

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
**Fakulta životního prostředí**  
**Katedra biotechnických úprav krajiny**



**Diplomová práce**

**Možnosti a příklady využití umělé infiltrace  
v rámci malého hydrologického cyklu**

**Bc. Martin Gregar**

**© 2015 ČZU v Praze**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra biotechnických úprav krajiny

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Martin Gregar

Voda v krajině

Název práce

**Možnosti a příklady využití umělé infiltrace v rámci malého hydrologického cyklu**

Název anglicky

**Possibilities and applications of artificial infiltration as a part of small water cycle**

---

### Cíle práce

Komplexní shrnutí problematiky řízeného doplňování zdrojů podzemní vody (Managed Aquifer Recharge – MAR). Problematika prudkého nárůstu deficitu podzemních vod způsobená nadměrnou exploatací kolektoru a probíhající klimatickou změnou se postupně stává čím dál tím více diskutovanou otázkou a to nejen v aridních a semiaridních oblastech, ale i v oblastech mírného klimatického pásu. Příčiny rostoucího deficitu zásob podzemní vody jsou v různých oblastech různé, jejich společným problémem je však vyřešit otázku jejich revitalizace a zajištění trvale udržitelného stavu. K řešení tohoto problému byla vyvinuta celá řada technik a přístupů využívajících jak historické zkušenosti, tak nejmodernější technologie. Cílem této práce je shromáždit souhrnnou informaci o využití různých technologií MAR, přehledný popis geologicky vhodných kolektorů, shrnutí poznatků a zkušeností při jejich aplikaci umělé infiltrace v různých oblastech světa a současně popsat jejich použití na konkrétních příkladech realizovaných projektů.

### Metodika

K naplnění cíle práce bude provedena literární rešerše o metodách řízeného doplňování zdrojů podzemní vody, o postupu při aplikaci těchto metod v různých zemích světa a shromáždění informací o realizovaných projektech MAR ve světě i v České republice. Pro shromáždění zdrojů a pramenů bude použit hierarchický přístup, tedy od obecně formulovaných témat a přístupů jaké jsou uplatňovány na úrovni OSN, UNESCO a EU, přes konkrétně definované přístupy na úrovni států a regionů až po specifické příklady na úrovni konkrétních projektů. Půjde především o shromáždění dostupných zdrojů, ať už to budou vědecké knihy, články, sborníky z mezinárodních konferencí či zkušeností tuzemských odborníků, které by popisovaly způsob fungování řízeného doplňování zásob podzemních vod. Práce bude obsahovat i stručný přehled hydrogeologicky vhodných kolektorů pro aplikaci MAR.

## **Doporučený rozsah práce**

40 až 70 stran

## **Klíčová slova**

dotace do podzemních vod, umělá infiltrace, kolektor, umělé zavlažování, kolmatace, zvedeň

---

## **Doporučené zdroje informací**

Krásný, J., Císlarová, M., Čurda, S., Datel, J. V., Dvořák, J., Grmela, A., a další. (2012). Podzemní vody České republiky – Regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod. Praha: Česká geologická služba.  
Máca, P. (2014). Hydrologie pro bakaláře. Praha: ČZU v Praze.  
Pyne, R. (1995). Ground water recharge and wells – A guide to Aquifer Storage and Recovery. Florida, USA: Lewis Publishing.

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2015/06 (červen)

## **Vedoucí práce**

doc. Ing. Jakub Štibinger, CSc.

## **Konzultant**

prof. Pavel Pech

Elektronicky schváleno dne 15. 4. 2015

**prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.**

Děkan

V Praze dne 20. 04. 2015

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Možnosti a příklady využití umělé infiltrace v rámci malého hydrologického cyklu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20.4.2015

---

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Jakobovi Štibingerovi za užitečné rady při zpracování diplomové práce, doc. RNDr. Zbyňkovi Hrkalovi, Ph.D. za uvedení do problematiky a cenné konzultace, RNDr. Janovi Jehličkovi, CSc. za pomoc při výkladu geologických termínů a své rodině za podporu.

# **Možnosti a příklady využití umělé infiltrace v rámci malého hydrologického cyklu**

## **Abstrakt**

Práce shrnuje komplexním způsobem podstatné informace o tématu umělé infiltrace v rámci malého hydrologického cyklu. Dále je zde shromážděna celá řada příkladů využití MAR (Managed Aquifer Recharge) v Čechách a ve světě s celou řadou pramenů a odkazů. Práce dále popisuje i problematiku kvality podzemních vod a její závislosti na zdrojích používaných při jejím řízeném doplňování infiltrací. Řeší hydrogeologické poměry různých typů kolektorů z hlediska jejich využitelnosti pro realizaci MAR. V rámci popisovaných příkladů jsou diskutována i rizika a komplikace spojené s jednotlivými projekty z pohledu technického, geochemického, kvality vody, kolmatace ale i různých přístupů na státních i místních úrovních.

**Klíčová slova:** dotace do podzemních vod, umělá infiltrace, kolektor, umělé zavlažování, kolmatace, zvodeň

# **Possibilities and applications of artificial infiltration as a part of small water cycle**

## **Abstract**

This work summons essential information about artificial infiltration as a part of small hydrological cycle. It contains examples of the use of MAR (Managed Aquifer Recharge) in Czech republic and from the World with a wide range of sources and references. The work also describes the problem of groundwater quality and its dependence on the water sources used in controlled recharge by infiltration. There are informations about hydrogeological conditions of different types of collectors in terms of their relevance for the implementation of MAR. Risks and complications from the technical, geochemical, water quality and clogging points of view associated with individual described projects and political approaches at government and local levels are discussed.

**Keywords:** Managed Aquifer Recharge, artificial infiltration, collector, irrigation, clogging, aquifer

## Obsah

1. Úvod.....	11
1.1 Velký hydrologický cyklus.....	11
1.2 Malý hydrologický cyklus.....	13
1.3 Problematika umělé infiltrace.....	16
2. Historie.....	20
2.1 Historie ve světě.....	20
2.2 Historie v ČR.....	21
3. Cíle MAR (současná strategie).....	22
4. Problémy s kvalitou vody a se zdroji vody při jejím doplňování.....	23
4.1 Povrchové vody (Surface Water).....	24
4.2 Odtok srážkových vod (Storm-Water Runoff).....	25
4.3 Vyčištěné odpadní vody (Reclaimed Water).....	26
4.4 Pitná voda (Potable Water).....	31
5. Hydrogeologické poměry a kontrola doplňování.....	32
5.1 Říční sedimenty (Alluvium).....	33
5.2 Puklinová propustnost (Fractured Hard Rock).....	34
5.3 Průlinová propustnost [konsolidované pískovce] (Consolidated Sandstone Aquifers).....	34
5.4 Krasový kolektor (Carbonate Aquifer).....	35
5.5 Horniny s dvojnou pórovitostí.....	35
6. Metodologie řízeného doplňování podzemní vody.....	36
6.1 Plošné metody zasakování (Spreading Methods).....	38
6.1.1 Infiltrace v infiltračních rybnících, nádržích a plochách (Infiltration or Recharge Ponds or Basins).....	38
6.1.2 Filtrace přes půdní horizont (Soil Aquifer Treatment – SAT).....	40
6.1.3 Řízené zaplavování (Controlled Flooding).....	41
6.1.4 Infiltrace u efemerních toků (Incidental Recharge).....	41
6.2 Modifikace odtoku (In-Channel Modifications).....	42
6.2.1 Perkolační rybníky za přehradami (Percolation Ponds Behind Check-Dams) 42	
6.2.2 Retence vody v písečných přehradách (Sand Storage Dams).....	43
6.2.3 Podpovrchové přehrady (Subsurface Dams).....	44
6.2.4 Propustné přehrady a uvolňování pro infiltraci (Leaky Dams and Recharge Releases) 45	



6.3	Studny, šachty, vrty (Wells, Shafts and Boreholes).....	45
6.3.1	Otevřené studny a šachty (Open Wells and Shafts).....	45
6.3.2	Vrtané studně a vrty (Drilled Wells and Boreholes).....	46
6.4	Indukované břehové infiltrace (Induced Bank Infiltration) .....	48
6.4.1	Břehová infiltrace (Bank Filtration).....	48
6.4.2	Mezidunová infiltrace (Interdune Filtration) .....	49
6.5	Zadržování srážek (Rainwater Harvesting).....	49
6.5.1	Zemědělství v suchých oblastech (Dry Land Farming) .....	50
6.5.2	Využívání srážkových vod ze střech (Roof – Top Rainwater Harvesting)....	50
6.6	Kolmatace (Clogging Issues).....	51
7.	Institucionální aspekty MAR .....	52
7.1	Vývoj programů rozvoje pro povodí a MAR v Indii .....	55
8.	Příklady .....	56
8.1	Příklady v ČR.....	56
8.1.1	Káraný.....	56
8.1.2	Jímací území Tlumačov .....	58
8.1.3	Umělá infiltrace v povodí Svitavy .....	59
8.2	Příklady ve světě .....	60
8.2.1	Doplňování zvodní pomocí povrchové plošné infiltrace v Kaftari, Irán.....	60
8.2.2	Management v povodí v Rajasthanu, Indie.....	61
8.2.3	Doplňování degradovaných zvodní pomocí propustných přehrad v Balochistanu.....	62
8.2.4	Zachycování přivalových srážek pomocí injekčních vrtů do brakické zvodně a jejich využití pro závlahy – Austrálie .....	64
8.2.5	Infiltrace mezi písečnými dunami v Atlantis, Jihoafrická republika.....	67
8.2.6	Retence v puklinových křemencích ve Windhoeku v Namibii.....	69
8.2.7	Retence podpovrchových vod v Keni .....	70
8.2.8	Retence zvodní pomocí zavlažovacích kanálů v jižní části pohoří Sierra Nevada, Španělsko .....	72
8.2.9	Intenzifikace doplňování zásob podzemních vod v Maďarsku prostřednictvím břehové filtrace pro zásobování pitnou vodou .....	73
8.2.10	Doplňování zvodní pomocí injekčních studní v Mexiku .....	73
8.2.11	Mapa potenciálních oblastí vytypovaných pro MAR v Amman-Zarqa a Azraq Basins, Jordánsko.....	74
8.2.12	MAR - Příkopová infiltrace do propustného podloží (USA) .....	76

8.2.13	Výběr vhodných území pro MAR s využitím systému řízeného vsakování v Phitsanulok, Sukhothai and Phichit Provinces, Thailand.....	78
8.2.14	MAR na úrovni vesnice v Indii.....	80
8.2.15	Vývoj kvality vody v průběhu MARu v krystalinické zvodni v Indii. Reaktivní transportní model v kritické zóně .....	81
8.2.16	Zásadní principy pro politiku MAR v Austrálii .....	82
8.2.17	Politické preference pro MAR při zabezpečení udržitelného zásobování vodou Chennai City, Indie .....	84
8.2.18	MAR, přehled legislativního přístupu ve vybraných západních státech USA	85
8.2.19	Umělá infiltrace ve starém řečišti u řeky Dunaj, Maďarsko .....	86
9.	Diskuze .....	87
10.	Závěr .....	88
11.	Seznam literatury .....	90

## 1. Úvod

Předkládaná práce shrnuje teoretická východiska a praktické příklady využití umělé infiltrace v ČR i ve světě. Příčin, proč byla a je umělá infiltrace používána je celá řada, od starověkých závlahových systémů, přes problémy se zásobováním pitnou vodou z podzemních zdrojů až po obecný přístup k plošnému zadržování srážkových vod v krajině a zlepšení hydrologických vlastností území. Pro pochopení širších souvislostí spojených s realizací řízeného doplňování zásob podzemní vody (Managed Aquifer Recharge – MAR) je nezbytné tento problém vnímat i jako součást hydrologického cyklu. Rozsah a zadání práce neumožňuje zkoumání a prezentaci detailních procesů aplikovaných v souvislosti s realizací jednotlivých projektů, jako jsou např. specifické hydrogeologické modely, modely proudění podzemních vod a celé další řady technických a hydrogeologických postupů.

### 1.1 Velký hydrologický cyklus

Hydrologie je věda, zabývající se studiem výskytu a koloběhu vody na Zemi (Němec, 1964). Jiná definice říká, že hydrologie je věda, zabývající se popisem a predikcí výskytu, cirkulací a distribucí vody na Zemi a v atmosféře (Chow, 1964).

Zájmem hydrologie je popis „rozdělování vody“, jenž je realizován prostřednictvím tzv. hydrologického cyklu.

Hydrologický cyklus je možné charakterizovat jako systém. Studium chování obecných systémů je rozvíjeno systémovou teorií, která ve značné míře ovlivnila popis hydrologického cyklu (Horton, 1933).

Systém je definován jako jakákoliv struktura, schéma, zařízení nebo postup, které dávají do vztahu vstup s výstupem (Dooge, 2003).

