vertical penetration and saturated hydraulic conductivity of fine-textured agricultural soil under controlled drainage. In: Kizilkaya, R., Gülser, C., and Dengiz, O. (eds.). International Soil Science Symposium on Soil Science and Plant Nutrition, 2-3 Dec 2022, Samsun, Türkiye, Federation of Euroasian Soil Science Societies, p. 292.

Bátková K., Matula S., Miháliková M., Hrůzová E., Kara S.R., Almaz C., Abebrese D.K., 2022: Can the Saturated Hydraulic Conductivity K_s of Agricultural Soil Be Predicted with Acceptable Accuracy? International Congress and Workshop on Agricultural Structures and Irrigation, 12 – 15 May, 2022, Diyarbakir, Turkey

Bátková K., Matula S., Hrůzová E., Miháliková M., Kara S.R., Almaz C., Abebrese D.K., 2022: Tarım topraklarının doygun hidrolik iletkenlik (K_s) değerleri kabul edilebilir bir doğrulukla tahmin edilebilir mi? International Congress and Workshop on Agricultural Structures and Irrigation, 12 – 15 May, 2022, Diyarbakir, Turkey

8. Seznam použitých podkladů

Odborné publikace

Abebrese D.K., Matula S. and Bářková K., 2023: Relating immediate changes in bulk density to changes in hydraulic properties on a silty clay loam under different tillage systems in the Czech Republic. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23: 819-830.

Araya S.N., Ghezzehei T.A., 2019: Using machine learning for prediction of saturated hydraulic conductivity and its sensitivity to soil structural perturbations. *Water Resources Research*, 55: 5715-5737.

Antoš V., Polách L., Fučík P., Hrabák P., Šupíková I., Zajíček A., Hejduk T., 2021: Substráty pro nízkonákladové systémy k čištění kontaminovaných průmyslových a zemědělských vod. Certifikovaná metodika. ISBN 978-80-88323-52-5 (tištěná verze), ISBN 978-80-88323-53-2 (online pdf).

Baker J. L., Campbell K. L., Johnson H. P., Hanway J. J., 1975: Nitrate, phosphorus, and sulfate in subsurface drainage water. *Journal of Environmental Quality* 4(3):406-412. ISSN:1537-2537.

<https://doi.org/10.2134/jeq1975.00472425000400030027x>

Bářková K., Matula S., Hřůzová E., Miháliková M., Kara S.R. and Almaz C., 2022: A comparison of measured and estimated saturated hydraulic conductivity of various soils in the Czech Republic. *Plant, Soil and Environment*, 68: 338-346.

Bářková K., Matula S. and Miháliková M., 2013: Multimediální učebnice hydroopedologických terénních měření. 2. doplněné vydání [on-line]. Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. Nestránkováno. Dostupné z: <http://hydroopedologie.agrobiologie.cz> ISBN: 978-80-213-2434-3.

Bářková K., Matula S., Miháliková M., Hřůzová E., Abebrese K.D., Serdar Kara R. and Almaz C., 2023: Prediction of saturated hydraulic conductivity K_s of agricultural soil using pedotransfer functions. *Soil and Water Research*, 18: 25-32.

Bářková K., Miháliková M. and Matula S., 2020: Hydraulic properties of a cultivated soil in temperate continental climate determined by Mini Disk infiltrometer. *Water*, 12: 843.

Beran J. a kol., 1991: Rekonstrukce drenážních sítí (směrnice). *Metodika* 7/1991. Praha: VÚMOP, v.v.i. 50 s.

Bonaiti G., Borin M., 2010: Efficiency of controlled drainage and subirrigation in reducing nitrogen losses from agricultural fields. *Agric. Water Manag.*, 98, 343-352. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.008>

Bruun J., Pugliese L., Hoffmann C.C., Kjaergaard C., 2016: Solute transport and nitrate removal in full-scale subsurface flow constructed Wetlands of various designs treating agricultural drainage water. *Ecological Engineering* 97: 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.010>

Carstensen M.V., Hashemi F., Hoffmann C.C. et al. 2020: Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review. *Ambio* 49, 1820–1837.

<https://doi.org/10.1007/s13280-020-01345-5>

Carstensen M.V., Børgesen Ch.D., Ovesen N.B., Poulsen J.R., Hvid S. K. and Kronvang B., 2019: Controlled Drainage as a Targeted Mitigation Measure for Nitrogen and Phosphorus. *Journal of Environmental Quality*, 3/2019, pp. 677-685, <https://doi.org/10.2134/jeq2018.11.0393>

Crumpton W.G., Baker J.L., Owens J., Rose C., and Stenback J., 1995. Wetland and streams off-site sinks for agricultural chemicals. Pages 49-53 in *Clean Water-Clean Environment-21st Century, Volume I: Pesticides*, American Society of Agricultural Engineers publication 2-95.

Čislerová M., Vogel T., 1998: *Transportní procesy*. VŠ Skriptum, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Vydavatelství ČVUT, Praha 6, 182 s., ISBN 80-01-01866-0.

Conacher A. J., Dalrymple J. B., 1977: The nine unit landsurface model and pedogeomorphic research. *Gedoderma*, 18 (1-2): 127–144.

Deichmann M.M., Andersen M.N., Thomsen I.K, Børgesen C.D., 2019: Impacts of controlled drainage during winter on the physiology and yield of winter wheat in Denmark. *Agricultural Water Management*, Volume 216, p. 118-126, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.013>

Dinnes D.L., D.L. Karlen, D.B. Jaynes, T.C. Kaspar, J.L. Hatfield, T.S. Colvin, and C.A. Cambardella, 2002: Nitrogen Management Strategies to Reduce Nitrate Leaching in Tile-Drained Midwestern Soils. *Agronomy Journal* 94:153-171.

