

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji



Adam Drmota

Umělé doplňování zdrojů podzemních vod

Artificial recharge of groundwater resources

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Josef Datel, Ph.D.

Praha 2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze 22. 8. 2018

Podpis:

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval svému školiteli RNDr. Josefu Datlovi, Ph.D. za cenné konzultace, přátelský přístup a možnost zpracovávat pro mě zajímavé téma. Dále bych rád poděkoval Mgr. Marku Skalickému a Ing. Václavu Kolerusovi z vodárny Káraný za konzultaci a ukázkou reálného provozu umělé infiltrace. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu během studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá umělým doplňováním zdrojů podzemní vody, obecně známým pod pojmem umělá infiltrace. Myšlenka umělého doplňování podzemních vod spočívá v člověkem vyvolaném přenosu povrchové vody do podzemních kolektorů.

V úvodu je věnována pozornost důvodům vedoucím člověka v dnešní době k doplňování podzemních vod. Dále jsou postupně popsány jednotlivé metody povrchové, podpovrchové a indukované infiltrace. Zvláštní kapitola byla věnována přírodním faktorům omezujících jejich využití.

Součástí práce jsou také studie tří konkrétních příkladů projektů umělé infiltrace do podzemních vod různou technikou, pokaždé s jiným záměrem. Konkrétně se jedná o boj s intruzí slané vody do kolektoru delty Llobregat ve Španělsku, využití vhodné geologické struktury jako zásobník pitné vody na období sucha na jižní Floridě a využití nádrží umělé infiltrace a břehové infiltrace pro vodárenské využití na lokalitě Káraný v České republice.

Abstract

This thesis addresses artificial replenishment of groundwater resources, commonly known as artificial recharge. The idea of artificial replenishment of groundwater lies in man-induced transfer of surface water to underground aquifers.

The introduction highlights the reasons that led humans to artificially replenish groundwater. In addition, individual methods of surface, subsurface and induced infiltration are described. A special chapter was devoted to natural factors limiting the use of these methods.

The thesis also includes studies of three concrete examples of projects of artificial recharge into groundwater by various techniques, each time with a different intention. Specifically, it describes resisting the intrusion of salt water into the Delta Llobregat aquifer in Spain, using the appropriate geological structure as a reservoir of potable water for the drought in South Florida, and the use of artificial infiltration basins and bank infiltration for water use in Káraný, Czech Republic.

Obsah

1. Úvod	1
2. Základní pojmy	2
3. Přehled využívání umělé infiltrace	4
4. Techniky doplňování podzemní vody	7
4.1 Povrchové metody	7
4.2. Podpovrchové metody	10
4.3. Nepřímé metody	13
5. Podmínky pro využití umělé infiltrace	15
5.1. Topografie terénu a proudění povrchového toku	15
5.2. Geologické podmínky	15
5.3. Kvalita zasakované vody	17
6. Příklady využití umělé infiltrace v praxi	18
6.1 Hydraulická bariéra proti intruzi mořské vody, Llobregat (Španělsko)	18
6.2 Využití systému ASR studen na jižní Floridě	22
6.3 Vodárenský zdroj Káraný	25
7. Diskuse a závěr	28
8. Literatura	30

1. Úvod

V některých částech světa sužovaných suchem je kritický nedostatek pitné vody. Odhaduje se, že v dnešní době více jak dvě miliardy lidí po celém světě trpí jejím nedostatkem. Podle obecné predikce klimatických změn do budoucna lze očekávat, že tento problém se bude i nadále prohlubovat. (UNESCO 2018)

V rámci boje proti nedostatku sladké vody v období sucha se dnes ve světě využívá celá řada opatření, která mají za cíl zvýšit její dostupnost. V této souvislosti se na řadě míst začíná využívat umělé infiltrace, metody, která může hrát zásadní roli při konzervování velkých objemů vody na období sucha, nebo zlepšování její kvality. Využití umělé infiltrace je však mnohem více a příklady lze nalézt napříč celým světem. Přestože Česká republika díky vodnímu zdroji Káraný patřila na začátku dvacátého století mezi první země, které efektivně využívaly umělou infiltraci, další větší projekty již na našem území nebyly realizovány. V posledních letech se ovšem období sucha několikrát dotkla i našeho území. Hlavní problém netkví v nedostatku vody obecně, ale často ve velmi nerovnoměrném rozložení srážek během roku (Střeštík et al. 2014), jehož důsledkem bývají hydrologické extrémny jako povodně nebo sucho. I proto je dnes tématice udržení vody v krajině, včetně umělého doplňování zdrojů podzemních vod věnována čím dál tím větší pozornost i u nás.

Tato bakalářská práce si klade za cíl shrnout některé poznatky o řízení umělé infiltrace. Prostor je věnován jednotlivým metodám doplňování podzemních vod, jejich výhodám, nevýhodám a možnostech jejich využití. V poslední části prezentují tři studie konkrétních lokalit, kde se provádí umělé doplňování vodních zdrojů. Jednotlivé studie jsou záměrně vybrány tak, aby bylo obrazně nastíněno co možná největší spektrum využití umělé infiltrace.

2. Základní pojmy

Voda, která dopadne na zemský povrch ve formě dešťových nebo sněhových srážek, se časem odpaří zpět do atmosféry, spotřebuje vegetací, odeče po povrchu (k povrchovému odtoku dochází až po vyplnění terénních elevací), nebo se infiltuje do půdy.

Infiltraci lze definovat jako proces přechodu atmosférických srážek, nebo povrchové vody do litosféry a je naprosto zásadním zdrojem podzemních vod. (Seiler a Gat 2007) Infiltraci lze dělit na přirozenou a umělou. Přirozená infiltrace je přírodní proces zasakování atmosférických srážek, nebo povrchových vod. Pro dané povodí, lze míru infiltrace odvodit z bilanční rovnice jako:

$$P = ET + PO + I$$

Po úpravě dostaneme,

$$I = P - ET - PO$$

kde P (precipitation) označuje celkový souhrn srážek za dané časové období. Dále ET značí evapotranspiraci, tedy kombinaci výparu a spotřeby vody vegetací a jako PO je označen povrchový odtok. Výsledkem výpočtu je objem vody infiltrované v povodí. Infiltrace vyjádřená z této rovnice se dále rozděluje na hypodermický odtok (HO) a na doplňování podzemní vody (D).

$$I = D + HO$$

Hypodermický odtok reprezentuje vodu, která sice infiltrovala, ale nedosáhla hladiny podzemní vody a proudí víceméně horizontálním směrem v nenasycené zóně. (Šrámek a Kuchovský 2003).

Doplňováním podzemní vody se v tomto případě rozumí zdroj podzemní vody. Za zdroje podzemní vody je podle odborné terminologie považována pohyblivá složka zásob podzemních vod. Oba pojmy přesněji definuje příloha vyhlášky č. 369/2004 Sb., viz dále:

„Zdroje podzemních vod jsou dynamickou (obnovitelnou) složkou podzemních vod, vyjádřenou v jednotkách objemového průtoku (objem za jednotku času). Sestávají z přírodních, indukovaných a umělých zdrojů podzemní vody:

a) Přírodní zdroje podzemní vody (přírodní obnovitelné zdroje podzemní vody) - množství vody za přírodních poměrů dlouhodobě doplňované infiltrací do hydrogeologického kolektoru nebo zvodněného systému.

b) Indukované zdroje podzemní vody - množství podzemní vody, která přitéká do zvodněného systému při jeho využívání v důsledku změn piezometrických poměrů na jeho hranicích.

c) *Umělé zdroje podzemní vody je množství podzemní vody, záměrně nebo mimovolně doplňované do hydrogeologického kolektoru nebo zvodněného systému v důsledku antropogenní činnosti (např. umělá infiltrace, úniky z potrubí, infiltrace přebytků vody při zavlažování).*

Zásoby podzemních vod tvoří objem podzemní vody v hydrogeologickém kolektoru daný jeho efektivní porozitou a pružnými vlastnostmi kolektorských hornin a vody:

a) *Statické (geologické) zásoby podzemní vody - objem gravitační vody ve zvodněném systému; v případě kolektorů svolnou hladinou odpovídají statické zásoby efektivní porozitě.*

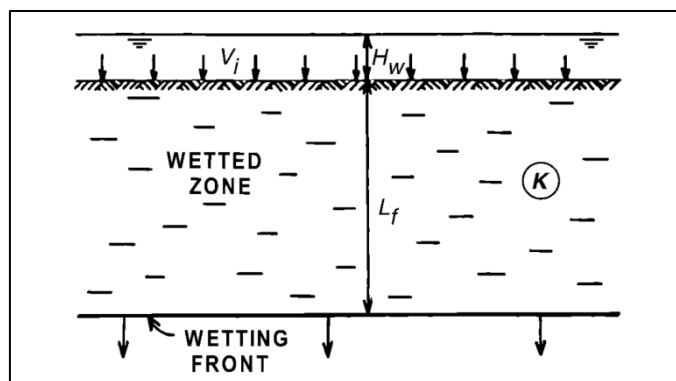
b) *Pružné zásoby podzemní vody - objem vody, která se uvolní po snížení kolektorového tlaku (piezometrického napětí) ze statické zásoby ve zvodněném kolektoru v důsledku pružnosti kolektoru, tj. v důsledku zvětšení objemu akumulované vody v souvislosti s její objemovou stlačitelností a v důsledku zmenšení pórového prostoru kolektoru.*“

Umělá infiltrace je tedy definována jako umělý zdroj podzemních vod, vzniklý lidskou činností. V praxi se jedná o povrchové i podpovrchové inženýrské systémy, které vytváří vhodné podmínky pro doplňování podzemních vod, vodami povrchovými.

Mezi hlavní sledované faktory patří zejména potenciální intenzita infiltrace při úplném nasycení [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$], [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$], která závisí především na vlastnostech půdy. Intenzitu lze měřit, buď experimentálně přímo na místě, například pomocí infiltrace v soustředěných válcích, nebo pomocí matematických modelů. Jako příklad lze uvést model Green – Ampt, který vychází z Darcyho zákona. Intenzita infiltrace zaplaveného povrchu se vypočte podle následující rovnice:

$$V_i = K \frac{(L_f + H_w - H_f)}{L_f}$$

Intenzitu infiltrace (V_i) lze tedy odvodit, pokud známe hydraulickou vodivost namáčené půdy (K), výšku vodního sloupce nad povrchem (H_w), vzdálenost mezi povrchem a linií zvlhčení (L_f) viz obrázek 1 a vlhkostní sací výška/sací tlak infiltračního čela (H_f). Z tohoto modelu lze dále vyčíst, že hlavním vlivem na intenzitu infiltrace má především parametr vzdálenosti L_f . Pokud je povrch poprvé zaplaven, je vzdálenost linie zvlhčení od povrchu malá a intenzita infiltrace velká. Čím hlouběji se voda v průběhu času zasakuje, tím více se hodnota intenzity infiltrace bude blížit hodnotě hydraulické vodivosti půdy. (Bouwer 2002)



Obrázek 1- Grafické znázornění hlavních parametrů pro výpočet intenzity infiltrace. (Bouwer 2002)

3. Přehled využívání umělé infiltrace

Umělá infiltrace byla v jistém pojetí provozována již ve starověku. K doplňování zdrojů podzemních vod docházelo například již při činnosti prvních zavlažovacích systémů v Egyptě nebo Mezopotámii. Prvotní cíl těchto zařízení byl ovšem dostat vodu po povrchu na místa určená k pěstování plodin.