Hydrologický cyklus je systém, který se skládá ze dvou hlavních částí:

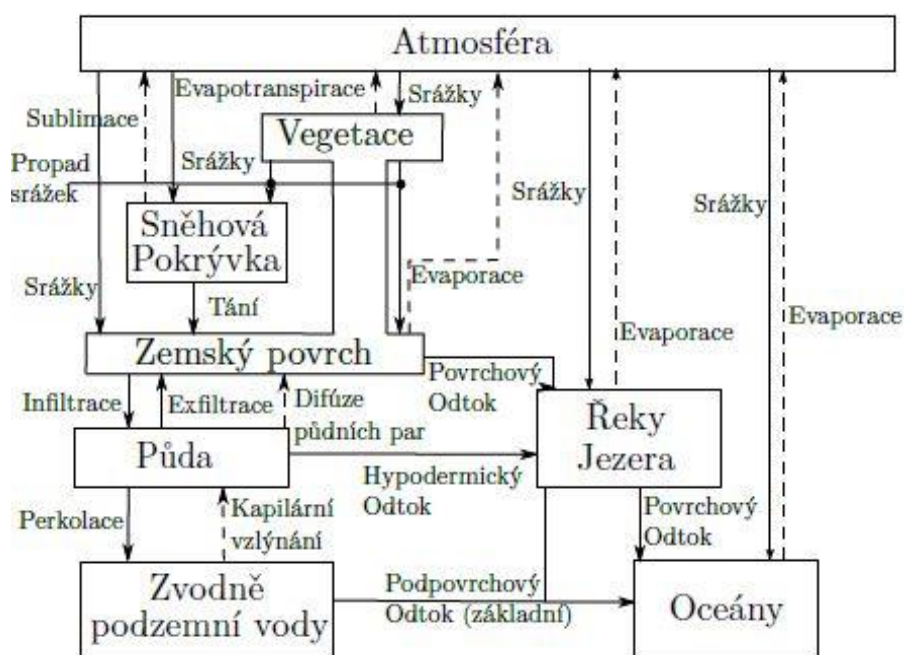
- Prostorů, ve kterých je voda zadržena – akumulována
- Procesů, které odvádějí a přivádějí vodu do daných prostorů

Prostory akumulace vody se nacházejí v atmosféře, na a pod zemským povrchem. Vytváří relativně komplikované retenční reservoáry – nádrže, které mnohdy nemají přesně určený objem a jsou navzájem úzce propojeny. Hydrologie se zaměřuje na studium akumulačních nádrží, které se nacházejí v blízkosti zemského povrchu.

Akumulační prostory spolu s aktuálně zadržným objemem vody jsou označovány jako zásoby (Dooge, 2003).

Hydrologické procesy propojují jednotlivé nádrže, zajišťují přítok a odtok vody z jednotlivých nádrží. Jestliže voda odtéká z jednoho retenčního prostoru, zároveň přitéká do dalšího retenčního prostoru, popřípadě se může vracet zpět do původního zásobního prostoru (Eagleson, 2003).

Hydrologický cyklus je tedy možné si představit jako systém navzájem propojených nádrží, které mezi sebou komunikují hydrologickými procesy (Máca, 2014).



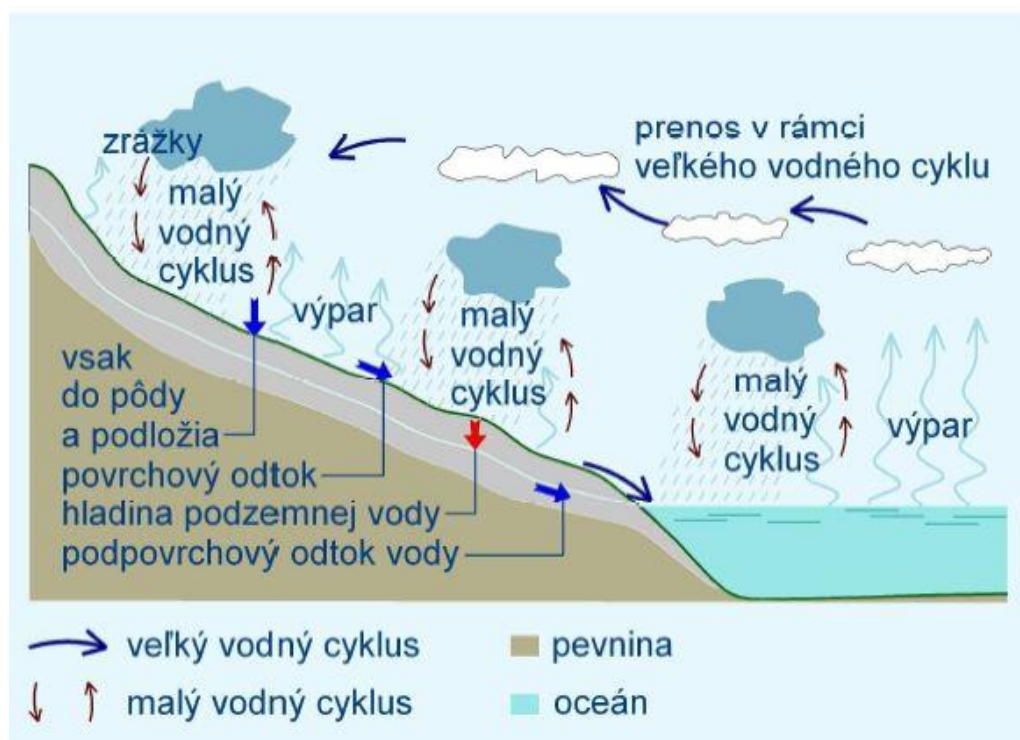
Obrázek 1 Hydrologický cyklus (Máca, 2014)

Velký vodní cyklus představuje v podstatě výměnu vody mezi oceány a pevninou. Do atmosféry se každoročně vypaří okolo 550 tisíc m<sup>3</sup>. Z moří a oceánů se odpaří okolo 86% tohoto objemu, z pevniny pak 14%. Z celkového úhrnu atmosférických srážek vzniklých z výparu vypadne nad moři a oceány 74% a 26% nad pevninami. Z toho vyplývá, že moře a oceány dotují pevninu určitým objemem vody. Část vody ze srážek se vsákne, a když dosáhne hladiny podzemní vody, odtéká podpovrchovým odtokem (mimo bezodtokových oblastí). Část vody využije rostlinstvo a část se opět odpaří. Zbytek odtéká říční sítí zpět do moří a oceánů. Za rovnovážných podmínek odtéká z pevniny stejné množství vody, jakým byla pevnina dotována v podobě srážek ze světového oceánu. Už relativně malé výkyvy z tohoto rovnovážného stavu

mohou působit na kontinentech vážné problémy, zejména pokud jsou dlouhodobé a týkají se velkých povodí. Potom dochází k odvodňování kontinentů. Děje se to například tehdy, když člověk systematickou činností snižuje vsak do půdy (odlesňování, intenzivní zemědělství, urbanizace) a naopak srážkovou vodu prostřednictvím odkanalizování rozsáhlých území co nejrychleji odvádí. Na pevnině se pak snižuje půdní vlhkost, klesá hladina podzemní vody a v důsledku chřadnoucí vegetace se i snižuje výpar. Kromě změn v globální vodní bilanci způsobené jevy mimo vliv člověka (sluneční cykly, změny polohy Země vůči Slunci, sopečná činnost, atp.) způsobuje člověk svoji činností další výkyvy. Soustavnou činností v opačném směru, tj. záměrným zadržováním vody na kontinentu, by mohlo dojít ke zmírnění tohoto stavu (deficit kontinentální vody ve velkém hydrologickém cyklu) a postupné stabilizaci (Kravčík, 2007). Umělá infiltrace, i když z globálního pohledu se jedná o mizivé zlomky procent, může být jednou z metod, která přispěje k řešení tohoto problému.

## **1.2 Malý hydrologický cyklus**

Z hlediska umělé infiltrace je důležitější a také „viditelnější“ malý vodní cyklus. Můžeme ho definovat jako uzavřený koloběh vody, při kterém voda vypařená na pevnině spadne v podobě srážek na to samé pevninské prostředí. Mezi jednotlivými malými vodními cykly, které probíhají v čase a prostoru nad velkými územími s různou morfologií a povrchy s různou vlhkostí, probíhají vzájemné interakce. V malém vodním cyklu probíhá i horizontální cirkulace vody, ale na rozdíl od velkého hydrologického cyklu, je pro něj charakteristický vertikální pohyb. Výpar ze sousedících ploch s různými teplotami na sebe navzájem působí při tvorbě oblačnosti. Lze říci, že v krajině probíhá cirkulace současně v množství malých vodních cyklů dotovaných velkým vodním cyklem.



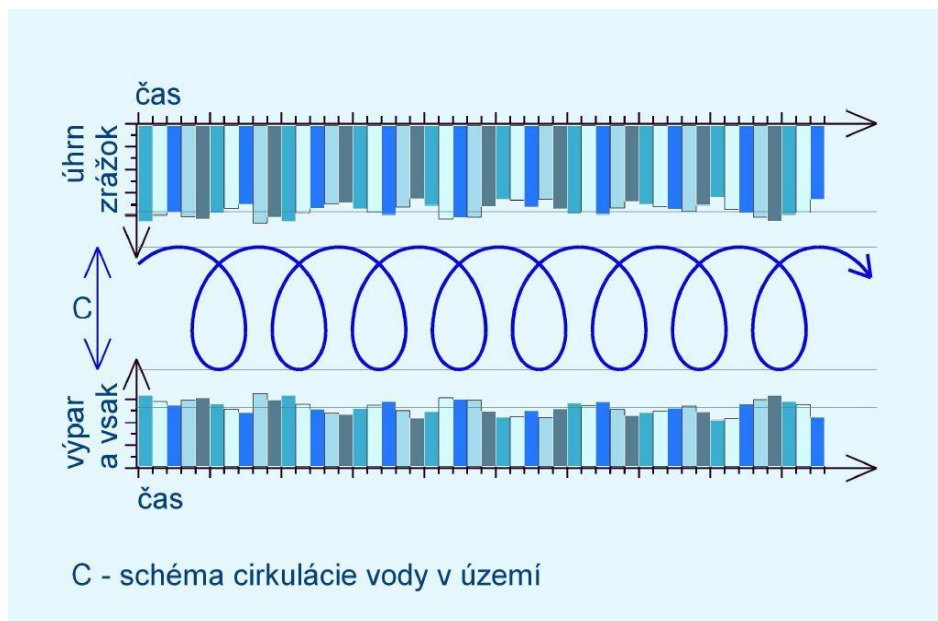
Obrázek 2 Malý hydrologický cyklus (Kravčík, 2007)

Název malý vodní cyklus vyvolává mylnou představu, že je v něm málo vody. Pokud vezmeme v úvahu pevninskou bilanci pro oblast s průměrným srážkovým úhrnem 720 mm, vyplývá, že přísun z moří a oceánů je okolo 310 mm a srážky jsou tedy většinou tvořeny (cca 410 mm) výparem z pevniny. Srážkový úhrn v území se podílí na přirozené infiltraci do půdní vrstvy a pochází z 50-65% z malého vodního cyklu. To je zásadní informace, která přináší nový pohled na dosavadní přístup k managementu povodí. Není možné donekonečna neomezeně přetvářet a odvodňovat krajinu bez vlivu na srážky, teplotní režim a v důsledku i na hladiny podzemních vod. Pokud mají zůstat vyrovnané a časově rozložené srážky nad pevninou (a tedy přirozeným a dostatečným způsobem i dotovat podzemní vody), musí zůstat zachovaný i dostatečný odpar z území.

V případě, že nastane rozsáhlé narušení vegetačního krytu (např. urbanizace, odlesňování, intenzivní zemědělství) dopadá sluneční energie na plochy s nízkým výparem a velká část se přemění na teplo. Tím vznikají i velké teplotní gradienty mezi dnem a nocí nebo mezi jednotlivými plochami. To je příčina zvýšeného proudění vzduchu a vodní pára je díky tomu unášena na velké vzdálenosti a většina odpařené vody se z krajiny ztrácí. Ubývají malé a četné srážky a zvyšuje se podíl mohutných a méně četných srážek od moře. Cyklus se otevírá a začíná převládat

velký vodní cyklus, který je, na rozdíl od malého charakteristický epizodami se všemi z toho vyplývajícími důsledky (zrychlený odtok, eroze, atd.). Obnova dominance malého vodního cyklu, který je z hlediska vegetace, ale i člověka klíčový pro zachování stability vodní bilance a klimatických podmínek, závisí na obnově rostlinného krytu území, vázaného na dostatečnou půdní vlhkost, obnově vodních ploch v krajině a odpovídající hladiny podzemní vody.

Nezbytnou, i když ne dostačující podmínkou stabilního klimatu v krajině je ustálený vodní cyklus. Proto je podstatná informace, která by měla být součástí sledování a vyhodnocování vodní bilance území, rozdíl mezi množstvím vody vstupující do systému a množstvím vody vystupujícího ze systému. Tento rozdíl nám v kladném případě indikuje nárůst množství vody v systému (nasyčování), v záporném pak ubývání vody v systému (odvodňování). Tato informace však není obvykle dostupná, protože ji obvykle modely neuvažují, respektive ji považují za zanedbatelnou. V povědomí široké veřejnosti, ale i odborníků je zakořeněná představa, že tento rozdíl se na velkých celcích (velká povodí, kontinenty) a v delším časovém období rovná nule nebo okolo nuly osciluje. Přesvědčení, že kolik srážek přinese vítr od moře, tolik vody zase řekami do moře odteče, je dědictvím dob, kdy hydrologové objevili vodní cyklus. Současná hydrologická měření ukazují, že hladiny moří a oceánů stoupají a zároveň klesají hladiny podzemních vod v rozsáhlých územích. Nikoho však jakoby „nenapadlo“, že bilance mezi vstupující a odtékající vodou nemůže být nulová. Největší nebezpečí zanedbání tohoto fenoménu pramení z faktu, že tento rozdíl je sice velice malý, ale vždy na stejné straně znaménka (minus). V takovém případě může po celá desetiletí docházet k plíživému odvodňování krajiny, aniž by hydrologové zaznamenali příčinu. Navíc, ve velkých celcích, které jsou obvykle předmětem zkoumání hydrologické bilance, se obvykle velmi malá odchylka ani neprojeví, o to je však z dlouhodobého pohledu nebezpečnější.