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.

Doležal F., Soukup M., Kulhavý Z., 2003: Bilanční odhady příspěvku odvodňovacích soustav k průběhu povodní. I. Teorie. *Soil and Water* 2/2003, vědecké práce VÚMOP Praha, s.7-19, ISSN 1213-8673.

Doležal F., Soukup M., Kulhavý Z., 2003: Bilanční odhady příspěvku odvodňovacích soustav k průběhu povodní. II. Aplikace. *Soil and Water* 3/2003, vědecké práce VÚMOP Praha, ISSN 1213-8673, s.93-108

Duffková R., Poláková L., Lukas V., Fučík P., 2022: The Effect of Controlled Tile Drainage on Growth and Grain Yield of Spring Barley as Detected by UAV Images, Yield Map and Soil Moisture Content. *Remote Sens.* 2022, 14(19), 4959.

Duffková R., Lukas V., Fučík P., Marval Š. 2019: Může precizní zemědělství zvýšit účinnost dusíkatých hnojiv? *Úroda* 12/2019.

Fiala D., Fučík P., Hruška J., Rosendorf P., Simon O., 2013: Fosfor v centru pozornosti. *Vodní hospodářství* 8: 247–250.

Fisher M.J., Fausey N.R., Subler S.E., Brown L.C., Bierman P.M., 1999: Water table management, nitrogen dynamics, and yields of corn and soybeans. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1786–1795.

Fučík P., Vymazal J., Šereš M., Hnátková T., Hejduk T., Sochacki A., Kulhavý Z., Zajíček A., Zhen Z., Duffková R., Kaplická M., Sítková V., Poláková V., Kukačka J., 2021: Metodika pro navrhování umělých mokřadů v návaznosti na zemědělské odvodnění pro zlepšení jakosti vody. Certifikovaná metodika. 70s.

Fučík P., Zajíček A., 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; (ISSN Print:2575-1867 ISSN Online: 2575-1875)

<https://doi.org/10.3390/w9090712>

Fučík P., Zajíček A., Duffková R., Kvítek T., 2015: Water Quality of Agricultural Drainage Systems in the Czech Republic — Options for Its Improvement. In *Research and Practices in Water Quality Teang Shui Lee* (ed.): 239-262. InTech. Kapitola v knize. ISBN 978-953-51-2163-3.

<http://dx.doi.org/10.5772/59298>.

Gaillot A., Delbart C. et al. 2023: Analysis of seasonal variation in the hydrological behaviour of a field combining surface and tile drainage. *Agricultural Water Management* 285, 108329;

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108329>

Gambrell R. P., Gilliam J. W., Weed, S.B., 1975: Nitrogen losses from soils of the North Carolinacoastal plain. *Journal of Environmental Quality*. 4(3):317–323. <https://doi.org/10.2134/jeq1975.00472425000400030006x>

Gibson H.S., Worrall F., Burt T.P., Adamson J.K., 2009: DOC budgets of drained peat catchments: implications for DOC production in peat soils. *Hydrol. Process.* 23, 1901–1911. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7296>.

Gramlich A., Stoll S., Stamm C., Walter T., Prashun V., 2018: Effects of artificial land drainage on hydrology, nutrient and pesticide fluxes from agricultural fields—A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2018, 299, 84–99.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.005>.

Helmerts M.J., Abendroth L. et al., 2022: Impact of controlled drainage on subsurface drain flow and nitrate load: A synthesis of studies across the U.S. Midwest and Southeast. *Agricultural Water Management* 259, 107265.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107265>

Hoffmann C.C., Zak D., Kronvang B. et al. 2020: An overview of nutrient transport mitigation measures for improvement of water quality in Denmark. *Ecological Engineering* 155, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105863>

Christianson L.E., Schipper L.A., 2016: Moving Denitrifying Bioreactors beyond Proof of Concept: Introduction to the Special Section. *J. Environ. Qual.* 45:757–761. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.01.0013>

Jůva K. a kol., 1964: Vodohospodářské meliorace. Praha: SNTL. 490 s.

Hamidreza J. J., Abdolmajid L., Alireza H., Ritzema H., 2018: Managing controlled drainage in irrigated farmers' fields: A case study in the Moghan plain, Iran. *Agricultural Water Management*, 208/2018, ppg. 393-405

Hooghoudt S.B., 1936: Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, 4. Bepaling van den doorlaatfactor van den grond met behulp van pompproeven (z.g. boorgatenmethode). *Verslagen landbouwkundige onderzoekingen* 42B, 449-541.

Kapoor A., Viraraghavan T., 1997: Nitrate removal from drinking water—review. *J. Environ. Eng.* 123: 371–380.

Kaur G. et al., 2018: Spatial Decision Support System: Controlled Tile Drainage – Calculate Your Benefits. *Proceedings of the 14th International Conference on Precision Agriculture* June 24 – June 27, 2018 Montreal, Quebec, Canada

Kaur H., Nelson K.A., Singh G., 2021: Subsurface drainage and subirrigation for increased corn production in riverbottom soils. *Agronomy Journal*, 113:4865–4874. <https://doi.org/10.1002/agj2.20887>

Kesicka B., Kozłowski M., Stasik R., 2023: Effectiveness of Controlled Tile Drainage in Reducing Outflow and Nitrogen at the Scale of the Drainage System. *Water*, 15, 1814. <https://doi.org/10.3390/w15101814>

King K. W., Williams M.R., Macrae L. et al., 2015. Phosphorus Transport in Agricultural Subsurface Drainage: A Review. *J. Environ. Qual.* <https://doi.org/10.2134/jeq2014.04.0163>

King K. W., Hanrahan B.R., Stinner J., Shedekar V.S., 2022: Field scale discharge and water quality response, to drainage water management. *Agricultural Water Management* 264, 107421, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107421>

Kodešová R., Nikodem A., Jakšík O., Klement A. and Fér M., 2015: Metodika průzkumu hydropedologických podmínek na území ovlivněném vodní erozí. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd. 40 pp.