Prvními technikami řízené umělé infiltrace tak byly pravděpodobně systémy břehové infiltrace v Evropě. Prvním doloženým příkladem bývá uváděna oblast skotského Glasgow. Tamní vodohospodáři realizovali v roce 1810 systém břehové infiltrace paralelní s řekou Clyde. Dlouhou dobu se jednalo o první projekt svého druhu v Evropě. Teprve v šedesátých letech devatenáctého století převzala myšlenku „přírodně filtrované vody“ další města. Projekty umělé infiltrace tehdy měly Nottingham, Derby a Newark. Všechny tyto systémy ovšem bojovaly se stále klesající efektivitou filtrace v důsledku zanášení vrtů a nakonec od nich bylo upuštěno. (Ray et al. 2002)

Na přelomu devatenáctého a dvacátého století se po vzoru anglických měst, začali zabývat umělou infiltrací i vědci napříč kontinentální Evropou. Hnacím motorem zájmu vědců byl především proces industrializace a stále rostoucí populace. V důsledku těchto změn ve společnosti již stávající zásobování pitnou vodou nebylo dostačující a bylo potřeba hledat nové zdroje. V této době se nejvýznamněji o rozvoj tematiky zasloužili zejména Dupuy, Belgrand, Salbach, Thiem a Richert. Posledně jmenovaný v roce 1900 sepsal dosavadní nejzásadnější poznatky v dané problematice v práci „On artificial underground water“. V projektování konkrétních systémů dominoval Adolf Thiem. Podle jeho návrhů postupně vznikly systémy říční břehové infiltrace poblíž center německého průmyslu u měst Düsseldorf (1870), Essen (1875), Saloppe – Drážďany (1875) a další. Časem se rozvinulo také využívání břehové infiltrace u umělých nádrží, zejména v Nizozemsku, Švédsku a Švýcarsku. (Sprenger et al. 2017)

Na začátku dvacátého století se zkouší využití umělé infiltrace také v Americe. V Kalifornii se praktikovalo rozlévání povrchových toků. Na území států Georgie, Arkansasu a Minnesoty se využívaly drenážní studny k rekultivaci mokřadů pro zemědělské využití. Ovšem i tyto projekty časem ztroskotaly na přílišné kolmataci. Za první úspěšný projekt umělé infiltrace do podzemních vod v USA lze

považovat systém drenážních studen plněných bouřkovým odtokem a kanalizací v okolí Orlanda na Floridě ve třicátých letech dvacátého století. (Weeks 2002)

V Evropě se myšlenka doplňování vod pomocí injekčních vrtů začala rozvíjet až v šedesátých letech dvacátého století. Pilotní projekty se uskutečnily v Nizozemsku, ale často ztroskotaly na nekvalitní zdrojové vodě a postupně došlo k ucpání vrtů. (Sprenger et al. 2017)

Ve stejné době budovalo první ASR systémy také Španělsko, z nichž například systém vrtů poblíž Barcelony je aktivní dodnes, a to zejména díky vhodným podmínkám v doplňovaném kolektoru (vysoká transmisivita nad $40\ 000\text{m}^2\cdot\text{den}^{-1}$) a čisté vodě použité k doplňování. (Hernández et al. 2015)

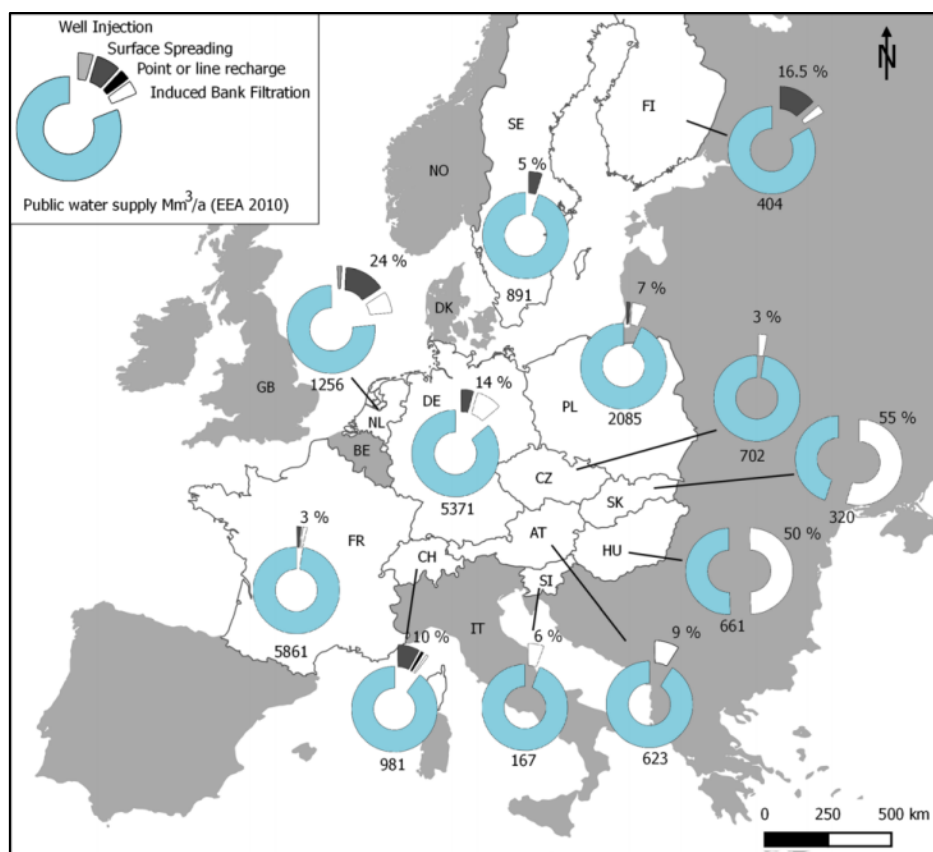
Metody umělé infiltrace pomocí systémů modifikace koryta za účelem zvýšení přirozené infiltrace se začaly testovat v šedesátých letech také ve Španělsku. Nejvýznamnějším byl projekt na řece Llobregat. Ovšem vzhledem k nízké efektivitě infiltrace a vysokým prostorovým nárokům se od těchto modifikací v Evropě upouští. (Hernández et al. 2015)

V dnešní době existuje po celém světě nespočet zařízení umělé infiltrace s různým využitím. Podle Todda a Mayse (2005) jsou nejčastější cíle pro využití zařízení umělé infiltrace následující:

- Udržet, nebo zvýšit objem přírodních zdrojů na lokalitě
- Boj s postupem slaných intruzí, nebo jiných polutantů do kolektorů
- Zajistit dostatečnou kapacitu pro uchování vody v dané oblasti
- Zpomalit nebo zastavit sesedání povrchu
- Zlepšit kvalitu vody průchodem horninovým prostředím
- Uchovat nebo získat energii ve formě horké nebo studené vody
- Zmírnění povodní

Z výše uvedených cílů se ve světě nejčastěji uplatňuje ten vodárenský, tedy infiltrace vody s předpokladem zlepšení její kvality. Pro ilustraci, na obrázku 2 je vidět přibližný podíl umělé infiltrace na vodárenských zdrojích pitné vody v jednotlivých státech Evropy.

V posledních letech se rozmáhají zařízení na infiltraci odpadních vod s různým stupněm předčištění. Velmi aktuální je tato problematika například na Blízkém Východě, v některých částech USA, Austrálii, Indii a dalších zemích, kde se obyvatelstvo potýká s nedostatkem sladké vody. Jedním z nejpokročilejších států v tomto ohledu je Izrael, kde velká část odpadních vod dále recykluje (75%), i pomocí metod umělé infiltrace. (Jiménez Cisneros et al. 2008)



Obrázek 2- Odhad podílu zařízení umělé infiltrace na zásobování pitnou vodou v jednotlivých státech Evropy v roce 2010. (Sprenger et al. 2017)

V České republice se začalo budovat první zařízení umělé infiltrace již na začátku dvacátého století. Podle návrhu A.Thiema byl na lokalitě Káraný zbudován vodárenský zdroj, který krom jiného čerpal vodu z řeky Jizery pomocí břehové infiltrace. V letech 1965 až 1968 se pro stejný vodárenský zdroj dobudoval také systém nádrží povrchové infiltrace (více v kap. 6.3). Nutno říci se o jediné zařízení umělé infiltrace takového rozsahu v České Republice. (Herčík a Jásek 2013)

V roce 2010 bylo Výzkumným ústavem vodohospodářským v rámci hodnocení perspektivy území pro umělou infiltraci vytipováno dalších vhodných 5 lokalit (Labe v prostoru mezi Poděbrady a Čelákovicemi, Litá, Lužnice u Majdalény, Lednice, Meziboří), pro které byl vytvořen detailní projekt včetně rozpočtu. K fyzické realizaci projektů ovšem zatím nedošlo. (Hrkal 2016) Před tímto projektem probíhaly různé průzkumné a vyhledávací práce i na jiných potenciálních lokalitách (např. na Strakonicku, Olomoucku, Litoměřicku) v průběhu 70. a 80. let se stejným výsledkem.

4. Techniky doplňování podzemní vody

4.1 Povrchové metody

Jedná se o nejjednodušší a také o nejstarší metody jak zvýšit dotaci infiltrované vody pomocí úprav v terénu. Princip spočívá v zadržování vody na vhodném, dostatečně propustném místě na povrchu, během kterého dochází k zvýšenému průsaku vody skrze půdu do kolektoru. Hlavním cílem je tedy dosáhnout co nejdelšího času pro kontakt povrchové vody s infiltračním prostorem. Toho se docíluje nejčastěji pomocí výstavby infiltračních příkopů, brázd, infiltračních van, nebo modifikací tvaru koryta povrchového toku.

Zaplavování:

Pravděpodobně nejjednodušší a nejstarší metodou je zaplavování oblasti v okolí povrchového toku. K tomu se využívá zpravidla distribučního kanálu, ze kterého se voda v závislosti na sklonu území volně rozlévá do okolí a infiltrované se do podloží. Hlavní výhodou je nízká cena výstavby a takřka nulové náklady na údržbu. Nicméně velikost infiltrace je závislá na rozloze zaplavované plochy a s tím souvisí také vyšší míra evapotranspirace, která způsobuje velké ztráty z objemu vody určené k infiltraci. Problémem může být také nevhodný typ půdy v okolí (např. některé málo propustné povodňové hlíny). Důležitá je také vhodná topografie zaplavovaného terénu. Při přílišném sklonu zaplavovaného území by mohla proudící voda nabývat vyšších rychlostí a způsobovat erozi půdy. (Asano 1985; Todd a Mays 2005)

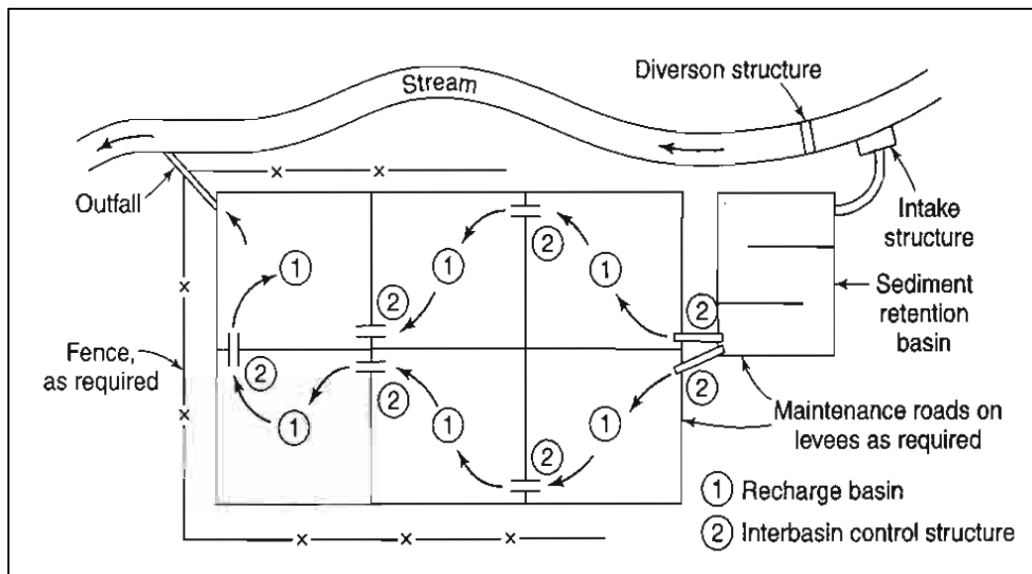
Příkopy a brázdy:

Pokročilejší metodou zvýšení infiltrace povrchové vody v dané oblasti je vytvoření sítě infiltračních příkopů a brázd v okolí toku. Typicky se využívá tří základních schémat rozložení příkopů. Prvním rozložením je laterální, při kterém se odvádí voda z původního toku pomocí hlavního kanálu, ze kterého postupně odbočují infiltrační brázdy. Přebytečná voda je poté svedena dalším kanálem zpět do původního koryta. Dále se využívají tzv. dendritické systémy, které odvádějí vodu z toku skrze regulační vrata do systému větvících se kanálů a slepých ramen. Posledním rozložením je obrysová (contour) schéma, jehož hlavním principem je rozdělení původního toku do několika paralelních koryt. Nově budované vodní trasy obsahují co nejvíce meandrů, aby se prodloužila jejich délka, potažmo plocha infiltrace. (Asano 1985)

Nádrže:

Další metodou je výstavba infiltračních nádrží/van s písčítým dnem. Jedná se dnes o pravděpodobně nejvíce oblíbenou metodou povrchové infiltrace a to zejména díky relativně snadné údržbě. Nejčastěji se používá systém více nádrží, kdy na několika vanách probíhá infiltrace a na dalších probíhá údržba, která spočívá v seškrabávání svrchní zanesené vrstvy písčitého dna. Nádrže mohou být budovány buď samostatně i ve vyšším počtu v rámci větších projektů, zejména pro zásobování měst. Pokud se jedná o systém více nádrží, jsou jednotlivé bloky většinou propojeny přetokovými kanály (Obrázek 3). Nicméně například Bouwer (2002) vidí jako výhodnější z hlediska údržby mít jednotlivé nádrže zcela oddělené.

