

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

**Katedra vodního hospodářství
a environmentálního modelování**



Využití umělé infiltrace k nakládání s vodou

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Bakalant: Petr Linhart

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petr Linhart

Krajinářství
Vodní hospodářství

Název práce

Využití umělé infiltrace k nakládání s vodou

Název anglicky

The use of artificial infiltration for the treatment of water

Cíle práce

Zpracovat formou rešerše přehled způsobů využití umělé infiltrace 1) pro zasakování za účelem zpomalení odtoku srážkové vody a zvýšení zásob podzemní vody a 2) pro zajištění zdrojů pitné vody.

Na základě rešerše vyhodnotit 1) výhody umělé infiltrace pro konkrétní způsoby využití umělé infiltrace a 2) problémy vznikající při umělé infiltraci a navrhnout jejich řešení.

Metodika

Zpracování literární rešerše týkající se problematiky využití umělé infiltrace pro zlepšení hydrologické bilance a navýšení dotace zvodní a dále pro navýšení kapacity zdrojů pro odběr pitné vody. Uvedení vybraných případových studií z ČR a zahraničí.

Zvolení nejdůležitějších vlastností (vody i porézního prostředí) ovlivňující množství infiltrované vody a její výslednou kvalitu při použití umělé infiltrace.

Shrnutí hlavních problémů a výhod při umělé infiltraci. Vyhledání možnosti řešení problémů v literatuře.

Doporučený rozsah práce

35 stran

Klíčová slova

umělá infiltrace, zdroje pitné vody, zlepšení hydrologické bilance, kolmatace

Doporučené zdroje informací

- Balke, K.D., Zhu, Y., 2008. Natural water purification and water management by artificial groundwater recharge. *Journal of Zhejiang University Science B* 9, 221-226.
- Bouwer, H., 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal* 10, 121-142.
- Grunheid, S., Amy, G., Jekel, M., 2005. Removal of bulk dissolved organic carbon (DOC) and trace organic compounds by bank filtration and artificial recharge. *Water Research* 39, 3219-3228.
- Herčík, L., 2008. 40 let provozování umělé infiltrace v Káraném (1968-2008). In: Kalousková, N., Dolejš, P. (Eds.), *Pitná voda 2008. Sborník konference. W&ET Team, Č. Budějovice 2008*, ISBN 978-80-254-2034-8, pp. 289-294.
- Hrkal, Z., 2010. Zpracování metodiky pro posuzování problematiky umělé infiltrace v ČR. Výzkumný úkol č. 3809. VÚV TGM, Praha.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2019

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 06. 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Využití umělé infiltrace k nakládání s vodou“ vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze

.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Lukášovi Jačkovi, Ph. D. za odborné vedení, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích a vypracovávání bakalářské práce.

V Praze

.....

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi využití umělé infiltrace pro navýšení zásob podzemních vod, zpomalení odtoku vody z krajiny, využití dešťové vody v místě dopadu v urbanizovaném území a úpravu vody na pitné účely. Na základě zpracování literární rešerše zabývající se problematikou využití umělé infiltrace bylo zjištěno, že umělá infiltrace představuje vhodný postup pro navýšení zásob vody v půdě a zvodních a také vhodný nástroj pro zmírnění dopadů sucha a povodní na území České republiky i ve světě. V práci je uveden ucelený přehled využití umělé infiltrace, včetně výhod a nevýhod umělé infiltrace důležitých pro posouzení její proveditelnosti a popisu pozitiv a negativ vzniklých za chodu umělé infiltrace. Hlavní pozitiva využití umělé infiltrace jsou následující: přirozený proces čištění vody filtrací, zlepšení hydrologické bilance, snížení rizik povodní a sucha, kladná spolupráce vodního hospodářství a životního prostředí, stabilizace a zvýšení hladiny podzemní vody, snižování rizik zasolování, zmírnění poklesů půdy, stabilizace zdrojů podzemních vod a stabilizace eroze půdy. Hlavní nevýhody umělé infiltrace jsou ztráty infiltrované vody, možné zhoršení kvality podzemních vod zasakovanou vodou, nutnost úpravy surové vody, nedokonalé odstranění rozpuštěných látek, kolísavost surové vody a problematika vzniku, prevence a odstraňování kolmatace. Důležitým přínosem této práce jsou příklady potenciálu využití umělé infiltrace v ČR, například zavedením břehové infiltrace u velkých řek a technologie infiltrování odpadních vod včetně pěti vytipovaných lokalit, které by mohly významným způsobem napomoci zlepšit hospodaření s vodou.

Klíčová slova

umělá infiltrace, zdroje pitné vody, zlepšení hydrologické bilance, kolmatace, zhodnocení výhod a nevýhod umělé infiltrace

Abstract

This bachelor thesis deals with the possibilities of using artificial infiltration to increase groundwater resources, to slow down the surface runoff, for the use of rainwater and for water treatment for drinking purposes. According to literature review, the artificial infiltration seems to be a suitable tool for increasing water supplies in soil and aquifers and also for mitigating the effects of drought and floods in the Czech Republic and worldwide in general. The thesis provides an overview of the use of artificial infiltration, including the advantages and disadvantages of artificial infiltration important for assessing the feasibility. The thesis also describes positives and negatives arising during the process of artificial infiltration. The main positives of the use of artificial infiltration are the following: natural process of water purification by filtration, improvement of hydrological balance, reduction of flood and drought risks, stabilization and increase of groundwater level, reduction of salinization risks, mitigation of landslides, stabilization of groundwater resources and stabilization of soil erosion. The main disadvantages of artificial infiltration are loss of infiltrated water, possible deterioration of groundwater quality by infiltrated water, the need for raw water pre-treatment, incomplete removal of dissolved substances, problems of formation, prevention and elimination of colmatation. An important contribution of this work are examples of the potential use of artificial infiltration in the Czech Republic, such as the introduction of riverbank infiltration for large rivers and wastewater infiltration technology, including five selected localities, which could significantly contribute to water management.

Keywords

artificial infiltration, sources of drinking water, improvement of hydrological balance, colmatation, evaluation of advantages and disadvantages of artificial infiltration

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce	3
3	Literární rešerše.....	4
3.1	Definice infiltrace.....	4
3.1.1	Historie umělé infiltrace.....	4
3.1.2	Historie umělé infiltrace v České republice	8
3.2	Legislativa	8
3.3	Dělení umělé infiltrace	11
3.3.1	Dle infiltrované vody	11
3.3.2	Dle porézního prostředí, do kterého probíhá infiltrace vody	14
3.3.3	Dle technického provedení.....	16
3.4	Vybrané případové studie.....	28
3.4.1	Případové studie v ČR.....	28
3.4.2	Případové studie v zahraničí	33
4	Přehled problémů a pozitiv umělé infiltrace	36
4.1	Hlavní výhody umělé infiltrace	36
4.2	Hlavní problémy při umělé infiltrace a jejich řešení	36
4.2.1	Kolmatace	36
5	Diskuse.....	42
7	Závěr	46
8	Přehled literatury a použitých zdrojů	48

1 Úvod

Česká republika se geograficky nachází na hranici tří úmoří, v hovorové češtině se pro ni v této souvislosti občas používá výraz střecha Evropy. Z toho vyplývá skutečnost, že srážky jsou jediným zdrojem vody na našem území. Z důvodu některých činností člověka, například napřimování vodních toků, budování meliorací, zvětšování ploch zastavěných území, zastavování zemědělské půdy, aplikace nevhodných zemědělských postupů, intenzivní zemědělství, dochází k stále k rychlejšímu odtoku vody z krajiny. To má za následek dva zásadní problémy. Těmi jsou neustále se opakující ničivé povodně a v posledních letech stále aktuálnější sucha. Oba tyto problémy lze řešit změnou hospodaření se srážkovou vodou, zvýšením infiltrační a retenční schopnosti půdy a celé krajiny.

Nabízejí se tři základní způsoby hospodaření se srážkovou vodou. První z nich je prevence vzniku srážkových vod, která spočívá v minimalizaci množství nepropustných zpevněných ploch. Hlavním pilířem této metody je v co největší míře zachovat nezpevněné povrchy, nejlépe s vegetačním pokryvem s přirozeně sníženým terénem podporujícím přirozenou infiltraci. V urbanizovaném území lze také účinně snížit povrchový odtok a kulminaci průtoku a zvýšit evapotranspiraci užitím vegetačních zelených střech. Zde se klade důraz na kompromis mezi vysokou propustností vegetačního pokryvu střechy, dostatečnou retenční schopností a nízkou měrnou hmotností.

Dalším řešením je akumulace a následné využití srážkové vody. Tento systém má za úkol snížit objem povrchového odtoku a kulminační průtoky. Hlavním důvodem využití srážkové vody v nemovitostech je náhrada a úspora pitné vody. Využití poté nachází především v zavlažování jak pro zemědělství, tak i pro zavlažování zahrad. K minimalizaci vnosu znečištění je nejvhodnější použití srážkové vody zachycené co nejbliže k místu dopadu.

V neposlední řadě je možné využít umělou infiltraci. Tato bakalářská práce se věnuje právě využití umělé infiltrace, jejím výhodám, a problematice s ní spojené. Umělou infiltrací lze například řešit zachytávání srážkové vody v místě nebo blízkosti dopadu, bez případné nutnosti zastavění většího území jako například u stavby nádrží. Jedná se o způsob doplňování zásob podzemních vod bez

velkých ztrát z důvodu evapotranspirace. Touto metodou lze srážkovou vodu čistit a popřípadě s ní doplňovat zásoby pitné vody.

2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je zpracovat přehled způsobů využití umělé infiltrace pro zasakování za účelem zpomalení odtoku srážkové vody, pro zvýšení zásob podzemní vody a dále využití umělé infiltrace pro zajištění zdrojů pitné vody.

Dalším cílem je na základě zpracované rešerše vyhodnotit výhody umělé infiltrace pro konkrétní způsoby jejího využití a případné problémy vznikající při umělé infiltraci a navrhnout jejich řešení.

3 Literární rešerše

3.1 Definice infiltrace

Infiltrace je jedním z nejzákladnějších fyzikálních jevů vyskytujících se v každodenním životě a je základním jevem hydrologického cyklu (Philip, 1957). Infiltrace se definuje jako fyzikální proces zahrnující vsakování vody do půdy a absorpci vody půdou (Horton, 1933).

Lal a Shukla (2004) stanovuje infiltraci jako termín vstupu vody do půdního prostředí přes rozhraní vzduch – půda.

Při infiltraci rozdělujeme srážkovou vodu na dvě části. Část vody ze srážky oteče po povrchu, která se do půdy nevsákne a část srážkové vody se infiltuje do půdy, kde je přivedena ke kořenům rostlin a dotuje zvodně (Novotná et. al, 2015). Infiltrace je tedy klíčovým hydrologickým procesem obohacujícím půdu a geologické podloží o vodu (Gale, 2005).

Obecný pojem umělá infiltrace znamená jakýkoliv technologický proces, při kterém dochází k řízenému zasakování povrchové vody do podzemí na daném místě. Po procesu umělé infiltrace se voda dále jímá pro další potřeby nebo obohatí infiltrované prostředí vsakovaným objemem vody (Hrkal, 2016).

3.1.1 Historie umělé infiltrace

První zmínky v historii o používání umělé infiltrace pochází již ze starověkého Egypta, kde se využívala voda z Nilu distribuována pomocí umělých kanálů k napájení studen a zajištění dostatečného množství vody pro zemědělství (Hrkal, 2010a).

V Evropě byly praktické zkušenosti a teoretické poznatky o umělé infiltraci publikovány ve druhé polovině 19. století. V největším měřítku byla a dodnes zůstává umělá infiltrace nejpoužívanější v Německu, a dále ve Švédsku, Švýcarsku a Holandsku. Mimo evropský kontinent se nejčastěji vyskytuje v USA (Hrkal, 2010a). Teoretické základy k využívání umělé infiltrace položil Adolf Thiem, který vypracoval teorii o použití břehové umělé infiltrace již v roce 1877 (Franke a Kleinschroth, 1991). Použitím této teorie se navrhovaly studňové řady v dostatečné vzdálenosti od řeky. Tak aby docházelo k co nejefektivnějšímu jímání vody, ale

také k dostatečnému zdržení vody při průsaku podloží a byla splněna v tu dobu stanovená 15denní lhůta zdržení vody (Hrkal, 2010a).

Jak již bylo zmíněno z evropských států je umělá infiltrace nejvíce využívána v Německu, kde je vybudováno velké množství zařízení, které se v dlouhodobém provozu velmi osvědčilo. Tímto způsobem získávají pitnou vodu pro zásobení měst jako je například Düsseldorf a Berlín (Balke a Zhu, 2008).

Další zemí využívající podstatnou část vody z umělé infiltrace je Švédsko, které má v současné době 14 významnějších vodáren s celkovou kapacitou 2,5 m³/s a Švédsko s 12 vodárnami produkujícími 6,6 m³/s kvalitní pitné vody. Velmi využívána jsou zařízení pro umělou infiltraci také v Holandsku při produkování téměř 6 m³/s pitné vody (Hrkal, 2010a). V této zemi je ovšem umělá infiltrace nejen využívána ke zdroji pitné vody, ale také jako prostředek pro ochranu podzemní vody před vnikáním mořské vody do pevniny. Pomocí systému umělé infiltrace svrchních vrstev je mořská voda pronikající do podzemí již ve vzdálenosti 500 m od vniku zatlačována do hloubek 30-50 m. Tento proces umožňuje využití podzemních vod i v pobřežních oblastech jak pro zásobování obyvatelstva pitnou vodou, tak pro zemědělství. Základním prvkem tohoto systému je technické použití závlahových kanálů na dunových píscích (Gale, 2005).

Stejně jako v Holandsku je i použití podobného systému využíváno u pobřeží Los Angeles, kde je užitá umělá infiltrace k vytvoření hranice mezi slanou mořskou vodou a podzemními vodami. Tímto způsobem dochází k zabránění zasolování pobřeží při snížení hladiny podzemní vody. Podobný systém zasakování povrchových vod se používá v Jižní Kalifornii, kde systém přítoků a přirozených i umělých nádrží představuje možnost infiltrace přívalových vod z horských toků (Mcdermott et al., 2005).

Zajímavým rysem vývoje technického uspořádání umělých infiltrací je vývoj jakosti povrchové (surové) vody. Z počátku systém umělých infiltrací nevyžadoval, kromě mechanického usazování, žádné další stupně úpravy surové vody. Tyto systémy byly budovány v lokalitách s příznivými hydrogeologickými podmínkami a zejména jako náhrada za pomalou přirozenou infiltraci. Z důvodů malého znečištění povrchových vod, a to zejména organickými látkami, byla postačující i malá doba zdržení vody mezi infiltračním zařízením a jímacím

objektem. Při malých specifických potřebách byla dostačující doba zdržení 10 dní. S růstem znečištění povrchových vod a stále se zvyšujícími potřebami pro zásobování bylo často nezbytné před vlastní infiltrací řadit stupeň předúpravy surové vody (Hrkal, 2010a).