Kodešová R., Kočárek M., Hajková T., Hýbler M., Drábek O. & Kodeš V., 2012: Chlorotoluron mobility in compost amended soil. *Soil and Tillage Research*, 118, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.014>

Kodešová R., 2005: Modelování v pedologii. Praha: ČZU v Praze. 150 s.

Kopáček J., Hejzlar J., Posch M., 2013: Factors Controlling the Export of Nitrogen from Agricultural Land in a Large Central European Catchment during 1900–2010. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, 47, 6400–6407. <https://doi.org/10.1021/es400181m>

Kosil V., 1973: Půdoznalství I. a II. Státní pedagogické nakladatelství, Vysoká škola zemědělská v Praze, Fakulta agronomická. 202 str., 377 str.

Kreiselmeier J., Chandrasekhar P., Weninger T., Schwen A., Julich S., Feger K.-H. and Schwärzel K., 2020: Temporal variations of the hydraulic conductivity characteristic under conventional and conservation tillage. *Geoderma*, 362: 114127.

Kulhavý F., Kulhavý Z., 2008: Navrhování hydromelioračních staveb. Ediční řada C, Technická knižnice autorizovaného inženýra a technika. IC ČKAIT, ISBN 978-80-87093-83-2, 431 stran

Kulhavý Z., Fučík P., Kozlovsky Dufková J., Mašiček T., Oppeltová P., 2022: Poznatky z provozu staveb zemědělského odvodnění s regulací odtoku a související dynamikou jakosti vod. Vodní hospodářství č. 3/2022, str. 2-7, ISSN 1211-0760

Kulhavý a kol., 2020: Redakčně upravená roční zpráva výzkumného projektu Snižování zátěže povrchových vod zdroji plošného zemědělského znečištění při uplatnění regulace drenážního odtoku na stávajících stavbách zemědělského odvodnění. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Agroprojekce Litomyšl, spol. s r.o., Česká zemědělská univerzita v Praze, Mendelova univerzita v Brně.

Kulhavý Z., 2018: Aktuální problémy zemědělského odvodnění v podmínkách ČR. Úroda, Odborný časopis pro rostlinou produkci. Praha: Profi Press s. r. o. 66 (11), str. 40-43. ISSN 0139-6013.

Kulhavý Z., Pelíšek I., 2017: Podmínky udržitelnosti staveb zemědělského odvodnění. Vodní hospodářství č. 6/2017, str. 14-18, ISSN 1211-0760

Kulhavý Z., Čmelík M., 2015: Drenážní regulační prvek s pulsním režimem činnosti. Udělený patent CZ 305921 a udělený UV28986. VÚMOP, v.v.i.

Kulhavý Z., Štibinger J., Křovák F., Kasl M., Pelíšek I., Soukup M., Macek L., Jakoubek J., Pavlíček T., 2015a: Opatření k posílení infiltračních procesů v krajině. Certifikovaná metodika. Praha, Pardubice: VÚMOP. 232 s.

Kulhavý Z., Čmelík M., Štibinger J., Macek L., Škripko J., 2015b: Rekonstrukce staveb odvodnění s uplatněním principu regulace drenážního odtoku. Certifikovaná metodika. 58 s. ISBN 978-80-87361-47-4.

Kulhavý Z., Štibinger J., 2014: Kvantifikace efektu regulace odtoku vody v systému zemědělského odvodnění. Příspěvek sborníku konference Krajině inženýrství 2014. ČSKI, ČSSI, MZe, ČVUT v Praze, ČZU v Praze. Praha. ISBN 978-80-87384-06-0

Kulhavý Z., Štibinger J., Tlapáková L., Hurda J., 2010: MANUÁL – Optimalizace krajinné struktury z hlediska hydrologických režimů. Autorizovaný SW, zpracovaný v rámci řešení projektu 2B06022
http://www.hydromeliorace.cz/sw/mka_skp/popup/navod_mka.php

Kulhavý Z., Eichler J., Doležal F., Soukup M., 2002: DRAINET- hydraulický model drenážního systému. Soil and Water 1/2002, vědecké práce VÚMOP Praha, str. 45–64, ISSN 1213-8673

Kulhavý Z., 1985: Studie vlivu regulační drenáže na podzemní vodní zdroje v oblasti Srch-Stěblová-Opatovice. Diplomová práce. ČVUT Praha, fakulta stavební, katedra hydromeliorací

Kung K.J. S., Hanke M., Helling C. S., Kladvko E. J., Gish T. J., Steenhuis T. S., Jaynes D. B., 2005: Quantifying pore-size spectrum of macropore-type preferential pathways Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 1196–1208.

Kutílek M., Nielsen D. R., 1994: Soil Hydrology. GeoEcology. Textbook. Cremlingen-Destedt: Catena Verlag. 370 s.

Kutílek M., 1978: Vodohospodářská pedologie. SNTL Praha, 296 stran

Kvítek T., Bystrický V., Peterková J., Žlábek P., Moravcová J., 2012: Dynamika koncentrací a interakce odnosu dusičnanů a fosforu na malých zemědělsko-lesních subpovodích v povodí VN Švihov na Želivce. In: Vodní hospodářství č. 6/2012. ISSN 1211-0760.