Jako zdroj napájení slouží nejčastěji povrchový tok, využít se ale dá například svod dešťové vody z oblasti s hustou zástavbou, nebo předčištěná odpadní voda. Nádrže se většinou budují pokud možno paralelně se zdrojem vody. Aby nedocházelo k velkému kolísání zdrojového toku během odběrů pro infiltraci, bývá součástí většiny projektů také vodní dílo přímo na toku. Odběr vody tak nemusí mít okamžitý vliv na průtok v korytě. Před napuštěním systému nádrží prochází surová voda také různým stupněm předčištění v závislosti na kvalitě surové vody a plánovanému využití vody po infiltraci. Vzhledem k poměrně jednoduché výstavbě, efektivnímu využití prostoru a jednoduché údržbě se v současnosti jedná o nejvíce využívanou metodu umělého doplňování podzemních vod. (Todd a Mays 2005)



Obrázek 3 - Schéma propojených nádrží umělé infiltrace včetně kontrolních propustí. (Todd a Mays 2005)

Modifikace toku:

Pro zvýšení stupně infiltrace se zejména na menších mělkých tocích využívají systémy berm (berma - umělá terasovitá část koryta) nebo menší zpomalovacích stupňů. Principem metody je vodu v korytě v místech s podzemní infiltrací udržet díky narušení přirozeného proudění co nejdéle. Podél modifikovaného toku se často také dostávají mělké studny systémů břehové infiltrace. (Todd a Mays 2005; Guidelines for water reuse 1992)

Navyšování průtoku:

Na některých povrchových tocích zejména v aridním a subaridním může docházet k pravidelnému vysychání koryt v důsledku nedostatku vody. Což v dolní části povodí může znamenat nedostatečnou nebo žádnou infiltraci, což lze řešit umělým zvýšením průtoku. Jako zdroj vody může sloužit například předčištěná odpadní voda z městských aglomerací nebo převod vody z jiného toku v okolí. Tato metoda s sebou nese velké nároky na technologii čištění, nicméně jedná se někdy o jedinou možnost jak udržet průtok v korytě a tedy i zajistit infiltraci z toku v oblastech dále po proudu. Využití tohoto postupu se v současnosti zvažuje například na Rakovnicku, které dlouhodobě trpí nedostatkem vody. Řešením by mohl být právě převody vody z povodí Ohře do místních toků (Blšanka, Liboc, Rakovnický potok, Hasina a Smolenský potok). (Nesládková a Šajer 2017)

Využívání zavlažovacích systémů:

K doplnění zásob podzemní vody lze využít také zavlažovací systémy určené původně k pěstování plodin. Hlavní ideou je využívat zavlažování i v mezidobí, kdy pole stojí ladem a v okolních tocích je přebytek vody. Například na jaře při tání sněhu. Velikou předností této metody je v podstatě nulová investice do technologie, neboť zavlažování je již nainstalováno. Jedinou podmínkou je vhodná geologická struktura pro infiltraci. (Asano 1985).

Todd a Mays (2005) upozorňují, že v některých případech může v rámci doplňování podzemních vod pomocí zavlažování docházet k nadměrnému vymývání živin z kořenové zóny.

Rozstřikovací systémy lze využít i pro čištění odpadních vod (land treatment), jedná se o alternativu ke klasickým čističkám pro malá sídla s vhodnou a nevyužívanou krajinou v okolí. Ukázalo se, že kombinace vhodné půdy a rostlin může významně snížit obsah znečištění polutantů. (Crites et al. 2014)

4.2. Podpovrchové metody

V místech, kde nelze využít povrchové infiltrace, je možno využít podpovrchové metody. Nejčastějšími důvody pro jejich požití jsou zejména: nedostatečná propustnost půdy a horninového podloží, nebo nevhodná topografie terénu pro budování prvků povrchové infiltrace. Celkově se ovšem jedná o méně efektivní variantu zvýšení zásob podzemní vody z hlediska financí. Problém bývá také menší životnost a náročnější údržba technologie.

Infiltrační jámy a šachtice:

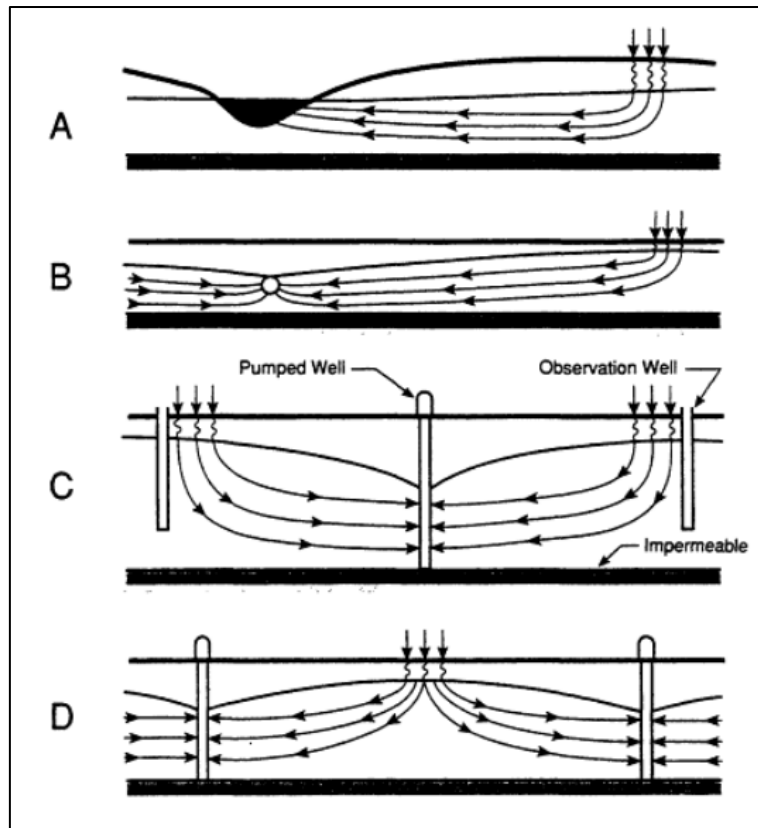
Pokud je propustná vrstva podloží poměrně blízko povrchu lze využít infiltrační jámy nebo šachtice, které jsou vedeny skrze nepropustnou vrstvu. Díky strmým stěnám po obvodu objektu, dochází k zanášení zpravidla pouze u dna. Čištění zanesené vrstvy je ovšem poměrně nákladné. Cenově výhodné se jeví využití těchto systémů v opuštěných šterkovnách a lomech, kde lze využít těžební jámy. (Asano 1985) Z důvodů ochrany zařízení před výparem, zvířaty a lidskou činností by zařízení měla být v ideálním případě zakryta. (Hrkal 2016)

Injekční studny (injection wells, drainage wells):

Pokud v dané lokalitě není k dispozici vhodně propustný povrchový kolektor nebo přípovrchové prostředí obsahuje nežádoucí chemické látky, je možné dotovat kolektory uložené ve větší hloubce pomocí tlakových studen. Jindy jsou zase tyto studny využívány, protože jiná metoda povrchové umělé infiltrace nepřichází v úvahu z důvodu nedostatku místa na povrchu (například v městských aglomeracích).

Z konstrukčního hlediska se jedná o nejčastěji klasickou studnu, utěsněnou v polohách nepropustného prostředí a perforovanou v oblasti kolektoru. U nezpevněných kolektorů (písek, štěrk) je podobně jako u klasické studny využíván obsyp okolo perforace. Ve zpevněných horninách s puklinovou propustností lze dno vrtu nechat otevřené bez obsypu. V oblastech s více oddělenými kolektory je možné využít jednu studnu k doplňování více kolektorů najednou. Doplňit lze jak zvodně s volnou, tak s napjatou hladinou (Todd a Mays 2005).

Rozdílne může být také schéma proudění vody v kolektoru. V podstatě se používají dva typy systémů. Za prvé injekční studny, které dotují kolektor, ze kterého jsou poté dále ve směru proudění podzemní vody instalovány klasické studny čerpající vodu na povrch. Zachycení vody nemusí být provedeno nutně pouze studnou. Existují i projekty, kde infiltrovaná voda dotuje například přírodní jezero, nebo přehradu viz obrázek 4. Zde je primární cíl zlepšit kvalitu infiltrované vody díky průchodu půdním, nebo horninovým prostředím tzv. SAT (soil aquifer treatment). (Ground water recharge using waters of impaired quality 1994)

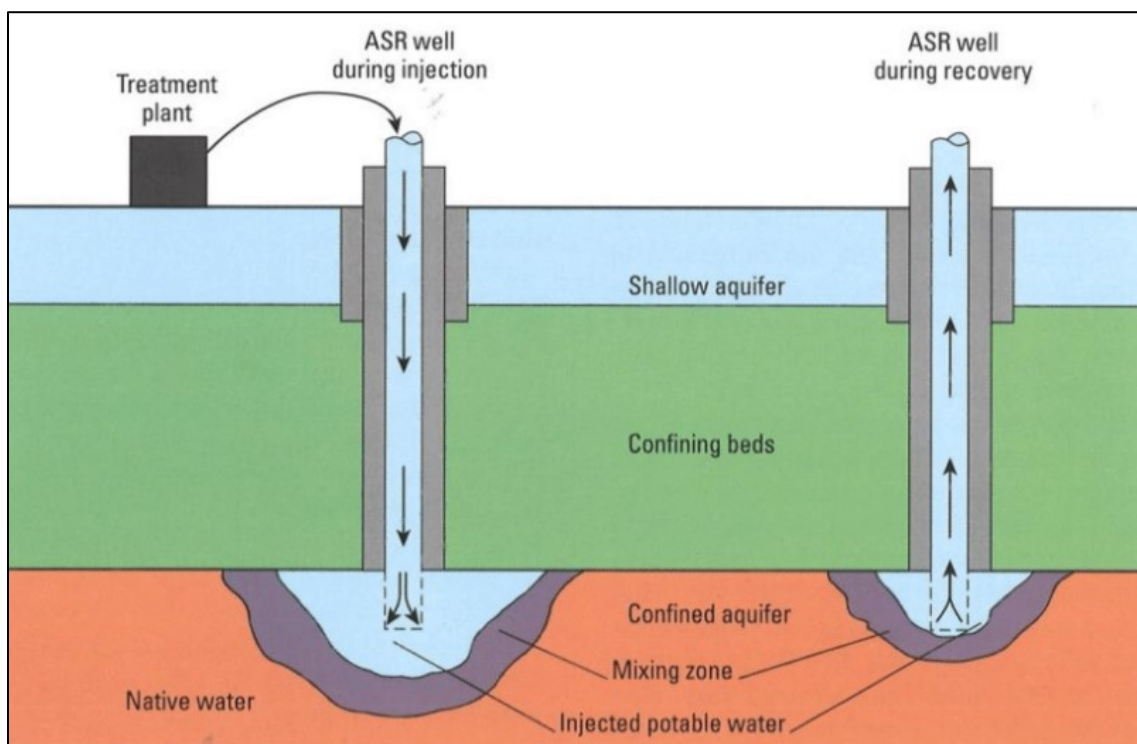


Obrázek 4 - Schéma proudění v různých SAT systémech. Voda proudí do povrchového vodního útvaru (A), horizontálního sběrače (B), nebo je čerpána vrtly v různém rozestavení (C,D). Převzato z *Ground water recharge using waters of impaired quality* 1994.

Za druhé kombinované studny tzv. ASR (aquifer storage recovery wells), které kombinují funkci injektáže i čerpání z kolektoru v jednom vrtu. Při nadbytku srážkové vody se tato, většinou předčištěná voda, pumpuje do kolektoru a v době sucha se čerpá zpět na stejném místě (Obrázek 5). Metoda ASR tedy nemá primárně zvýšit kvalitu infiltrované vody, ale pouze jí uskladnit v podzemí na potřebnou dobu. (Hiscock a Bense 2014)

Poprvé bylo fungování tohoto schématu vyzkoušeno v jižní Austrálii v roce 1993 a od té doby se rozšiřuje do celého světa. (Bouwer 2002)

Využití injekčních studen může spočívat nejen v dobíjení kolektoru předčištěnou vodou pro její uschování, ale také například k tvoření hydraulické bariéry před šířením kontaminace, dorovnávání hydrostatického tlaku v kolektoru, nebo průniků mořské vody. Velkým problémem bývá kolmatace vrtů. Zanášení je možné v některých případech zpomalit lehkou chlorací vody, nebo zpětným chodem čerpadla, nejčastěji jednou za den, při kterém se odsaje část nánosů z perforace. (Vecchioli et al. 1980)



Obrázek 5 - Schéma práce ASR studny podle Maliva and Missimer 2010.