Obrázek 3 Schéma dlouhodobého ustáleného vodního cyklu v území (Kravčík, 2007)

Pokud chceme analyzovat území, je nezbytné kvantifikovat vodní bilanci i na nižších úrovních – regionální, lokální nebo i detailní části území. Při podrobnějším zkoumání zjistíme, že se poměr srážek a odtoku může lišit a také obvykle liší v závislosti na velikosti a charakteru zkoumaného území. Pro návrhy opatření pro zadržení vody můžeme stanovit vodní bilanci i na úrovni jednotlivých pozemků (Kravčík, 2007).

Z hlediska problematiky umělé infiltrace a řízeného doplňování zvodní je proto nezbytné uvažovat vždy v měřítku bilance příslušného povodí či subpovodí. Problémy s poklesem hladiny podzemních vod mohou mít řadu příčin (nadměrná exploatace, intenzivní zemědělství, odlesňování či urbanismus), při jejich zkoumání a řešení je třeba vzít do úvahy i obecné principy funkce malého vodního cyklu a velké setrvačnosti jeho fungování.

### 1.3 Problematika umělé infiltrace

Výhody využití MAR k doplňování zásob podzemních vod byly jasně prokázány. Kolektory poskytující zásoby vody, které by byly v případě potřeby využity a efektivně řízeny, mohou sehrát zásadní roli v:

- Snížení chudoby / zdroj stability
- Snížení rizik: ekonomické, zdravotní
- Zvýšení zemědělské produktivity vyplývající ze spolehlivé irigace



- Zvýšení ekonomické návratnosti
- Distribuce kapitálu (vyšší hladiny vody znamenají větší přístup pro všechny)
- Snížení zranitelnosti (sucha, změny ve srážkách)

MAR a využívání srážkové vody přispívají k zachování výše uvedených výhod, a to zejména v případě, že budou praktikovány jako součást širšího přístupu k hospodaření s vodními zdroji.

MAR často představuje nejlevnější formu řešení zabezpečení zásobování vod do malých obcí a měst. Využíváním MAR je limitováno nedostatečnou znalostí hydrogeologie území a znalostí metod MAR. Pomocí demonstračních projektů má MAR potenciál v novém tisíciletí stát se významným přispěvatelem pro zásobování vody a to zejména v dodávkách pro obce, v aridních a semiaridních oblastech.

MAR popisuje řízené doplňování zásob vody a její využití v přirozených zvodních. Dříve se používal pojem "umělé znovudoplňování", ale to není příliš žádoucí termín, protože slovo "umělý" má v naší společnosti – která stále více řídí vodní zdroje - negativní souvislosti. V současnosti dochází ke změně terminologie. "Managed recharge" znamená vlastně "řízené" ovlivňování, na rozdíl od budování umělých závlah a vodovodů, jejíž využívání přináší mnohdy nepředvídatelný vliv na vodní cyklus. MAR se také proto někdy nazývá "enhancement recharge", neboť vede k uchování zásob vody, doplnění a jejímu zadržení v podpovrchových vrstvách.

MAR je vlastně způsob – mezi mnoho dalšími způsoby – jak ovlivnit podzemní vodu, což může být užitečné pro opětovné „natlakování“ zvodní, které podléhají zvýšené exploataci, pronikání solí nebo zabránění poklesu hladiny půdní vody. MAR sám o sobě není univerzálním lékem pro řešení problému přetížených zvodní, může však přinést zlepšení poměrů v těchto zvodních. Přesto však může hrát významnou roli jako část souborů opatření pro kontrolu využití a znovuoobnovení bilance podzemních vod. MAR hraje také ústřední roli při zachycování srážek a jejich využití. Mnoho měst infiltruje srážkovou vodu do zvodní prostřednictvím infiltračních nádrží, jímek nebo studní a je pak následně využívána jako voda pitná nebo závlahová.

Tam kde disponují obce, urbanisté, developeři, vodohospodářské společnosti a regulační autority dostatečným know-how, tam jsou schopné přicházet s inovativním

řešením, které vede ke snížení spotřeby vody v městských oblastech a vytváří tak podmínky pro udržitelnější rozvoj města a tím zvyšuje jeho atraktivitu. Pro hydrogeology je klíčové vytvořit si povědomí o roli MAR společně s geologickým prostředím v oblasti. Mohou pak navrhnout pro vedení měst a obcí nejlepší možná řešení pro zásobování vodou.

Umělá infiltrace a využívání srážkových vod byly využívány v aridních a semiaridních oblastech světa po celá staletí pomocí široké škály technik. Použité metody a účinnost těchto intervencí je řízena nejen po fyzické stránce, ale i prostřednictvím sociálních a ekonomických parametrů. Znalosti získané na základě historických zkušeností, včetně těch negativních, jsou často špatně interpretovány a na základě toho je i jejich účinnost špatně hodnocena.

MAR je využívána po celém světě v řadě rozličných důvodů. Ve své nejjednodušší podobě omezuje povrchový odtok a podporuje infiltraci do zvodnělých vrstev prostřednictvím výstavby jednoduchých hrázek. Velké procento metod je vyvíjeno pro uchování vody pro budoucí využití, pro zásobování pitnou vodou a pro zemědělství. Další důvody pro umělou infiltraci je kontrola hladiny solí, snížení odtoku a eroze půdy, případně akumulace povodňové vlny.

Řízené doplňování kolektorů poskytuje nejen účinné prostředky pro zadržování vody a umožňuje i lepší správu dostupných zdrojů, ale může mít vliv i na kvalitu vody a to obvykle z hlediska jejího zlepšení. Změny v kvalitě jak zdroje vody, tak výsledné kvality podzemních vod jsou důsledkem jednak předúpravy vody před vlastní infiltrací, biologických a geochemických procesů probíhajících v průběhu infiltrace a ve vlastním kolektoru, a dále i vlivem zředování.

MAR by měla být považována za jednu metodu řízení vodních zdrojů ve spojení s širokou škálou dalších metod, jako je zadržování v přehradách a řízení využití podzemních vod, řízení poptávky, recyklace vody atd.

<p><b>Jaké jsou cíle a výhody MAR?</b></p> <p>Uchování vody pro budoucí využití  Vyrovnat výkyvy dodávky / poptávky  Součást integrované strategie vodního hospodářství  Stabilizovat nebo zvýšit hladiny podzemních vod, v m ístech nadměrného využívání  Využití, kde není k dispozici vhodný způsob povrchového skladování  Snižít ztráty vzhledem k odparu a odtékání  Zpomalovat odtok při přívalových srážkách a tím i snižovat erozi půdy  Zlepšít kvalitu vody a snížit kolísání  Udržovat přírodní tok v potocích / řekách  Řídit pronikání solí  Likvidace / opětovné využití odpadních / dešťových vod</p>	<p><b>Které institucionální a řídicí aspekty je třeba brát v úvahu?</b></p> <p>Vodní práva  Vlastnictví půdy  Právní a regulační otázky  Kdo platí a kdo z toho má výhody?  Kdo řídí?  Obce / vláda (NGO)?  Místní / centrální vláda / státem vlastněné podniky?  Místní zastupitelstva / společnosti  Soukromé / domácnosti / agentury privátního sektoru  Integrovaný management (užitelné / NGO / vláda)  Řízení poptávky</p>
<p><b>Jaké jsou zdroje vody?</b></p> <p>Stálé potoky / řeky / kanály  Občasné toky / vadózní  Zásobovací přehradý  Městské dešťové vody  Upravená pitná voda  Střešní dešťové vody  Odpadní / recyklované vody</p>	<p><b>Jak můžeme vyhodnotit výhody / benefity?</b></p> <p>Stabilizované / rostoucí piezometrické úrovně</p> <p>Zvýšená hladina (přírodních) průtoků v řekách  Snižování poklesu hladiny půdní vody  Udržitelnost zdroje podzemních vod  Udržitelnost zavlažovaných ploch  Stabilizace půdní eroze  Pozitivní analýza nákladů / výhod  Zlepšení životního prostředí</p>
<p><b>Jak lze posuzovat oblast?</b></p> <p>Aplikovat vhodný hydrogeologický model (poznání)  Detailní popis hydrologie (vč. meteorologie)  Odhad velikosti podzemního zásobního prostoru potenciálně vhodného pro využití MAR  Kvantifikovat komponenty vodní bilance  Ohodnotit kvalitu podzemních vod a zdrojů vody  Aplikovat vhodný model k posouzení vhodné metody infiltrace  Vyhodnotit vlivy podpovrchového proudění</p>	<p><b>Obecné problémy, kterými je třeba se zabývat</b></p> <p>Kolmatace  Špatná koncepce geologie / hydrologie  Špatný design infiltrace struktury / vrtů  Stabilita struktury / vrtů v provozních podmínkách  Provozní schéma / management  Špatná kvalita podzemních vod  Ochrana kvality podzemních vod  Ztráta infiltrované vody odtokem  Přechod ze zkušebního na provozní tarif  Politická a společenská přijatelnost  Dostupnost a šíření informací / povědomí  Dostupnost dovedností a lidských zdrojů</p>
<p><b>Možnosti infiltrace</b></p> <p>Otevřené kanály, vodní plochy (rybníky), mezi dunami  Modifikace koryt  Otevřené studny, šachty a příkopy  Napouštění vrtů  Břehová infiltrace  Trativody z okapů a zpevněných ploch</p>	<p><b>Jaké jsou důsledky pro kvalitu vody?</b></p> <p>Odstranění nerozpuštěných látek  Zředění při nevyhovující kvalitě podzemních vod  Možná kontaminace vysoce kvalitní podzemní vody  Zvýšení množství rozpuštěných látek v důsledku vyššího promývání  Nežádoucí geochemické reakce (As, F, Fe, Mn)</p>

Obrázek 4 Problematika MAR (Gale, 2005)

## 2. Historie

### 2.1 Historie ve světě

Začátky využívání umělé infiltrace se objevují už ve starověkém Egyptu, kdy se umělými kanály rozváděla voda z Nilu, která zajišťovala dostatek vody pro zemědělství a doplňování vody ve studních.

První teoreticky a prakticky sepsané poznámky v Evropě o umělé infiltraci byly publikovány v polovině 19. století. Umělá infiltrace měla a má největší využití v Německu, dále ve Švédsku, Švýcarsku, Holandsku a USA. V roce 1877 Thiem položil základy pro využívání podzemní vody pomocí břehové infiltrace. Pomocí jeho práce byly navrhovány stupňové řady v potřebné vzdálenosti od řeky tak, aby bylo dosaženo dostatečného množství jímané vody, ale i dostatečná doba jejího zdržení při průsaku v podzemí, která byla tehdy stanovena na 15 dnů.

V dlouhodobém provozu umělé infiltrace se z evropských zemí nejvíce osvědčilo Německo. Většinu jímané vody využívají města Düsseldorf, Basen, Wiesbaden atd. Dalšími zeměmi, kde je umělá infiltrace rozšířená, je Švédsko a Švýcarsko. Ve Švédsku se v současné době využívá 14 významných vodáren zaměřených na umělou infiltraci, ve Švýcarsku jich je 12. Umělá infiltrace se využívá v Holandsku i pro ochranu podzemní vody před pronikáním mořské vody do podzemních vod. Pomocí systému umělé dotace svrchních zvodněných vrstev je mořská voda již ve vzdálenosti 500 m od pobřeží zatlačena do hloubky 30 – 50 m. To umožňuje využívat podzemní vody i v příbřežních oblastech nejen pro zásobování obyvatelstva, ale i pro závlahy.

Např. v Los Angeles se využívá technický způsob, používaný v Holandsku, který brání zasolování podzemních vod při pobřeží infiltrující mořskou vodou po předchozím nadměrném snížení hladiny podzemních vod. V Jižní Kalifornii se pomocí umělých nádrží zachycují přívalové vody z horských toků.

Jakost povrchové (surové) vody byla určující pro technické uspořádání umělých infiltrací. První zařízení na umělou infiltraci nepotřebovala kromě mechanického předčištění žádné další úpravy. Budovala se na příznivých hydrogeologických lokalitách a sloužila v podstatě jako náhrada za pomalou infiltraci. Charakter znečištění, který byl povětšinou organickými látkami, dovozoval krátkou dobu

zdržení mezi vsakovacím a jímacím zařízením. Ve většině případů stačila pro specifickou potřebu pitné vody pro obyvatele břehová infiltrace s dobou zdržení podzemní vody do 10 dnů. Se vzrůstající potřebou a současně probíhajícím růstem znečištění povrchových toků bylo potřeba před vlastní infiltrací zařadit stupeň předúpravy surové vody.

V současné době došlo k významnému nárůstu chemického znečištění povrchových vod a opatření do té doby používaná, se ukázala jako nedostatečná. Z tohoto důvodu bývá zařazen další stupeň předúpravy surové vody. Po odběru vody projde voda usazovacími nádržemi, kde se zachytí hrubší splaveniny. Následně je přepadem po kaskádě stupínek provzdušněna a zavedena do zásobních nádrží. Poté je dávkován chlorid železitý spolu s práškovým aktivním uhlím. Následuje flotace, po které jsou zařazeny pískové rychlofiltry. Po rychlofiltraci následuje vlastní proces infiltrace, při níž je doba zdržení 50 – 60 dnů. Jímaná voda je opět provzdušněna, projde pomalými pískovými filtry a teprve poté, po následném chlorování, je přiváděna ke spotřebiteli.

Funkce filtrační blány na dně vsakovacích nádrží je dalším poznatkem pozorovaným u umělých infiltrací. Časté je uspořádání sousedících vsakovacích nádrží, z nichž jedna je v provozu a druhá se nechává vyschnout k procesu přirozené regenerace jejího dna. Obvykle je umělá infiltrace navržena tak, aby pod dnem vsakovacích nádrží byla vytvořena nesaturovaná zóna, tj. dochází k nespojitému průsaku, při němž je zajištěn delší styk infiltrující vody s provzdušněným prostředím.