Lalonde V., Madramootoo C. A., Trenholm L., Broughton R. S., 1996: Effect of controlled drainage on nitrate concentrations in subsurface drain discharge. *Agricultural water management* 29(2):187–199.

[https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01193-5](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01193-5)

Land M., Graneli W., Grimwall A., Hoffmann C.C. et al., 2016: How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environmental Evidence* 5, 9.

<https://doi.org/10.1186/s13750-016-0060-0>

Langergraber G. et al., 2020: *Wetland Technology. Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands*. 190 p. ISBN: 9781789060171 (eBook).

Lavaire, T., Gentry L.E., David M.B., Cooke R.A., 2017: Fate of water and nitrate using drainage water management on tile systems in east-central Illinois. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.004>

Leij F.J., Alves W., van Genuchten M.T. and Williams J.R., 1996: The UNSODA unsaturated soil hydraulic database : user's manual Version 1.0. Cincinnati, Ohio : National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.

Lefrancq M., Jadas-Hecart A., La Jeunesse I., Landry D. & Payaraudeau 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.022.

Lennartz B., Janssen M., Tiemeyer B., 2011: Effects of artificial drainage on water regime and solute transport at different spatial scales. In: Shukla, M.K. (Ed.), *Soil Hydrology, Land Use and Agriculture: Measurement and Modelling*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 266–290.

Lin BL, Sakoda A, Shibasaki R, Suzuki M., 2001: A modelling approach to global nitrate leaching caused by anthropogenic fertilisation. *Water Res.* 2001; 35. 8: 1961–1968. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00484x](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00484x) PMID: 11337842

Lukas V., Neudert L., Širůček P., Kraus M., Novák J., Mezera J., Zemek F., Píkl M., Žížala D., 2018: Postupy tvorby aplikačních map se zohledněním variability agrochemických vlastností půdy a výnosové úrovně pozemků. Certifikovaná metodika pro praxi. Mendelova univerzita v Brně. ISBN 978-80-7509-630-2, 44 stran

Macek L., Kulhavý Z., 2016: Možnosti rekonstrukce melioračních staveb s uplatněním principu regulace drenážního odtoku. *Vodohospodarsky spravodajca*, č. 1-2/2016, ISSN 0322-886X

Macháč J., 2017: Metodický postup ekonomického hodnocení opatření komplexní ochrany jakosti vody a zvýšení retence. IREAS centrum, s. r. o.

Matula S., Kozáková H., 1997: A simple pressure infiltrometer for determination of soil hydraulic properties by in situ infiltration measurements. *Rostlinná výroba*, 43: 405-413.

Menberu M.W., Marttila H., Tahvanainen T., Kotiaho J.S., Hokkanen R., Kløve B., Ronkanen A.-K., 2017: Changes in pore water quality after peatland restoration Assessment of a large-scale, replicated before-after-control-impact study in Finland. *Water Resour. Res.* 53, 1–17.

Miháliková M., Matula S. and Doležal F., 2013: HYPRESCZ – database of soil hydrophysical properties in the Czech Republic. *Soil and Water Research*, 8: 34-41.

Michaud A.R., Poirier S.-C. and Whalen J.K., 2019: Tile Drainage as a Hydrologic Pathway for Phosphorus Export from an Agricultural Subwatershed. *J. Environ. Qual.*, 48: 64-72. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0104>

Nazari S., Ford W.I., King. K.W., 2020: Impacts of preferential flow and agroecosystem management on subsurface particulate phosphorus loadings in tile-drained landscapes. *J. Environ. Qual.* 2020;1–14. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20116>.

Negm L. M., Youssef M. A., Chescheir G. M., Skaggs R. W., 2016: DRAIN-MOD-based tools for quantifying reductions in annual drainage flow and nitrate losses resulting from drainage water management on croplands in eastern North Carolina. *Agricultural Water Management*; 2016. 166:86-100

Nemes A., Schaap M.G., Leij F.J. and Wösten J.H.M., 2001: Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *Journal of Hydrology*, 251: 151-162.

Nishiwaki J., Horton R., 2020: Temporal changes in soil hydraulic conductivity in saturated and unsaturated fields. *Paddy and Water Environment*, 18: 677-686.

Novotný I., Vopravil J. a kol., 2013: Metodika mapování a aktualizace bonitovaných půdně ekologických jednotek. VÚMOP, v.v.i., 174 s, ISBN 978-80-87361-21-4.

Parr J.R., and Bertrand A.R., 1960: Water infiltration into soils. *Advances in Agronomy*, 12: 311-363.

Oppeltová P., Kvítek T. & Kasal P., 2022: Nutrient Balance from Agricultural Pollution Sources on Selected Tributaries to the Švihov Reservoir. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 70(4-5), 317-335. doi: 10.11118/actaun.2022.024

Pelíšek I., 2018: Investigation of soil water infiltration at a scale of individual earthworm channels. *Soil & Water Res.*, 13: 1–10.

Pelíšek I., 2015: Příspěvek k řešení změn vlastností půdních makropórů při podpovrchové retenci a retardaci vod. In: kol. (2015): Závlahy a jejich perspektiva. ČBKs. Poster a el. verze článku, 11 s. ISBN 978-80-87577-46-2.