Oproti povrchové infiltraci je využití injekčních vrtů více závislé na kvalitě vodního zdroje, neboť zde nedochází k filtraci vody přes půdní vrstvu. (Todd a Mays 2005)

Jen zřídka se tato metoda využívá k injektování vody odpadní, neboť hrozí kontaminace kolektoru. Provádí se tedy jen v místech, kde je daná hydrogeologická struktura déle využívána pouze jako zdroj užitkové vody, například pro zemědělství. (Bouwer, 2002) V České republice je podle novely (č. 150/2010 Sb) vodního zákona zasakování odpadních vod do vod podzemních zakázáno.

4.3. Nepřímé metody

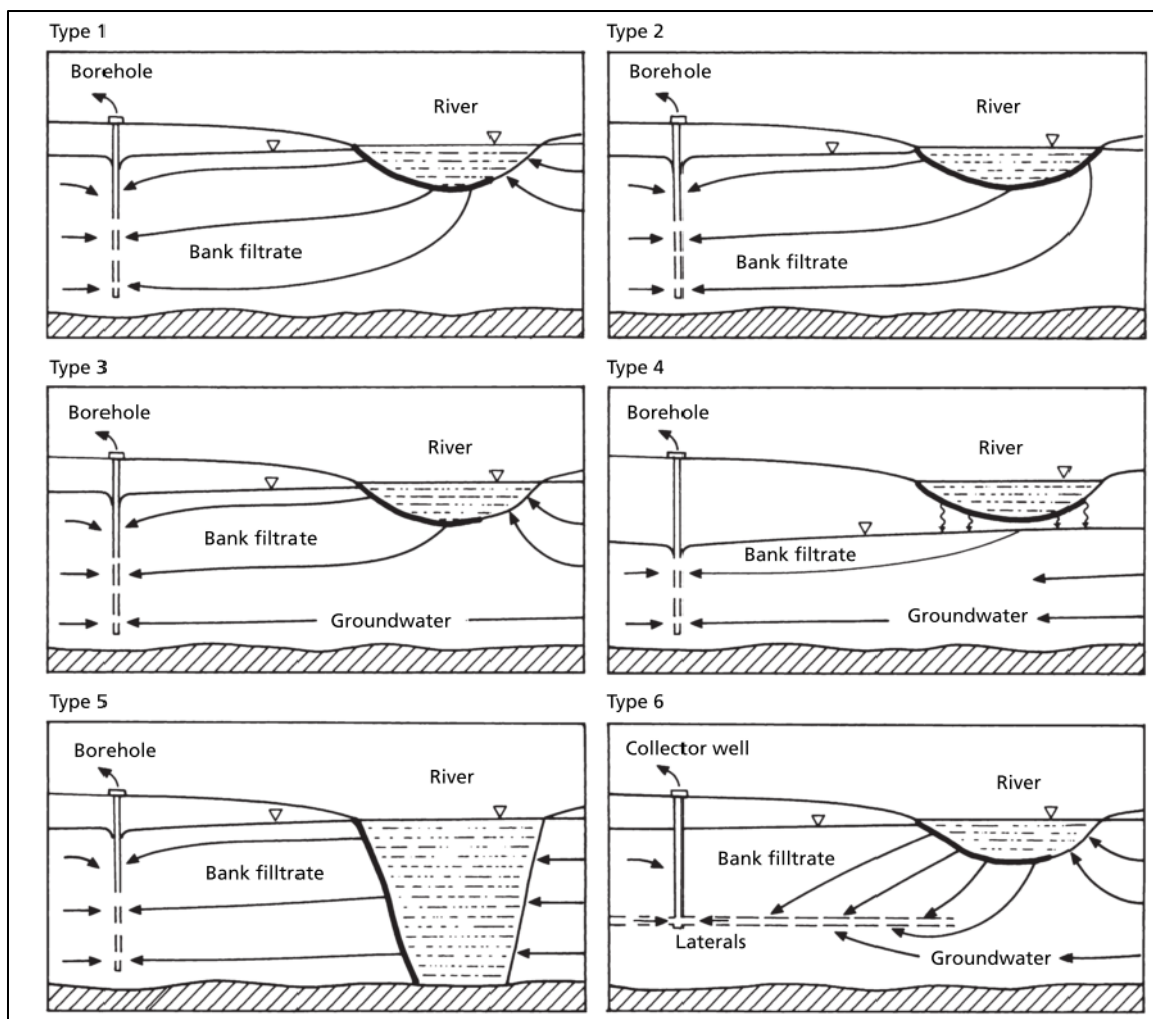
Břehová infiltrace

Mezi metody umělého doplňování podzemních vod lze řadit i metody tzv. indukované infiltrace. Jedná se zejména o břehovou infiltraci, metodu hojně využívanou ve světě.

Z konstrukčního hlediska se jedná o řady studní (vertikálních, nebo s horizontálním sběračem), umístěných podél jezera, přehrady, nebo povrchového toku v údolních terasách. Ideální podmínky představují zvodnělá tělesa písků, nebo štěrkopísků, případně štěrků, která jsou hydraulicky propojena s povrchovým tokem. Tyto studny, při odběru vody z podzemí, rychle rozšiřují svůj depresní kužel k hraně toku. Šíření depresního kužele se zpravidla zastaví při kontaktu s povrchovým tokem a dochází k dotaci vodou právě z toku. Během čerpaní studny zesilují nebo dokonce mění směry proudění v kolektoru v závislosti na dalších faktorech jako je druh studny (např. s horizontálním sběračem), hloubka koryta a okolní geologická stavba. Čerpaná voda tak v různých případech nemusí být pouze z povrchového toku, ale často bývá směsí s podzemní vodou z okolního kolektoru. Nejčastější situace jsou znázorněny na obrázku 6. (Hiscock a Bense 2014)

Voda infiltrovaná z řeky poté proudí ke studnovému řadu většinou několik desítek až stovek dní. Tento čas je dán vzdáleností sběrných studen od primárního zdroje vody, který bývá v rozsahu 50 až 200 metrů. (Grischek et al. 2002). Během průchodu horninovým prostředím dochází přírodnímu čištění vody pomocí procesů filtrace, sorpce na zrna hornin a dalších. Z těchto důvodů se jedná o metodu vhodnou pro vodárenský zdroj.

Hrkal (2016) vidí hlavní omezení využitelnosti břehové infiltrace v kvalitě infiltrované vody. Kapacita zdroje břehové infiltrace u větších toků je nejčastěji omezena pouze filtrační kapacitou břehů, průtok v řece bývá mnohonásobně větší než odebíraný objem.



Obrázek 6 - Odlišné typy proudění vody k vrtu v závislosti na přírodních podmínkách podle Hiscock and Grischek 2002

Modifikace kolektoru:

Modifikaci kolektoru lze využít v případech, kdy je problém s udržení vody v podzemí. Cílem je změnit podmínky bazálního odtoku na lokalitě. Nejvýznamněji se uplatňuje v oblastech, kde se střídají období sucha a srážek. Jedná se hlavně o bariéry, které brání odtoku vody z kolektoru s vysokou transmisivitou. Tyto překážky se nejčastěji budují jako příkopy kolmo na směr proudění podzemní vody, které se následně se vyplní méně propustným materiálem vzhledem k okolí. Výsledkem dobře zbudované bariéry je poté zadržování většího množství podzemní vody z období srážek a zvyšování její hladiny. (Asano 1985)

5. Podmínky pro využití umělé infiltrace

Každá metoda umělé infiltrace má své specifika. Metody povrchové infiltrace lze využít v odkrytých kolektorech s napojením na povrch. Oproti tomu hlubší překryté kolektory s tlakově napjatými zvodněmi lze doplnit pouze injekčními vrty. Každá z metod má svá specifika a omezení, která vyplývají nejen z přírodních podmínek na lokalitě a vydatnosti vodního zdroje, ale také například z podmínek ekonomických.

5.1. Topografie terénu a proudění povrchového toku

Reliéf povrchu často rozhoduje o volbě metody umělé infiltrace, zejména pokud uvažujeme o povrchové infiltraci. Rychlost proudění, spád, přítomnost meandrů a zrnitost naplavenin v okolí toku jsou do jisté míry dány reliéfem.

Využití cíleného zaplavyování, nebo zavlažovacích systémů je založeno na rozprostření vody na co největší plochu. Taková operace vyžaduje poměrně rovný terén s mírným sklonem, ideálně bez strží a hřebenů. Oproti tomu, vsakovací nádrže kanály a brázdy často kopírují směr proudění toku a mohou být budovány i ve členitějším reliéfu. Topografie však nijak zásadně neovlivňuje využití metod podpovrchových, jako jsou injekční studny, nebo vsakovací jámy.

Další důležitý faktor je také stálost průtoku. Je potřeba zvážit jak výkyvy v závislosti k ročnímu cyklu srážek pro dané podnebí včetně míry rizika povodní. Pozornost se věnuje také kolísavosti toku během dne. Zejména na tocích, které protékají obydlenými oblastmi, může během dne průtok kolísat z důvodu odběru vody do podniků nebo městských vodárenských sítí výše po proudu. Toky se stabilním průtokem se poté hodí více například pro břehovou infiltraci. (Asano 1985)

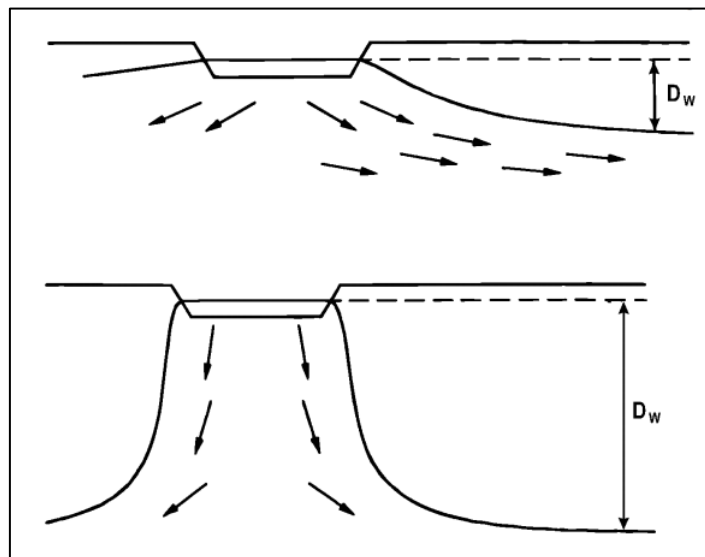
5.2. Geologické podmínky

Základním faktorem všech projektů je nalezení vhodné geologické struktury. Pro využití povrchové infiltrace se jako ideální jeví pískové, štěrkopískové případně pískovcové kolektory s průlinovou propustností zespod ohraničené izolátorem.

Nejdůležitější roli v procesu čištění vody při povrchové infiltraci má půdní vrstva a vadózní vrstva. Právě zde se odehrává většina filtračních, sorpčních a chemických dějů, a právě složení této přípopovrchové vrstvy určuje nároky na kvalitu primárního vodního zdroje nebo předčišťovací technologie. Ideální médium pro potřeby umělé infiltrace by bylo takové, které by umožňovalo rychlou filtraci a zároveň by během této krátké doby odbouralo všechny nechtěné látky. Takové řešení ale v přírodě nenalezneme. Hrubě strukturované materiály jsou vhodné pro filtraci, protože umožňují snadný přesun vody, nicméně velké póry v těchto půdách jsou neúčinné při odbourávání kontaminantů. V kontrastu s tím jemnozrnné půdy jsou velmi účinné při adsorpci kontaminantů. Filtrační rychlost je ale v porovnání s hrubšími půdami značně pomalá, navíc malé póry se mnohem snáze ucpávají nečistotami. Nevhodné jsou také strukturované půdy s větším obsahem organiky, kde se mohou nacházet makropóry (cesty živočichů, otvory po kořenech), které vedou k trendu, že většina vody během

zasakování použije tyto cesty místo filtrace půdou. Jako nejlepší kompromis je tedy považována zemina se strukturou jemného písku, nebo písčná hlína. (Bouwer 1985)

U zařízení povrchové infiltrace má velký vliv na rychlost a směr infiltrace také výška hladiny podzemní vody pod místem vsaku. Během procesu infiltrace dochází k hydraulickému propojení hladiny podzemní vody a vody uměle dodávané. V případě, že hladinu podzemní vody dělí od povrchu pouze malá vzdálenost (řádově jednotky metrů) šíří se infiltrovaná voda spíše laterálně (Obrázek 7) a její rychlost je dána především výškou vodního sloupce na povrchu. Oproti tomu, pokud je hladina podzemní vody více vzdálena od povrchu (řádově desítky metrů) bude pohyb infiltrované vody především sestupný, řízený gravitací a s menším vlivem výšky vodního sloupce na hladině. Vliv výšky hladiny podzemní vody je znatelný pro následnou změnu zásob podzemní vody. Pokud se zasakuje do již zvodněného kolektoru, zvyšuje se pouze množství přírodních zdrojů, tedy průtok v kolektoru. Naopak zasakuje-li se voda do suchého kolektoru, tak se kromě přírodních zdrojů zvyšuje také objem zásob podzemní vody a to úměrně volnému pórovému prostoru v kolektoru. (Bouwer 2002)



Obrázek 7 - Směr proudění infiltrované vody v závislosti na vzdálenosti od hladiny podzemní vody (D_w). (Bouwer 2002)

5.3. Kvalita zasakované vody

Kvalita zdroje infiltrované vody je společně s vhodným geologickým prostředím řídicím faktorem při výběru vhodné technologie zasakování, její kapacity a provozního plánu. V některých případech vede také k výstavbě předčišťovacího provozu, nebo následné úpravny. Nutno podotknout, že následující odstavce se zabývají pouze jakostí vody potřebnou pro provoz zařízení umělé infiltrace. Požadavky na výslednou kvalitu čerpané vody se liší podle požadavků na její další využití jako např. pro vodárenské účely, nebo pro zavlažování.