V poslední době zažívá umělá infiltrace v celosvětovém měřítku rychlý rozvoj. Aktivně se podílí i vědecká asociace hydrologů IAHS (International Association of Hydrological Sciences) a hydrogeologů IAH (International Association of Hydrogeologists). Tyto organizace ve spolupráci s UNESCO iniciovaly odbornou kampaň ke zlepšení hospodaření s podzemní vodou na základě řízené dotace kolektorů podzemních vod. Spolupodílí se instituce spojené s OSN i s národními hydrologickými a geologickými institucemi.

## **2.2 Historie v ČR**

V České republice se umělá infiltrace poprvé začíná využívat na přelomu 19. a 20. století. Tehdy se začínají využívat indukované a umělé zdroje vodárny v Káraném (Hrkal, 2010). Vypracováním projektu výstavby káranské vodárny byl pověřen odborník – hydrogeolog A. Thiem z Lipska. Po složitých jednáních a odporu

zejména z řad zemědělců v dotčeném území, byl konečný projekt schválen a následně započato se stavbou, která v té době neměla obdoby v celé Evropě. Po půlročním zkušebním provozu v roce 1913 a nezbytném vyhodnocování kvality vody byla káránská vodárna schopna dodávat do Prahy až 800 l/s kvalitní pitné vody (Historie káránské vodárny).

Zvyšující nárůst počtu obyvatel a rozvoj průmyslu hlavního města i jeho okolí po druhé světové válce, si vyžádal zvětšení kapacit stávajících zdrojů. Byla zahájena modernizace v lokalitě Káraný (Historie káránské vodárny).

Mimo vodárnu v Káraném se umělá infiltrace v České republice využívá velmi sporadicky.

V průběhu 70-tých a počátkem 80-tých let 20. století došlo k oživení zájmu o umělou infiltraci (zřejmě pod vlivem úspěšného rozšíření vodárny v Káraném). V rámci výzkumných úkolů tehdejšího Ministerstva lesního a vodního hospodářství byly provedeny průzkumy pro celou řadu lokalit s cílem prověřit na těchto lokalitách možnosti využití umělé infiltrace. Rozsah těchto průzkumů však byl značně různorodý. Současně s tím se některé výzkumné úkoly zabývaly celou řadou aspektů umělé infiltrace, počínaje hydraulikou, jakostními parametry vsakované a jímané vody, kolmatací až k testování různých hydrogeologických metod. (Hrkal, 2010).

V současné době probíhá projekt zpracování metodiky pro posuzování problematiky umělé infiltrace v ČR financovaného z Operačního programu životního prostředí. Tento projekt řeší Výzkumný ústav vodohospodářský.

### **3. Cíle MAR (současná strategie)**

- Uchování vody pro budoucí využití
- Vyrovnání výkyvů dodávky / poptávky
- Součástí integrované strategie vodního hospodářství
- Stabilizování nebo zvyšování hladiny podzemních vod, v místech nadměrného využívání
- Využívání, kde není k dispozici vhodný způsob povrchového skladování
- Snížení ztrát vzhledem k odparu a odtékání
- Zpomalování odtoků při přívalových srážkách a tím i snižování erozí půdy
- Zlepšení kvality vody a snižování kolísání

- Udržování přírodních toků v potocích / řekách
- Řízení pronikání solí
- Likvidace / opětovné využívání odpadních / srážkových vod

#### **4. Problémy s kvalitou vody a se zdroji vody při jejím doplňování**

Přirozená kvalita podzemních vod se bude lišit podle geologických formací a dále i vlivem přirozeného proudění podzemních vod. Podzemní vody bez antropogenních vlivů mívají obvykle vynikající kvalitu z hlediska obsahu chemického složení, zákalů a mikrobiologických charakteristik. Nicméně, podzemní vody mohou obsahovat přirozeně se vyskytující koncentrace železa, manganu, arzenu, fluoridu, bóru, zvýšené salinity atd., a díky tomu se stávají nevyužitelné pro vodárenské či jiné využití. Vysoká kvalita podzemní vody je výsledkem přírodní filtrace a mikrobiologického „čištění“ dešťové a říční vody, infiltrující skrz půdní vrstvy do kolektoru. Zde zůstává více či méně chráněna před antropogenním znečištěním nadložních vrstev.

Přirozená kvalita podzemních vod může být ovlivněna širokou škálou antropogenních činností. Nejvíce signifikantní je nadměrný odběr podzemních vod, nadměrné navýšení infiltrace, zavlažování, změny v land use, charakter zemědělského hospodaření a lesnictví, urbanizace, hornictví a ukládání tekutých a pevných odpadů. Největší hrozbou pro podzemní vody je zasolení - pronikání soli v pobřežních oblastech nebo z hlubokých zvodní, hluboké průsaky závlahových vod a průsak odpadních vod do zvodní. Při zvažování dopadu MAR v konkrétním hydrogeologickém prostředí je důležité pochopit přirozenou kvalitu podzemních vod, dopady lidské činnosti a procesy řídící výslednou kvalitu. Na základě těchto znalostí je možné předvídat pravděpodobné dopady řízené infiltrace na stávající podzemní vody a zabránit tím nepřijatelným dopadům.

Obecně platí, že pokud kolektory byly nadměrně využívány (nadměrný pokles hladiny vody), mělo to vždy za následek zhoršení kvality vody.

Řízené doplňování s využitím zadržování plošného odtoku přes povrchové vsakovací struktury obvykle poskytuje vysoce kvalitní vodu, která nejen doplňuje zvodně, ale i přispívá k zlepšení kvality vody prostřednictvím vyššího ředění, ale i slouží jako

hydraulická bariéra proti bočnímu pronikání solí (např. v Holandsku používaný způsob příbřežních písečných dun).

Tam, kde je pitná nebo srážková voda injektována do brakických zvodnělých vrstev prostřednictvím infiltračních studní, se může kvalita následně odebírané vody vlivem smíchání a rozpouštění minerálů významně zhoršit, na druhou stranu může dojít i k zlepšení vlivem odstranění nutrientů a některých organických sloučenin.

Stručně řečeno, z hlediska kvality vody je pro posouzení účinnosti MAR nezbytná dobrá analýza přirozené kvality vody, antropogenních vlivů a lokálních geochemických procesů. Udržitelný konceptuální model může být sestaven na základě analýzy vzorků podzemních vod a znalostí hydrogeologie a antropogenních vlivů v dané oblasti. Výsledky dopadů navrhovaného způsobu řízené infiltrace může být předpovídán a testován pomocí monitoringu.

#### **4.1 Povrchové vody (Surface Water)**

Povrchová voda může být signifikantním zdrojem pro řízené doplňování zvodní v závislosti na klimatických podmínkách. V humidních oblastech lze očekávat mírnou variabilitu říčních toků. V aridních a semiaridních oblastech převládají občasné vodní toky. Voda z trvalých toků může být přesměrována do okolních nebo vzdálenějších infiltračních zařízení. Indukovaná břehová infiltrace přímo z řek je běžně využívána, spíše však pro zlepšení kvality vody, než pro vytvoření zásob.

Říční voda může nést značné množství částic v suspenzi, přičemž její množství je závislé na vegetačním pokryvu, turbulencích a „energii“. V nížinách, pomalu tekoucí toky obecně nesou několik desítek g / m<sup>3</sup>, zatímco horské potoky mohou nést až stovky g / m<sup>3</sup>. Bleskové povodně mohou zvýšit plaveniny mnohonásobně. Z těchto důvodů může dojít k zanášení infiltračních objektů tam, kde se používá přímo říční voda. K zamezení tohoto jevu jsou před nátokem do infiltračního objektu budována odkaliště.

V jezerech, kde voda ve skutečnosti neproudí, je proto relativně čistá s malým nebo žádným obsahem suspendovaného materiálu. Tam, kde není tato voda znečištěna odpadními vodami nebo splachem ze zemědělsky intenzivně obdělávaných ploch a kde je pouze malý růst řas, je možné jezerní vodu přímo využívat bez jakékoliv předběžné úpravy (Huisman & Olsthoorn, 1983). Voda ze znečištěných řek nebo



jezer, zejména těch, kam se vypouštějí průmyslové odpady, by měly projít před využitím pro infiltraci předčištěním. V některých situacích mohou být využita infiltrační povodí pro zlepšení kvality vody vlivem fyzikálních a biochemických procesů probíhajících při vlastní infiltraci.

Uvedené příklady v kapitolách 8.2.2., 8.2.8., 8.2.9., 8.2.10..

#### **4.2 Odtok srážkových vod (Storm-Water Runoff)**

V městských oblastech se vytváří významná množství srážkových vod. Velikost odtoku z těchto oblastí je velmi variabilní (např. po přívalových srážkách). Aby bylo možné dosáhnout optimálního výsledku při zachycování těchto vod, je třeba využít v povodích komplexní přístup při využití různých opatření, jako např. infiltrace, retenční nádrže, zatravněné plochy, mokřady (Murray & Tredoux, 1998).

Ve venkovských oblastech mohou intenzivní srážky způsobit zrychlený odtok ze zemědělsky obdělávaných pozemků, stejně jako z neobdělávané půdy. V některých oblastech (např. Saurashtra, Indie) je tento odtok sváděn do ručně kopaných studní s velkým průměrem k doplňování kolektorů. Hrázování je někdy používáno pro snížení množství sedimentů, neodstraňuje však nerozpuštěné látky a ostatních znečištění. Takto svedené vody nelze doporučit k přímému zasakování do studní, ale je nezbytné dát přednost filtraci přes půdní vrstvu nebo vrstvu písků, aby se odstranily některé z rozpuštěných složek, části patogenů a to pomocí chemických a mikrobiologických procesů v průběhu infiltrace.

Odtok z přívalových srážek je obvykle velmi variabilní v kvalitě. Kontaminace může zahrnovat splach atmosférické depozice z povrchu v povodí, z povrchu komunikací, ze stavební a průmyslové činnosti, živočišných odpadů, rozkládající se vegetace, chemických látek používaných při údržbě trávníků a zeleně, průsaků septiků a skládek odpadů. Nejlepší kvalita odtoku vody v městských oblastech je ze střech a stále více iniciativ (např. vládní budovy v Indii) je orientována pro využití těchto vod k okamžitému doplňování podzemních vod prostřednictvím infiltračních teras, studní a vrtů. To doplňuje nejen městské kolektory, které jsou často nadměrně využívány, ale také přivádí kvalitní vody do často znečištěné podzemní vody.

Kontaminační zatížení odtoku ze zemědělské půdy ve venkovských oblastech zahrnuje zbytky pesticidů a hnojiv, jakož i exkrementy hospodářských zvířat, lidské

a jiné zdroje. Je-li tento odtok směřován na doplňování zvodně, potom jsou veškeré výhody účinku infiltrace půdní vrstvou znehodnoceny a riziko kontaminace zvodně se zvyšuje - musí být kompenzována jinými formami úpravy, jako je pomalá písečná filtrace (Gale I. , 2005).

Geologická stavba České republiky umožňuje vsakování srážkových vod pouze v relativně malém měřítku. Nicméně tento fakt žádným způsobem neovlivňuje to, že vsakování je v lokalitách, kde je možné, prioritním způsobem hospodaření se srážkovou vodou (Stránský, a další, 2012).

Pro vsakování srážkových vod, ale i pro jejich využití, se musí zohlednit míra znečištění srážkové vody (Žabička & Vrána, 2011).

Uvedené příklady v kapitolách 8.2.1., 8.2.3., 8.2.4., 8.2.7..

### **4.3 Vyčištěné odpadní vody (Reclaimed Water)**

Odpadní vodu pro účely této práce budeme definovat jako vodu, jejíž jakost byla negativně ovlivněna působením lidské činnosti, zejména jako produkt lidského metabolismu a činnosti v domácnostech. Do těchto vod zahrnujeme i vody srážkové, shromažďované v jednotné kanalizační síti, a které jsou součástí nátoky na komunální ČOV. Průmyslové odpadní vody, jako výstup technologických procesů, nejsou z hlediska umělé infiltrace do horninového prostředí uvažovány.

Zasakování předčištěných komunálních odpadních vod je v zahraničí běžně používanou metodou, včetně historických zemí EU (např. Německo). V České republice je tento postup spíše výjimečný a málo používaný, proto i množství publikací je ve srovnání se zahraničím omezeno.