Pelišek I., Kulhavý Z., Čmelík M., 2013: Měření hydropedologických charakteristik pro určení účinnosti modernizace drenáží. In: ROŽNOVSKÝ, J. a kol. (eds.) (2013): Voda, půda a rostliny. Sborník z mezinárodní konference. Brno, Praha: ČBKs, Česká bioklimatologická společnost, ČHMÚ, Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno. 15 s. ISBN 978-80-87577-17-2.

Poole C. et al., 2018: Effect of drainage water management on nitrate nitrogen loss to tile drains in North Carolina. Transactions of the ASABE, Vol. 61(1): 233-244, <https://doi.org/10.13031/trans.12296>

Povilaitis A. et al., 2018: Efficiency of drainage practices for improving water quality in Lithuania. Transactions of the ASABE. Vol. 61(1): 179-196, <https://doi.org/10.13031/trans.12271>

Ross J. et al., 2016: A synthesis and comparative evaluation of factors influencing the effectiveness of drainage water management. Agricultural Water Management 178, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.011>

Saadat S., Bowling L., Frankenberger J., Kladivko E., 2018: Nitrate and phosphorus transport through subsurface drains under free and controlled drainage. Water Research 142 (2018) 196-207; <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.040>

Seják J., Cudlín P., Dejmal I., Petříček V., Černý K. a kol., 2010: Metodika oceňování biotopů AOPK ČR. http://users.prf.jcu.cz/kucert00/HABIT/METODIKA_OCENOVANI_BIOTOPU.pdf

Shedekar V. S., King K. W., Fausey N. R., Islam K. R., Soboyejo A. B. O., Kalcic M. M., Brown L. C., 2021: Exploring the effectiveness of drainage water management on water budgets and nitrate loss using three evaluation approaches. Agricultural Water Management 243 106501. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106501>

Schipper P. N. M., Heinen M., Jansen P., Stuyt L., Dik P., 2015: Practice test measurable drainage test farm Rusthoeve 2010-2014. End report of the practice test on the effects of controllable and deep drains on clay in Zeeland. [Dutch]. Alterra-rapport – Wageningen University and Research Centre; 2015. (2639): 114 pp.

Schaap M.G., Leij F.J. and van Genuchten M.T., 2001: Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedo-transfer functions. Journal of Hydrology, 251: 163-176.

Schrimpelová K., Malá J. 2017: Náplně denitrifikačních bioreaktorů. Vodní Hospodářství, 3/2017.

Schwen A., Bodner G. and Loiskandl W., 2011: Time-variable soil hydraulic properties in near-surface soil water simulations for different tillage methods. Agricultural Water Management, 99: 42-50.

Sojka M. et al., 2019: Sustainable Water Management in Agriculture—The Impact of Drainage Water Management on Groundwater Table Dynamics and Subsurface Outflow. Sustainability, 11, 4201; <https://doi.org/10.3390/su11154201>; <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/15/4201>

Stuyt L. C. P. M., 1992: The Water Acceptance Of Wrapped Subsurface Drains. Thesis.

- Wageningen: ILRI, Institute for Land and Water Management Research. 312 s.
- Singh D., Patra S., Mishra A.K., Mariappan S. and Singh N., 2022: Temporal variation of saturated and near-saturated soil hydraulic conductivity and water-conducting macroporosity in a maize-wheat rotation under conventional and conservation tillage practices. *Land Degradation & Development*, 33: 2208-2219.
- Skaggs R.W., Fausey N.R., Evans, R.O., 2012: Drainage water management. *Journal of Soil and Water Conservation* 67(6):167A–172A.
<https://doi.org/10.2489/jswc.67.6.167A>
- Skaggs R.W., Youssef M.A., Evans R.O., 2005: Agricultural drainage management effects on water conservation, N-loss and crop yields. In: Proceedings of 2nd Agricultural Drainage and Water Quality Field Day, August 19, 2005. Lamberton, MN: University of Minnesota.
- Soukup M., Kulhavý Z., 2011: Regulační prvek pro odvodňovací systémy. Užitečný vzor č. 21754. <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/Full-Documents/FDUM0021/uv021754.pdf>
- Soukup M., Kulhavý Z., Pilná E., Mimrová K., Eichler J. 2001: Opatření pro regulaci odtoku v zemědělsky využívaném povodí. *Metodika* 26/2001. VÚMOP Praha, ISSN 1211-3972, 51 stran
- Strock J.S., Kleinman P.J.A., King K.W., Delgado J.A., 2010: Drainage water management for water quality protection. *Journal of Soil and Water Conservation* [online]. 65(6), 131A-136A. ISSN 0022-4561.
- Sunohara M.D., Gottschall N., Craiovan E., Wilkes G., Topp E., Frey S.K., Lapen D.R., 2016: Controlling tile drainage during the growing season in Eastern Canada to reduce nitrogen, phosphorus, and bacteria loading to surface water. *Agric. Water Manag.*, 178, 159–170.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.030>
- Svobodová N., 2023. Vliv drenážního odvodnění na jakost vody. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 115 s.
- Šeda S., 2018: Regulovaná drenáž – názor hydrogeologa. Odborný posudek. Fingeo s.r.o.
- Šimůnek J., Šejna, M., van Genuchten, M.Th., 1999: The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0. U.S. Salinity laboratory, Agricultural research service, U.S. department of agriculture, Riverside, California.
- Štibinger J., 2014: Examples of determining the hydraulic conductivity of soils. Theory and applications of selected basic methods, University Handbook on Soil Hydraulics, J. E. Purkyně University in Ústí n. Labem, Faculty of the Environment, ISBN 978-80-7414-836-1.
- Štibinger J., Pešková J., 2013: Terénní experimentální stanovení hydraulické vodivosti mokřadů v Jizerských horách v lokalitě Horní Maxov. In: J. Rožnovský, Litschmann, T., Středová, H., Středa, T. (Editor), *Voda, půda, rostliny, Křtiny*, 29. – 30. 5. 2013, ISBN 978-80-87577-17-2.