Mezi hlavní ukazatele jakosti vody pro konstrukci systémů umělé infiltrace patří především obsah suspendovaných pevných látek SS (suspended solid) a obsah celkových rozpuštěných pevných látek TDS (total dissolved solids). Akumulace pevných částí na rozhraní pláště zasakovacího objektu s půdou může mít za následek zpomalení, nebo dokonce zastavení procesu filtrace do podzemí. (Ground water recharge using waters of impaired quality 1994)

K ucpávání kontaktní vrstvy dna infiltrační nádrže, nebo pláště studny vede také růst organických částic. Jedná se zejména o řasy, bakterie a biofilm. V kombinaci s ucpáváním pevnými částicemi se tento jev obecně popisuje jako ucpávání kolmatace (clogging). V důsledku výše zmíněného vzniká v místě infiltrace vrstva jak anorganického, tak organického původu s nízkou propustností. Tloušťka takovéto vrstvy se nejčastěji pohybuje od 1 mm do 0.3 m. (Bouwer 1982) Kromě výše zmíněného je potřeba zmínit také chemické reakce, srážení minerálů (nejčastěji karbonáty a oxidy železa), ke kterým dochází v důsledku změny redoxních poměrů při čerpání. (Larroque a Franceschi 2011)

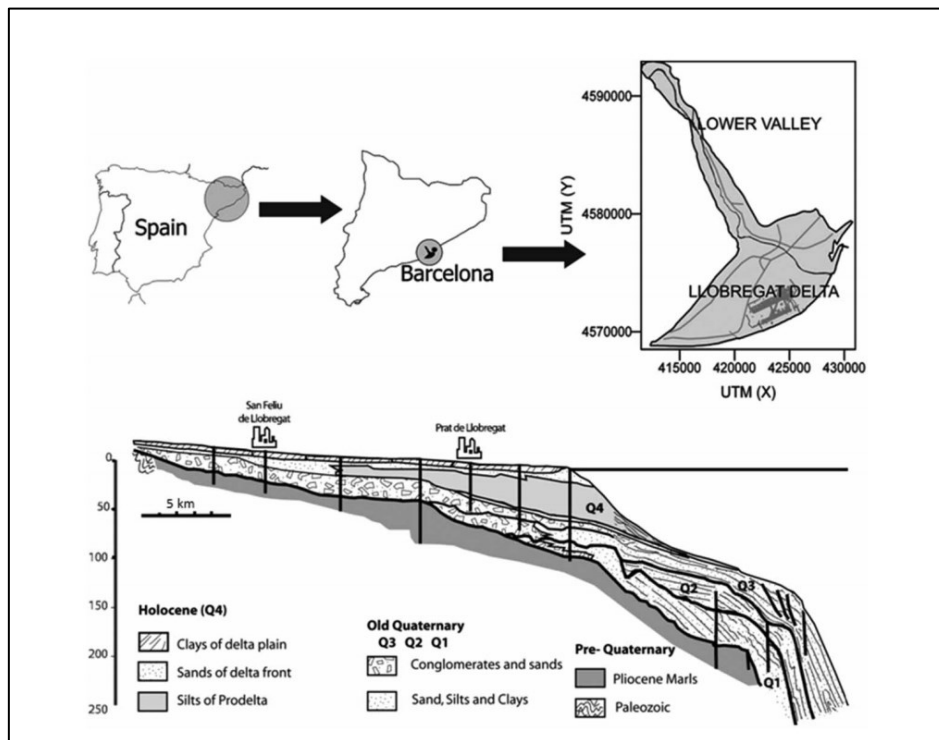
U metod povrchové infiltrace velmi záleží na chemických vlastnostech půdy, přes kterou se voda zasakuje. Jako příklad lze uvést sledování obsahů kationtů vápníku, hořčíku a sodíku. Tato koncentrace se nejlépe vyjadřuje pomocí koeficientu adsorpce sodíku SAR (sodium adsorption ratio). Pokud v infiltrované vodě oproti normálu převládají jednomocné kationty, zejména sodík a draslík, má to z pravidla za následek rozpouštění jílových minerálů přítomných v půdě. Vzniklá disperze zanáší volné póry půdy a snižuje tím rychlost infiltrace. (Bouwer 1978)

U vody injektované do kolektoru pomocí ASR nebo SAT studen je vhodné monitorovat také obsahy rozpuštěných plynů a teplotu, která by během infiltrace neměla být významně nižší než teplota v kolektoru. Při změně teploty původně povrchové vody v prostředí kolektoru by poté mohlo docházet k uvolňování těchto plynů, což může mít následek snížení hydraulické vodivosti prostředí a úměrně k tomu snížení injekční kapacity vrtu. Pokud se ovšem k injektáži využívá voda s malým obsahem rozpuštěných uvolnitelných plynů, nejedná se o velký problém. (Ground water recharge using waters of impaired quality 1994)

6. Příklady využití umělé infiltrace v praxi

6.1 Hydraulická bariéra proti intruzi mořské vody v kolektoru Llobregat (Španělsko)

Zájmová oblast delty Llobregat je tvořena jílovým klínem umístěným mezi dvěma štěrkopískovými kolektory. Vrchní kolektor formovaný v období holocénu má tloušťku 15 m. Tloušťka spodního, pleistoceního kolektoru se pohybuje od 10 do 20 m. Právě spodní kolektor, se svojí velkou transmisivitou v rozmezí 1000 až 5000 m² za den, je pro vodní zásobování nejdůležitější (Obrázek 8). Zdejší vody se čerpají nejen za účelem dotace okolí pitnou vodou a pro místní průmysl, ale jedná se také o významný zdroj vody pro aglomeraci Barcelony pro období sucha.



Obrázek 8 - Umístění delty Llobregat a geologická situace podle Simó et al. 2005

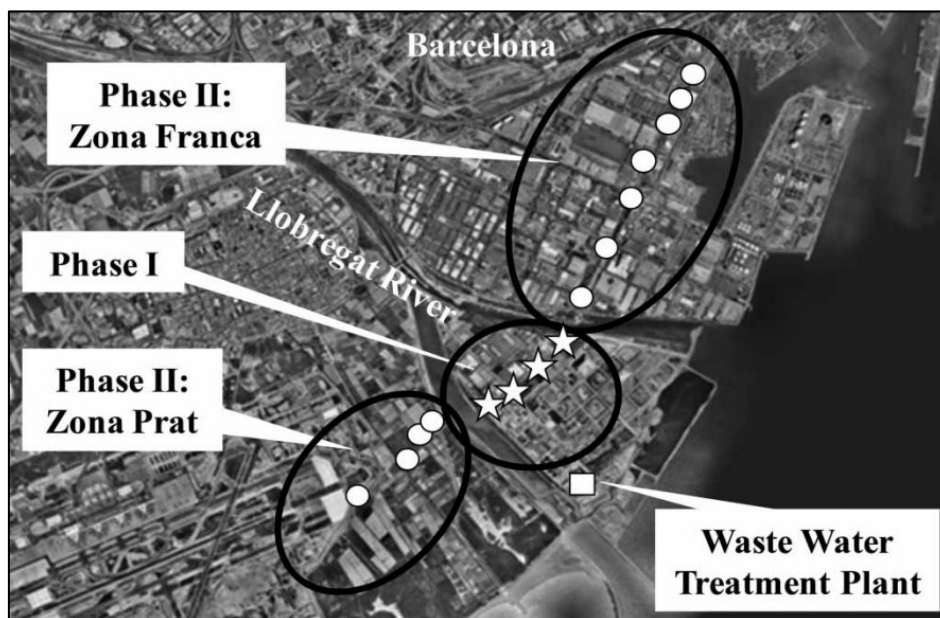
Intruze mořské vody do hlavního kolektoru v deltě Llobregat byly poprvé pozorovány již v šedesátých letech. Postupné zvyšování využívání podzemních zdrojů vod v oblasti vedlo k dalšímu zhoršení situace. V současné době má mořská intruze dvě hlavní fronty postupu a to jednak přímo centrální deltou a dále nejvýchodnějším cípem oblasti (Obrázek 9).



Obrázek 9- Zobrazení postupu mořské intruze do vnitrozemí. Vyjádřeno pomocí koncentrace chloridů v mg.l^{-1} (Ortuño et al. 2012)

Rostoucí problém s kvalitou vody v kolektoru se nakonec rozhodly řešit místní vodohospodářské instituce: ACA (The Catalan Water Agency), EMSHTR (Metropolitan Agency for Hydraulic Services and Waste Treatment) v kooperaci s hlavním místním dodavatelem vody, společností Agbar. Nejdůležitějším projektem v rámci této kooperace bylo vybudování hydraulické bariéry proti intruzím slané vody.

Za tímto účelem byla vytvořena síť injekčních vrtů, plněných vyčištěnou odpadní vodou (Obrázek 10). Výstavba probíhala ve dvou fázích. Během první fáze v roce 2007 se realizovaly celkem 4 vrty s injekční kapacitou $2400 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$. V roce 2010 se poté dokončilo dalších 11 vrtů a kapacita stoupla na $15000 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$. Celková cena veškeré technologie včetně čistírny odpadních vod byla vyčíslena na 23 miliónů eur.

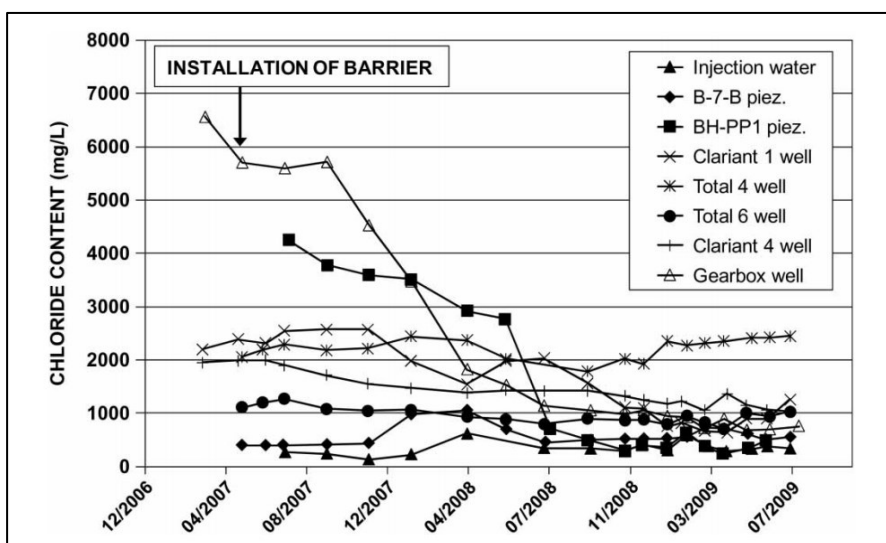


Obrázek 10- Rozmístění vstřikovacích vrtů (Ortuño et al. 2012)

Vtlačovaná voda je připravována na čistírně odpadních vod Baix Llobregat. Voda postupně prochází dále nitrifikací a denitrifikací, čiřením, koagulací, dekantací, ultrafiltrací, reverzní osmózou a nakonec dezinfekcí pomocí UV záření. Pro potřeby umělé infiltrace je třeba vyzdvihnout zejména ultrafiltraci, která garantuje konstantní stabilitu mikrobiologické složky, aby docházelo k co možná nejmenšímu zanášení injekčních vrtů. V tomto konkrétním případě je důležitá také reverzní osmóza, která snižuje salinitu. Během čištění se nepoužívá chlorace, zejména kvůli obavám z potenciálně zvýšeného množství karcinogenních trihalometanů v kolektoru. Takto přečištěná voda, která splňuje všechny požadavky na její uznání za pitnou, pokračuje dále do sítě patnácti vrtů lokalizovaných v 6 km dlouhé linii kopírující pobřeží ve vzdálenosti 1 km do vnitrozemí. Všechny vrty jsou 70 m hluboké a protínají hlavní kolektor v celé jeho tloušťce. Každý vrt je vybaven ventilem s průtokoměrem, teploměrem, konduktometrem a detekcí hladiny. Hydraulická bariéra je poté ovládána pomocí různého objemu vstřikování vody do vrtů tak, aby se hladina držela 1 m až 3 m nad mořskou hladinou. Preventivní údržba proti zanášení vrtů je vykonávána pomocí ponorných čerpadel, která v pravidelných intervalech, vždy 15min za 2 týdny, mění směr proudění vody ve vrtu. Díky tomu, a také díky dobře upravené vodě, zatím nebyl zaznamenán pokles účinnosti v doplňování podzemních vod.