Od 50. let se sedimentační nádrže a následné použití rychlofiltrace jako opatření na ochranu jakosti vody ukázaly nedostatečné. A to zejména z důvodu zvyšování chemického znečištění povrchových vod. Z tohoto důvodu musela být před samotnou umělou infiltraci zařazena úprava surové vody. Jako příklad nám může posloužit umělá infiltrace Wiesbadenu, kde do 50. let minulého století byl jako stupeň úpravy surové vody používán pouze proces rychlofiltrace. Nyní je v používán celý následující postup úpravy vody. Voda odebrána z Rýna projde přes usazovací nádrže, kde dojde k zachycení hrubších splavenin. Následně je provedena přes kaskádu stupínek pro provzdušnění a zavedena do zásobních nádrží. Z těchto nádrží je do vody přidáván chlorid železitý spolu s práškovým aktivním uhlím. Poté je zařazena flotace a pískové rychlofiltry. Až po provedení této technologie úpravy vody následuje samotná infiltrace, která ovšem vyžaduje dobu zdržení 50–60 dnů. Jímaná voda je dále opět provzdušněna a následně chlorována, aby se mohla nakonec vést do spotřebiště (Hrkal, 2010a).

Častou aplikací je uspořádání vsakovacích nádrží se dvěma bezprostředně sousedícími řadami nádrží. Jedna řada je v provozu a u druhé se nechává vysychat dno za účelem přirozené regenerace. V případě velké propustnosti dna bývá užíván proces přidávání jílovité suspenze do surové vody tak, aby došlo k vytvoření méně propustné vrstvičky, což napomáhá k rychlejšímu vytváření převážně biologické kolmatační blány. Tento postup je užíván v Izraeli a Holandsku. Velmi často je u plánování umělé infiltrace počítáno s tím, že pod dnem vsakovacích nádrží dojde k vytvoření nenasurované zóny, tedy že dochází k nespojitému průsaku, při němž dochází k delšímu styku infiltrující vody s provzdušněným prostředím (Gale, 2005).

Překvapivým zjištěním při zkoumání současného světového trendu je fakt, že v evropských hospodářsky vyspělých státech se znovu zavádí priorita na zásobování obyvatelstva pitnou vodou z podzemních zdrojů. Příkladem je například Německo, které má z celkových vodárenských odběrů 69 % ze zdrojů podzemní vody, 11 % břehovou infiltrací, 9 % umělou infiltrací, 6 % je odebíráno

z přehrad, 3 % z jezer a 2 % spotřeby je odebíráno z řek. Pokud by se započítala břehová infiltrace a umělá infiltrace ke zdrojům podzemní vody, vyšlo by číslo téměř 90 % podzemních zdrojů z celkových vodárenských odběrů (Hrkal, 2010a).

Dle Hrkala (2010a) jsou hlavními zásadami pro zásobování vodou v Německu:

- 1) Redukování specifických znečišťujících substancí, a to zejména kovů a organohalogenů bezpečnou cestou.
- 2) Hospodářské odstranění obvyklého znečištění jako jsou organické látky, amonium a patogenní bakterie.
- 3) Dostatečná příprava na kolísání jakosti dodávané surové vody.
- 4) Malá citlivost na náhlé změny ve spotřebišti.
- 5) Systém úpravy a využívání nesmí nežádoucími účinky zatěžovat životní prostředí z hlediska vytváření nežádoucích vedlejších produktů, jako například dlouho přetrvávající chemikálie ve dně. Příkladem může být chemická sloučenina amonium.
- 6) Malá spotřeba energie.

Těmto zásadám nejvíce odpovídají zdroje podzemní vody, kde se počítá s rozšířením jejich umělé dotace (infiltrace). Pokud bude předúprava surové vody na stejné úrovni jako u Wiesbadenu musí technické uspořádání umělé infiltrace v příslušném regionu zajistit co nejmenší ztráty infiltrované vody (Hrkal, 2010a). Z tohoto důvodu jsou navrhované systémy vesměs hydraulicky uzavřeny. Výjimku tvoří pouze umělé infiltrace užívané například v Nizozemsku, kde předčištěná voda je zasakována do písku v dunových oblastech. A zdržení vody v podzemí je 100 a více dní a není tedy podmínka hydraulické uzavřenosti zcela reálná (Gale, 2005).

V poslední době se umělou infiltrací zabývají v celosvětovém měřítku velkým podílem organizace Vědecká asociace hydrologů IAHS (International Association of Hydrological Sciences) a asociace hydrogeologů IAH (International Association of Hydrogeologists). Tyto organizace ve spolupráci s UNESCO propagují odbornou kampaň k zvyšování kvality hospodaření s podzemní vodou na základě řízení kolektorů podzemních vod (MAR – Management of Aquifer Recharge) (Gale, 2005; Hrkal, 2010a).

3.1.2 Historie umělé infiltrace v České republice

Na území České republiky se poprvé začíná umělá infiltrace využívat na přelomu 19. a 20. století. V této době se začínají využívat umělé zdroje vodárny v Káraném, u které byla první část vybudována v letech 1906-1913 v dolním Pojizeří podle projektu A. Thiema z Lipska. Vodárna v Káraném byla po dlouhou dobu základním zdrojem pitné vody pro hlavní město Prahu, využívající zejména podzemní zdroje infiltrované z Jizery do okolních kvartérních štěrkopísků v úseku od soutoku Jizery s Labem až k okolí Benátek nad Jizerou o délce úseku 26 km. Od roku 1968 získává vodárna v Káraném také vodu pomocí umělé infiltrace. Za využití přivedení surové vody z Jizery do vsakovacích nádrží a následné jímání vody pomocí systému trubních studní nebo spouštěných studní s horizontálními sběrači (Kněžek, 1989).

Kromě vodárny v Káraném bylo využíváno umělé infiltrace v České republice velmi sporadicky. V praktické provozu byly koncem 80. let pouze umělé infiltrace u Nového Bydžova, Luhu u Sišis, Přerov – Lýsky a Hrachovce u Valašského Meziříčí. Jako „divoké“ infiltrace byly zřízeny objekty U Rokycan, Frýdku-Místku, Rožnova pod Radhoštěm a v Kněžpoli u Uherského Hradiště (Kněžek, 1989).

Z důvodu velmi úspěšného rozšíření vodárny v Káraném došlo v průběhu 70. a počátkem 80. let 20. století k oživení zájmu o umělou infiltraci. V rámci studií, které nařídilo tehdejší Ministerstvo lesního a vodního hospodářství, byly provedeny průzkumy pro několik lokalit s možností využití umělé infiltrace. Tyto průzkumy byly značně různorodé. Paralelně s těmito průzkumy byly hodnoceny i aspekty umělé infiltrace z hlediska hydrauliky, jakostních parametrů vsakované a jímání vody, účinku kolmatace (Hrkal, 2010a).

3.2 Legislativa

Legislativa se v České republice o umělou infiltraci zajímá zejména jako o součást „**hospodaření s dešťovými vodami**“ (dále jako HDV). Do roku 2005 bylo v České republice HDV v urbanizovaných oblastech velmi pozadu. V posledních 15 letech patří HDV k nejrychleji se rozvíjejícím možnostem odvodnění měst (Novotná et al., 2015).

Na konci 90. let 20. století a počátku 21. století vzniklo v České republice několik ojedinělých projektů, které vycházely ze zahraničních vzorů. A to z důvodu, že do roku 2007 nebyl pro HDV pevně stanoven právní rámec. Jako jeden z prvních projektů vznikl Generel odvodnění hl. m. Prahy (GO HMP), který byl sestaven podle Švýcarského vzoru. Podle stejného vzoru byla také zpracována Situační zpráva o zasakování, doplněná o mapu s kategorizací vhodnosti území pro zasakování. Tyto mapy jsou stále aktualizované pro jednotlivé detailní generely odvodnění (Novotná et al., 2015).

Plán hlavních povodí v ČR položil v roce 2007 legislativní základy pro HDV. Tyto legislativní základy zdůrazňovaly především nutnost snižovat množství srážkových vod odváděných kanalizací. Dále kladly důležitost na zlepšení podmínek, na přímé vsakování do půdního prostředí a začaly požadovat koncepci nakládání s dešťovými vodami tak, aby bylo možné jejich zadržování, vsakování a přímé využití v zastavěných oblastech (Novotná et al., 2015).

V dokumentu ministerstva Životního prostředí Politika územního rozvoje ČR v roce 2008 na požadavky Plánu hlavních povodí ČR je uvedeno v kapitole Republikové priority územního plánování pro zajištění udržitelného rozvoje území:

„Vytvářet podmínky pro zvýšení přirozené retence srážkových vod v území s ohledem na strukturu osídlení a kulturní krajinu jako alternativy k umělé akumulaci vod.“

„V zastavěných územích a zastavitelných plochách vytvářet podmínky pro zadržování, vsakování i využívání dešťových vod jako zdroje vody a s cílem zmírňování účinků povodní.“

V roce 2009 proběhla novelizace Vyhlášky o obecných požadavcích na využívání území č. 501/2006 Sb. Nově se do ní dostaly priority řešení srážkových vod, kdy se stavební pozemek vždy vymezuje tak, aby na něm bylo vyřešeno vsakování nebo odvádění srážkových vod ze zastavěných ploch nebo zpevněných ploch, pokud se neplánuje jejich jiné využití. Přitom musí být řešeno:

- přednostně jejich vsakování, v případě jejich možného smísení se závadnými látkami umístění zařízení k jejich zachycení, není-li možné vsakování,

- jejich zadržování a regulované odvádění oddílnou kanalizací k odvádění srážkových vod do vod povrchových, v případě jejich možného smísení se závadnými látkami umístění zařízení k jejich zachycení, nebo
- není-li možné oddělené odvádění do vod povrchových, pak jejich regulované vypouštění do jednotné kanalizace.

Od roku 2010 má velký význam pro rozvoj HDV novela Zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů. Byla přidána definice srážkových vod a zároveň stanoveny podmínky obecného nakládání se srážkovými vodami. Nově vodní zákon požaduje aplikaci stavebního zákona a souvisejících právních předpisů nejen pro novostavby, ale také při provádění změn staveb a změn užívání staveb.

Do roku 2012 ovšem stále chyběly technické normy, které by bylo možné využít pro návrh a z tohoto důvodu se především využívaly německé technické normy DWA-A 138 a DWA-A 117. V únoru 2012 vyšla *ČSN 75 9010 Vsakovací zařízení srážkových vod* a v dubnu 2013 *TNV 75 9011 Hospodaření se srážkovými vodami* (Novotná et al., 2015).

ČSN 75 9010 Vsakovací zařízení srážkových vod stanovuje především způsob, rozsah a výstupy geologických průzkumů pro vsakování. Dalším bodem normy je klasifikace vody dle přípustnosti vsakování vzhledem k jejich znečištění (vody přípustné, podmíněčně přípustné a vody z potenciálně výrazněji znečištěných ploch) a uvádí přípustné způsoby vsakování.

Při vypouštění srážkových vod do kanalizace pro veřejnou potřebu existuje dle zákona č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích mnoho výjimek za zpoplatnění. Od poplatku jsou osvobozeny plochy silnic, dálnic, místních komunikací a účelových komunikací veřejně přístupných, plochy drah celostátních a regionálních, zoologické zahrady a plochy nemovitostí určených k trvalému bydlení, domácnosti a mnoho dalších. Z toho vyplývá, že převážná část majitelů staveb nemá motivaci k hospodaření s dešťovými vodami. Jedinou ekonomickou motivací je v dnešní době dotace zaměřená na změnu koncepce městského odvodnění jako je například:

Operační program Životní prostředí 2014–2020 Prioritní osy 01 „Zlepšování kvality vody a snižování rizika povodní“ (Novotná et al., 2015).

3.3 Dělení umělé infiltrace

Umělou infiltraci můžeme dělit podle tří hledisek:

- dle infiltrované vody, tedy dělení podle toho, jaký druh vody infiltrujeme.
- dle porézního prostředí, do kterého infiltrace probíhá.
- dle technického provedení, jakým realizujeme infiltraci.

Tato tři hlediska se navzájem propojují a jsou mezi sebou provázána. Například pokud se budeme snažit pohlížet na umělou infiltraci z pohledu technického provedení, plošná infiltrace vyžaduje pro svou optimální funkčnost jiné prostřední a jinou infiltrovanou vodu než například bodová infiltrace.

3.3.1 Dle infiltrované vody

Předpokladem k možnosti využití řízené umělé infiltrace je nutná dostupnost zdroje vody s dostatečnou vydatností a vhodnou kvalitou. Důležitým faktorem je znalost chemismu podzemní vody v přírodním stavu i ve stavu pozměněném činností člověka. Dále je nutné znát procesy ovlivňování infiltrované vody s horninovým prostředím a již stávající podzemní vodou. Pro umělou infiltraci se dají využít povrchové vody, srážkové vody, upravené odpadní vody, pitné vody (Gale, 2005).

3.3.1.1 Povrchová voda

Podle klimatických podmínek na daném území může být pro umělou infiltraci významným zdrojem povrchová voda. U některých druhů klimatu lze čekat proměnlivost říčních průtoků nebo jejich dočasnost. Naopak v jiných klimatických podmínkách se lze setkat spíše se stálými vodními toky. Tyto toky se vyznačují zejména menším rozptylem průtoků a jsou hydraulicky spojeny s podzemními vodami. Voda ze stálých vodních toků může být odváděna a infiltrována přímo do infiltračních zařízení, a to i na delší vzdálenosti pomocí kanálů. Obvyklou metodou pro umělou infiltraci povrchových vod je břehová infiltrace, ovšem v takových případech se jedná spíše o zlepšování kvality podzemních vod pro jejich další využití jako je například jímání z důvodu levného způsobu předčištění, než zvyšování zásob podzemních vod (Gale, 2005).

Nevýhodou infiltrace povrchové vody je velké množství obsažených sedimentů, které závisí na druhu krajinného pokryvu, turbulenci a energii řeky. Pomalé nížinné toky nesou méně sedimentů než horské toky s velkým spádem a

rychlostí. Největší množství sedimentů ovšem nesou přívalové vody. Pokud by se povrchová voda vsakovala přímo, měly by sedimenty za následek zanášení vsakovacích zařízení. Z tohoto důvodu se před vsakovací zařízení situují usazovací nádrže, které mají za úkol zpomalení infiltrované vody a její sedimentaci před započítáním infiltrace (Gale, 2005).

Povrchová voda v jezerech, která není znečištěna odpadními vodami ani zemědělskými odpadem, povětšinou stagnuje, a je tedy i bez většího množství sedimentů. Z tohoto důvodu se dá tato voda infiltrovat přímo bez jakékoliv úpravy. Naproti tomu voda ze znečištěných řek nebo jezer, zejména pokud obsahuje vysoké procento zemědělských odpadů, by měla být před infiltrací upravena. V některých případech mohou být použity infiltrační nádrže. V těchto nádržích probíhají fyzikální a biochemické procesy, které vedou ke zlepšení kvality infiltrované vody (Huisman a Olsthoorn, 1983).

3.3.1.2 Srážkové vody

Zejména zastavěné oblasti jsou zdrojem velkého množství srážkových vod. Tyto vody se vyznačují velice kolísavým průtokem závisícím na délce a vydatnosti srážek. Pro zajištění rovnoměrného přítoku vody se využívají infiltrační nádrže, zatravněné plochy, porézní dlažby a mokřady v povodí. Kontaminace těchto vod se skládá z chemických látek z povrchu silnic, stavební činnosti, průmyslové znečištění živočišnými odpady, rozkládající se vegetaci, chemikálií používaných pro ošetřování městské zeleně, prosakování odpadních vod a odpadky. Nejvyšší stupeň kontaminace srážkové vody v zastavěných oblastech je v prvotním přívalu vody. Tato voda sebou nese největší množství výše uvedeného znečištění a měla by být odvedena do čistírny odpadních vod. Nejméně znečištěnou vodou v zastavěných oblastech je voda ze střech, kde také dochází v prvotním přívalu k smývání nečistot, ale s malou nebo zanedbatelnou kontaminací. V tomto případě se stále více využívá přímá infiltrace do podzemních vod přes galerie, studně a vrty. Tento proces má velký vliv na navyšování městských zvodní, které jsou často nadměrně využívány. Navíc se jedná o infiltraci často kvalitní vody do mnohdy znečištěných podzemních vod. Tím dochází k navyšování kvality podzemní vody v dané oblasti (Murray a Tredoux, 1998).