Štibinger J., Kulhavý Z., 2010: Úpravy vodního režimu půd odvodněním. Monografie. VÚMOP, v.v.i. ČZU v Praze, ISBN 978-80-213-2132-8 Současně slouží jako manuál k autorizovanému SW, publikovanému na adresách <https://hydromeliorace.vumop.cz/>

Tanner C.C., Sukias J.P.S., Yates C.R., 2010: New Zealand guidelines: Constructed Wetland Treatment of Tile Drainage. NIWA Information Series No. 75. National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd.

Tiemeyer B., Kahle P., 2014: Nitrogen and dissolved organic carbon (DOC) losses from an artificially drained grassland on organic soils. *Biogeosciences*, 11, 4123–4137, 2014. <https://doi.org/10.5194/bg-11-4123-2014>

Tolomio M., Borin M., 2019: Controlled drainage and crop production in a long-term experiment in North-Eastern Italy. *Agricultural Water Management* 222, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.040>

Tóth B., Weynants M., Nemes A., Makó A., Bilas G. and Tóth G., 2015: New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66: 226–238.

Tournebize J., Chaumont C., Mander Ü., 2017: Implications for constructed wetlands to mitigate nitrate and pesticide pollution in agricultural drained watersheds. *Ecological Engineering* 103, p. 415–425.

Turner E.K., Worrall F., Burt T.P., 2013: The effect of drain blocking on the dissolved organic carbon (DOC) budget of an upland peat catchment in the UK. *Journal of Hydrology* 479, p. 169–179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.059>

Urbanová Z., Píček T., Bárta J., 2011: Effect of peat re-wetting on carbon and nutrient fluxes, greenhouse gas production and diversity of methanogenic archaeal community. *Ecological Engineering* 37; 1017–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.07.012>

Valla M., Kozák J., Němeček J., Matula S., Borůvka L. and Drábek O., 2000: Pedologické praktikum. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra pedologie a geologie AF, PowerPrint, Praha. ISBN: 80-213-0637-8, pp. 148.

Vaniček I., 1996: Mechanika zemin, VŠ Skriptum, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Vydavatelství ČVUT, Praha 6, 3. vydání, 229 s., ISBN 80-01-01437-1.

Váška J., Dvořák P., Hrádek F., Kovář P., Kulhavý F., Kuráž V., Říha J., Vrána K., 2000: Hydromeliorace. Technická knihovna autorizovaného inženýra a technika, TK16, ČSSI rok 2000, ISBN 80-86426-01-7

Vašků Z., 2011: Zlo zvané meliorace. *Vesmír* 90, 440, č. 7.

Vašků Z., 2008: Základní druhy průzkumů pro krajinné inženýrství, využití a ochranu krajiny. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 396 s.

Vymazal J., Dvořáková Březinová T., 2018: Treatment of a small stream impacted by agricultural drainage in a semi-constructed wetland. *Science of the Total Environment* 643: 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.148>

Vymazal J., Sochacki A., Fučík P. et al., 2020: Constructed wetlands with subsurface flow for nitrogen removal from tile drainage. *Ecological Engineering* 155: 1-10. ISSN 0925-8574.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105943>

Wang Z., Shao G., Lu J., Zhang K., Gao Y., Ding J., 2020: Effects of controlled drainage on crop yield, drainage water quantity and quality: A meta-analysis. *Agricultural Water Management* 239 106253.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106253>

Wesström I., Joel A., Messing I., 2014: Controlled drainage and subirrigation – A water management option to reduce non-point source pollution from agricultural land. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 198, p. 74-82;

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.017>

Williams M.R., King K.W., Fausey N.R., 2015: Contribution of tile drains to basin discharge and nitrogen export in a headwater agricultural watershed. *Agricultural Water Management* 158 p. 42–50.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.009>

Williams M.R., King K.W., Fausey N.R., 2017: Dissolved organic carbon loading from the field to watershed scale in tile-drained landscapes. *Agricultural Water Management* 192, p. 159–169.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.008>

Willison R.S., Nelson K. A. et al., 2021: Corn yield response to subsurface drainage water recycling in the midwestern United States. *Agronomy Journal*, 113:1865–1881. <https://doi.org/10.1002/agj2.20579>

Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., and Le Bas C., 1999: Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90: 169-185.

Wösten J.H.M., Pachepsky Ya. and Rawls W.J., 2001: Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251: 123-150

Youssef M.Y., Strock J. et al., 2023: Impact of controlled drainage on corn yield under varying precipitation patterns: A synthesis of studies across the U.S. Midwest and Southeast. *Agricultural Water Management* 275; 107993,

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107993>

Youssef M.Y., R.W. Skaggs, G.M. Chescheir and J.W. Gilliam, 2005: The Nitrogen Simulation Model, DRAINMOD-N II. *Trans. ASAE* 48(2):611-626.

Yupu H., Jianyun Z., Shihong Y., 2019: Effect of controlled drainage on nitrogen losses from Zcontrolled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization. *Agricultural Water Management* 221:231–237. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.043>

Zajíček A., Dostál T., Hanák R., Novotná J., Kulhavý Z., Krása J., Ryšavý S., Fučík P., Pavel M., Hejduk T., Kratochvílová L., Rosendorf P., Bauer M., Marval Š., Malý A., Novák P., Pelíšek I., Krátký M., Kvítek T., 2023: Identifikace kritických bodů odtoku vody a kategorizace jejich přispívajících lokalit z hlediska potřeby návrhů opatření ke zvýšení infiltrace, retence, akumulace a jakosti vod v zemědělských povodích na území České republiky.