Výsledky projektu po první fázi jeví velmi pozitivně. Od roku 2007 došlo k výraznému snížení obsahu chloridů (Obrázek 11), sodíku, vápníku, hořčíku, železa a amoniaku v okolních monitorovacích vrtech. Obsahy dusičnanů, které se vyskytují i ve vstříkované vodě mírně narostly. Obsah hydrogenuhličitanů zůstal konstantní. Bylo prokázáno, že hydraulická bariéra opravdu významně omezila rozsah intruzí mořské vody. Druhá fáze projektu, běžící od roku 2010, původní závěry potvrdila.

Psáno podle Ortuño et al. 2012, *Seawater injection barrier recharge with advanced reclaimed water at Llobregat delta aquifer (Spain). Water Science & Technology.*



Obrázek 11- Graf zachycující pokles obsahu chloridů na jednotlivých vrtech (Ortuño et al. 2012).

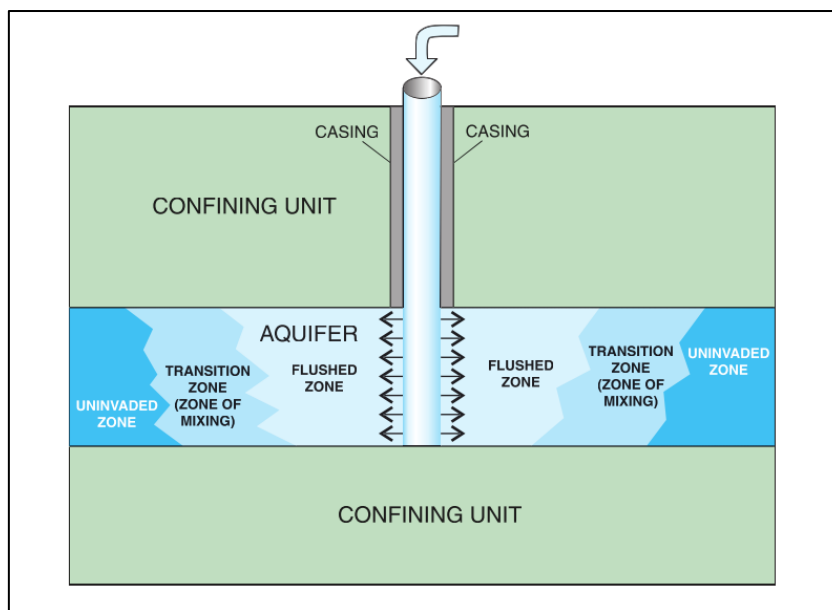
6.2 Využití systému ASR studen na jižní Floridě

Nedostačující kapacita stávajících zdrojů vody v době sucha vedla v oblasti Floridy k hledání nových možností jak tuto kapacitu zvýšit. Zvýšil se tak zájem i o možnost budovat systémy umělé infiltrace na principu *storage and recovery* studen. Hlavní myšlenkou tedy bylo uschovávání vody z období se srážkami na období sucha. ASR studny byly navrtány na třiceti lokalitách, převážně podle samostatných projektů menších měst a obcí. Pro infiltraci byl vybrán ve většině případů svrchní kolektor floridského zvodněný systému, který má kontinuální průběh napříč celou oblastí jižní Floridy. Strop této vrstvy se pohybuje v rozmezí od 150 m do 370 m pod povrchem. V celém kolektoru se vyskytuje brakická slaná voda, která představuje potenciální problém při jeho využití pro zásobování pitnou vodou. Podle idealizovaného modelu postupu uměle doplňovaných vod v kolektoru by měla časem vzniknout zóna, již zcela vymytá od původní vody brakické (Obrázek 12).

V roce 2000 byl americkým Kongresem schválen rozsáhlý legislativní dokument (Comprehensive Everglades Restoration Plan – CERP) zabývající se ochranou přírodních ekosystémů na Floridě. V rámci opatření přijatých s tímto dokumentem se počítá i s opatřeními k udržení vody v oblasti, včetně ASR studen.

Projekt se však potýkal s řadou nevyřešených otázek. Zejména se jednalo o to, jak se bude mísit infiltrovaná voda s původní vodou v kolektoru a s tím související otázka: jak připravit povrchovou vodu na infiltraci. Dále hrozilo, že by infiltrovaná voda mohla potenciálně vyplavovat nežádoucí složky z horniny v kolektoru, konkrétně arzén nebo radionuklidy dalších prvků.

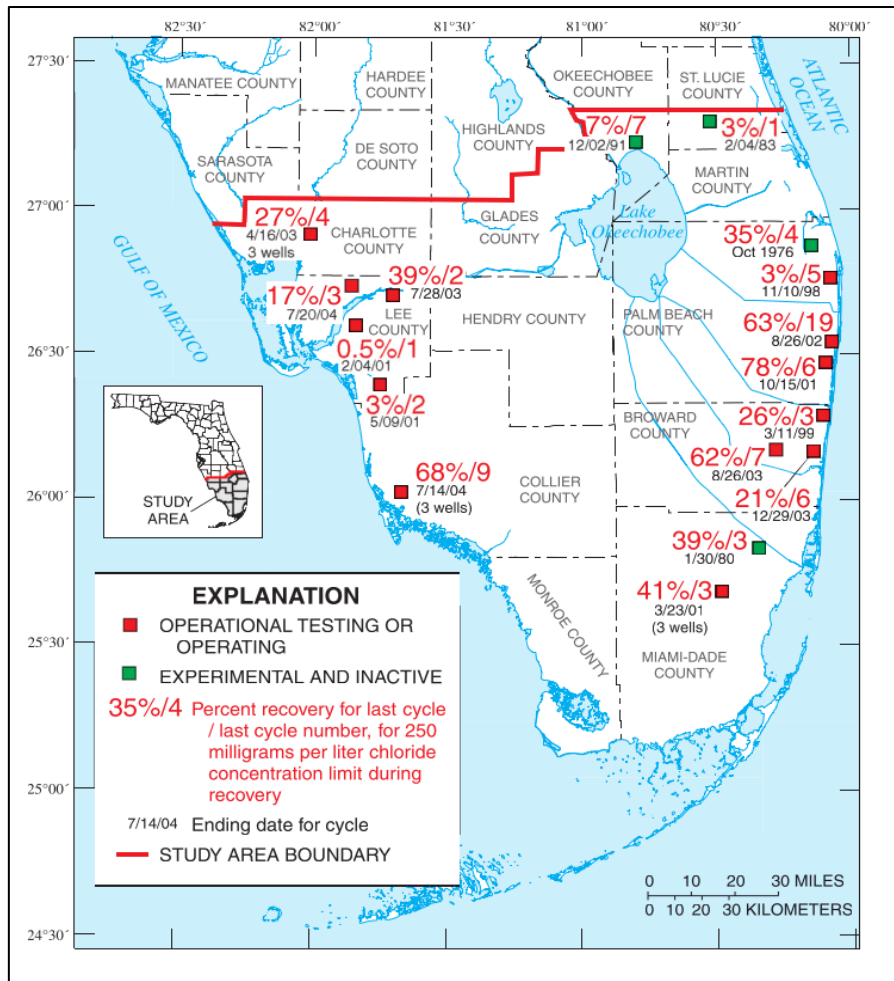
Aby bylo možné posuzovat budoucí úspěšnost celého projektu, byla hodnocena efektivita jednotlivých, již funkčních ASR projektů v rámci menších měst. Hodnoceno bylo na základě kritéria zvoleného jako podíl vyčerpaného objemu využitelné pitné vody k celkovému vyčerpanému objemu (který odpovídá objemu infiltrovanému). Pokud by tedy brakická voda v kolektoru neměla žádný vliv na vodu infiltrovanou pomocí studen, rovnal by se výsledný poměr 100%. Procentuální poměr se vypočítával pro každý provozní cyklus (vstřikování/čerpání) zvlášť. Hlavním ukazatelem kontaminace slanou vodou byl obsah chloridů, který byl limitní při hodnotě 250 mg.l⁻¹.



Obrázek 12 - Zóny postupu injektované vody v kolektoru (*Review of Aquifer Storage and Recovery in the Floridan Aquifer System of Southern Florida 2004*)

Z původních třiceti lokalit bylo nakonec hodnoceno pouze dvacet. Zbylé vrty trpěly buď nedostatkem vody pro zasakování, nebo technickými problémy. Objem injektované vody do kolektoru byl průměrně cca 420 000 m³ v jednom cyklu. Výsledky se navzájem velmi lišily. Přes deset lokalit dosáhlo již po prvních cyklech na úspěšnost přes 30%. Na pěti lokalitách naopak nikdy nestoupla úspěšnost nad 10% (Obrázek 13). Což bylo dáváno za vinu především nízkému počtu cyklů (s větším množstvím provedených cyklů byl pozorován trend vzrůstající úspěšnosti), přílišné salinitě okolí a malé mocnosti kolektoru. Na vině může být také až příliš vysoká transmisivita v kolektoru (okolo 3000 m² za den), která tak usnadňuje míchání s původní slanou vodou v kolektoru.

Očekávaných výsledku se podařilo dosáhnout nejlépe na východním pobřeží. Jako příklad lze uvést lokalitu Boyton Beach. S testováním ASR studen se zde začalo ke konci roku 1992 a do začátku roku 2000 zde proběhlo již 16 provozních cyklů (2 x ročně). Od počátečně nízkého podílu pitné vody, v řádu prvních desítek procent se po deseti provozních cyklech pohyboval tento podíl již okolo 75%. K tomuto úspěchu vedla zejména vhodná kombinace okolních podmínek, především relativně úzký kolektor (cca 30m) s vhodnou transmisivitou a vůči okolí relativně nízká salinita (1900 mg.l⁻¹).



Obrázek 13- Rozmístění pozorovaných lokalit a jejich účinnosti (Review of Aquifer Storage and Recovery in the Floridan Aquifer System of Southern Florida 2004)

Celkově lze tedy shrnout, že metodu ASR lze v některých případech využít i v kolektorech s brakickými vodami. Může se například jednat o alternativu k povrchové vodní nádrži v místech, kde by její výstavba nebyla možná. Největšími limity určující úspěšnost využití těchto studen jsou zejména: objem infiltrované vody, mocnost kolektoru, míra salinity a transmisivita prostředí.

Psáno podle Reese 2002, *Inventory and Review of Aquifer Storage and Recovery in Southern Florida*

6.3 Vodárenský zdroj Káraný

Vodárna Káraný je v dnešní době, po úpravně vody Želivka, druhým nejvýznamnějším zdrojem pitné vody pro Prahu a přilehlou oblast (pokrývá cca 1/3 celkové spotřeby). Vodní zdroj se skládá ze tří vzájemně oddělených systémů, a sice ze soustavy artéských studní s kapacitou 50 l.s^{-1} , břehové infiltrace podél řeky Jizery s kapacitou 900 l.s^{-1} a ze zařízení povrchové umělé infiltrace s kapacitou 900 l.s^{-1} . Většina vody pocházející ze zdroje Káraný je tedy získávána technikami umělé nebo indukované infiltrace. Všechny tři zdroje se mísí na hlavní čerpací stanici v Káraném, kde také probíhá závěrečná chlorace. Poté je již voda vedena do Prahy a dalších měst ve středočeském kraji.

Původní plán vodárny od Adolfa Thiema pochází z roku 1902, výstavba probíhala v letech 1906 až 1913 a do plného provozu naběhla vodárna 1. ledna 1914 (břehová infiltrace, artéské studny). Zařízení umělé povrchové infiltrace bylo uvedeno do provozu v roce 1968. (Herčík a Jásek. 2013) Všechny tři dílčí zdroje vody v Káraném jsou blíže popsány níže.