Mimo zastavěné oblasti může docházet účinkem srážkových vod k odnosu splavenin z obdělávaných polí a neobdělávaných půd. Tato voda může obsahovat

zbytkové pesticidy, hnojiva, fekálie z chovu hospodářských zvířat, septiků a dalších zdrojů. Pokud by byl tento odtok přímo infiltrován, mohlo by dojít ke ztrátě filtrační schopnosti prostředí a ke zvyšování rizika kontaminace podzemních vod. Z tohoto důvodu je v některých případech zapotřebí předstupu předčištění. Například pomalá filtrace přes pískové filtry. Pokud kontaminace není tak vysoká, mohou se pro zamezení zanášení infiltračních zařízení instalovat zadržovací sedimentační hráze, které mají za cíl zadržení splavenin. Tímto způsobem ovšem není možno snížit obsah rozpuštěných kontaminačních látek, jako je například dusík. Z tohoto důvodu není vhodná přímá infiltrace například pomocí studní. Lepším řešením je pozvolné vsakování plošnou infiltrací půdou nebo písčitémi vrstvami. Tato metoda infiltrace umožňuje odstranění rozpuštěných složek pomocí filtrace a mikrobiologických proces (Gale, 2005).

3.3.1.3 Upravená odpadní voda

Infiltrace upravené odpadní vody do horninového prostředí je proces, který dnešní česká legislativa umožňuje pouze ve výjimečných případech (§ 38 vodního zákona). Ovšem v mnoha státech vyznačujících se polopouštním podnebím, ale také v některých evropských členských státech, je tento proces zcela běžný. (Hrkal, 2010a). Velkou váhu na využití upravených odpadních vod je fakt, že se vyznačují poměrně stálým a předvídatelným objemem v průběhu času a stálou, i když horší kvalitou (Murray a Tredoux, 1998).

Z důvodu nezbytnosti minimalizování jakéhokoliv zhoršení kvality stávající podzemní vody je nutností čištění odpadní vody tak, aby vyhovovala pro infiltraci. Chemické znečištění odpadní vody závisí na tom, je-li tato voda produkována průmyslem nebo domácnostmi. Umělá infiltrace odpadních vod má spíše uplatnění pro koncového uživatele, jako například zemědělství, kde spíše než k zavlažování plodin k přímé lidské spotřebě, bývá využívána k zavlažování krmných plodin. Nicméně s řádnou předúpravou nebo zředěním s přírodní podzemní vodou, může takto využívaná metoda uspokojit i uživatele požadující pitnou vodu (Bouwer, 1996).

3.3.1.4 Pitná voda

Infiltrovaná pitná voda je hlavním zdrojem pro systém Skladování a čerpání zvodní (ASR). Upravená voda s vysokou kvalitou se injektuje do vrtů tak aby došlo k vytvoření souvislé zvodně pitné vody. Takováto zvodně pitné vody může být

vytvořena i v místech s nevhodnou kvalitou vody, kde dochází k jejímu vytěšňování. Tato technika se ukázala být výnosná a ekologicky přijatelná jako řešení nejrůznějších problémů. Aby se využila přebytečná kapacita úpraven pitných vod, jsou obvykle infiltrační systémy stavěny blízko úpraven a zdrojů infiltrované vody (Pyne, 1995).

V oblastech, kde je poptávka po pitné vodě vyšší, než je možnost zisku z obnovitelných zdrojů, jako je například kolem Arabského zálivu, se k zásobení pitnou vodou využívají odsolovací stanice. Aby byla zajištěna dostupnost pitné vody i v případě odstávky odsolovacích stanic, je přebytečná voda infiltrována do zvodni za účelem dočasného vytvoření zásob sladké vody. Vzhledem k vysoké kvalitě odsolované vody a možnosti upravení vody tak, aby se případně minimalizovaly reakce s horninovým prostředím, nedochází k žádným komplikacím s geochemickou kompatibilitou (Mukhopadhey et al., 1998).

3.3.2 Dle porézního prostředí, do kterého probíhá infiltrace vody

Hydrogeologické podmínky jsou jedním z faktorů, na kterých nemalým podílem závisí umělá infiltrace. Určují schopnost zasakovat vodu do nenasycené zóny a schopnost zvodně infiltrovanou vodu přijímat (Gale, 2005).

Hlavními faktory jsou:

- Fyzikální a hydraulické hranice zvodně a stupeň jejího omezení
- Hydrogeologické vlastnosti zvodně
- Hydraulický gradient ve zvodni
- Hloubka zvodně
- Kvalita podzemní vody

Množství vody, které je zvodně schopna uchovávat, závisí na jejích hydraulických vlastnostech, mocnosti a rozsahu. Zvodně s vysokou hydraulickou vodivostí mohou způsobit rychlé šíření infiltrované vody a tím snížit možnosti jejího opětovného použití. Pokud je cílem umělé infiltrace doplnění podzemní vody a zvýšení hladiny toků v regionálním měřítku, může být vysoká hydraulická vodivost i výhodou (Gale, 2005).

Existuje velké množství hydrogeologických prostředí. Pro případ umělé infiltrace se dají rozdělit do čtyř hlavních kategorií (Gale, 2005).

3.3.2.1 Aluvium

Obvykle se nachází v dolním toku povodí v zátopových oblastech. Skládá se z říčních, mořských či jezerních usazenin v mocnostech metrů až kilometrů. Povahově se tyto sedimenty skládají z málo propustných materiálů jako je například jílu, ale i z vysoce propustných materiálů, jako například štěrku. V oblastech trvalých řek, tedy řek se stálým průtokem, jsou hladiny podzemních vod mělké (Gale, 2005).

3.3.2.2 Krystalinikum, horniny s puklinovou porozitou

Krystalinikum je tektonicky porušené podloží tvořené magmatickými, metamorfovanými nebo vulkanickými horninami. Toto prostředí má zpravidla nízkou propustnost, úspěch k využití umělé infiltrace v tomto prostředí spočívá v nalezení dostatečně zvětralé a rozpukané zóny. Zvětralá zóna tvoří v mnoha oblastech právě hlavní a jedinou zvoď. Způsob, kam bude voda infiltrována, má v tomto prostředí velký vliv na efektivitu umělé infiltrace. Je výhodnější infiltrovat vodu tam, kde je nezpevněné aluvium, pomocí vsakovacích nádrží a příkopů. Avšak v případě větších hloubek může být jedinou možností injektáž pomocí vrtů do puklinově propustné zóny (Gale, 2005).

3.3.2.3 Zvodně ve zpevněných pískovcích

Zpevněné pískovce mají porézni nebo puklinové zvodně. Tyto zvodně mohou mít vysoké „úložné“ kapacity a kolektorové vlastnosti. Kapacitu umělé, ale i přírodní infiltrace určuje charakter povrchové zóny. Půda se vyvinula z pískovce a sama o sobě má vysokou infiltrační kapacitu, ale tato infiltrační kapacita může být značně snížena, pokud je půda překryta jemnozrnnými naplaveninami. Pokud je propustnost prostředí příliš vysoká, může docházet k zvýšenému rozptýlení infiltrované vody a k její úplné ztrátě do vodních zdrojů. Proto je u zvodně ve zpevněných pískovcích důležitá jejich celková znalost, aby požadované výsledky infiltrace odpovídaly očekávání a byl zajištěn dostatečný „skladovací“ prostor. Tento „skladovací“ prostor může být bez obav využíván v průběhu vlhkého období a čerpán v období sucha (Gale, 2005).

3.3.2.4 Karbonátové zvodně

Tyto zvodně se velmi podobají pískovcovým zvodním s výjimkou toho, že zde dochází k „ukládání“ podzemní vody ve zkrasovělých zlomech (puklinách), které byly zvětšeny rozpouštěním primárních hornin. Dochází zde k poměrně

vysokému kolísání proudění mezi puklinami a zrny od nízkých hodnot v porézním prostředí vápence až k vysokým hodnotám v krasových vápencích. V prostředí Karbonátových zvodní je reakce na rozptýlení infiltrační vody velmi rychlá a rychlý je tedy i oběh znečišťujících látek. Krasové zvodně mohou být využity pouze tam, kde proudění podzemních vod je omezeno bočně a je přítomno nepropustné podloží. Zde opět platí jako u pískovcových zvodní, že pro využití plného potenciálu zvodně je zapotřebí důkladná znalost hydrogeologických podmínek (Gale, 2005).

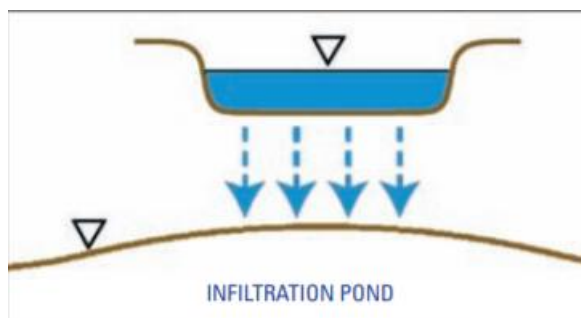
3.3.3 Dle technického provedení

Velké množství druhů provedení umělé infiltrace nevyžaduje složité technologie, a tedy mohou být prováděny jen s malými technickými znalostmi. Mezi ně patří zachytávání dešťové vody a hliněné hráze. Tento fakt s sebou nese výrazná pozitiva jak v možnosti uplatnění, tak i v nenáročnosti na stavbu. Další metody již vyžadují více znalostí fyzikálních, hydraulických, geochemických a mikrobiologických procesu v podmínkách provozu daných infiltračních metod, aby došlo k zajištění jejich optimálních výkonů (Gale, 2005).

3.3.3.1 Plošná infiltrace

Plošná infiltrace najde nejlepší uplatnění v oblastech, kde je zvođen s volnou hladinou a je blízko povrchu. Pro plošnou infiltraci jsou nejdůležitější hydrogeologické podmínky v nenasycené zóně. Při tomto typu infiltrace musí infiltrovaná voda projít nenasycenou zónou, než dosáhne zvodně a míra schopnosti vsakování souvisí právě s nenasycenou zónou a vertikální propustností půdy. Ovlivnění zvodně je zobrazeno na Obrázku 1, kde je znázorněno zvýšení hladiny zvodně pod plošnou infiltrací. Pokud je zdroj vody dobré kvality, tím se rozumí malý a v průběhu roku stálý obsah sedimentů a biologického znečištění, může být plošná infiltrace provozována po celý rok (Balke a Zhu, 2008).

Pro půdy jemné struktury jako například jíly může umělá plošná infiltrace dosáhnout 30 m/rok, 100 m/rok pro písčité půdy, 300 m/rok pro středně čisté písky a 500 m/rok pro hrubé čisté písky (Bouwer, 2002).



Obrázek 1: Schéma působení plošné infiltrace na zvodeň (Gale, 2005)

a) Infiltrace pomocí vsakovacích nádrží nebo pánví

Při využití této metody umělé infiltrace dochází k výparu vody z hladiny. Odpařování z hladiny nádrží se pohybuje v přibližném rozmezí od 0,4 m/rok v oblastech převážně chladného klimatu a 2,4 m/rok v oblastech s převážně teplým klimatem. Z těchto hodnot můžeme usoudit, že nejde o významnou složku vodní bilance. Pokud je ovšem zdroj vody omezený nebo ze sezónních toků a s vysokým obsahem nerozpuštěných látek, stává se odpařování z vodní hladiny a sedimentace důležitým procesem, který musí být omezen na minimum. Sedimentace, zanášení a infiltrační schopnost v poměru k předvídanému podílu odpařování z otevřené hladiny je faktor, který rozhoduje o řízení provozu, a to zásadním způsobem (Gale, 2005).

Naopak pokud vsakovací nádrže využíváme k infiltraci dešťových vod v zastavěných oblastech, kde není kladen důraz na zvýšení zvodně a opětovné využití podzemních vod, může odpařování vody z hladiny způsobit ovlivnění mikroklimatu v dané oblasti a snížením teploty v obdobích horka. Toto snížení teploty a zvýšení vlhkosti může vést ke zlepšování prostředí pro život v zastavěných oblastech (Vacek, 2018).

Infiltrační nádrž může být buď vyhloubená v zemi, anebo se může jednat o plochu půdy, kolem které je vybudován systém hrází, který je schopen zadržovat infiltrovanou vodu dostatečně dlouho na to, aby došlo k infiltraci vody do dna nádrže. V případě jemnozrnného materiálu zvodně dochází k rychlé sedimentaci a ucpávání pórů, což může mít za následek pronikání nerozpuštěných látek nebo vodních řas a jiného organického materiálu do větších hloubek. Toto pronikání má za následek nezvratné zanesení. Pro zpomalení tohoto procesu zanášení lze dno a boky nádrže pokrýt vrstvou středně zrnitého písku cca 0,5 m mocnou. Pro

puklinově propustné zvodně se používá stejná technologie (Huisman a Olsthoorn, 1983).

Nádrž by měla být mělká, aby byla možnost rychlého vypuštění v případě údržby. Dále by hladina vody měla být ovladatelná z důvodu zabránění růstu rostlin nebo hromadění řas (Gale, 2005).

V průběhu infiltrace se na dně a po stranách infiltrační nádrže vytvoří povlak, který má za následek zmenšení infiltrační rychlosti a může způsobit až úplnou ztrátu infiltračních vlastností objektů. Tento problém se dá řešit následujícími způsoby:

- Systém střídání nádrží, kdy jedna nádrž je v provozu a druhá nádrž je sušena (sušení má kladný vliv na likvidaci řas), což s kombinací s čištěním dna obnovuje infiltrační vlastnosti (Gale, 2005).
- Vytvoření hřebenů tak, aby se sedimentace soustředila do žlabů, čímž se zachová infiltrace na stranách hřebenů (Peyton, 2002).
- Mechanické předčištění v podobě usazovacích nádrží. Usazovací účinnost může být navýšena pomocí flokulačních chemikálií (Gale, 2005).
- Pomocí chlorování surové vody se sníží mikrobiální aktivita (Gale, 2005).
- Vytvoření filtru na odstranění nerozpuštěných látek pomocí středně zrnitého písku (Gale, 2005).

b) Kontrolované zaplavení

Tato metoda je jedna z nejstarších metod umělé infiltrace a zavlažování. Metoda kontrolovaného zaplavení má největší uplatnění v oblastech s plochým povrchem, kde lze vodu rozvést pomocí kanálů z řeky a rovnoměrně rozprostřít na velké ploše. Voda tvoří tenkou vrstvičku a proudí minimální rychlostí tak, aby se zabránilo narušení půdního pokryvu. Pokud je v oblasti neporušená vegetace a neporušený půdní pokryv, má infiltrace největší intenzitu (Todd, 1959). Pro správnou kontrolu zaplavování je nutné celou zaplavovanou oblast obklopit hrázemi a protkat příkopy. Při srovnání s ostatními možnostmi infiltrace je kontrolované zaplavování nejekonomičtější řešení, protože nevyžaduje žádné přípravy pozemků. Na druhou stranu pro zavodnění musí být k dispozici velké plochy půdy. Na povrchu zaplavovaného území dochází k usazování velkého množství nerozpuštěných látek. Tento fakt může být pozitivní v případě využívání

zaplavované plochy k zemědělským účelům, kdy usazené sedimenty a kaly mohou zlepšovat kvalitu půdy. Pokud je ale půda používána k zemědělským účelům, je důležité důkladně zvážit, zda je možné půdu opětovně využívat jak na zaplavování, tak i na pěstování plodin, případně je důležitá vhodná volba vegetace (Esfandiari-Baiat a Rahbar, 2004).

c) Doplnková infiltrace ze zavlažování

Přebytek z polí a zavlažovacích kanálů byl v minulosti častým problémem zasolení. Pokud je ovšem tento přebytek ovládn, může se infiltrace takového typu vody stát prospěšnou. Pro příklad lze uvést umělou infiltraci v Indii v povodí řeky Gangy, kde došlo během 10 let ke zvýšení hladiny podzemní vody přibližně o 6 m. Zde byla infiltrována přebytečná voda určená pro zavlažování, která mimo vegetační období nebyla využita. Odhaduje se, že přibližně 60% vody určené k zaplavování rýžových políček slouží k zavlažování a zbytek vody prosakuje do kolektorů. Provedené studie prokázaly, že velké systémy kanálového zavlažování mohou po úpravě doplňovat zásoby podzemních vod (Gale, 2005).