Certifikovaná metodika. 84 s. ISBN 978-80-88323-74-7 (tištěná verze), 978-80-88323-75-4 (online pdf), osvědčení č. MZE-32953/2023-15121

Zajiček a kol., 2021: Návrhy revitalizačních opatření na hlavních a přílehlých podrobných odvodňovacích zařízeních. Certifikovaná metodika. VÚMOP, v.v.i., Sweco Hydroprojekt, a.s., GEOREAL spol. s r.o., ISBN 978-80-88323-54-9 (tištěná verze), 978-80-88323-55-6 (online pdf)

Zajiček A., Fučík P., Duffková R., Kaplická M., Maxová J., 2019: Jakost drenážních vod a její potenciální vliv na vodní zdroje. TZB-info 2019(9):1. ISSN: 1801-4399. <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/19500-jakost-drenaznich-vod-a-jeji-potencialni-vliv-na-vodni-zdroje>

Zajiček 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. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.068>

Právní předpisy a normy

ČSN EN ISO 772 (259300): Hydrometrická měření – Terminologie, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.

ČSN 75 0110 (750110) Vodní hospodářství – Terminologie hydrologie a hydrogeologie

ČSN EN ISO 17892-11 (721007): Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 11: Stanovení propustnosti, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

ČSN 75 7221 Kvalita vod – Klasifikace kvality povrchových vod

TNV 75 4221. Regulace a retardace odtoku na zemědělských pozemcích odvodňovací trubkovou drenáží. Praha, 2004.

ČSN 754200 (754200) Hydromeliorace. Úprava vodního režimu zemědělských půd odvodněním

ČSN 75 0434 Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu. Účinnost od 4/2017. Česká technická norma, ICS 13.060.10, 65.020.20

Vyhláška č. 216/2011 Sb. Vyhláška o náležitostech manipulačních řádů a provozních řádů vodních děl

TNV 752910 Manipulační řády vodních děl na vodních tocích

ČSN 75 7143 Jakost vody pro závlahu

TNV 75 4922 – Údržba odvodňovacích zařízení

TNV 75 4933 – Údržba závlahových zařízení

TNV 75 29 20 Provozní řády vodních děl.

Směrnice ROS, 1985“ Regulované odvodňovací systémy – Směrnice. Ministerstvo zemědělství a výživy ČR Praha, Ministerstvo poľnohospodárstva

a výživy SSR Bratislava, Výzkumný ústav pro zúrodnění zemědělských půd Praha. 43 stran. Ke stažení na adrese <http://www.hydrmeliorace.cz/sw/knihovna/stahnout.php?dl=238>

Internetové zdroje

<https://www.bae.ncsu.edu/agricultural-water-management/drainmod/>
DRAINMOD – A Computer Simulation Model

www.sswm.info Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox

<https://www.ctpz.cz/vyzkum/aktualni-problemy-zemedelskeho-odvodneni-v-podminkach-cr-komentovany-souhrn-abstraktu-cilenych-na-tematiku-odvodneni-zemedelskych-pozemku-848>

MZe, SPÚ, VÚMOP, 2020: Plán opatření pro řešení sucha prostřednictvím pozemkových úprav a adaptací hydromeliorací v horizontu 2030 <https://www.vumop.cz/tz-mze-ministr-zemedelstvi-mame-plan-na-vyuziti-melioraci-vetsinu-prebudujeme-tak-aby-zadrzely-vodu>

Usnesení č. 479/2016: https://www.vlada.cz/assets/urad-vlady/poskytovani-informaci/poskytnute-informace-na-zadost/Priloha_1_Usneseni_479_plus_material.pdf

Usnesení č. 354/2023: https://eagri.cz/public/web/file/726040/Usneseni_vlady_230517_0354.doc v rámci něhož vláda dne 17. 5. 2023 schválila upravenou „Koncepci ochrany před následky sucha pro území České republiky na období 2023–2027“ obsaženou v části III. materiálu č.j. 402/23 https://eagri.cz/public/web/file/726042/6_B3_Koncepce_SUCHO_2023_final_MPR.pdf Melioračního odvodnění se týká kapitola „Regulace odtoku z melioračních odvodňovacích zařízení a zajištění podkladů pro uplatnění v praxi“, strana 50-51 dokumentu

<https://kpp.vumop.cz/?core=app> zprostředkování přístupu k výsledkům Komplexního průzkumu půd (KPP) ve formě popisu půdních sond; příkladem použití v souvislostech této metodiky je zdroj, trvání a rozsah zamokření – viz <https://metadata.vumop.cz/record/basic/5fd1f9fb-576c-40e7-8e7c-6aa60a000319>

<https://mapy.vumop.cz/> mapové vyjádření odvozených půdních vlastností vzniklé odbornou činností VÚMOP, v.v.i. včetně základních charakteristik BPEJ

9. Abstrakt (český jazyk, anglický jazyk)

Zpracovaná certifikovaná metodika dokumentuje možnosti modernizaci drenážního odvodnění, dosud používaného jako tradiční opatření na zemědělské půdě, se značným potenciálem uplatnění reagujícím na projevy klimatické změny. Metodika přináší přehled historických i aktuálních poznatků, informací a postupů, týkajících se možnosti regulace drenážního odtoku na stavbách zemědělského odvodnění z hlediska vlivu na jakost i množství vod. Úvodní část metodiky se věnuje přehledu tuzemských i zahraničních poznatků a výsledků, vč. souvislostí s výnosy plodin na pozemcích s regulovaným odtokem a srovnání tradičního a regulovaného odvodňovacího systému. Další část shrnuje a vysvětluje zásady, uvedené v souvisejících odvětvových normách a komentuje dosavadní principy státní podpory. Samostatné kapitoly podrobně uvádí přehled způsobů a možností řešení úprav staveb zemědělského odvodnění, vč. typologie regulačních prvků a praktickou uplatitelnost těchto postupů i zásady provozu. Pro doplnění je stručně začleněn přehled jiných biotechnických opatření, vč. vyjádření jejich účinnosti z hlediska vlivu na jakost vod.