Pro zvýšení množství podzemních vod je v řadě států Evropské unie běžnou metodou infiltrace předčištění odpadních vod do horninového prostředí (zejména v oblastech s výskytem kvartérních sedimentů), v České republice umožňuje tento postup legislativa pouze výjimečně od roku 2010 po novele Zákona o vodách 254/2001 Sb. (novela Zák.150/2010 Sb.) a to podle §38:

*„Kdo vypouští odpadní vody do vod povrchových nebo podzemních, je povinen zajišťovat jejich zneškodňování v souladu s podmínkami stanovenými v povolení k jejich vypouštění, které vydal vodoprávní úřad. Dále je povinen v souladu s*

*rozhodnutím měřit objem vypouštěných vod a míru jejich znečištění. Výsledky těchto měření předává vodoprávnímu úřadu, správci povodí a pověřenému odbornému subjektu. Způsob měření objemu a znečištění vypouštěných odpadních vod a četnost předkládání výsledků stanoví vodoprávní úřad.*

*Podle odstavce 7 tohoto zákona je přímé vypouštění odpadních vod do podzemních vod zakázáno. Vypouštění odpadních vod neobsahujících nebezpečné závadné látky z jednotlivých staveb pro bydlení a individuální rekreaci nebo z jednotlivých staveb poskytujících služby, vznikajících převážně jako produkt lidského metabolismu a činností v domácnostech přes půdní vrstvy do vod podzemních lze povolit jen výjimečně na základě vyjádření osoby s odbornou způsobilostí k jejich vlivu na jakost podzemních vod, pokud není technicky nebo s ohledem na zájmy chráněné jinými právními předpisy možné jejich vypouštění do vod povrchových nebo do kanalizace pro veřejnou potřebu. Vodoprávní úřad stanoví nejvýše přípustné hodnoty množství vypouštěných odpadních vod a jejich znečištění. Při povolování vypouštění odpadních vod do vod podzemních je úřad vázán ukazateli vyjadřujícími stav podzemní vody v příslušném útvaru podzemní vody, ukazateli a hodnotami přípustného znečištění podzemních vod, ukazateli a přípustnými hodnotami znečištění odpadních vod a náležitostmi a podmínkami povolení k vypouštění odpadních vod do vod podzemních, které stanoví vláda nařízením. Při povolování vypouštění odpadních vod vodoprávní úřad podle odstavce 9 zákona přihlíží k potřebě dosažení nebo zachování dobrého stavu povrchových nebo podzemních vod a na vodu vázaných ekosystémů a posuzuje možnosti omezování znečištění u jeho zdroje i omezování emisí do životního prostředí jako celku a možnosti opětovného používání odpadních vod.*

*Odst.11 Vyžadují-li to cíle stanovené v příslušném plánu povodí nebo cíle ochrany vod či normy environmentální kvality, stanovené přímo použitelným předpisem Evropských společenství, vodoprávní úřad stanoví přísnější přípustné hodnoty ukazatelů znečištění odpadních vod než hodnoty stanovené nařízením vlády podle odstavce 8 § 38 zákona o vodách, popřípadě může stanovit další ukazatele jejich hodnoty.“*

Norma ČSN 75 6404 (2006) poskytuje návod pro zemní infiltrační systémy – infiltrací (vsakováním) do horninového prostředí, které lze použít společně se

systemy malých čistíren odpadních vod. Uvádí požadavky na zemní infiltrační systémy v rozmezí velikostí pro jeden obytný dům až do 50 EO. Uvádí návrhové parametry, stavební detaily, požadavky na ukládání a na části zemních infiltračních systémů (Hrkal, 2010).

Byl zpracován metodický pokyn MŽP ČR (2005) pro hodnocení přirozené atenuace, který lze využít i pro účel posuzování přirozené atenuace v rámci procesů, které doprovázejí vsakování odpadních vod do horninového prostředí (Hrkal, 2010).

Výsledky výzkumu vsakování předčištěných odpadních vod do podzemí v lokalitě Měděnec prezentují Eckhardt a Kučera. Výsledky ve vztahu k dané lokalitě potvrdily velmi výraznou redukci znečištění hlavních kontaminantů odpadních vod (bakterie, nerozpuštěné látky, sloučeniny dusíku a fosforu) vsakováním do horninového prostředí. Výsledky dokazují, že infiltrace může být pro kvalitu vod šetrnější než obvyklé vypouštění odpadních vod do vod povrchových (Eckhardt & Kučera, 2008).

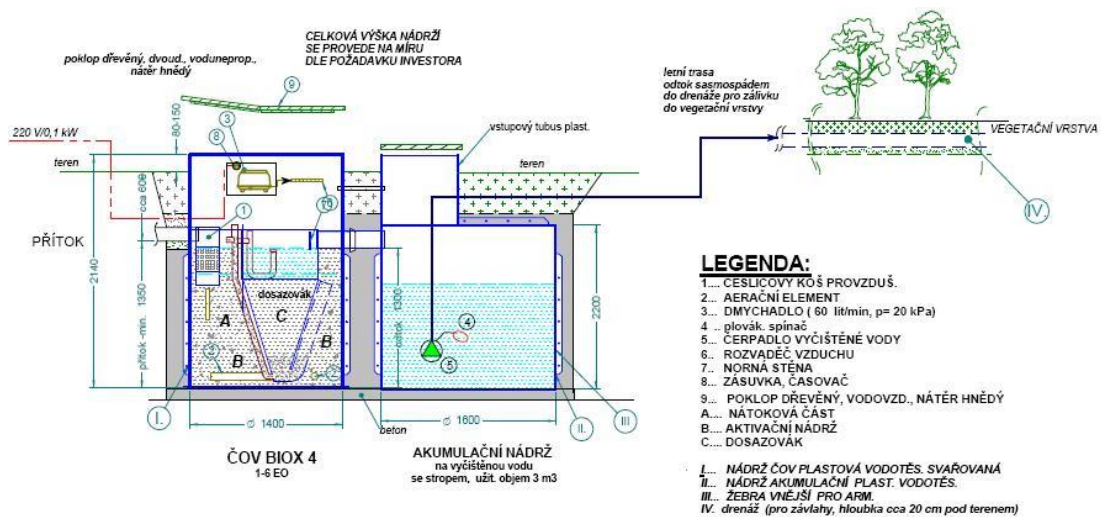
Šálek uvádí výsledky dlouhodobého výzkumu jednotlivých aspektů závlah odpadní vodou. Z hlediska čištění odpadních vod dochází autor mj. k následujícímu závěru: rozhodující část čistících procesů probíhá v provzdušněné orniční vrstvě. Intenzita rozkladných procesů závisí na obsahu organické hmoty, teplotě a složení odpadních vod a na vlastnostech půdy (Šálek, 1996).

V oblasti recyklace odpadních vod je světovou jedničkou bezpochyby Izrael, kde je každý rok až 70 % odpadních vod infiltrováno. Rozman et al. jako hlavní pozitiva zasakování těchto vod přes rozlehlá pole uvádí vynikající vyčištění vody při průchodu horninovým prostředím, zvýšení hladiny podzemní vody, vytvoření hydraulické bariéry a významné zvýšení efektivity vodního hospodářství (Rozman, a další, 2013).

Podle dostupné literatury lze odhadnout, že největší podíl opětovného využití recyklovaných odpadních vod nastává v odvětví zavlažování, a to jak pro veřejné parky, zahrady, golfové hřiště a další veřejnou zeleň, tak i pro zavlažování v zemědělství. Při zavlažování zeleniny konzumované v syrovém stavu nesmí použitá voda obsahovat patogenní organizmy a koncentrace fekálních koliformních bakterií by se měla rovnat nule. Nicméně Bouwer dále uvádí, že v rozvojových zemích, kde

je odpovídající čištění téměř nemožné, povoluje WHO koncentrace až 1000 fekálních koliformních bakterií na 100 ml vody (Bouwer, a další, 1991).

Oblastí západní Austrálie se zabývají McFarlane et al., z důvodu klesající hladiny podzemní vody, jako důsledku zvýšeného odběru a sníženého množství srážek. Jako jednu z možností zvýšení hladiny podzemních vod uvádějí vsakování předčištěných odpadních vod do infiltračních galerií, což by v ideálním případě mohlo vést i k obnovení místních mokřad. Studie prokázala, že fosfor a organický uhlík jsou významně redukovány již po 5 – 50 m a koncentrace dusíku, přestože se snižuje pomaleji, je obdobná jako koncentrace v blízkých zvodních. Navíc za vhodných podmínek existuje možnost využití předčištěných odpadních vod k vytvoření hydraulických bariér proti vnikání slané vody do pobřežních oblastí (McFarlane, a další, 2007).



**Obrázek 5** Závlahy vyčištěnou odpadní vodou ([www.renoplast.cz](http://www.renoplast.cz))

Více než 25 % populace Spojených států a 37 % nové zástavby je zásobováno místními malokapacitními systémy čištěných odpadních vod, z nichž většina je založena na recyklaci primárně vyčištěných splaškových vod průchodem půdou tak, aby se docílilo vyčištění dříve, než dojde k dosažení podzemní vody. Pokusy využít výhod decentralizovaných systémů vyústily v inovaci v konstrukčních postupech a technologiích, které se objevují ve stále větší míře. Jeden takový případ je i trend, kde se absorpční půdní systémy (WSAS) navrhují s využitím vyšší úrovně předčištění, než jaké poskytují septiky (např. pískový filtr nebo umělý mokřad), Tato zpráva pojednává o potřebě většího pochopení principů chování a transportu patogenů v systémech WSAS. Znalost procesů, kterým podléhají použité splaškové

vody a jejich vliv na účinnost odstraňování patogenů, je nezbytná k efektivnějšímu využití systémů založených na bázi půda – zvodeň i v pohledu zamezení kontaminace pitné vody (Huntzinger, a další, 2001).

Z důvodu rostoucího počtu obyvatel v Berlíně i jeho okolí, se kromě běžných postupů (čištění povrchových vod) pro zajištění dostatečného množství vody pro pitné účely uvažuje také o využití odpadních a srážkových vod (Heinzmann & Sarfert, 1995). Tento postup vyžaduje zajištění pokročilého čištění odpadních vod tak, aby bylo dosaženo přísných požadavků na jejich kvalitu a dořešení legislativy. Vyčištěná povrchová voda, pokročile vyčištěná odpadní voda, čištěná srážková voda a předčištěná slabě kontaminovaná odpadní voda z kombinovaných systémů tvoří slibné zdroje pro doplnění vody podzemní.

Běžnou praxí ve Spojených státech je využívání absorpčního půdního systému (WSAS) k nakládání a čištění odpadní vody (Huntzinger, a další, 2001). U těchto systémů se předpokládá efektivní a dlouhodobé odstranění kontaminantů z odpadní vody před tím, než jsou tyto vypouštěny do podzemních vod.

Problematikou zasakování odpadních vod v různých stupních čištění do horninového prostředí, které se tak stávají druhotným zdrojem užitkových, ale i pitných vod, se zabývají také různé nadnárodní organizace. Mezi ně patří například World Health Organization (WHO) nebo Association of Hydrogeologist (Aertgeerts & Angelakis, 2003).

Mezi nadnárodní organizace, které se problematice vsakování odpadních vod do horninového prostředí významněji věnují, patří například International Association of Hydrogeologists (mj. spravované internetové stránky věnované řízenému doplňování zvodnělých vrstev <http://www.iah.org/recharge/>).

Na význam vsakování odpadních vod a jejího opětovného využití v oblastech s rychlým rozvojem sídel v aridních a semiaridních oblastech Asie, Latinské Ameriky, Středního východu a Afriky upozorňují Foster a Chilton (2004) (Foster & Chilton, 2004).

Difúzní znečištění přímým vypouštěním z jednotlivých domů, farem, tábořišť atp., pro které je připojení na centrální kanalizaci nemožné, se může značně snížit čištěním přímo na místě Fastenau et al.. Z různých systémů bylo srovnáno 8 typů

čištění vod. Ze studie vyplývá, že infiltrace odpadních vod přímo na místě vykazuje nejlepší podmínky pro úpravu při znečištění až do 100 EO (Fastenau, a další, 1990).

Jenssen et al. uvádí, že infiltrace odpadní vody v půdních infiltračních systémech je nenákladná a účinná alternativa čištění a eliminuje odpadní vody z obchodních zařízení a malých obcí. Půdní infiltrační systémy podléhají vlivům, které vyplývají z přírodních podmínek a z vzájemného působení mezi odpadní vodou a dynamickým systémem půdy a podzemní vody. Proto jsou vztahy mezi projektem a účinností často založeny pouze na místní tradici a empirizmu. Předpokladem dobré funkce systému je výzkum a znalost místa, kde se infiltrace má provádět (Jenssen & Siegrist, 1990).

Obecně lze říci, že téma problematiky vsakování odpadních vod do horninového prostředí není v České republice dostatečně rozpracováno. Širší problematikou kontaminace a atenuačních procesů se však zabývá větší množství prací, například Šráček, Datel, Mls; Mihaljevič, Moldan; Beneš (Šráček, a další, 2000) (Mihaljevič & Moldan, 2000) (Beneš, 1995).

Uvedený příklad v kapitole 8.2.5..

#### **4.4 Pitná voda (Potable Water)**

Pitná voda je hlavním zdrojem vody používané pro infiltraci v programech ASR (Aquifer Storage Recovery). Vysoce kvalitní vyčištěná voda se injektuje do studní, k vytvoření „bubliny“ pitné vody v kolektoru. Tyto bubliny mohou být vytvořeny v původně nepitných zvodních prostřednictvím vytvoření hydraulického tlaku a tím „odsunutím“ původní vody v kolektoru. Tento přístup se ukázal být nákladově efektivní a ekologicky udržitelným způsobem řešení široké škály problémů (Pyne, 1995). Tyto systémy jsou obvykle konstruovány v blízkosti úpravní vody, z důvodů úspory nákladů a využití přebytečné kapacity při zpracování.

V aridních oblastech, jako je například oblast Perského zálivu na Blízkém východě, kde poptávka po vodě převyšuje dostupnost vody z obnovitelných zdrojů, slouží k pokrytí deficitu vody vhodné pro infiltraci, voda vyrobená z odsolovacích stanic. Pro zajištění potřeby dostupnosti vody pro mimořádné situace, například když odsolovací závody jsou mimo provoz, je zapotřebí vytvořit velké sladkovodní zadržovací kapacity. Byly provedeny pilotní pokusy proveditelnosti využití odsolené

vody do zvodní s cílem vybudovat takto podzemní sladkovodní nádrž (Mukhopadhyay, a další, 1996). Vzhledem k vysoké kvalitě odsolené vody, nenastávají větší problémy způsobené geochemickými reakcemi. Navíc může být voda upravena, aby se minimalizovala vzájemná reakce s materiálem kolektoru; například úpravou pH.

Uvedený příklad v kapitole 8.2.6..