Kvalita podzemní vody je obvykle problematická, pokud se jako zdroj surové vody pro infiltraci používá městská odpadní voda. Komunální odpadní voda se jako zdroj pro závlahy široce užívá v Mexiku, v okolí měst Leon a Mexico City. V oblastech, kde se čerpání podzemní vody využívá k uspokojování potřeby rychle rostoucí populace obyvatel, úrovně podzemních vod klesají. Avšak v oblastech, kde se k zavlažování používají odpadní vody zůstává hladina podzemní vody relativně blízko povrchu. Bohužel tento přínos nemusí vyvážit problémy s kvalitou vody. Odpadní vody mohou obsahovat znečištění mnoha typů. Například v již uvedeném Leonu je významnou složkou znečištění odpad z průmyslu, který má vysoký obsah chloridů. Filtrační schopnosti půdní vrstvy a horninového prostředí mohou snížit obsah znečišťujících látek v odpadních vodách. To pomáhá zabránit šíření znečišťujících látek jako jsou organický uhlík, živiny, těžké kovy a patogeny dále do podzemních vod. Hlavním rizikem pro zmiňované oblasti Mexika je zvyšující se koncentrace chloridů, které se v současné době dostávají do obecních studen, a tím mají za následek riziko požití obyvatelstvem využívajících tyto studně pro svou potřebu (Chilton et al., 1998).

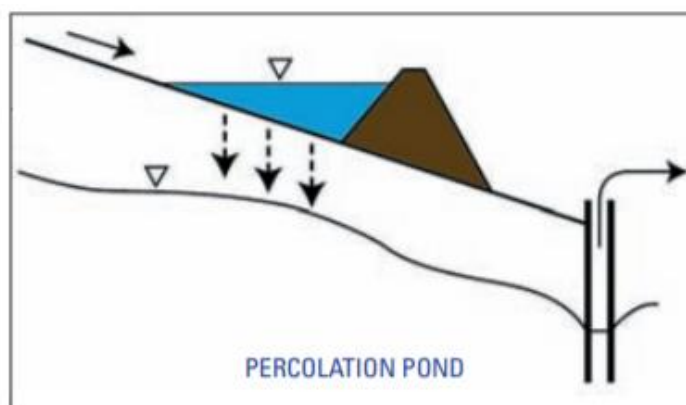
3.3.3.2 Úpravy vodních kanálů

a) Vsakování nádržemi za přehradami, štěrkovými stěnami

Velmi ekonomickým způsobem umělé infiltrace je vybudování hrází napříč vodotečí z materiálu získaného z dané oblasti. Tyto zemní hráze zpomalují průtok v toku a tím umožňují zvýšení efektivity infiltrace (viz Obrázek 2) a snižují půdní erozi (Gale, 2005).

V případě vybudování série po sobě jdoucích hrází dochází k odvodnění a tím ke snížení energetického potenciálu toku hlavně při přívalových a monzunových deštích. Voda je v těchto hrázích zachycena pouze na krátkou dobu, a proto může být půda obdělávána bezprostředně po přívalových deštích nebo monzunech. Tento fakt má za následek lepší využití půdní vlhkosti a s tím související zvýšený potenciál úrody. Správným obděláváním a hospodařením (orání půdy atd.) dochází k dalšímu zlepšení půdy pro následující infiltraci (Gale, 2005).

Pro prodloužení zadržetí vody a rozšíření vlhčené oblasti občasných vodotečí jsou používána různá zařízení. Například v Keni a dalších částech Indie jsou použity povrchové jezy a nafukovací přehrady (Gale, 2005).



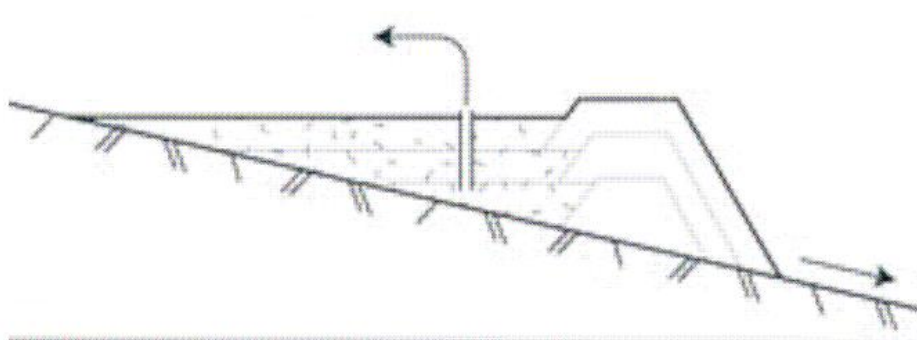
Obrázek 2: Schéma vsakovací nádrže (Gale, 2005)

b) Pískové skladovací nádrže

Nejlepšího využití dosáhnou pískové skladovací nádrže v morfoloicky členitém terénu v aridních podmínkách, kde k nejčastějšímu odtoku dochází vlivem přívalových povodní. Pravidelně se tyto přehrady staví v územích písčitých koryt občasných řek výrazných údolí. Hráz musí být založena přes celou šíři koryta ve skalním podloží tak aby mohla zpomalit přívalové povodně a další průtokové

události. Zpomalením průtokové události dochází k sedimentaci naplavovaného materiálu za hrází (viz Obrázek 3). Výška hráze může být zvýšena po každé následné povodni a její výška tedy určuje povodňový průtok a objem nahromaděného materiálu. Pro odtečení jemnějšího materiálu musí být umožněn dostatečný přetok (Murray a Tredoux, 1998).

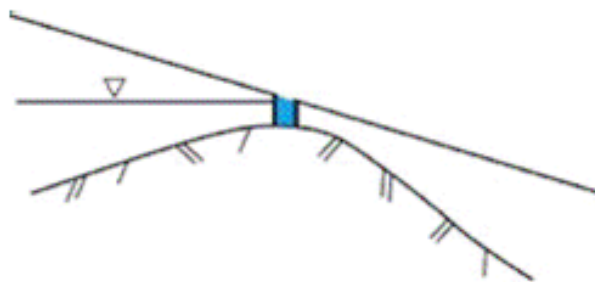
Ideální příklad funkce přehrady spočívá v tom, že místní hornina zvětrává na hrubé písčité zvětraliny, jako například pískovce, granity nebo kvarcity. Postupem času, povodně vytvoří umělou zvodeň. Tato zvodeň umožní zadržené vodě proniknout do podzemní vody dříve, než odeče po proudu. Jímaná voda je k dispozici pro čerpání, ovšem pískové zadržovací přehrady je možné lokalizovat nad propustné skalní podloží, a tak uměle doplňovat původní zvodeň (Gale, 2005).



Obrázek 3: Schéma pískové skladovací nádrže (Hrkal, 2016)

c) Podzemní nádrže

Podzemní (podpovrchové) přehrady je možné použít k zadržení vody v aluviálních zvodních. Pro vybudování těchto nádrží je nejlepší prostředí, kde jsou sporadické toky s vyvýšeninami podloží omezující průtok. V podloží takového území je vybudován příkop přes celé koryto a je vyplněn materiálem s nízkou propustností. Schéma provedení je znázorněno na Obrázek 4. Tento příkop výrazným způsobem omezí odtok podzemní vody. Čerpání podzemní vody je poté možné pomocí studní nebo vrtů (Gale, 2005).



Obrázek 4: Schéma podzemní hráze (Hrkal, 2016)

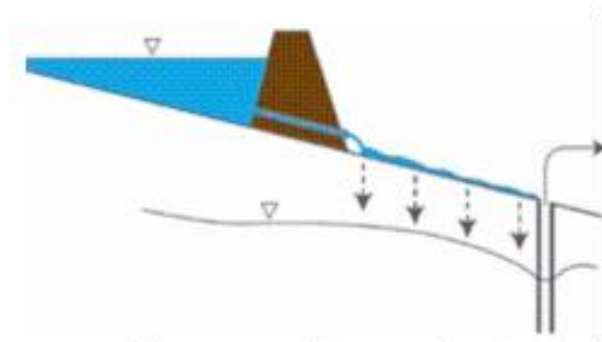
d) Polopropustné přehrady

Voda v přirozeném stavu toku má možnost odtéct mimo infiltrační prostředí dřív než stačí doplnit zvoďeň. Tento problém můžeme vyřešit vybudováním vhodné konstrukce, která usnadní sedimentaci. Zadržaná voda se poté vypouští potrubím po proudu řeky (viz Obrázek 5). Tímto způsobem je umožněno vodě snadnější infiltrování a doplňování zásob podzemní vody (Zeelie, 2002).

Obměnou této konstrukce je výstavba polopropustných přehrad ze štěrkových stěn s potrubím vedoucím skrz přehradu (Kahlowa a Majeed, 2003).

Tento typ stavby primárně zadržuje prudké povodně, zvyšuje usazování sedimentů a umožní prostřednictvím polopropustné stěny uvolnění vody do řečiště toku pod sebou (Gale, 2005).

Příklad polopropustné přehrady je uveden v kapitole 3.4.2 Případové studie v zahraničí.



Obrázek 5: Schéma polopropustné hráze (Hrkal, 2016)

3.3.3.3 Vrty, šachty a zavodňovací vrty

a) Otevřené studny a šachty

Využití těchto staveb je k infiltraci vhodné u lokalit s mělkými povrchovými vodami a tam, kde se povrchové vrstvy vyznačují malou propustností. Pro tyto lokality jsou nevhodné plošné infiltrace z důvodu jejich malé účinnosti (Gale, 2005).

Vybudování infiltračních studen a šachet je poměrně nákladné a infiltrace vyššího objemu vody je omezená. Z tohoto důvodu se stále častěji pro tento typ infiltrace využívají vrty nebo studny, které vyschly z důvodu poklesu hladiny podzemní vody v důsledku nadměrného odčerpávání (Gale, 2005).

Před zahájením infiltrace pomocí vrtů je nutné odstranění nerozpuštěných sedimentačních látek, aby bylo omezeno zanášení pórů, a to zejména pokud se jedná o dešťovou vodu (Gale, 2005).

Pro odstranění problému se zanášením je vhodné následné čerpání vody, což může vypláchnout částice z pórů horniny (odstranění zavlečených jemných sedimentačních částic) a svým způsobem ovlivnit infiltrační kapacitu. Vhodnou variantou je také možnost využít pro čištění vysokotlakou vodu (Gale, 2005).

Při využívání vrtů k umělé infiltraci může být nevhodným následkem pronikání nejen nerozpuštěných látek, ale také chemického znečištění (nitráty, pesticidy a podobně) a bakteriální kontaminace včetně fekálií do podzemní vody (Hrkal, 2010a). Podrobnější řešení této problematiky je uvedeno v kapitole (4.2.1 Kolmatace).

Plošná infiltrace má oproti otevřeným vrtům nespornou výhodu. Voda u plošných infiltrací proniká půdou složenou převážně z náplavy, která může působit jako velmi účinný filtr. Podle tohoto vzoru bývají infiltrační studny nebo šachty vyplňovány filtrem z hrubozrnného materiálu, který lze vyměnit nebo vyčistit. Infiltrační mocnost nepropustných materiálů překrývající cílenou zvodně nesmí přesahovat 15 m (Bouwer, 1996).

Pro efektivní dosažení přímého přístupu k podložní zvodni je zapotřebí proniknout nepropustnou vrstvou. K usnadnění přítoku infiltrační vody do zvodně

by konstrukce šachet měla být koncipována s co nejmenší plochou dna a naopak s maximální plochou stěn (Murray a Tredoux, 1998).

Pro ideální funkčnost objektu by měla být šachta zakryta z důvodu ochrany proti slunečnímu záření, zvěři a lidské aktivitě (Gale, 2005).

Hezký příklad využití otevřené šachty pro umělou infiltraci je projekt v Radžastánu v Indii. (viz Obrázek 6)



Obrázek 6: Budování otevřené šachty pro infiltraci povrchové vody v Radžastánu v Indii (Gale, 2005)

b) Vrtané studny a vrty

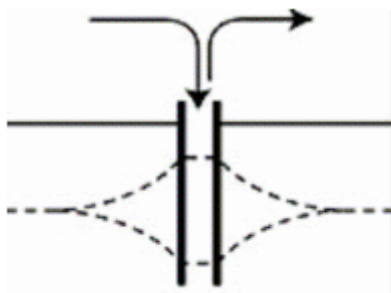
V případech, kdy požadovaná zvodně je překryta mocnější vrstvou s izolačními vlastnostmi je nutné k dosažení této požadované zvodně použít infiltrační vrtané studny nebo vrty. Tyto objekty lze také využít tam, kde jsou vysoké ceny pozemků z důvodu velmi malého požadavku na plochu potřebnou ke stavbě (Pyne, 1995).

Tato technologie využívající hlubší vrty je poměrně složitá a konstrukce se mohou lišit případ od případu. Může se jednat například o vrtání na dně širokoprofilových studní anebo zásyp studny důkladně protříděným filtračním materiálem (Pyne 1995). Metoda zasypání filtračním materiálem omezuje vniknutí nerozpuštěných látek a tak zamezuje rychlé kolmataci stěn a omezuje přítok znečišťujících látek, které by mohly kontaminovat zvodně (Gale, 2005).

V případech, kdy je využito k infiltraci vyvrtaných studní nebo vrtů, je obvykle vyžadována výrazně vyšší kvalita infiltrační vody než u doplňování podzemních vod pomocí plošné infiltrace. Pokud je vrt použit současně pro infiltraci a čerpání (viz Obrázek 7) dojde k výraznému snížení nákladů na provoz

objektu a zároveň se sníží problém s kolmatací, kdy k jejímu omezení dojde v době čerpacího cyklu. Pokud je kladen důraz spíše na využití čisticí schopnosti horninového prostředí a zároveň na prodloužení filtrační doby, je možné infiltrovat vodu do jednoho vrtu a z jiného vrtu poblíž ji čerpat (Pyne, 1995).