Artéské vrty východně od obce Káraný byly dokončeny jako součást původního vodárenského zdroje již v roce 1914. Jímaná voda pochází ze svrchnokřídových cenomanských pískovců. Doba zdržení v podzemí u této vody byla určena na zhruba 16 000 let. Jedná se o vodu vysoce kvalitní a po odželeznění (provzdušněním a následnou filtrací vysrážených oxidů) splňující limity pro vodu kojeneckou. Množství cca 50 l.s^{-1} je jímáno pomocí 7 celkem objektů. (Herčík a Jásek. 2013)

Břehová infiltrace je v provozu již od roku 1914. Voda je jímána pomocí násoskových řadů z více 680 studní, vybudovaných v kvartérních sedimentech podél řeky Jizery. Zdrojem vody ve studnách je voda infiltrovaná z řeky Jizery, smíšená s vodou přetékající ze sedimentů středního turonu a s vodou infiltrovanou do kvartérních sedimentů z atmosférických srážek. (Herčík a Jásek. 2013)

Jizerská voda se infiltuje dnem i břehem do okolních štěrkopískových náplavů. Cestou ke studnovým řadům urazí ve štěrkopískových náplavech vzdálenost cca 250 m. Získaná voda poté putuje pomocí čerpacích stanic a gravitačního svodného řádu do hlavní čerpací stanice v Káraném, kde se mísí s ostatními zdroji.

Problémem se zde v posledních letech stává zvýšená koncentrace dusičnanů v čerpané vodě. Vysoké koncentrace NO_3^- (100 až 145 mg.l^{-1}) byly zjištěny u většiny studní hornosojovického řadu (především severně od obce Sojovice), skorkovského řadu a jižní části benáteckého řadu, který se nachází jižně od Benátek nad Jizerou (orientační plánek rozmístění jednotlivých řadů na obrázku 14). Za hlavní zdroj kontaminace je považováno především využívání hnojiv s obsahem těchto látek. Bylo prokázáno, že zdrojem dusičnanů je především voda infiltrovaná přírodní cestou přes okolní pole do kvartérních náplavů. Velkou roli v tomto procesu hraje množství a rozložení atmosférických srážek. Při zapnutém čerpání studen břehové infiltrace se tato voda mísí s vodou infiltrovanou z Jizery a koncentrace NO_3^- klesá. (Milický et al. 2013) Z důvodu sledování stavu kontaminace byl v roce 2004 navržen monitorovací systém skládající se z 25 objektů (vrtů, domovních studen) rozprostřených po celé

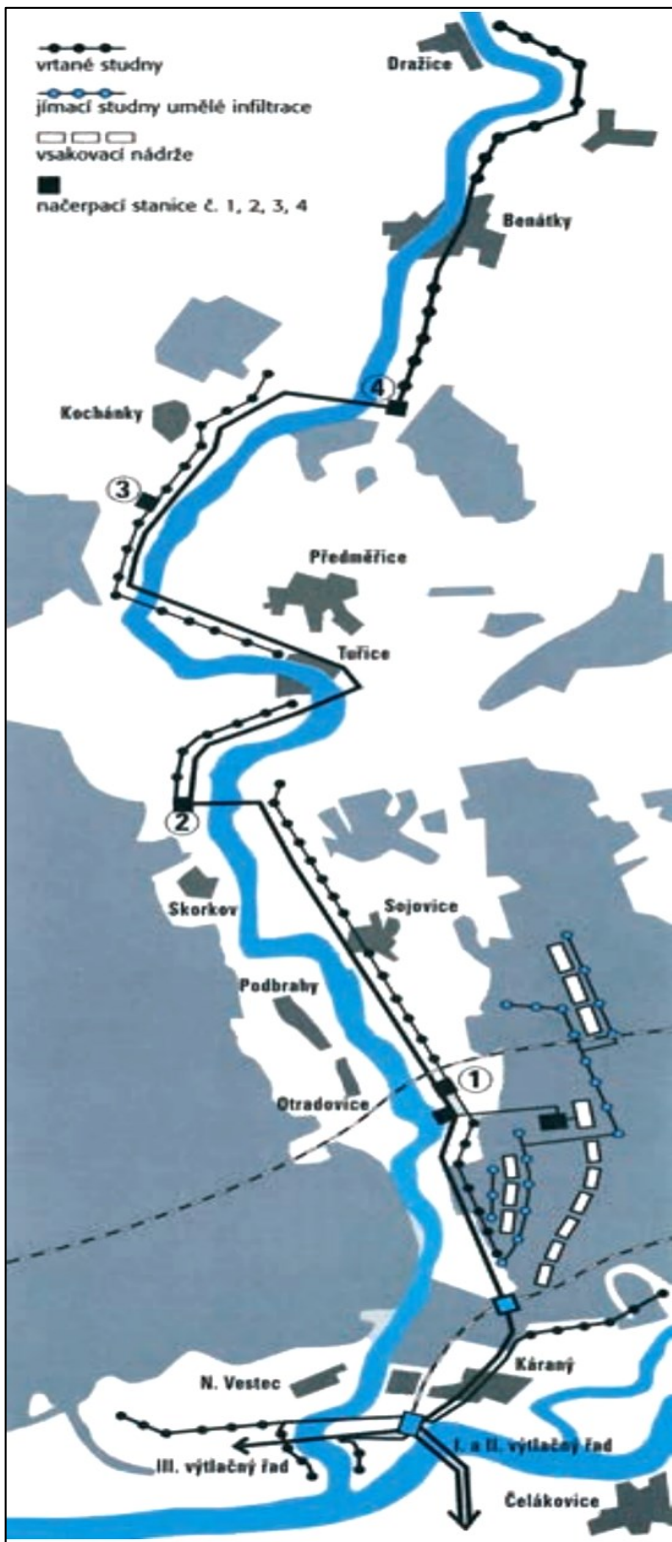
zájmové oblasti (stav k roku 2008). V rámci tohoto systému probíhá 2x ročně odběr vzorků pro chemické rozbor. (Koudelová a Hrušková 2008)

Umělá infiltrace byla vybudována v letech 1965 až 1969 v reakci na stále stoupající spotřebu pitné vody v hlavním městě. Zařízení bylo uvedeno do provozu ve 2 etapách. První část s kapacitou $500 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ byla uvedena do provozu v září 1968, zbývající část poté během roku 1969.

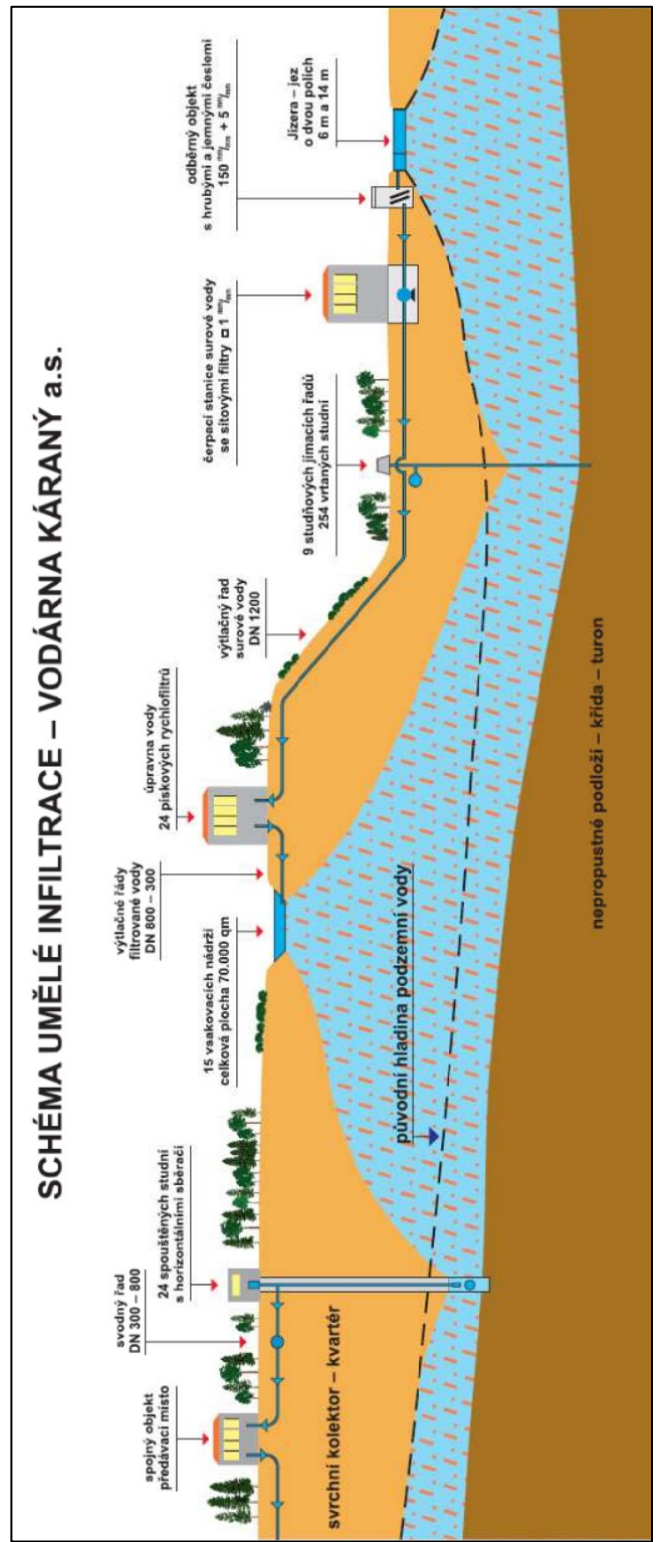
Zařízení umělé infiltrace se skládá z několika dílčích částí (Obrázek 15). Pro zajištění odběrů většího množství vody slouží pohyblivý jez na řece Jizeře, na jehož levém břehu se nachází odběrné zařízení s hrubými a jemnými česlemi. Následně voda přitéká do čerpací stanice surové vody, kde prochází přes pásové filtry (oka 1 mm), poté se pomocí vertikálních čerpadel dopraví na úpravnu vody Sojovice. Na úpravně jsou využívány pískové rychlofiltry o výšce náplně 130cm, s filtrační rychlostí okolo $3,6 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. Aby se při následné infiltraci zamezilo nadměrnému růstu řas, jsou na úpravně do vody dávkovány algicidní přípravky (AgNO_3 a CuSO_4). Takto upravená voda již putuje do jedné z celkem patnácti vsakovacích nádrží, jejichž celková vsakovací plocha je cca $70\,000 \text{ m}^2$. Dno nádrží je tvořeno vrstvou šterkopísku, který je obměňován v závislosti na míře kolmatace. Další procesy úpravy vody jako zvýšení tvrdosti, vyrovnání alkality a acidity, obohacení o minerální látky a vyrovnání teploty probíhá již přírodní cestou při průchodu kolektorem. Doba zdržení vody v podzemí se pohybuje v rozmezí 35 až 45 dní, poté je jímána vrtanými, spouštěnými (s horizontálním sběračem) studnami a putuje do hlavní čerpací stanice v Káraném. (Herčík 2008, Skalický 2015)

Zařízení umělé infiltrace v Káraném funguje bez větších komplikací již bezmála 50 let. Lokalita vyhovuje všem podmínkám pro využití této technologie, jako přítomnost dostatečně kvalitního, vydatného zdroje a poměrně stálého, vhodná geologická struktura, ideální hloubka podzemní vody a absence zdrojů znečištění v okolí. (Skalický 2015) Vliv na v zásadě bezproblémový chod zařízení může mít také fakt, že je využívána asi jen 50 % ($400\text{-}500 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) jeho kapacity.

Herčík (2008) vidí možnou slabinu technologie v zimních podmínkách, kdy může docházet k namrzání a ucpávání česlí, což vede k odstavení úpravní vody.



Obrázek 14- Rozložení vodárenských objektů zdroje Káraný (Herčík a Jásek. 2013)



Obrázek 15- Řez zařízením umělé infiltrace na lokalitě Káraný (Skalický 2015)

7. Diskuse a závěr

V první části své práce jsem se rozhodl shrnout základní poznatky o infiltraci a její intenzitě, na kterou má hlavní vliv zejména hydraulická vodivost prostředí, do kterého se voda zasakuje, a vzdálenost zdroje infiltrované vody od čelní linie zvlhčení (model Green-Ampt). V další části se vyskytuje stručný historický souhrn vývoje metod řízené umělé infiltrace, zejména v Evropě, který začal na přelomu 19. a 20. století. V práci jsou také popsány jednotlivé druhy využití umělé infiltrace.

Zvláštní kapitola byla věnována jednotlivým metodám doplňování podzemní vody. Popsány byly metody povrchové infiltrace, kam spadá například řízené zaplavování území v okolí vodních toků, systémy příkopů a brázd, nebo infiltrační nádrže. Dále možnosti doplňování podzemní vody pomocí metod podpovrchové infiltrace, kam spadají zejména infiltrační jámy a injekční vrty. Pozornost je věnována také metodám indukované infiltrace, zejména infiltraci břehové, která je na pomezí mezi infiltrací přírodní a umělou.