## **5. Hydrogeologické poměry a kontrola doplňování**

Hlavní faktory k uvážení:

- Fyzikální a hydraulické hranice zvodně a stupeň zadržení
- Hydrogeologické vlastnosti kolektoru a nadložní formace
- Hydraulický spád v kolektoru
- Hloubka zdrojů podzemních vod / piezometrický povrch
- Kvalita podzemních vod
- Mineralogie zvodně

Hydrogeologické poměry na povrchu a v nesaturované zóně jsou klíčové pro systémy využívající plošnou infiltraci a to proto, že těmito zónami prostupuje infiltrovaná voda před dosažením kolektoru. Perkolační rychlost je závislá na svislé propustnosti půdy a nesaturované zóny. Poté, co infiltrovaná voda dosáhne hladiny podzemní vody, její množství, kterou je zvodně schopno uchovat, je závislé na jejích hydraulických charakteristikách (transmisivnosti, puklinatosti, atd.) a její mocnosti. Kolektor musí mít dostatečnou propustnost a mocnost, aby byl schopen akceptovat infiltrovanou vodu v kalkulovaném množství. Na druhou stranu, kolektory s vysokou hydraulickou vodivostí mohou být příčinou rychlého rozptýlení infiltrované vody, což může vést k získání omezeného množství pro zpětné využití. To nemusí být problémem, pokud cílem režimu MAR je obecné navýšení hladiny podzemních vod a úprava základního odtoku na regionální úrovni.

Kolektory s nízkou zásobní kapacitou mohou mít pouze omezený potenciál přijímat další vodu. Vysoké hladiny podzemní vody mohou vést ke zrychlení základního odtoku říční sítí a mohou tak prodloužit průtok v efemerních tocích. Obvyklejší je situace, kdy je podzemní voda intenzivně odčerpávána a naopak hladina vody klesá. Ve skutečnosti zásobní kapacita je doplňována kombinací přírodní a řízené infiltrace.



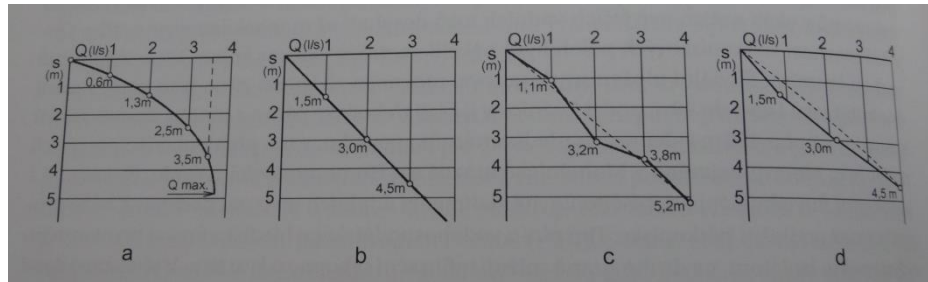
Z hlediska vhodnosti k MAR můžeme rozdělit hydrogeologické podmínky do čtyř hlavních kategorií:

### **5.1 Říční sedimenty (Alluvium)**

Nívy se mohou skládat z mořských a jezerních usazenin v rozmezí tloušťky od několika desítek metrů do kilometrů. Hlavní ložiska se obvykle nacházejí v dolním toku povodí, které tvoří rozlivové oblasti. Topografický reliéf je obvykle nízký, stejně jako přírodní hydraulické gradienty. Složení sedimentů se bude pohybovat od vysoce propustného hrubého štěrku po nepropustné jemné granulované bahno a bláto. Hladiny podzemních vod budou samozřejmě mělké tam, kde jsou trvale vodní toky, ale mohou se nacházet i ve velkých hloubkách, zejména v aridních oblastech, nebo pokud došlo ke snížení hladiny podzemní vody vlivem nadměrného čerpání (Gale I. , 2005).

V Česku jsou značně rozšířeny kvartérní fluvialní sedimenty. Akumulace štěrkopísků údolních a nízkých teras, jimž bývá přisuzován vznik během wormského anebo risského glaciálního období, sledují údolí většiny řek. Podél větších vodních toků, zejména Labe, Moravy, Dyje a jejich hlavních přítoků, dosahují údolní či nízké terasy až vícekilometrových šířek, především v plochých terénech – v pánvích a úvalech. Převládající transmisivita bývá vysoká, tj. ve stovkách  $m^2/d$ , při velkých mocnostech až velmi vysoká s hodnotami více než  $1000 m^2/d$ . V okrajových částech údolních teras a podél menších vodních toků převládá při menší mocnosti štěrkopísků střední transmisivita, někdy klesající až na nízkou transmisivitu v jednotkách  $m^2/d$ . Ve vertikálním směru byly v mnohých terasových akumulacích zjištěny rozdíly v hydraulické vodivosti, odrážející jejich různou zrnitost. Nejvyšší hodnoty často bývají při bázi akumulací. Štěrkopísky údolních teras jsou obvykle kryty až několik metrů mocnými povodňovými (nivními) hlínami (Krásný, a další, 2012).

Uvedené příklady v kapitolách 8.2.2., 8.2.5..



Obrázek 6 Porovnání čar vydatnosti v různých hydrogeologických prostředích a v kvartérních fluviálních sedimentech s propustnější bazální polohou (Krásný et al. 2012)

## 5.2 Puklinová propustnost (Fractured Hard Rock)

Tento typ kolektoru je obvykle tvořen vysoce – puklinovými horninami (metamorfované a vulkanické horniny). Tyto kolektory se nacházejí na velkých plochách v semiaridních oblastech, a protože mají malý zásobní prostor a propustnost, mohou být v oblasti jediným zdrojem podzemních vod. Z toho důvodu je velmi významný jejich pečlivý management. Zvětralá povrchová zóna hraje důležitou roli při absorpci srážek, protože v ní dochází k jejich efektivnímu zachycení a následné infiltraci do hlubších vrstev. V řadě oblastí je zvětralá povrchová zóna hlavním kolektorem. Úspěšné využívání podzemních vod, stejně tak jako jejich řízené doplňování, je závislé na lokalizaci zvětralých nebo puklinových zón, a to z pohledu jejich saturace. Čerpání ze studní umístěných v horninovém kolektoru může vést sezónně k odvodnění překryvné aluviální nebo zvětrané vrstvy. Vhodná metoda doplňování je závislá na charakteru kolektoru, pokud je tento tvořen nekonsolidovaným aluviem, potom jsou jako nejúčinnější metody používány filtrační nádrže nebo příkopy. Pokud se jedná o doplňování zásob podzemní vody v hlubokém horninovém kolektoru, je použití vrtů jediná možnost.

Uvedené příklady v kapitolách 8.2.1., 8.2.3., 8.2.6., 8.2.8..

## 5.3 Průlinová propustnost [konsolidované pískovce] (Consolidated Sandstone Aquifers)

Porézní kolektory mohou mít dobrou akumulaci kapacitu a prostupné vlastnosti. Povrchová vrstva je určující pro kapacitu infiltrace a to jak přírodní, tak řízenou. V případě, že půda vznikla z pískovce, pak infiltrační kapacita bude vysoká, ale může být snížena, pokud je překryta naplaveninami s jemným zrněním. V případě, že propustnost kolektoru je vysoká, pak se infiltrovaná voda může ztratit odtokem v říční síti. Proto je nezbytná detailní znalost hydrauliky kolektoru, aby bylo

zajištěno, že infiltrace bude efektivní a přinese očekávané výsledky. Jednou z možných metod řízení výšky hladiny podzemní vody v průběhu roku je využití nadměrného odtoku z kolektoru. Tímto způsobem se „vytvoří“ zásobní prostor, který může být využit k zachycení srážek v období dešťů.

#### **5.4 Krasový kolektor (Carbonate Aquifer)**

Podobné argumenty, jako pro pískovcové, platí pro vápencové zvodně. Kromě toho, že hlavní akumulací kapacita je soustředěna ve zlomech a jimi proudí převážná část toku. Podíl odtoku zlomy, k podílu mezikrystalického oddílu, se bude výrazně lišit u malého porézního vápence, a ve velkém krasovém vápenci. Vliv vápencových zvodní je nejextrémnější z hlediska odvodu infiltrované vody a rychlého pohybu znečišťujících látek. Krasové kolektory mohou poskytnout využitelné zásobní prostory, zejména tam, kde jsou vázány na vodní tok (např. v případě vázaného kolektoru). Opět platí, že je nutné mít detailní znalost hydrogeologie kolektoru a vodního zdroje, má-li být tato zvodně efektivně řízena.

Uvedený příklad v kapitole 8.2.4..

#### **5.5 Horniny s dvojnou pórovitostí**

S přibývajícím geologickým stářím sedimentů, zejména následkem diagenese a tektonických procesů, ale i kompakce některých hlouběji uložených kolektorů v hydrogeologických pánvích, jsou póry průlinově porézních hornin zatěsňovány a nebo zmenšovány. Postupně tak tyto horniny ztrácejí svojí průlinovou pórovitost. Díky změnám v jejich mechanických vlastnostech, a v závislosti na tektonické expozici, se začíná uplatňovat pórovitost puklinová. Výsledkem je pak tzv. pórovitost dvojná, s různým poměrem a uplatněním pórovitosti průlinové i puklinové. Tento poměr závisí na litologickém charakteru a stratigrafické příslušnosti hornin, stupni diagenese a tektonické expozici příslušného území. V prostředí s dvojnou pórovitostí pukliny a puklinové systémy různých směrů spojitě či nespojitě oddělují bloky, v nichž převládá pórovitost průlinová. Puklinová pórovitost se uplatňuje především při proudění podzemní vody a obvykle také určuje limity odběru podzemní vody z jednotlivých jímacích objektů, průlinová pórovitost rozhoduje zejména o akumulacích možnostech prostředí. Rozdíly v podílu a velikosti obou typů pórovitosti jsou patrné z odlišných hodnot hydraulické vodivosti, stanovených různými postupy, zejména při porovnávání výsledků laboratorních a

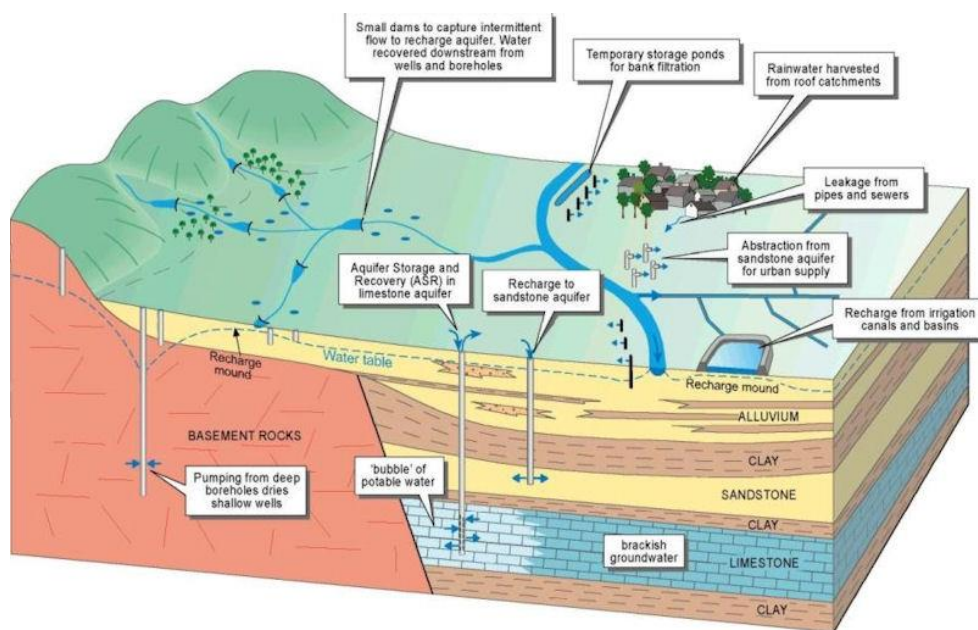
terénních zkoušek, a promítají se do charakteru proudění podzemní vody, akumulačních schopností příslušných hornin a mnohdy také i do chemického složení podzemní vody. Při relativně rychlém proudění puklinovými systémy dochází k jejich promytí, často intenzivnímu, naopak v málo propustných a izolovaných mezipuklinových blocích s intergranulární pórovitostí se může po delší dobu uchovávat silněji mineralizovaná voda chemického charakteru, odpovídajícího „hlubším“ hydrochemickým zónám. Tato hydrogeologicky starší voda pak může postupně a dlouhodobě ovlivňovat kvalitu podzemní vody proudící v puklinách, i stanovované doby zdržení / radiouhlíkové stáří těchto vod. Obdobná situace platí i při procesech sanace v antropogenně kontaminovaných prostředích s dvojnou pórovitostí (Krásný, a další, 2012).