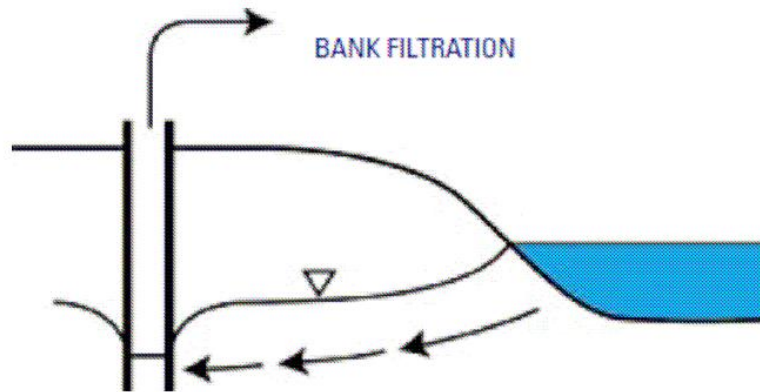
Běžným problémem vrtaných studní a vrtů je kolmatace zvodně nebo filtru vrtu. Kolmatační procesy lze řídit mechanickou úpravou infiltrační vody pomocí filtrace nerozpuštěných látek nebo sedimentací. Přítok infiltrované vody lze regulovat uzávěrem tak, aby byl zajištěn nepřetržitý sloupec vody až na povrch. K omezení srážení železa a dalších látek se běžně využívá chemická úprava vody, nebo jiná úprava, která rovněž zabrání růstu mikrobů (Gale, 2005). Další podrobnosti ohledně problematiky kolmatace a ochrany před ní jsou sepsány v kapitole 4.2.1. Kolmatace.



Obrázek 7: Schéma vrtu využívajícího pro infiltraci i jímání vody (Hrkal, 2016)

3.3.3.4 Břehová umělá infiltrace

Břehová infiltrace je složena z galerie nebo linie vrtů které jsou situovány v malé vzdálenosti od povrchového toku a umístěny rovnoběžně s jeho břehem. V průběhu čerpání vody z vrtů dochází k snížení hladiny podzemní vody v blízkosti řeky nebo jezera a tím nastává proces infiltrace říční vody do zvodně. Znázornění tohoto procesu je na Obrázek 8. Pro zajištění předepsané kvality vody by měla být doba zdržení vody (tj. doba proudění vody z povrchu do vrtu) 30 až 60 dní (Huisman a Olsthoorn, 1983).



Obrázek 8: Schéma břehové infiltrace (Gale, 2005)

Dle O'Hare et al. (1982) jsou pro uspokojující výsledky březní infiltrace rozhodující následné faktory:

- a. Dostatečný zdroj povrchové vody přijatelné kvality.
- b. Dostatečná propustnost dna nebo jezerních sedimentů v blízkosti zdroje povrchové vody.

Pokud je propustnost říčního dna nebo jezerních sedimentů vysoká a zvodně je dostatečně objemná, můžeme z vrtů nebo galerie odebírat velké množství podzemní vody. A to bez nežádoucích účinků na hladinu podzemní vody a i ve větších vzdálenostech od zdroje (Huisman a Olsthoorn, 1983).

Voda získávaná z řek nebo jezer je často znečištěná značným množstvím nerozpuštěných látek. Když voda pronikne do zvodně, je tento jemný materiál odfiltrován a zůstane v podobě tenké vrstvy jemného filtrátu na dně řeky nebo jezera. Tento jev je vítaný, avšak dochází při něm ke kolmataci dna. Ta může dosáhnout až takové míry, že v období nízkého stavu vodní hladiny je nutno sediment mechanicky odstranit (Gale, 2005).

Jako příklad ekonomicky výhodného a udržitelného zdroje může posloužit infiltrace v Drážďanech (Fischer et al., 2005).

Filtrace mezi dunami

Provedení této metody umělé infiltrace spočívá v zaplavení deprese mezi pobřežními písčitémi dunami vodou z řek tak, aby bylo vodě umožněno proniknout do podložních sedimentů a vytvořit zvodně. Tato zvodně může hrát důležitou roli v prevenci vniknutí slané vody, ale stejně tak i k zajištění zdroje vody, která je odebírána dále ve vnitrozemí. Tato metoda je známá už několik staletí a je vysoce

rozvinutá podél pobřeží Nizozemska, kde jako zdroj vody pro infiltraci slouží řeky (viz Obrázek 9). Jako další zdroj může sloužit srážková voda, a to jak přívalové vody, tak i upravená městská odpadní voda. Hlavní účel této metody infiltrace je zlepšení kvality vody pocházející často z nekvalitních zdrojů (Gale, 2005).



Obrázek 9: Doplnování podzemní vody v dunových oblastech v Nizozemsku (Royal Haskoning DHV, © 2020)

3.3.3.5 Zachytávání dešťové vody

Zachytávání dešťové vody je ve své podstatě sběr srážkové vody. Jestliže si to žádá kvalita vody musí být upravena a následně se může použít k zavlažování. Pokud se objem vody nevyužije k zavlažování nebo dalším potřebám dojde k infiltraci (Gale, 2005).

Dle Gerges et al. (1996) kvalita vody vhodná pro infiltraci a její opětovné využití musí splňovat tato kritéria:

- Nesmí způsobovat nevratnou kolmataci.
- Nesmí narušit stávající nebo potenciální možnost využití podzemních vod.
- Kvalita vody, kterou následně budeme čerpat musí splňovat podmínky na její zamýšlené využití.

Střešní lapače dešťové vody a infiltrace v urbanizovaném území

Zachytáváním srážkové vody ze střech lze uchovat vodu buď pro přímou spotřebu nebo pro navýšení hladiny podzemní vody. Pro využití této metody je zapotřebí odklonit stok dešťové vody připojením okapového potrubí ze střech buď do již stávající studny nebo do jiného infiltračního objektu. Aby nedocházelo ke

kontaminaci dešťové vody z okapové roury, střešní krytiny a jímací nádrže, musí být zhotoveny z chemicky inertních materiálů, jako jsou například plasty, hliník, pozinkované železo nebo sklolaminát. Pokud je dešťová voda využívána k přímé spotřebě nebo k přímé infiltraci je zapotřebí, aby se počáteční dešťová voda nechala odtéct do odpadu. Voda s sebou vezme i nahromaděné nečistoty z oblasti sběru (střech) a svodů (okapů). Hlavním zdrojem znečištění dešťových vod v urbanizovaném území jsou znečištěné ovzduší, ptačí a zvířecí výkaly a hmyz. Pro snížení bakteriální kolmatace infiltračního zařízení je třeba udržovat střešní plochy a svody v čistotě (Gale, 2005).

3.4 Vybrané případové studie

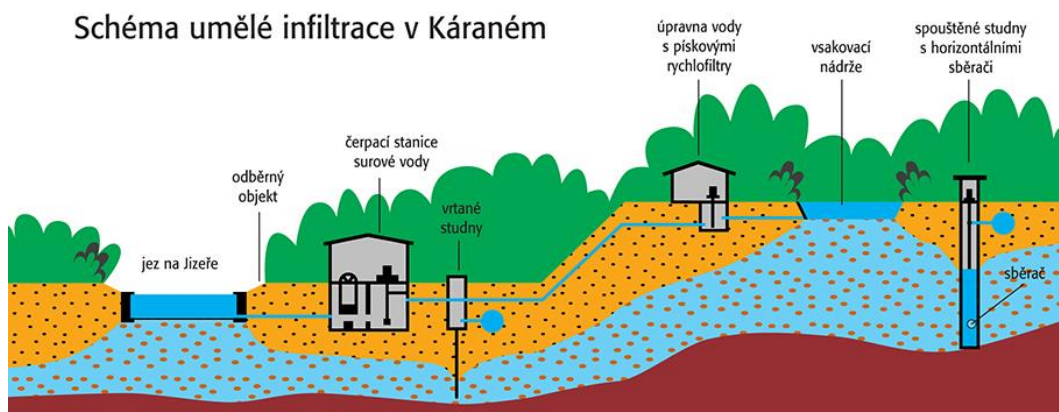
V následujících kapitolách jsou uvedeny příkladové studie z České republiky i ze zahraničí.

3.4.1 Případové studie v ČR

3.4.1.1 Vodárna v Káraném

Úpravna vody v Káraném je nejstarší ze tří úpraven vody zásobující hlavní město Praha. Do provozu byla úpravna uvedena v roce 1914. V té době se jednalo pouze o zdroj vody z břehové infiltrace o vydatnosti 900 l/s a o zdroje artéské o vydatnosti 50 l/s. Vybudování umělé infiltrace v Káraném proběhlo až v letech 1965-1969 v rámci akce „Rozšíření vodárny v Káraném“. Toto rozšíření mělo za úkol téměř zdvojnásobení objemu dosavadní výroby pitné vody. Stavba byla zahájena 1.1.1965 výstavbou příjezdové komunikace v celkové délce 5 km a odlesněním celého areálu. V září 1968 byla do provozu uvedena I. etapa stavby o vydatnosti zdrojů 500 l/s. Zbývající část byla dostavěna a spouštěna postupně do roku 1969 (Herčík, 2008).

Umělá infiltrace vodárny v Káraném má několik částí, jejich umístění znázorňuje Obrázek 10:



Obrázek 10: Schéma umělé infiltrace v Káraném (Vodárna Káraný a.s., © 2020)

a. Jez na Jizeře

Jez slouží k zajištění minimální hladiny pro odběr vody. Jedná se o pohyblivý jez o dvou polích. Hradící části jsou segment a jednostranně ovládaná klapka viz Obrázek 11. Na levém břehu Jizery je umístěno odběrné zařízení, které je opatřeno hrubými a jemnými česlemi. Před toto zařízení musela být instalována plovoucí ponorná stěna sloužící k zachycení plovoucích nečistot. Jemné česle byly dodatečně opatřeny automatickým strojním stíráním z důvodu častého zanášení listím v podzimních obdobích a zanášení ledovou tříští v zimních obdobích. Při nedostatečném průtoku česlemi dochází k snížení hladiny v jímkách čerpadel pod minimální hladinu. To vede k častým výpadkům čerpací stanice. Namrzání česlí se doposud nepodařilo zcela vyřešit, a to zvláště při chodu ledové tříště. Z tohoto důvodu je v období chodu ledové tříště nutno úpravnu vody vyřadit z provozu (Herčík, 2008).



Obrázek 11: Jez Otradovice, řeka Jizera ř. km. 4,7 (Mapy.cz., © 2020)

b. Čerpací stanice

Voda vtéká do čerpací stanice gravitačně z odběrného zařízení. Pomocí čerpadel pokračuje dál na horní terasu, do úpravný vody. Čerpací stanice je osazena dvěma čerpadly o výkonu 1450 l/s respektive 400 l/s při výtlačné výšce 18,5 m. Provoz čerpadel je automatický se zastavením chodu při nízké hladině v jímkách, zvýšené teplotě ložisek a dalšími možnými problémy (Herčík, 2008).

c. Předúprava vody Sojovice

Předúprava čerpané vody probíhá na otevřených rychlofiltrech s celkovou filtrační plochou 1440 m² a filtrační rychlostí 3,6 m/hod. Při funkci rychlofiltrů dochází k jejich zanášení a musí být čištěny. Čištění rychlofiltrů, tzv. praní, je zde automatické. Praní filtrů je odvozené od nastavené tlakové ztráty jednotlivých filtrů. Prací voda odtéká do laguny pracích vod umístěné na břehu Jizery a po odsazení přepadá zpět do Jizery. Filtrovaná voda je dále čerpána do vsakovacích nádrží (Herčík, 2008).

d. Vsakovací nádrže

Z důvodu místních geologických podmínek bylo rozhodnuto o umístění vsakovacích nádrží do dvou řad v celkovém počtu 15 kusů. Celková vsakovací plocha na umělé infiltraci v Káraném činí cca 70 000 m². Každá vsakovací nádrž má ve středu postaven napouštěcí objekt ovládaný dálkově z velínu umístěného na předúpravě vody. Tímto objektem se reguluje velikost přítoku vody do nádrže. Systém přepadových hran v napouštěcím objektu zajišťuje přetlakovou výšku pro vodoměr a zabrání vyprázdnění nádrže do níže položených, pokud dojde k výpadku čerpání. Na obou koních nádrže jsou vybudované sjezdy pro technickou údržbu používané při čištění a doplňování písku. Čištění nádrží se provádí sejmutím vrchní vrstvy písku o tloušťce 3–5 cm (viz Obrázek 12) a odvezením na skládku. V průměru kolem pěti let se musí odebíraný písek doplňovat pískem z vlastní pískovny. Vlivem obnovy svrchních vrstev dna vsakovacích nádrží se proces kolmataci nezanáší do větších hloubek. To vede k menšímu znehodnocení infiltračního lože. Pokud by ale přece jenom došlo k znehodnocení infiltračního lože, a tedy i ke snížení vydatnosti celého systému, nabízí se možnost výstavby nových vsakovacích nádrží podél stávajících při zmenšení vzdálenosti mezi místem vsaku a jímání. V dnešním provozu se infiltrovaná voda jímá cca 200 m od vsakovacích nádrží jímacím zařízením různého typu (Herčík, 2008).



Obrázek 12: Umělá infiltrace Kárané, odstraňování horní vrstvy filtrátu (Vodárna Káraný a.s., © 2020)

Důležitým úkolem Úpravny vody v Káraném je zajistit dostatečné množství vody v daném časovém období s minimálními ztrátami v podzemí. Nelze však předem stanovit délku a četnost přerušení odběru surové vody. Hlavním důvodem přerušení může být vysoký zákal, následek čistotářských havárií, popřípadě technologických poruch. Proto je nutné udržovat zásoby vody v podzemí vyšší i za cenu větších ztrát únikem do okolí. Tyto ztráty se ovšem pohybují pouze kolem 20 % (Herčík, 2008).

e. Radiální studny

Jímání horizontálními sběrači bylo voleno tam, kde se předpokládána hladina nachází v hloubce 10–13 m. Jedná se o studny o průměru 4 m se dvěma radiálními sběrači, umístěnými kolmo na směr proudění podzemní vody. To znamená přibližně rovnoběžně s řadou vsakovacích nádrží. Čerpacích stanic nad radiálními studnami je 24, z toho do sedmi jsou zaústěny násoskové řady (Herčík, 2008).

f. Vrtané trubní studny

Vrtaných studní je v areálu umělé infiltrace v Káraném 165 kusů. Jsou napojeny na 7 násoskových řadů a jsou zaústěny do radiálních studní (Herčík, 2008).

Doba zdržení vody v podzemí

Vzdálenost 200 m mezi vsakovací nádrží a jímacím objektem je navržena dle projektu tak, aby zdržení vody bylo 30 dnů. Ve většině případů je ale zdržení větší, a to 50-60 dnů. S největší pravděpodobností je to způsobeno nespojitým vsakováním. Vlivem častého přerušování provozu a z toho vyplívající menší spády hladiny, než se předpokládalo (Herčík, 2008).

Kvalita vody

Čistota vody ve studnách umělé infiltrace je výhradně závislá na kvalitě vody dodávané do vsakovacích nádrží. V horninovém prostředí nedochází k podstatným změnám obsahu rozpuštěných látek. Voda produkovaná umělou infiltrací v Káraném je velmi kvalitní a vyhovuje limitům vyhlášky 252/2004 Sb. ve všech parametrech (Herčík, 2008).

3.4.1.2 Jímací území Tlumačov

Jímací území Tlumačov je situováno v části údolní nivy řeky Morava mezi Tlumačovem a Otrokovicemi. Od roku 1966 je průtok na řece Morava řízen Bělovským jezem, který zde udržuje hladinu v rozmezí 183,9 až 184,6 m n. m. V úseku nad jezem je situováno jímací území, ze kterého probíhá infiltrace z řeky do Hg kolektoru kvartérní fluvialní zvodně. V minulosti byly realizovány pokusy s využitím umělé infiltrace včetně vybudování infiltračních zářezů a jímacími vrty, které ale již dnes nejsou využívány. V dnešní době je prostor jímacího území Tlumačov využíván pouze pro propojení řeky Moravy a Kapřiska (slepé rameno) z něhož zákonitě dochází rovněž k infiltraci (Hrkal, 2010a).