Dále jsou rozebrány hlavní faktory umožňující využití technik umělé infiltrace na dané lokalitě. Celkově lze říci, že jimi jsou zejména přítomnost vhodné geologické struktury pro infiltraci a zdroj relativně čisté vody, nebo možnost jejího předčištění. Každá metoda infiltrace má poté svá další specifika. Pro povrchovou infiltraci jsou naprosto klíčové podmínky v půdní a vadózní vrstvě, zejména pak hydraulická vodivost. Zde velmi záleží na konkrétním účelu zasakování vody do podzemí. Pokud je zařízení vybudováno za účelem retence vody z období dešťů pro zemědělství, je žádoucí, aby se během relativně krátkého času infiltrovalo co největší množství vody. Pro takové účely by byl vhodný například hrubozrnný písek. Na druhou stranu pomalejší infiltrace přes jemnější struktury může odbourat mnohem více polutantů a lze jí tak využít například ve vodárenství. Kvalita infiltrované vody se odráží zejména na míře zanášení / kolmatace dna infiltračních struktur. Hlavním důvodem tohoto děje může být především přítomnost vyššího množství suspendovaných pevných látek a organických částic jako jsou řasy a bakterie. Kolmatace je problémem i při využití technik podpovrchové infiltrace, která se využívá především v místech, kde je vhodná geologická struktura překryta izolátorem. Kromě výše zmíněného může docházet k zanášení vrtů oxidy železa nebo karbonáty. K tomuto jevu může docházet díky změně redoxních poměrů během čerpání vody.

V poslední části práce jsem zařadil studie tří vybraných projektů s tematikou doplňování podzemních vod. Na prvním příkladu, kterým je lokalita Llobregat ve Španělsku, je popsáno využití injekčních vrtů k vytvoření hydraulické bariéry proti intruzi mořské vody od pobřeží. Z výsledků během prvních let provozu zařízení lze usuzovat, že tento koncept může být účinný (redukce obsahu chloridů). Na druhou stranu je potřeba zmínit, že se jedná o velice nákladnou (cena projektu 23 mil. eur) technologii i vzhledem k tomu, že je zde infiltrována původně odpadní voda, která vyžaduje několikastupňové předčištění. V řadě států včetně České republiky by dnes navíc takový projekt vzhledem k původu infiltrované vody (odpadní) nebyl podle platné legislativy povolen. Druhá studie se týkala využití ASR studen na jižní Floridě, s cílem uchovávat vodu z období srážek pro období sucha.

Zde byl hlavní překážkou přirozený výskyt brakické slané vody v cílovém kolektoru. Z původních prognóz se očekávalo, že při opakovaných cyklech vtláčení a čerpání vody bude podíl přimísené brakické vody postupně klesat. Za dobu 8 let provozu byla, podle kritéria obsahu chloridů v čerpané vodě (str. 22), usuzována procentuální úspěšnost čerpání pro zásobování pitnou vodou. Na celkem 20 hodnocených lokalitách byl výsledný percentil velmi proměnlivý (rozmezí od 0,5 do 78%). Celkově lze tedy říci, že projekt byl úspěšný jenom na některých lokalitách v závislosti na geologických podmínkách kolektoru a počtu provozních cyklů. Posledním popsáním příkladem využití umělé infiltrace byl vodní zdroj Káraný, který se podílí na zásobování pitnou vodou v Praze a Středočeském kraji. Zde se využívá povrchová infiltrace přes soustavu infiltračních van, a také břehová infiltrace. Přičemž infiltrační vany jsou v provozu bezmála 50 let a břehová infiltrace dokonce takřka 100 let. Hlavními důvody úspěšného provozu jsou zejména kvalitní zdroj surové vody pro infiltraci z řeky Jizery a přítomnost dobře propustných štěrkopískových náplavů. Největším rizikem pro tento zdroj pitné vody (část břehové infiltrace) se v dnešní době stává zemědělství v okolní krajině. V důsledku používání hnojiv byl pozorován velký vzestup koncentrací NO_3^- v některých sběrných řadech.

Umělé doplňování podzemních vod je stále se rozvíjející obor vodního hospodářství. V souvislosti s trendy růstu světové populace a klimatické změny lze očekávat, že jeho význam i nadále poroste. Nutno podotknout, že ne vždy lze nalézt vhodný vodní zdroj a geologický útvar pro infiltraci. Plánování projektů umělé infiltrace také klade velké nároky na jeho zpracovatele, neboť uměle vyvolaná infiltrace může také nepříznivě změnit stávající hydrogeologické podmínky v kolektoru. Z toho důvodu je nutno ke každému projektu přistupovat velmi zodpovědně, zejména pokud by se jednalo například o infiltraci původně odpadních vod.

Osobně vidím do budoucna velký potenciál využití zařízení umělé infiltrace, která budou mít jako hlavní účel uchování vody z období srážek na období sucha, nebo se budou podílet na recyklaci odpadních vod, jako tomu je dnes například v Izraeli.

Stanovený cíl bakalářské práce byl splněn.

Adam Drmota

8. Literatura

- Asano, T.: Artificial recharge of groundwater. Boston: Butterworth, 1985. ISBN 0-250-40549-0.
- Bouwer, H. Groundwater hydrology. New York: McGraw-Hill, 1978. ISBN 9780070067158.
- Bouwer, H.: Design Considerations for Earth Linings for Seepage Control. Ground Water [online]. 1982, 20(5), 531-537 [cit. 2018-08-01]. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1982.tb01366.x.
- Bouwer, H.: Renovation of wastewater with rapid-infiltration land treatment systems. Pp. 249-282 in Artificial Recharge of Groundwater, T. Asano, ed. Boston, Mass.: Butterworth. 1985
- Bouwer, H.: Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal 2002, Volume: 10, Issue: 1, Pages: 121-142.
- Crites, R. W.; Middlebrooks, E. J.; Bastian, R. K.: Natural wastewater treatment systems. CRC Press: 2014. ISBN 9781466583269
- Grischek, T.; Schoenheinz, D.; Worch, E.; Hiscock, K.: (2002) Bank filtration in Europe – an overview of aquifer conditions and hydraulic controls. In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability (ed. P.J. Dillon). A. A. Balkema Publishers, Lisse, pp. 485–488.
- Ground water recharge using waters of impaired quality. Washington, D.C.: National Academy Press, 1994. ISBN 978-0-309-05142-2.
- Guidelines for water reuse. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1992.
- Herčík, L.: 40 let provozování umělé infiltrace v Káraném (1968-2008). Sborník konference Pitná voda 2008, s. 289-294. W&ET Team, Č. Budějovice 2008. ISBN 978-80-254-2034-8
- Herčík, L.; Jásek, J.: Sto let Káranské vodárny. SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací. Praha, 2013, 22(7-8), 1-6.
- Hernández, M.; Camprovín, P.; Bernat, X.; Massana, J.; Castelló, J.: (2015) ASR en Barcelona: Nuevo régimen de operación para hacer frente a nuevos escenarios [ASR in Barcelona: New operating regime to deal with new scenarios]. IV Jornadas de Ingeniería del Agua La precipitación y los procesos erosivos, Cordoba, October 2015
- Hiscock, K. M.; Grischek, T.: (2002) Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. Journal of Hydrology 266, 139–144.
- Hiscock, K. M.; Bense, V. F.: Hydrogeology: principles and practice. Second edition. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-0-470-65663-1. "

Hrkal, Z.: Řízená umělá infiltrace jako nástroj proti suchu i povodním – její perspektivy v ČR. Výzkumný ústav vodohospodářský TGM, 2016.

Jiménez Cisneros, B; Asano, T.: Water reuse: an international survey of current practice, issues and needs. London: IWA Publishing, 2008. Scientific and technical report (London, England), no. 20. ISBN 9781843390893.

Koudelová L., Hušková R.: Monitoring ochrany zdrojů ÚV Káraný. Sborník konference Pitná voda 2008, s. 295-300. W&ET Team, Č. Budějovice 2008. ISBN 978-80-254-2034-8

Larroque, F.; Franceschi, M.: Impact of chemical clogging on de-watering well productivity: numerical assessment. *Environmental Earth Sciences* [online]. 2011, 64(1), 119-131 [cit. 2018-08-13]. DOI: 10.1007/s12665-010-0823-9. ISSN 1866-6280. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-010-0823-9>

Maliva, R.; Missimer, T.: Effective use of aquifer storage and recovery technology for mine process water supply in Chile. *Water in Mining Conference*, At Santiago, Chile, 2010

Milický, M.; Gvoždík, L.; Šantrůček J.: Problematika dusičnanů v podzemní vodě v kvartérních sedimentech dolního toku Jizery. *SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací*. Praha, 2013, 22(7-8), 7-12.

Nesládková, M.; Šajer, J.: Vodohospodářské aspekty převodů vody v rámci ochrany před následky sucha a nedostatku vody v ČR. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2017, roč. 59, č. 4, str. 54–57. ISSN 0322-8916.

Ortuño, F.; Molinero, J.; Garrido, T.; Custodio, E.: Seawater injection barrier recharge with advanced reclaimed water at Llobregat delta aquifer (Spain). *Water Science & Technology* [online]. 2012, 66(10), 2083- [cit. 2018-06-06]. DOI: 10.2166/wst.2012.423. ISSN 0273-1223. Dostupné z: <http://wst.iwaponline.com/cgi/doi/10.2166/wst.2012.423>

Ray, C.; Melin, G.; Linsky, R. B.: *Riverbank filtration improving source-water quality*. S.l.: Kluwer, 2002. ISBN 9780306481543.

Reese, R. S.: *Inventory and Review of Aquifer Storage and Recovery in Southern Florida: Water-Resources Investigations Report 02-4036*. Tallahassee, Florida: U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2002.

Richert J. G.: *On artificial underground water*. C. E. Fritze's Royal Book-Store, Stockholm. 1900

Seiler, K. P.; Gat, J. R.: *Groundwater Recharge from Run-off, Infiltration and Percolation*. Water Science and Technology Library, 2007. ISBN 978-1-4020-5306-1

Simó, J. A.; Gámez, D.; Salvany, J. M.; Vazquez-Suñé, E.; Carrera, J.; Barnolas, A.; Alcalá, F. J.: *Arquitectura de facies de los deltas cuaternarios del río Llobregat*, Barcelona, España. *Geogaceta* 38, 171–174.

Skalický, M.: Umělá infiltrace lokality Káraný jako nástroj řešení nedostatku podzemní vody pro vodárenské využití. *SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací*. 2015, 24(6), 14-15.

Sprenger, C.; Hartog, N.; Hernández M.; Vilanova, E.; Grützmacher, G.; Scheibler, F.; Hannappel, S.: Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeology Journal* [online]. 2017, 25(6), 1909-1922 [cit. 2018-06-07]. DOI: 10.1007/s10040-017-1554-8. ISSN 1431-2174. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-017-1554-8>

Šrámek, O.; Kuchovský, T.: *Základy hydrogeologie*. Brno: Masarykova univerzita, 2003. ISBN 80-210-3146-8.

Štřeščík, J.; Rožnovský, J.; Štěpánek, P.; Zahradníček, P.: Změna ročních a sezonních srážkových úhrnů v České republice v letech 1961-2012. In: *Extrémny oběhu vody v krajině*. Mikulov: Nakladatelství Českého hydrometeorologického ústavu, 2014. ISBN 978-80-87577-30-1.

The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based solutions for water. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2018. ISBN 978-92-3-100264-9.

Todd, D. K.; Mays, L. W.: *Groundwater hydrology*. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2005. ISBN 0-471-05937-4.

Vecchioli, J.; Ku, H. F. H.; Sulam D. J.: *Hydraulic Effects of Recharging the Magothy Aquifer, Bay Park, New York, With Tertiary - Treated Sewage*. U.S. Geological Survey, 1980

Weeks, E. P.: U.S. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings: A Historical Overview of Hydrologic Studies of Artificial Recharge in the U. S. Geological Survey. In: Denver Federal Center, Lakewood, Colorado: U.S. Geological Survey, 2002, s. 5-12.

Legislativní dokumenty:

Vyhláška č. 369/2004 Sb., Vyhláška o projektování, provádění a vyhodnocování geologických prací, oznamování rizikových geofaktorů a o postupu při výpočtu zásob výhradních ložisek

Zákon č. 150/2010 Sb., Zákon, kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 200/1990 Sb., o přestupcích, ve znění pozdějších předpisů

Elektronické zdroje:

Review of Aquifer Storage and Recovery in the Floridan Aquifer System of Southern Florida [online]. U.S. Geological Survey, 2004 [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3128/>