## **6. Metodologie řízeného doplňování podzemní vody**

Existuje řada metod pro zvýšení doplňování množství podzemních vod a jsou tak různorodé, jako vynalézavost těch, kdo se podíleli na jejich vývoji a provozu. Tyto systémy jsou navrženy s hlavním cílem zvýšit zásoby podzemních vod (cílené doplňování), ale kolektory mohou být také doplňovány neúmyslně (příčinné doplňování), během jiných činností, např. zavlažování. Metody jsou zaměřeny na zlepšení zásob podzemních vod, ale také mohou přinést i vedlejší efekty, jako je zmírňování eroze půdy nebo změny využití půdy. Zde se zaměříme na cílené doplňování podzemních vod. Použité metody jsou obecně rozděleny do následujících kategorií, z nichž většina je znázorněna na schématu:

- Plošné metody zasakování
  - Infiltrace v infiltračních rybnících, nádržích a plochách
  - Soil Aquifer Treatment (SAT)
  - Řízené zaplavování
  - Vedlejší (náhodné) zaplavování
- Modifikace odtoku
  - Perkolační rybníky a nádrže
  - Retence vody v písčítých přehradách
  - Podpovrchové přehrady
  - Propustné přehrady a uvolňování pro infiltraci

- Studny, šachty a vrty
  - Otevřené studny a šachty
  - Vrtané studny a vrty
- Indukované břehové infiltrace
  - Břehová infiltrace
  - Mezdunová infiltrace
- Zadržování srážek
  - Zemědělství v suchých oblastech
  - Využívání srážkových vod ze střech



Obrázek 7 Možnosti MAR ([www.hydratelife.org](http://www.hydratelife.org))

Mnoho systémů vyžaduje nízkou úroveň technologie a mohou být (a byly po celá staletí) prováděné s malou technickou znalostí. To zahrnuje techniky pro zachycování vody, např. výstavbou polních ochranných hrází nebo malých příčných hrází na efemerních tocích. Znalosti při hloubení studní se vyvíjely z generace na generaci a zaústění povrchového odtoku do těchto studní (přes možné problémy se znečištěním a usazování nerozpuštěných pevných látek) se stává stále více populární v některých částech Indie. Při konstrukci pískových retenčních přehrad, přelivů na březích řek a trvalých přehrad jsou nezbytné větší inženýrské a projekční znalosti, to platí ještě více při využívání hlubokých vrtaných studní pro injektáž nebo pro ASR. I když je to v principu jednoduchá metoda, efektivní využití plošné retence a jednotlivé infiltrační metody vyžadují dobré znalosti fyzikálních, hydraulických,

geochemických a mikrobiologických procesů v provozu, včetně zkušeností s řízením těchto systémů pro zajištění jejich optimálního výkonu. Podobné otázky je třeba řešit v případě zachycování srážkové vody ze střech.

### **6.1 Plošné metody zasakování (Spreading Methods)**

Povrchové zasakování se používá v případech, kdy se kolektor, který má být doplněn, nachází těsně pod povrchem. Doplnění kolektoru se provádí prostřednictvím filtrace přes propustný materiál uložený na povrchu. V případech, kdy je k dispozici kvalitní spolehlivý zdroj filtrační vody, plošné infiltrace lze provozovat celoročně. V těchto případech lze kalkulovat s hydraulickou prostupností okolo 30 m / rok v případě jemně texturovaných zemin, 100 m / rok na hlinito-písčitých půdách, 300 m / rok na středně jemných píscích a 500 m / rok na hrubozrných píscích. Evaporace z otevřených vodních ploch je v průměru od asi 0,4 m / rok pro chladné vlhké klima až do 2,4 m / rok, pro teplé suché podnebí a tvoří nevýznamnou složku vodní bilance (Bouwer, 2002).

V případě, že zdrojem vody je sezónní tok se sporadickým průtokem s vysokým obsahem plavenin, nabývá na významu řízení průběhu infiltrace, aby se minimalizovalo ucpávání, ovlivňující velikost infiltrací a velikost odparu. Pro operativní rozhodování při řízení infiltrace jsou významnými pomocnými parametry monitoring poměru rychlosti sedimentace a rychlost infiltrace k odhadované hodnotě evaporace z volné hladiny.

#### **6.1.1 Infiltrace v infiltračních rybnících, nádržích a plochách (Infiltration or Recharge Ponds or Basins)**

Infiltrační pánev je buď vyhloubena v zemi, nebo je tvořena vyhrazenou plochou ohraničenou břehy či hrázemi, ve které probíhá retence doplňované vody (např. srážkové vody), do té doby než proběhne vlastní dnová infiltrace. V případě, že materiál dna je velmi jemný, dochází rychle ke kolmataci. V tomto případě zakrytí dna a okrajů vrstvou písku (asi 0,5m silnou) může zpomalit proces kolmace a zanášení a prodloužit infiltrační období. Stejná technika by měla být použita na puklinových horninových kolektorech, aby se zabránilo proniknutí nerozpuštěných látek nebo řas do hlubokých vrstev, kde by mohlo dojít k jejich ucpání (Huisman & Olsthoorn, 1983).



Obrázek 8 Infiltrace v infiltračních rybnících, nádržích a plochách ([www.un-igrac.org](http://www.un-igrac.org))

Hloubka nádrže by měla být natolik mělká, aby umožnila rychlé odčerpání vody v případech, kdy je nutné čistit dno sušením a sklývkou. Hladina vody by měla být řízena, aby se zabránilo růstu rostlin, nebo hromadění řas s vytvořením následné rezistence vůči průtoku vody. Velikost plochy, která je k dispozici pro infiltrační pánve a rychlost infiltrace, určuje dosažitelný objem akumulované vody.

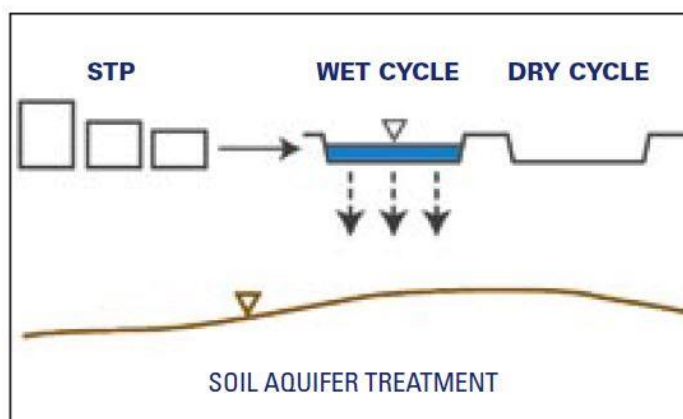
Zanesení filtračního dna je největší problém při infiltraci, na dně a okrajích nádrže se vytváří nepropustný film. Při řešení tohoto problému je nutno zvážit následující metody:

- Aplikace střídavého systému zaplavit nádrže a následného sušení a shrabování dna. Sušení zabraňuje růstu řas, a to v kombinaci se shrabováním dna pánve obnovuje infiltrační kapacitu.
- Na dně nádrže vytvořit hřebenovité útvary a následně kontrolovat hladinu vody. Tím dojde k sedimentaci částic v rýhách mezi hřebeny, ale zůstává zachována filtrační kapacita v šikmých plochách hřebene (Maliva & Missimer, 2012).
- Provést mechanickou úpravu infiltrační vody primární sedimentací za účelem odstranění nerozpuštěných látek. Účinnost může být zvýšena přidávkou flokulantů.
- Chlorace infiltrační vody pro inhibici mikrobiální aktivity.
- Mechanické ošetření půdy orbou, pro zvýšení propustnosti.
- Překrytí vrstvou středně zrnitým pískem, který slouží k zachycení suspendovaných částic a je i s nimi po použití odstraněn.

Uvedené příklady v kapitolách 8.2.2..

### 6.1.2 Filtrace přes půdní horizont (Soil Aquifer Treatment – SAT)

Diskuze nad znovuvyužitím vyčištěných odpadních vod nabývá z hlediska dostupnosti vodních zdrojů čím dál větší důležitosti. Pohled na odpadní vody z čistíren se postupně mění, nejsou již považovány za problém, ale z vodohospodářského hlediska za výhodu. Praktický výzkum, který byl proveden v posledních několika desetiletích (zejména ve Phoenixu v Arizoně pod vedením H. Bouwer), zkoumal hydraulické, provozní a bio-geochemické procesy spojené s odpadními vodami, jejich zasakování a jejich znovuvyužití prostřednictvím půdní infiltrace, vodních nádrží, atd. Zapojení odpadních vod do procesu recyklace přináší řadu výhod, jako jejich uchování v kolektorech a tím snížení variability dodávky / poptávky, zlepšení kvality v důsledku filtrace půdního horizontu, příznivého ekonomického dopadu a postupného zlepšení přístupu veřejnosti k jejich opětovnému použití. Odpadní vody se zasakují přes infiltrační pánve po jejich sekundárním stupni čištění a jejich chloraci předtím, než jsou odváděny do infiltračních rybníků. Při zlepšování kvality vody je často hlavním cílem odstranění všech nerozpuštěných látek a mikroorganismů. Odstranění dusíku prostřednictvím denitrifikace je také klíčovým momentem, stejně jako je snížení koncentrace organického uhlíku prostřednictvím biologických procesů. Fosfáty a kovy mohou být také předem odstraněny, dochází však i k jejich zadržení procesy půdní filtrace (Bouwer, 2002).



Obrázek 9 Filtrace přes půdní horizont (SAT) (Gale, 2005)

Akumulovanou vodou je možné plně nahradit přírodní podzemní vodu, a protože neobsahuje patogeny, tak zejména pro zemědělské a rekreační závlahy nebo jako vodu pro čištění komunikací v komunální sféře. Využití pro zásobování pitnou vodou je však omezeno obsahem organického uhlíku, a četnými syntetickými



organickými chemikáliemi. To lze řešit reverzní osmózou nebo uhlíkovou filtrací před SAT nebo zředěním přirozených podzemních vod v průběhu opětovného využití.

### **6.1.3 Řízené zaplavování (Controlled Flooding)**

V oblastech s relativně plochou topografií mohou být vody svedeny pomocí kanálů z řeky a rozvedeny rovnoměrně na velké ploše. Vytváří se tenký film, který se pohybuje minimální rychlostí, aby se zabránilo narušení půdního pokryvu. Nejvyšší filtraci lze pozorovat v oblastech s nenarušenou vegetací a půdním pokryvem (Todd, 1959). Za účelem kontroly zavodňovacího procesu je nutné, aby břehy nebo příkopy obklopovaly celou pláň. Protože je nutná jen minimální příprava půdy, zavodňování touto formou je velmi efektivní z hlediska nákladů, v porovnání s jinými metodami. Nicméně musí být k dispozici velké plochy půdy pro realizaci infiltrace. Vysoké zatížení sedimentem, který se bude ukládat na povrchu, bude mít za následek snížení rychlosti infiltrace. Pro udržení požadované rychlosti vsakování mohou být prováděna nápravná opatření. Zemědělská půda používaná pro zaplavování může benefitovat z usazování sedimentu, ale musí být udržována rovnováha se snižováním infiltrační kapacity (Escalante, 2010).

Uvedený příklad v kapitole 8.2.2..

### **6.1.4 Infiltrace u efemerních toků (Incidental Recharge)**

Přebytek závlahové vody z kanálů a polí způsobily v minulosti podmáčení a zasolování. Je-li však tento přebytek kvantifikován a vhodně usměrněn, může přinášet pozitivní efekt. Např. v oblasti nivy Gangy - Indie se hladina podzemní vody zvýšila asi o 6 m za dobu deseti let, a voda byla využívána jako závlahová i v období mimo zavlažovací sezóny. IWMI (2002) odhaduje, že asi 60% vody aplikované na rýžová pole je využívána rostlinami, zbytek se infiltruje do podzemních vod. Nedávné studie demonstrovaly, že průsak kanálových irigačních systémů lze modifikovat i s cílem doplňování zásob podzemní vod.

Rozumný koncepční model může být vyvinut na základě odběru vzorků jakosti podzemní vody a se znalostí hydrogeologie a antropogenních činností v této oblasti.

Problémy s kvalitou podzemní vody narůstají zejména při neřízeném zasakování městských odpadních vod. Např. v Mexiku se široce používají městské odpadní vody

pro zemědělské účely. V okolí měst, jako je Leon a Mexico City, se prudce snižují hladiny povrchových vod a vlivem nárůstu populace nestačí pokrýt poptávku nárůstu obyvatelstva.

Odpadní vody obsahují různé druhy průmyslového znečištění a největší vliv na kvalitu podzemní vody mají tam, kde jsou prováděny závlahy těmito vodami. V současnosti špatná kvalita podzemních vod dosahuje do hloubek 50 až 100 m s obsahem chloridů 800-1000 mg / l v horních vrstvách. Mnoho dalších znečišťujících látek v odpadních vodách je odstraněno, nebo dochází k poklesu koncentrací v distribučním systému a průsakem půdním horizontem. To pomáhá zabránit znečišťujícím látkám, jako jsou organický uhlík, živiny, těžké kovy a patogeny, aby dosáhly až k hladině podzemních vod. Hlavní hrozbou pro podzemní vody je zvýšená koncentrace chloridu, který se dostává do municipálních studní (Chilton, a další, 1998).

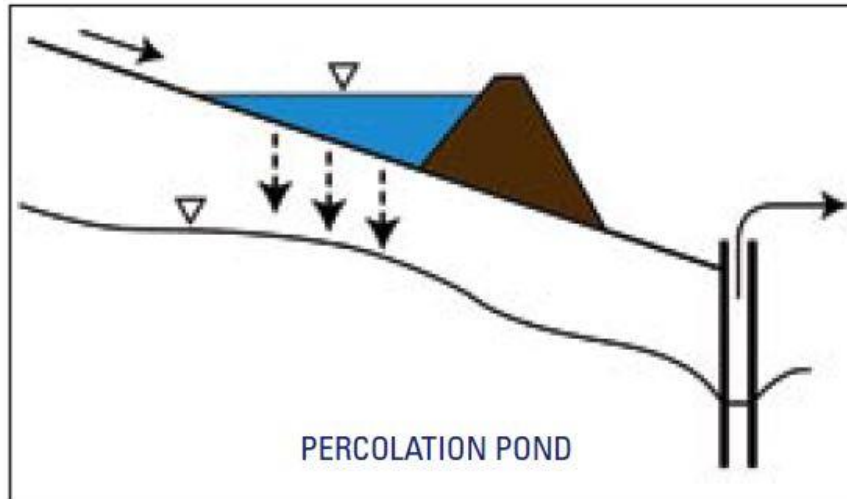
Je také důležité vzít v úvahu náhodné zasakování v městských oblastech, protože může mít vliv na vodní bilanci v daném povodí. Úniky vody, odpadní vody a srážkové vody v městských oblastech mohou významně přispět k doplňování zásob podzemních vod, v některých případech mají i za následek zvyšování hladiny podzemní vody a zaplavování.