3.4.2 Případové studie v zahraničí

3.4.2.1 Vyšetřování chování vybraných léčiv v podzemní vodě po infiltraci čištěné odpadní vody

Studie se zabývá situací, kdy se na venkově v místech bez vhodných zdrojů vody využije umělá infiltrace jako způsob dočištění předčištěné odpadní vody z málo vytižených čistíren odpadních vod. Podzemní voda byla testována každé 2 měsíce po dobu 14 měsíců. Kromě běžných parametrů (živiny, uhlík a bakterie) byly testovány vzorky na farmaceuticky aktivní substance. Prvním příkladem jsou kyseliny jako diklofenak (analgetikum), ibuprofen (analgetikum) a bezafibrát (hypolipidemikum). Tyto kyseliny se snadno odstraňují již během čištění odpadních vod a podléhají dalšímu odstranění při infiltraci. Účinně lze snížit koncentraci těchto látek až o několik mikrogramů na litr. Druhým příkladem jsou neutrální látky jako je diazepam (sedativum) a karbamazepin (antiepileptikum). Tyto látky během infiltrace nevykazují žádné odstranění a její koncentrace zůstává stabilní jak při čištění odpadních vod, tak i po následné infiltraci. Posledním příkladem jsou polycyklické látky tonalid a galaxolid (syntetická pižma). Tyto látky se dají odstranit při čištění odpadních vod, ale nevykazují žádné další snížení koncentrace po infiltraci. Toto chování může být způsobeno nedostatečnou koncentrací adsorbentů v podzemní vodě (Kreuzinger et al., 2004).

Výsledkem obecného pozorování všech těchto látek je, že jejich koncentrace dosažená po 75 dnech zdržení vody v podzemí zůstává stabilní i po zbytek pozorované doby. Z důvodu vzorkování každého druhého měsíce nelze určit, jestli ke stabilizaci nedochází dřív (Kreuzinger et al., 2004).

3.4.2.2 Trvalá udržitelnost břehové filtrace v Drážďanech v Německu

Od roku 1875 je břehová infiltrace podél Labe v Drážďanech důležitým zdrojem pro veřejné i průmyslové zásobování vodou. Infiltrace je vyvolávána čerpáním vrtů a instalací drenážního potrubí (Fischer et al., 2005).

Hlavním tématem studie je silné znečištění Labe, ke kterému došlo v 80. letech minulého století. Znečištění způsobily organické látky z celulózek a papíren, které se nacházely výše proti proudu řeky. Po zlepšení kvality vody v 90 letech minulého století se nevyskytly žádné případy se zanášením řečiště a ani s nepříjemnou chutí a zápachem pitné vody (Fischer et al., 2005). Kvalita a úprava surové vody se optimalizuje řízením specifických poměrů břehového filtrátu a podzemní vody. Dále byl snížen objem čerpané vody a tím bylo docíleno prodloužení doby zdržení vody. Zároveň nebyly zjištěny žádné známky snižování kapacity kolektoru (Grischek, 2003). Studie porovnává historická a nedávná data z kterých vyplývá, že břehová infiltrace v Drážďanech je hospodářsky udržitelný zdroj vody (Fischer et al., 2005).

3.4.2.3 Polopropustné přehradý pro umělou infiltraci v Balučistánu

V pakistánském Balučistánu je jediným spolehlivým zdrojem sladké vody podzemní voda. V posledních dvaceti letech došlo k mnohonásobnému navýšení spotřeby vody v důsledku rychlého růstu obyvatelstva a průmyslu. Množství čerpané vody výrazně převyšuje přirozenou infiltraci, což má za následek vysychání mnoha kopaných studní, pramenů a drenáží. Situace se zde nadále zhoršila katastrofálním suchem v letech 1998–2002 (Kahlow a Majeed, 2003).

Pákistánská rada pro výzkum vodních zdrojů realizovala v Balučistánu koncept výstavby a provozu polopropustných hrází. První polopropustná hráz byla postavena v roce 2002 v Margatu asi 35 kilometrů od města Quetta. Pomocí piezometrů byl následně monitorován vliv hráže na podzemní vodu (Kahlow a Majeed, 2003).

Pro stavbu nízkonákladových polopropustných a zadržovacích hrází byly zvoleny jako stavební materiál balvany, dlažební kostky, kameny a hrubozrné šterky. Tento materiál je k dispozici v řečišti potoků a řek nebo v jejich okolí. Stavební materiál je stavěn v drátěné síti v 5 stupních do celkové výšky 4,9 m. Trubky pro vypouštění přebytečné vody nevyužité pro infiltraci z přehrady jsou

uloženy do druhého a čtvrtého stupně shora. Koruna hráze slouží jako přepad a navazující hráze jsou konstruovány tak, aby zabránily erozi (Kahlowan a Majeed, 2003).

Přestože kvantitativní dopad polopropustné hráze bude znám až za nějaký čas, její princip je oceňován vodohospodáři a zemědělci už nyní. Konstrukce hráze přinesla možnost řady inovací. Například na návodní stranu hráze byla umístěna nastavitelná fólie, která umožňuje delší dobu zadržet vodu před jejím pomalým vypouštěním (Kahlowan a Majeed, 2003).

Spolu s hrázemi byly během projektu zavedeny další opatření. Mezi ně patří důsledná ochrana a úplná kontrola pastevectví, důsledná správa povodí se zaměřením převážně na snížení suspendovaných částic v nádržích a posílení přirozené infiltrace srážek (Kahlowan a Majeed, 2003).

3.4.2.4 Umělá dotace kolektoru Baghmelak v provincii Chúzestán v jihozápadním Íránu

Zemědělská planina Baghmelak je relativně plochá. Podzemní voda je zde často jediným zdrojem dodávek vody pro účely zemědělství i pitné vody. Existuje zde pouze jedna použitelná nádrž podzemní vody. S nástupem mechanických čerpadel se zde začaly přetěžovat zdroje podzemní vody a docházelo k jejich znehodnocování. Řízená dotace kolektoru je zde tudíž zajímavou alternativou a mohla by výrazně zpomalit trend snižování podzemní hladiny. Byly zahájeny studie, které obsahovaly povrchové i podpovrchové průzkumy, dostupnost zdrojů podzemní vody, kvalitu vody, infiltrační kapacitu a hydrodynamické parametry. Ze studií vyplývá, že v oblasti je jen minimální počet lokací, které by byly vhodné pro umělou dotaci. Z těchto lokací byly vybrány tři, které nejvíce vyhovovaly a byly zde navrženy dva druhy umělé dotace, a to infiltrační nádrž s průměrnou hloubkou 2 m a ochranné hráze se vzduším 3,35 m (Kalantari et al., 2010).

Výstavba těchto opatření vedla k navýšení celkového ročního objemu dotační vody o cca 2,2 milionů m³ a vedlejším přínosem je zmírnění záplav (Kalantari et al., 2010).

4 Přehled problémů a pozitiv umělé infiltrace

4.1 Hlavní výhody umělé infiltrace

Výčtem těchto výhod jsou:

- možnost uskladnění vody
- infiltrace přívalových vod
- schopnost vytlačit nežádoucí podzemní vodu
- přirozený proces filtrace vody
- snížení nutnosti nákladných rekonstrukcí kanalizace a ČOV
- snížení nákladů na protipovodňová opatření
- zvýšení ochrany povrchových vod z kvantitativního i kvalitativního hlediska,
- zvýšení obnovy zásob podzemních vod
- zásobování vodních toků v době sucha
- zlepšení mikroklimatu v urbanizovaných oblastech
- zlepšení městského prostředí, estetického vzhledu a biodiverzity

4.2 Hlavní problémy při umělé infiltrace a jejich řešení

Výčtem těchto problémů jsou:

- kolísavost kvality surové vody pro infiltraci
- menší počet vhodných míst
- nemožnost odstranit větší množství rozpuštěných látek
- ztráta vody v podzemí (hydraulicky otevřená infiltrace)
- nedokonalé odstranění léčiv ve vodě
- nutnost úpravy surové vody
- kolmatace

4.2.1 Kolmatace

Kolmatace je jedním z nejdůležitějších problémů umělé infiltrace.

Obecně můžeme kolmataci definovat jako proces postupného utěsňování kolektoru v oblasti relativně blízké vsakovacího objektu. V ní se odehrává většina procesů kolmatace, které zásadním způsobem ovlivňují infiltrační schopnost objektu (Hrkal, 2010a).

Kolmatace je všeobecný problém zanášení porézních materiálů, kterými proudí odpadní, průsakové a srážkové vody (Mlejnská, 2013). Je to proces snižování propustnosti porézního prostředí, do kterého je voda infiltrována (Siriwardene et al., 2007). Jedná se o shrnutí fyzikálních, chemických a biologických procesů, díky kterým dochází k snižování propustnosti filtračního lože, ale také působí na přenos kyslíku obsaženého ve vzduchu do vody. Kvůli těmto skutečnostem dochází u systému k poklesu schopnosti čistit odpadní vody (Kayser a Kunst, 2005).

Postupně dochází k vytváření vrstvy s menší hydraulickou vodivostí, čímž se snižuje průtok filtrované vody. Tato vrstva vzniká akumulováním jak organických, tak i anorganických suspendovaných pevných látek, srážením karbonátů, oxidů, popřípadě hydroxidů železa a manganu vznikajících při interakci vod s horninovým prostředím nebo biologickými procesy, jako je například růst řas (Fischer et al., 2005).

Složitost této problematiky spočívá v nesnadném oddělení jednotlivých jevů způsobujících zanášení objektu a nemožnost tyto jevy samostatně studovat z důvodu vzájemného ovlivňování (Fischer et al., 2005).

Kolmatace má určující vliv na volbu technického typu zasakování a jímacích objektů, účinnost, technickou a technologickou náročnost celkového provedení a z toho se odvíjející ekonomičnost celého řešení (Hrkal, 2010a).

4.2.1.1 Hydraulické účinky na kolmataci

Jeden ze zásadních parametrů kolmatace při umělé infiltraci z hydraulického hlediska je stanovení rychlosti infiltrace, průsakového množství, délky trvání jednotlivých zasakovacích cyklů a velikost zvyšování hydraulických odporů jako funkce času. Všechny výše uvedené parametry mají podíl na postupném rozvoji kolmatace. Hydraulické účinky působící na kolmataci jsou pouze důsledkem fyzikálních, chemických a biologických procesů probíhajících mezi infiltrovanou vodou, již stávající podzemní vodou a horninovým prostředím ve kterém infiltrace probíhá (Hrkal, 2010a).

Pastuszek (1979; 1985) zjistil, že proces kolmatace se skládá ze tří fází:

1. Fáze zanášení pórového prostoru daná rozdílem mezi celkovou a efektivní pórovitostí (zanášení mrtvého prostoru)

2. Fáze postupného snižování hodnoty efektivní pórovitosti
3. Fáze snížení efektivní pórovitosti pod hranici, kdy výška hladiny nad filtrátem již prakticky přestává stačit k překonání odporu kapilárního tlaku pro vstup vody do filtrátu.

Jedlička et al. (1984) pomocí indexu filtrability popisuje průběh vzestupu hladiny a růst tlakových ztrát při kolmatačním cyklu. Skutečnou hodnotu kolmatačního cyklu stanovuje na základě rozdílnosti hodnot indexu filtrability.

$$I = \frac{\ln(H) - \ln(h)}{V}$$

Kde:

- H - tlakový výška v kolmatátoru
- h - tlaková výška vody v piezometru
- V - objem proteklé vody kolmatátorem
- I - index filtrability

4.2.1.2 Chemické pochody při kolmataci

Chemické pochody při kolmataci probíhají především u látek, u kterých se mění podmínky jejich stability. Jedná se především o různé formy železa (Fe), mangan (Mn), dusík (N), dále se jedná také o látky jejichž obsah je závislý na karbonátových rovnováhách a v neposlední řadě o obsah rozpuštěných plynů, a to zejména kyslíku. Většina chemických pochodů probíhá ve vtokové zóně (Pastuszek, 1985).

Dle Massmann et al. (2005) změny chemismu ve vtokové zóně zapříčiňují zejména:

- změna oxidačně-redukčních podmínek (Eh), která má velký vliv na stabilitu přítomných forem Fe a Mn,
- změna parciálního tlaku CO₂,
- vyrovnání chemické rovnováhy mezi vlastní podzemní a infiltrovanou vodou.

Dále mohou ovlivňovat chemické pochody při kolmataci mikrobiologické složky, a to zejména významné ovlivnění průběhu ryze chemických pochodů (Massmann et al., 2005).

Pochody způsobené změnou oxidačně-redukčních podmínek jsou poměrně velmi rychlé a jejich průběh se koncentruje ve vtokové zóně, k ostatním změnám (pokud abstrahujeme od účasti mikrobiální složky) dochází pomaleji a v celém prostoru mezi vsakovacím a jímacím objektem. Oxidačně-redukční pochody v transienční zóně mohou být zanedbatelné. Na významu tyto pochody opět nabývají až v oblasti výtoku z infiltračního pole, kde se uplatňují při kolmataci jímacích objektů. (Jde prakticky o stejný případ jako u infiltračních objektů.) Transformace obsahu biogenních prvků (N, P a C), popřípadě iontů obsahujících tyto prvky, je do určité míry spojena s rozvojem organismů a jejich metabolickou aktivitou (Hrkal, 2010a).

4.2.1.3 Mikrobiologické pochody při kolmataci

Mikroorganismy, a to především řasy a sinice tvoří na rozhraní sedimentu a vody biofilm. Exopolymer vytvořený biofilmem má vliv na degeneraci hydraulických vlastností infiltračních nádrží (Gette-Bouvarot et al., 2014).

Na filtračním okolí lze aplikovat teorii kontinuální kultivace mikroorganismů v biologickém průtočném kultivátoru. Z této teorie plyne, že celková transformace obsahu mikroorganismů je určena hodnotou jejich specifické růstové rychlosti (v této hodnotě je zahrnuta i závislost mikroorganismů na složení živného substrátu – tedy kvalita infiltrované vody), dále hodnotou úbytku mikroorganismů rozkladem a velikostí průtoku Q při stálém objemu vtokové oblasti (Hrkal, 2010a).

Několika provedenými zkouškami se výše uvedené závislosti potvrdily. Dále se prokázalo, že k největším změnám v počtu mikroorganismů dochází v hloubkách do 40-50 cm filtračního média (tedy v zóně, kde dochází k největším změnám hodnot koeficientu filtrace a také k největším změnám v množství látek obsahující biogenní prvky N, P a C) (Jedlička et al., 1984; Pastuszek, 1979).

Změny v obsahu mikroorganismů a změny jejich aktivity výrazně ovlivňují proces kolmatace především působením železitých a manganových bakterií. Železité bakterie zpracovávají ionty Fe^{2+} , které za přítomnosti kyslíku oxidují pomocí enzymu oxidázy. Ionty Fe^{2+} jsou následně vylučovány do infiltrovaného roztoku. Z důvodu jejich omezené stability dochází k vysrážení a vylučování z roztoku a následnému zanášení filtračního média (Hrkal, 2010a).