Samostatná kapitola je v metodice věnována popisu vhodných přírodních a technických podmínek k regulaci. Podrobně je uvedeno a interpretováno použití hydropedologických podkladů a jejich získání ve vazbě na předmětné téma, jakož i hydraulika drenážního potrubí v různých podmínkách a režimech. Metodika rovněž obsahuje představení automatizovaných online nástrojů pro kvantitativní i kvalitativní hodnocení efektů regulace drenážního odtoku jak z hlediska množství, tak kvality vod.

V poslední sekci metodiky je představen související pětiletý výzkumný projekt (NAZV – QK1910086; 2019–2023), řešený autory této metodiky. V rámci projektu bylo zrealizováno sedm experimentálních ploch s různými regulačními zásahy na stavbách odvodnění v různých půdních, klimatických a zemědělských podmínkách. Souhrnně lze na základě výsledků experimentů konstatovat, že z hlediska snížení zátěže povrchových vod dusíkem byl potvrzen dominantní efekt regulace dosahovaný snížením odtoku vody z drenážního systému, tj. s projevem na látkový odnos N, spíše než efekt snížení koncentrací nitrátů v ploše odvodnění.

Metodika syntetizuje dosavadní poznatky melioračního výzkumu v oblasti zemědělského odvodnění a reaguje na potřebu adaptovat tyto stavby na měnící se klima s nutností zlepšit hospodaření s dostupnými zdroji vod na pozemku. Vychází z minulých praktických zkušeností projekce a provozu staveb regulační drenáže v ČR, doplněné o srovnání se zahraničními zkušenostmi a experimentálním provozem modelových staveb, provozovaných v rámci tohoto i minulých výzkumných projektů. Tyto poznatky promítá nově do návrhu zásad manipulace s regulačními prvky, a to nejen s cílem maximalizace využití lokálních zdrojů vody, ale také pro minimalizaci negativních důsledků přítoku znečišťujících drenážních vod do recipientů těchto staveb.

This certified methodology elaborates the adjustment options on tile drainage towards controlling the drainage runoff and thus decrease water outflow and improve water quality. Tile drainage, so far predominantly used as a traditional single-purpose intervention on agricultural land, poses a considerable potential as a climate change adaptation action when equipped with runoff controlling mechanisms. The methodology provides an overview of historical and current knowledge, information and practices concerning the possibilities of regulating drainage runoff on agricultural drainage systems in terms of the impact on water quality and quantity. The introductory part of the methodology is devoted to a review of domestic (Czech) and foreign knowledge and results, including the relationship with crop yields on land with controlled drainage and a comparison of traditional and regulated drainage systems. The next section summarises and explains the principles set out in the relevant standards and further comments on the principles of State support and incentives. Separate chapters provide a detailed overview of the methods and options for modifying agricultural drainage systems, including a typology of runoff control elements and the applicability of these practices and operating principles. A brief overview of other biotechnical measures is included to complement this, including quantification of effectiveness in terms of their impact on water quality.

A separate chapter in the methodology is devoted to the description of suitable natural and technical conditions for drainage flow regulation. The use of hydrogeological data and their acquisition as well as the hydraulics of drainage pipes under different conditions and regimes are presented and interpreted in detail. The methodology also includes the introduction of automated online calculation tools for quantitative and qualitative assessment of the effects of drainage flow regulation in terms of both water quantity and quality.

The last section of the methodology presents the related five-year research project (NAZV – QK1910086; 2019-2023), which was carried out by the authors of this methodology. The project conducted field trials on seven experimental plots with different runoff controlling interventions on tile drainage in various soil, climatic and agricultural conditions. In summary, based on the research results, it can be concluded that, in terms of reducing the N load from tiled land to surface waters, the dominant control effect to decrease N loss was achieved by diminished drainage runoff, rather than by reducing nitrate concentrations by denitrification under controlled drainage.

The methodology synthesizes existing knowledge of controlled drainage research and responds to an urgent need to adapt land drainage to a changing climate with the necessity to improve the management of available water resources directly on land. The presented approaches are based on past practical experience of design and operation of drainage control structures in the Czech Republic, supplemented by comparison with foreign knowledge and results from the pilot yet operational sites conducted within this and past research projects. These findings are summarized into a newly formulated principles for the management of runoff control elements as well as the whole drainage systems, not only to optimize the use of local water resources, but also to minimize the negative consequences regarding downstream water quality.

Doplňující citace anglickojazyčná:

Kulhavý, Z., Fučík, P., Pelíšek, I., Matula, S., Bářková, K., Miháliková, M., Šťastná, M., Kozlovsky Dufková, J., Oppeltová, P., Mašíček, T., Jakoubek, J. (2023): Controlled drainage – options for reduction of agricultural water pollution, A certified methodology. 93 p. ISBN 978-80-88323-83-9 (printed version), 978-80-88323-84-6 (online pdf), certificate no. MZE-646/2024-15113