4.2.1.4 Obnova objektů pro umělou infiltraci

Problematika kolmatace zasakovacích objektů představuje jeden z největších problémů umělé infiltrace a u infiltrace pomocí vrtů může vést až ke kolmatačnímu kolapsu. To znamená, že dojde k zanesení infiltračního média na takovou úroveň, že skrz toto médium bude probíhat jen minimální infiltrace. (Woessner, 1998). Z tohoto důvodu je při návrhu infiltrace věnována velká pozornost technice obnovování hydraulické funkce zasakování u objektů. U zasakování pomocí nádrží či van dochází k zanešení filtrační vrstvy v rozmezí 50–100 cm, a proto je řešením odstranění horní filtrační vrstvy v daném rozsahu pod dnem nádrže a nahrazení novým filtračním médiem (Hrkal, 2010a).

U infiltrace v řečišti dochází dlouhodobými procesy k zanášení během období malého průtoku a během záplav s dostatečnou hydraulickou přenosovou energií k narušování a erodování řečiště. To má za následek zvyšování hydraulické vodivosti řečiště a následně i infiltrace (Fischer et al., 2005).

Složitější problém nastává u regenerace vsakovacích vrtů, kde obnova hydraulických parametrů musí být provedena v poměrně širokém okolí. Jedná se o okolí dosahu kolmatace vrtu (v průměru 3-6 metrů okolo vrtu). Pro tento účel se používá technologie regenerace vrtů pomocí hydraulických rázů, která se objevila již v první polovině 20. století. Ta ovšem neumožňovala obnovení hydraulických parametrů v širším okolí vrtů a soustřeďovala se pouze na čištění vtokových otvorů do vrtu (Hrkal, 2010a). Tato technologie pracuje na principu vytvoření hydraulických rázových vln, které způsobují kavitační efekt. Kavitačním efekt následně vytváří hydraulickou vlnu sání. To umožní uvolnit sediment v objektu infiltrace a tento sediment následně vyčerpát (Lidařík s.r.o., © 1993). Až v průběhu 70. let 20. století došlo k vyvinutí technologií regenerace založené na kombinaci dvou složek: hydraulických rázů a chemické regenerace (Hrkal, 2010a). Chemická regenerace vrtů je technologie, při které se aplikuje do vrtu minimálně (5% silný) kyselý roztok. Nejčastějším základem roztoku je kyselina citrónová. Před aplikací roztoku je nutné změření pH. Poté se aplikuje roztok a nechá se 24 hodin působit tak, aby došlo k uvolnění (rozpuštění) usazenin (železa, manganu, vápenatohořečnaté soli atd.). Po uplynutí této doby se voda s rozpuštěnými usazeninami z vrtu čerpá tak dlouho, dokud nedojde k navrácení pH na původní hodnotu (Lidařík s.r.o., © 1993; TvS-centrum, © 2020; Voda pitná, © 2020).

Kombinací chemické regenerace a regenerace pomocí hydraulických rázů se zvýšil dosah účinku obnovení vrtu až na vzdálenost 5–15 m. Touto technologií byla negativa umělé infiltrace pomocí vrtů značně omezena (Hrkal, 2010a).

Novou technologií regenerace vrtů se zabývá projekt ULTRA – Zařízení pro regeneraci vodárenských jímacích vrtů na principu ultrazvuku. Tento projekt se zabývá návrhem konstrukce a komplexním testováním technologie využívající k regeneraci vrtů ultrazvuk (FŽP ČZU v Praze, © 2019). Tato technologie pracuje na stejném principu jako rázová regenerace vrtů s tím rozdílem, že místo stlačeného vzduchu (kapaliny) používá k vytvoření kavitačního efektu ultrazvuk. Výhodou ultrazvukové metody je efekt rozštěpení velkých molekul, který způsobuje i likvidaci bakterií ve studni (Vodní zdroje a.s., © 2016).

5 Diskuse

Jednotlivé druhy infiltrací zmíněných v textu jsou na základě jejich výhod a nevýhod vhodné k různému využití. Tuto myšlenku potvrzuje i výčet kvalitativní a kvantitativních souborů otázek, které uvádí Hrkal (2016). Například jestli oblast má dostatečnou akumulační schopnost, v jaké hloubce je uložena, jaká je biogeochemická interakce mezi vodou, atmosférou a horninovým prostředím, zjištění vydatnosti a kvality zdroje vody atd. Přikláním se k názoru, že je nutné tyto otázky vyřešit, aby se dalo efektivně rozhodnout, jakou technologii a na jakém území použít. Tak, aby bylo dosaženo požadované kvality jímané vody.

Hlavní nevýhody umělé infiltrace uvádí Gale (2005) jako ztráty infiltrované vody, možné zhoršení kvality podzemních vod zasakovanou vodou, nutnost úpravy surové vody, dále Kreuzinger et al. (2004) uvádí nedokonalé odstranění rozpuštěných látek jako například léčiv. A nakonec Hrkal (2010a) popisuje kolísavost surové vody a problematickou kolmataci. Všechna tato negativa je důležité zvážit a posoudit, zda převyšují pozitiva nebo jestli je možné je nějakým způsobem eliminovat. Například Bouwer (1996) uvádí u vsakovacího vrtu nespornou nevýhodu oproti plošné infiltraci, kde při infiltraci dochází k pronikání skrz půdu složenou převážně ze sedimentů, které fungují jako účinný filtr. To vede k logickému řešení, že v místech, kde nevyžadujeme vysokou kvalitu podzemní vody lze vrt využít nebo jak uvádí Bouwer (1996) musíme zajistit dostatečně kvalitní surovou vodu pro umělou infiltraci.

Je zajímavé, že zmíněný problém kolmatace se dá rozdělit na dvě části. První část, jak uvádí Gale (2005), je preventivní přístup za pomoci usazovacích nádrží, kladení středně zrnitého písku na dno nádrží, předčištění, ozónování nebo chemické úpravy surové vody. Druhá část, kterou uvádí Hrkal (2016) je reagovat na již existující kolmataci pomocí technologie regenerace vrtů, odstranění vrchní části filtračního média v sakovacích nádržích atd. Já se ztotožňuji s názorem Huisman a Olsthoorn (1983), že prevenční opatření má za úkol pouze zpomalit vytváření kolmatace, ale nedokáže ji plně zastavit. Dle Hrkala (2010a) reakce na již vytvořenou kolmataci řeší tento problém pouze na omezenou dobu, než se bude muset opět kolmatované filtrační médium odstranit. Hezký příklad využití obou způsobů řešení problému využívá Vodárna v Káraném, kde dochází k úpravě

surové vody i k následnému odstraňování zanesené filtrační vrstvy (viz Obrázek 12).

Hlavní výhody umělé infiltrace jmenuje Hrkal (2016). Jedná se především o přirozený proces filtrace vody, zlepšení hydrologické bilance, schopnost infiltrace pomoci snížit rizika povodní i sucha a kladné spojení vodního hospodářství a životního prostředí. Novotná et al. (2015) vidí hlavní pozitiva ve snížení nákladů jak na rekonstrukci kanalizace a ČOV, tak i na protipovodňové opatření a přirozené zásobování řek v období sucha. Podle Gale (2005) jsou hlavními výhodami stabilizace a zvýšení hladiny podzemní vody, snižování rizik zasolováním, zmírnění poklesů půdy, stabilizace zdrojů podzemních vod, stabilizace eroze půdy. Myslím si, že všechny zde uvedené výhody umělé infiltrace jsou důležité. Pokud se bavíme o hlavních výhodách přikláněl bych se spíše k (Hrkal, 2016) nebo k (Gale, 2005). Důvod, proč každý udává jiná hlavní pozitiva, je ten, že se jedná o rozličné práce, které pohlíží na umělou infiltraci z jiného úhlu jejího využití.

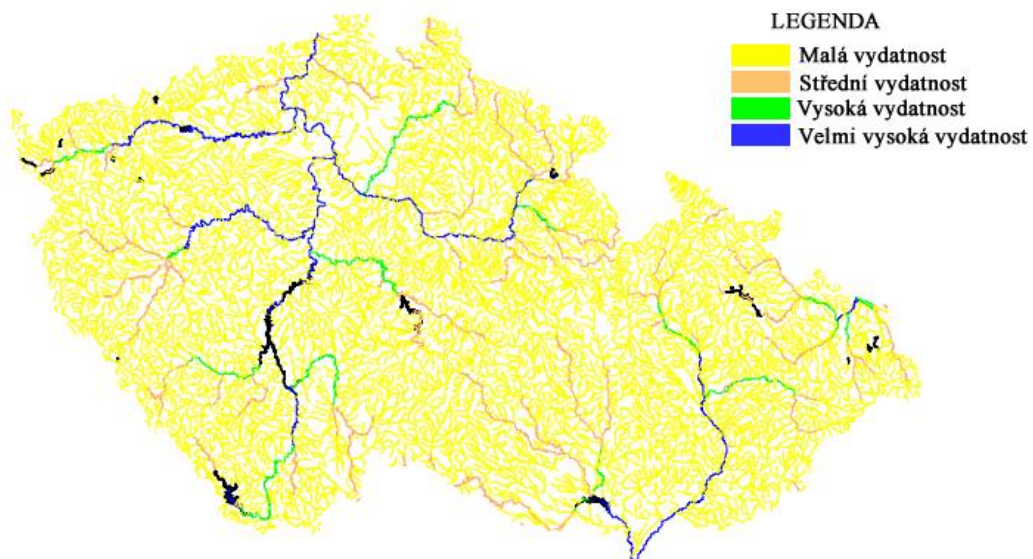
Například Novotná et al. (2015) řeší umělou infiltraci v urbanizovaném území, na kterém se řeší dvě hlavní hlediska. Rozloha infiltračního objektu a nutnost odvádět přebytečnou dešťovou vodu do kanalizace. Dle Gale (2005) se pro tento účel nejvíce hodí technologie střešních lapačů. Pyne (1995) na druhou stranu uvádí vrtý. Obě tyto technologie mají společná pozitiva, například možnost zabránit minimálního území pro výstavbu, levnější výstavba v porovnání s ostatními technologiemi infiltrace a u vrtů je pozitivem dosah pod hluboko uloženou nepropustnou horninu. Dle Vacka (2018) se ovšem do urbanizovaného území může hodit i plošná infiltrace (Obrázek 1) a to z důvodu pozitivního vlivu na mikroklima území.

Oproti tomu Gale (2005) řeší problematiku prudkých dešťů a nedostatku vody. Zde se musí počítat se sedimenty a přívalovými vodami, na které jsou dle Gale (2005) nejvhodnější úpravy vodních toků pomocí zemních hrází (Obrázek 2). A to z důvodu jejich dobrého nakládání se sedimenty, takže nedochází k zpomalování infiltrace, a přitom dochází k snižování eroze půdy. Dalším pozitivem této technologie je fakt, že v případě potřeby se dá voda čerpat rovnou z nádrže. To má v případě suchých oblastí pozitivní vliv na zemědělství.

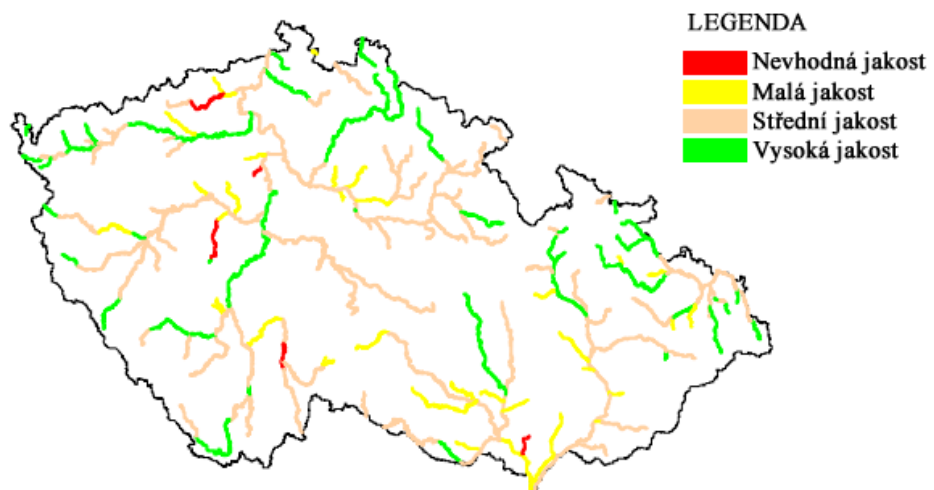
Podle mého názoru je v umělé infiltraci skrytý obrovský potenciál s velkou možností budoucího využití. To vyplývá například ze studie Hrkala (2010a), který uvádí příklad vsakování odpadních vod. Z této studie vyplývá možnost využití u osamoceně stojících budov, které odpadní vodu musejí vyvážet. Studie Kreuzinger et al. (2004) ovšem poukazuje na problematiku odstranění rozpuštěných látek a především léčiv ve vodě pomocí umělé infiltrace. Tento problém má podle mého mínění řešení pomocí správného předčištění odpadní vody před infiltrací. K tomuto faktu se přiklání i Hrkal (2010a), který tvrdí, že v Izraeli pomocí předčištění odpadní vody a následnou infiltrací se dá získat jímaná voda kvalitativně řadící se mezi pitné vody.

Další práce potvrzující můj názor potenciálu umělé infiltrace je Llamas (2000) která poukazuje na dlouhodobé využívání umělé infiltrace ve Španělsku s kladným účinkem. Umělá infiltrace zde hraje velkou roli ve zlepšení vodní bilance a tím chrání a napomáhá rozvíjení životního prostředí. Dle Hrkala (2016) je vytipováno 5 lokalit (Labe v prostoru mezi Poděbrady a Čelákovicemi, Litá, Lužnice u Majdalény, Lednice a Meziboří), které by při zřízení umělé infiltrace významným podílem přispívali na zmírnění obou klimatických extrémů (povodní a sucha), a měli by velký význam pro akumulaci a čerpání podzemní vody.

Jedna z mnoha potenciálních možností navýšení umělé infiltrace v ČR je rozvoj břehové infiltrace. Zde je potřeba upozornit na fakt, že většina malých toků v ČR nemá dostatečnou kapacitu vody k zásobování břehové infiltrace s dostatečnou vydatností, jak ukazuje Obrázek 13. Obrázek 14 znázorňuje, že i některé toky jsou příliš znečištěné na to, aby zde šla provést břehová infiltrace. Na druhou stranu u našich větších řek je potenciál dosti vysoký v případě dostatečných geologických podmínek. Tento fakt potvrzuje i práce Fischera et al. (2005) o břehové infiltraci na Labi v Drážďanech a příklad vodárny v Káraném.



Obrázek 13: Říční síť České republiky členěná z hlediska vydatnosti (Hrkal 2010b)



Obrázek 14: Kvalitativní rozdělení říční sítě České republiky pro břehovou infiltraci (Hrkal, 2010b)

7 Závěr

V této bakalářské práci byl sepsán formou rešerše dostupných zdrojů přehled umělé infiltrace vody z pohledu infiltrované vody, prostředí, do kterého infiltrace probíhá a dle technického provedení. Práce také představila, za jakých podmínek je možné jednotlivé technologie použít a pro jaké účely se nejvíc hodí.

Pozitivním zjištěním bylo, jak velké množství výhod umělá infiltrace přináší. Hlavní pozitiva, která přispívají ke kladnému vnímání umělé infiltrace jsou přirozený proces filtrace vody, schopnost infiltrace snížit rizika povodní a sucha a zmírnění poklesu půdy. Důležitým pozitivem pro začlenění umělé infiltrace do zemědělství je schopnost snižování rizik zasolování a stabilizace eroze půdy. Hlavní výhody umělé infiltrace pro napomáhání rozvíjení životního prostředí jsou zlepšení hydrologické bilance, stabilizace hladiny podzemních vod a kladné spojení spolupráce vodního hospodářství a životního prostředí. Poslední z hlavních výhod umělé infiltrace je stabilizace zdrojů podzemních vod využívaných pro jímání jak pro pitnou vodu, tak i pro zemědělské účely.

Na druhou stranu negativní zjištění bylo množství problémů určujících proveditelnost umělé infiltrace. Hlavními problémy jsou ztráty infiltrované vody, možné zhoršení kvality podzemních vod zasakovanou vodou, nutnost úpravy surové vody, nedokonalé odstranění rozpuštěných látek (například léčiv), kolísavost surové vody. Další nevýhodou je proces kolmatace, který postupně snižuje účinnost umělé infiltrace.

Umělá infiltrace má v ČR velký potenciál minimálně v pěti vytipovaných lokalitách (Labe v prostoru mezi Poděbrady a Čelákovici, Litá, Lužnice u Majdalény, Lednice a Meziboří), které při zřízení umělé infiltrace významným podílem napomohou hospodaření s vodou. Dalším nevyužitým potenciálem je břehová infiltrace na větších tocích. Poslední příklad možného rozvoje umělé infiltrace v ČR je zasakování odpadních vod. U této infiltrace se ovšem musí klást důraz na důkladné předčištění odpadní vody z důvodu ochrany kvality podzemní vody.

Na základě zjištěných informací lze vymezit tři činnosti, kterými je významné se nadále zabývat pro zlepšení využití umělé infiltrace:

- a) Rozvoj metod řešení kolmatace jako například odstranění horní filtrační vrstvy, regenerace vrtů pomocí ultrazvuku, hydraulických rázů, oxidačních činidel a dezinfekcí.
- b) Vývoj nových technologií ochrany před kontaminováním podzemních vod obsahem olejů, tuků, těžkých kovů, organického znečištění BSK₅, chlorovodíky, patogenními mikroorganismy a živin N, P. Nebo rozvíjení stávajících technologií jako například lapáky motorových olejů a tuků, možnost odstavení prvotní znečištěné srážkové vody do kanalizace, dostatečně kvalitní předčištění odpadních vod, sedimentační nádrže, rychlofiltry.
- c) Motivace majitelů staveb pro výstavbu a následnou pravidelnou údržbu infiltračních zařízení, například ve formě finanční podpory pomocí dotace, odečtení nákladů za údržbu infiltračního zařízení z daní nebo jiných zvýhodnění.

8 Přehled literatury a použitých zdrojů

Odborné publikace

BALKE, K. a Y. ZHU, 2008. Natural water purification and water management by artificial groundwater recharge. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B* 9. 221–226.

BOUWER, H., 2002. Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal* 10. 121–142.

BOUWER, H, 1996. Issues in artificial recharge. In: *Water Science and Technology* 33. 381-390.

CHILTON, P. J., M. E. STUART, O. ESCOLERO, R. J. MARKS, A. GONZALEZ a C. J. MILNE, 1998. Groundwater recharge and pollutant transport beneath wastewater irrigation: the case of Leon. *Geological Society. London. Special Publications* 130. 153-168

ESFANDIARI-BAIAT, M. a G. RAHBAR, 2004. Monitoring of infl ow and outfl ow rate from Kaftari artifi cial recharge of groundwater system in dorz-sayban region in South-eastern Iran. In: Gale, I.: *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas. UNESCO IHP (International Hydrological Programme). Paris.* 22-23.

FISCHER, T., K. DAY a T. GRISCHEK, 2005. Sustainability of riverbank filtration in Dresden, Germany. *5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* 23–28.

FRANKE, P.G. a A., KLEINSCHROTH, 1991. *Kurzbiographien Hydraulik und Wasserbau. Persönlichkeiten aus dem deutschsprachigen Raum. Edition LIPP.* 685.

GALE, I., 2005. *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas. UNESCO IHP (International Hydrological Programme). Paris.* 33.

GETTE-BOUVAROT, M., F. MERMILLOD-BLONDIN, R. ANGULO-JARAMILLO, C. DELOLME, D. LEMOINE, L. LASSABATERE, S. LOIZEAU a V. VOLATIER, 2014. Coupling hydraulic and biological measurements highlights the key influence of algal biofilm on infiltration basin performance. *ECOHYDROLOGY Ecohydrol.* 7. 950–964.

GERGES, N. Z., R.R., MARTIN, P.J., DOLLON, 1996. Aquifer Storage and Recovery (ASR) using water treated to irrigation standards. In: Gale, I.: Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas. UNESCO IHP (International Hydrological Programme). Paris. 41-43.

GRISCHEK, T., 2003. Zur Bewirtschaftung von Uferfiltratfassungen an der Elbe (Management of bank filtration sites along the River Elbe). University of Technology Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft. 252 s. Dissertation. „nepublikováno“. Mitteilungen des Instituts für Grundwasserwirtschaft 4

HERČÍK, L., 2008. 40 let provozování umělé infiltrace v Káraném (1968-2008). In: Kalousová, L., Dolejš, P. (Eds.), Pitná vody 2008. Sborník konference. W&ET Team, Č. Budějovice 2008. 289–294.

HORTON, R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions, American Geophysical Union 14., 446–460.

HRKAL, Z., 2010a. Zpracování metodiky pro posuzování problematiky umělé infiltrace v ČR - DU2. Výzkumný úkol č. 3809. VÚV TGM, Praha. 80.

HRKAL, Z., 2010b. Zpracování metodiky pro posuzování problematiky umělé infiltrace v ČR - DU3. Výzkumný úkol č. 3809. VÚV TGM, Praha. 22.

HUISMAN, L. a T. N. OLSHOORN, 1983. Artificial groundwater recharge. Journal of Hydrology 73. 400–402.

JEDLIČKA, B., B. MORAVCOVÁ a L. ŽÁČEK, 1984. Účinek kolmatace na vsakovacích nádržích. VÚV. Praha: Účelové vydání.

KAHLON, A. a A. MAJEED, 2003. Water Resources Situation in Pakistan: challenges and future strategies. In: Kulkarni, H. (eds.): Water Resources in the South: Present Scenario and Future Prospects. Comsats. Islamabad. 21-40

KALANTARI, N., K. RANGZAN, S.S. THIGALE a M.H. RAHIMI, 2010. Site selection and cost-benefit analysis for artificial recharge in the Baghmalek plain, Khuzestan Province, southwest Iran. Hydrogeology Journal J 18. 761-773

KAYSER, K. a S. KUNST, 2005. Processes in vertical-flow reed beds: nitrification, oxygen transfer and soil clogging. Water Science and Technology, Vol. 51, Issue 9. 177–184.

- KNĚŽEK, M, 1989. Umělá infiltrace ve světě a v ČSSR. ČSVTS. Praha.
- KREUZINGER, N., M. CLARA, B. STRENN a B. VOGEL, 2004. Investigation on the behaviour of selected pharmaceuticals in the groundwater after infiltration of treated wastewater. In: Water Science and Technology 50(2). 221.
- LAL, R. a M.K. SHUKLA, 2004. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, New York.
- LLAMAS, MR, 2000. Několik lekcí získaných během sucha 1991–1995 ve Španělsku. Omezení sucha a sucha v Evropě. Pokroky ve výzkumu přírodních a technologických rizik, sv. 14. Springer, Dordrecht.
- MASSMANN, G., J. GRESKOWIAK, C. KOHFAHL, A. KNAPPE, B. OHM, A. PEKDEGER, T. TAUTE a J. SÜLTENFUSS, 2005. Evaluation of the hydrochemical conditions during bank filtration and artificial recharge in Berlin. 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. HPVI, Series on Groundwater.
- MCDERMOTT, J., J. CLARK, D. AVISAR a G. HUDSON, 2005. A Comparison of Hydrogeologic Models, Tritium/helium-3, and Deliberate Tracer Experiments to Understand Ground Water Residence Time. AGU Fall Meeting Abstracts.
- MUKHOPADHEY, A., MN. AL-SENAFI a E. AL-AWADI, 1998. Geology and hydrogeology of the Dammam Formation in Kuwait. Hydrogeol J 6(2). 302-314.
- MURRAY, R a G TREDoux, 1998. Artificial Recharge: A Technology for Sustainable Water Resource Development: Final Report to the Water Research Commission. Water Research Commission.
- NOVOTNÁ, J., M., LUBAS a I., KABELKOVÁ, 2015. Možnosti řešení vsaku dešťových vod v urbanizovaných územích v ČR. 93.
- O'HARE, J.A., M.B., M.R.C.P.I., M.R.C.P. (U.K.), M. DERMOT J., B.SC., M.B. a F.R.C.P.I., 1982. Reversal of Aluminum-Induced Hemodialysis Anemia by a Low-Aluminum Dialysate. The NEW ENGLAND JOURNAL of MEDICINE 306. 654-656.
- PASTUSZEK, F., 1979. Vyhodnocení kolmatační zkoušky na lokalitě Horšovský Týn. Vodní zdroje. Praha

PASTUSZEK, F., 1985. Teorie pohybu podzemní vody, vyhodnocení kolmatační zkoušky na lokalitě Kolín-Tři Dvory. Vodní zdroje. Praha

PEYTON, D., 2002. Modified recharge basin floor to control sediment and maximize infiltration efficiency. In P. Dillon. (Ed.) Management of aquifer recharge for sustainability. In: . B.m.: Lisse:Swets&Zeitlinger. 215–220.

PHILIP, J.R., 1957. The infiltration equation and its solution. In: The theory of infiltration. Soil Sci. 345–357.

PYNE, R. D. G., 1995. Groundwater Recharge and Wells: A Guide to Aquifer Storage Recovery. Florida, USA.: Lewis Publishing. Second Edition 2005.

SIRIWARDENE, N.R., DELETIC A., FLETCHER T.D., 2007. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. Water Research, Vol. 41, Issue 7. 1433-1440.

TODD, D.K., 1959. Ground Water Hydrology. John Wiley and Sons. 535

WOESSNER, W., 1998. Changing views of stream-groundwater interaction. American institute of Hydrology. In: Brahana, J. (eds.): Gambling with Groundwater: Physical, Chemical and Biological Aspects of Aquifer-stream Relations : Proceedings of the Joint Meeting of the XXVIII Congress of the International Association of Hydrogeologists and the Annual Meeting of the American Institute of Hydrologists. American Institute of Hydrology. Las Vegas, Nevada. 1-6.

ZEELIE, S, 2002. OMDDEL dam and recharge ponds to enhance recharge in the Namib. In: Dillon. P.J., ed. Management of Aquifer Recharge for Sustainability. B.m.: Taylor & Francis. 580.

Legislativní zdroje

ČSN 75 9010: Vsakovací zařízení srážkových vod. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2012. 44 s.

Plán hlavních povodí České republiky (PHP ČR)

Politika územního rozvoje ČR 2008, z 20. 7. 2009

Vyhláška č. 501/2006 Sb., o obecných požadavcích na využívání území, ve znění pozdějších předpisů.

Zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.

Internetové zdroje

LIDARÍK S.R.O., © 1993. Čištění a regenerace vrtů [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z: <https://www.lidarik.cz/cisteni-a-regenerace-vrtu.php>

TVS-CENTRUM, © 2020. Chemická regenerace vrtů [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z: <http://www.vrtystudny.cz/chemicka-regenerace-vrtu-76>

HRKAL, Z, 2016. Řízená umělá infiltrace jako nástroj proti suchu i povodním – její perspektivy v ČR – TZB-info [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/14163-rizena-umela-infiltrace-jako-nastroj-proti-suchu-i-povodnim-jeji-perspektivy-v-cr>

VODNÍ ZDROJE a.s., © 2016. 2016 05 RIGA PREZENTACE čeština-Hydrologie-sanace-životní prostředí [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z: <https://s-ic.cz/wp-content/uploads/2019/08/Zaji%CF%84t%E2%95%AAni-a-obnova-zdroja-pitne-vody-Ing.-%C2%BCern%E2%88%9E.pdf>

MLEJNSKÁ, E., 2013. Kolmatace – významné omezení funkčnosti umělých mokřadů – jak jí předcházet, jak ji odstranit? [online]. [cit. 27.06.2020] Dostupné z: https://docplayer.cz/10323682-Kolmatace-vyznamne-omezeni-funkcnosti-umelych-mokradu-jak-ji-predchazet-jak-ji-odstranit-eva-mlejnska-17.html?fbclid=IwAR3hjdFEy-iaro2YfSIApdrEhh_nNdM9tlKb8eI1EMiJyU9_R7RQrCzNOdE

VACEK, J, 2018. Jak vypadá vsakovací zařízení srážkových vod [online]. [cit. 27.06.2020] Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/destova-voda/16968-hospodareni-se-srazkovymi-vodami>

VODA PITNÁ, © 2020. Regenerace vrtaných a kopaných studní. [online]. [cit. 27.06.2020] Dostupné z: <http://www.vodapitna.cz/index.php/studny/75-regenerace-vrtanych-a-kopanych-studni>

FŽP ČZU v Praze, © 2019. Zařízení pro regeneraci vodárenských jímacích vrtů na principu ultrazvuku [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z: <https://www.fzp.czu.cz/cs/r-6899-projekty-a-spoluprace-s-praxi/r-6923-projekty/r->

12203-ultra-zarizeni-pro-regeneraci-vodarenskych-jimacich-vrtu-na-principu-ultrazvuku

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma působení plošné infiltrace na zvodeň (Gale, 2005)

Obrázek 2: Schéma vsakovací nádrže (Gale, 2005)

Obrázek 3: Schéma pískové skladovací nádrže (Hrkal, 2016)

Obrázek 4: Schéma podzemní hráze (Hrkal, 2016)

Obrázek 5: Schéma polopropustné hráze (Hrkal, 2016)

Obrázek 6: Budování otevřené šachty ro infilraci povrchové vody v Radžastánu v Indii (Gale,2005)

Obrázek 7: Schéma vrtu využívaného pro infiltrace i jímání vody (Hrkal, 2016)

Obrázek 8: Schéma břehové infiltrace (Gale, 2005)

Obrázek 9: Doplnování podzemní vody v dunových oblastech v Nizozemsku (Royal Haskoning DHV, © 2020).

Zdroj: ROYAL HASKONING DHV, © 2020. [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z: https://www.royalhaskoningdhv.com/en-gb/projects/optimisation-of-artificial-recharge-systems-in-a-coastal-dune-reserve/6050?fbclid=IwAR1I9bIJcUi6FYLiOD5vWqqWBmg2ygvEoz_PJKk2DCxglsh34apIAT0WfYk

Obrázek 10: Schéma umělé infiltrace v Káraném (Vodárna Káraný a.s., © 2020).

Zdroj: VODÁRNA KÁRANÝ A.S., © 2020. [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z:

https://www.zpvkarany.cz/?fbclid=IwAR0BIVVEgPMGoyfhTf4sSeoX0KGristi4xI_VWBGf3NbcPceB9u9uabeSsE

Obrázek 11: Jez Otradovice, řeka Jizera ř. km. 4,7 (Mapy.cz., © 2020).

Zdroj: MAPY.CZ., © 2020. [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.7518153&y=50.2021326&z=17&source=base&id=1900194&gallery=1>.

Obrázek 12: Umělá infiltrace Kárané, odstraňování horní vrstvy filtrátu (Vodárna Káraný a.s., © 2020).

Zdroj: VODÁRNA KÁRANÝ, A.S., © 2020. [online]. [cit. 27.06.2020]. Dostupné z: <https://www.zpvkarany.cz/fotogalerie>

Obrázek 13: Říční síť České republiky členěná z hlediska vydatnosti (Hrkal 2010b)

Obrázek 14: Kvalitativní rozdělení říční sítě České republiky pro břehovou infiltraci (Hrkal, 2010b)