Uvedený příklad v kapitole 8.2.8..

## **6.2 Modifikace odtoku (In-Channel Modifications)**

### **6.2.1 Perkolační rybníky za přehradami (Percolation Ponds Behind Check-Dams)**

Infiltrace vody lze dosáhnout levnou výstavbou levných příčných hradících objektů v korytech, z místních stavebních materiálů z nivy toku. Aby se zabránilo každoroční erozi, nebo zničení těchto struktur, staví se betonový přeliv s kanálovým odtokem. Přiřazené ohrázení zpomaluje rychlost vody v toku, a tak dává potřebný čas pro infiltraci a současně snižuje erozi.



Obrázek 10 Infiltrační schéma perkolačních rybníků (Gale, 2005)

Řada z těchto struktur podélných liniových odvodnění snižují destruktivní energii intenzivního odtoku (např. z monzunových dešťů), což vede ke snížení eroze a transportu sedimentů. Vzhledem k tomu, že v těchto strukturách je voda v uzavřeném prostoru a na krátkou dobu, půdu lze tak hned obdělávat. Využívání vlhkosti půdy může mít za následek dodatečnou roční úrodu. Obdělávání půdy také udržuje infiltrační kapacitu.

Povrchové jezy v Keni a mnoha částech Indie, a na Tchaj-wanu zadržovací přehrady, se používají k prodloužení období zadržování vody a ke zvýšení smáčené plochy nivy.

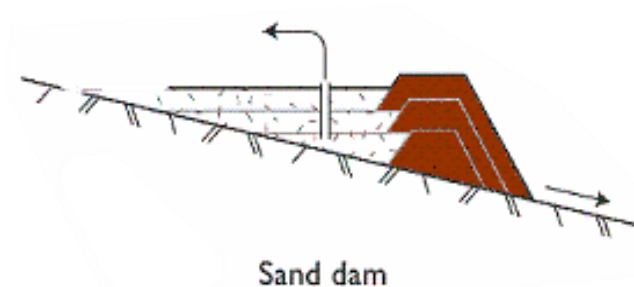
Uvedený příklad v kapitole 8.2.1..

### 6.2.2 Retence vody v písčinných přehradách (Sand Storage Dams)

Písčinné přehrady jsou optimálně umístěny v mírně zvlněném terénu v suchých klimatických podmínkách, kde se odtok často odehrává ve formě povodně. Přehrady jsou obvykle konstruovány v písčinných, pomíjivých korytech vodních toků, v dobře definovaném údolí. Hráz je postavena na skalním podloží, po celé šířce koryta, aby zpomalila povodňovou vlnu. To umožňuje hrubšímu materiálu, aby se usadil za hrázi. Hráz může být zvýšena po každé následné povodni, výška hráze je určena velikostí povodňového odtoku a množstvím nahromaděného materiálu. Pro odolnost jemnějšího materiálu musí být zajištěn dostatečný odtok. V ideálním případě by dominantní skalní útvar měl odolat klimatickým vlivům, včetně hrubých, písčinných sedimentů, např. žula, pískovec, křemen. Časem, po sobě jdoucí povodně, pomohou vytvořit nový kolektor se zásobou podzemní vody. Voda v tomto kolektoru může být

dále využívána. Pískové zásobní přehradý mohou být umístovány i nad propustným podložím a tím doplňovat množství podzemní vody v přirozených zvodních (Murray & Tredoux, 1998).

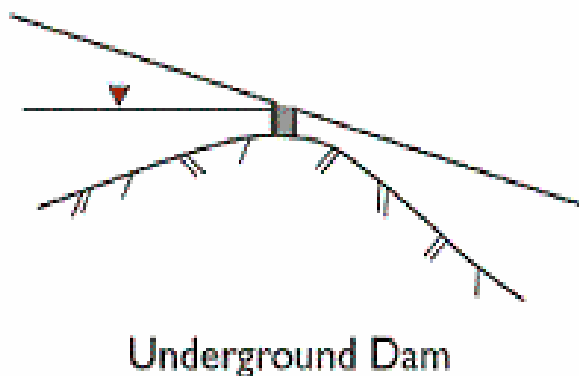
Uvedený příklad v kapitole 8.2.7..



Obrázek 11 Písečná filtrace (Gale, 2005)

### 6.2.3 Podpovrchové přehradý (Subsurface Dams)

Podpovrchové přehradý mohou být použity k zadržení vody v sedimentech. U dočasných toků, kde dnové vyvýšeniny zpomalují odtok, je vybudována příčná hráz zakotvená do nepropustného podloží, tvořena materiálem s nízkou propustností pro omezení toku podzemní vody. Podzemní voda se následně získává ze studní a vrtů.

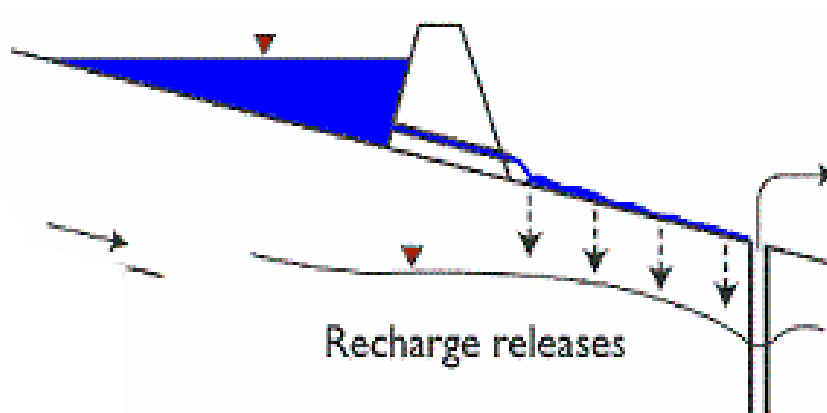


Obrázek 12 Podpovrchové přehradý

## 6.2.4 Propustné přehrady a uvolňování pro infiltraci (Leaky Dams and Recharge Releases)

V případě, kdy tok je velmi „divoký“ a obsahuje velké množství nerozpuštěných látek, může dojít ke ztrátě odtokem vody korytem z povodí, dříve než se může infiltrovat do podzemní vody. Výstavba hrází na těchto odtokových rýhách může pomoci vyřešit tento problém tím, že zachycuje sedimenty. Voda je potom následně odváděna do navazujícího toku, kde může následně dojít k doplňování zásob podzemních vod. Dobrým příkladem této praxe je přehradní systém OMDEL v Namibii (Zeelie, 2002). Obdobným příkladem, založeným na stejném principu, je výstavba propustných přehrad z gabionů naplněných kamenem a s odtokovými trubkami vedoucími skrz tuto hráz (Kahlow & Abdullah, 2004). Tyto struktury snižují vysokou kinetickou energii toku; stimulují usazování suspendovaných sedimentů a postupně uvolňují vodu prostřednictvím průsaku. Ta následně infiltruje do navazujícího řečiště.

Uvedený příklad v kapitole 8.2.3.



Obrázek 13 Propustné přehrady (Gale, 2005)

## 6.3 Studny, šachty, vrty (Wells, Shafts and Boreholes)

### 6.3.1 Otevřené studny a šachty (Open Wells and Shafts)

Tento způsob je používán pro doplňování mělkých depresních zvodní a také tam, kde povrchové vrstvy mají nízkou propustnost a tudíž metody doplňování zásob vody povrchovým vsakem nejsou účinné. Pro tyto účely jsou často používány studny, které vlivem nadměrného čerpání vyschly, a došlo k dlouhodobému poklesu hladiny podzemní vody.

Sedimentace suspendovaných pevných látek ve vodě je nutná před infiltrací, aby se snížila možnost ucpání pórů, a to zejména v případě, že zdrojem je srážková voda. Následné odběry mohou vyplavovat jemné částice zeminy z pórů, což vede do určité míry k obnovení infiltrační kapacity. Mnohdy nastává nutnost fyzického odstranění sedimentu.

Využití studní má potenciál nejen introdukovat nerozpuštěné látky přímo do zvodně, ale touto cestou dochází i k přímému vnosu chemického (dusičnany, pesticidy, atd.) a bakteriálního (včetně výkalů) znečištění. Možnosti doplňování zásob podzemní vody, popsané výše, mají výhodu proti studním v tom, že voda z povrchu prostupuje půdou a sedimenty mohou působit jako velmi účinné filtrační mechanismy. Hrubý materiál se někdy užívá k vyplnění jam a příkopů a působí jako filtr, který může být vyměněn, pokud dojde k jeho ucpání.

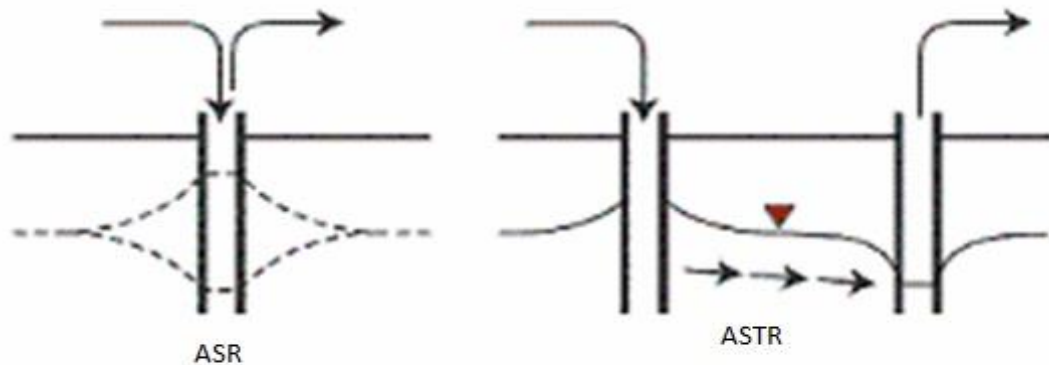
Infiltrační jámy a příkopy se používají v případech, kdy materiál o nízké propustnosti překrývá podzemní kolektor, který se vyskytuje v příkopu 5 až 15 m, který je překryt volně uloženým materiálem (Bouwer, 1996). Objekty musí být dostatečně vyhloubeny tak, aby pronikly hlubšími, málo propustnými vrstvami, s cílem dosáhnout přímého dotyku se zvodní. Rýhy nebo jámy jsou budovány tak, aby boční stěna měla co největší povrchovou plochu a minimální spodní povrchovou plochu, což usnadňuje horizontální pohyb infiltrované vody do zvodně (Murray & Tredoux, 1998). Jámy mohou být vyplněné hrubým pískem nebo jemným štěrkem. Zařízení by mělo být v ideálním případě zakryto, aby nebylo vystaveno slunečnímu záření, zvířatům a antropogenním vlivům.

Obecně platí, že výstavba šachet a příkopů je nákladná, a infiltruje jen relativně malé množství vody. Proto je jejich použití většinou omezeno jen pro případy, kdy jsou již k dispozici v podobě opuštěných lomů, štěrkoven, atd.

### **6.3.2 Vrtané studně a vrty (Drilled Wells and Boreholes)**

Studně nebo vrty se používají tam, kde je silná, málo propustná vrstva ležící nad cílovými kolektory, proto aby infiltrovaly vodu přímo do zvodně. Infiltrační studně jsou také výhodné tam, kde je málo prostoru pro povrchovou infiltraci. Nicméně, požadavky na kvalitu infiltrované vody jsou obvykle signifikantně vyšší pro injekční vrty, než pro doplňování vod prostřednictvím povrchové infiltrace. Podrobný popis je možné nalézt v dokumentu od Pyne (Pyne, 1995). Tam, kde se používá studně/vrt

jak pro injektování, tak pro odběry (Aquifer Storage Recovery: ASR), bývají náklady minimální a zanášení je přirozeně odstraňováno během cyklu čerpání. Voda může být vstříkována do jednoho vrtu a čerpána z jiného, vzdáleného vrtu, což má za následek prodloužení doby mezi injektáží a odběrem, a z toho je vyplývající výhoda lepšího využití kapacity kolektoru. To se označuje jako Aquifer Storage Transfer and Recovery (ASTR).



Obrázek 14 ASR a ASTR (Gale, 2005)

Technologie, potřebná pro vytvoření těchto systémů, může být poměrně složitá a vyžaduje technické znalosti. Projektování těchto systémů se může značně lišit a zahrnuje realizaci vrtů v základně vrtných jamek a zpětné naplňování vrtných studní přesně strukturovaných filtračním materiálem, aby se:

- (a) omezilo pronikání nerozpuštěných látek, které by vedlo k rychlému zanesení vrtu
- (b) zamezilo přítoku znečišťujících látek, které by mohly znečistit podzemní vody

Zanesení zvodně nebo filtračního materiálu ve vrtu suspendovanými sedimenty, velkým obsahem vzduchu v infiltrované vodě, vlivem růstu mikroorganismů nebo chemického srážení, je častý problém, který vede k nadměrnému hromadění vody ve studnách. Tyto procesy spojené se zanášením, mohou být regulovány mechanickým zpracováním infiltrované vody pomocí sedimentace nebo filtrace, vedoucí k odstranění nerozpuštěných látek. Voda by měla být vedena přes ventil, k zajištění kontinuálního sloupce vody ve vrtu. Určitá chemická předúprava vody může být nutná, aby se zabránilo flokulaci železa,  $\text{CaCO}_3$ , atd.. Chlorace nebo jiné dezinfekční postupy se uplatňují tam, kde hrozí nadměrný růst mikroorganismů. Zanesené studny je nutno fyzicky čistit v pravidelných intervalech pomocí rázů a čerpání pro

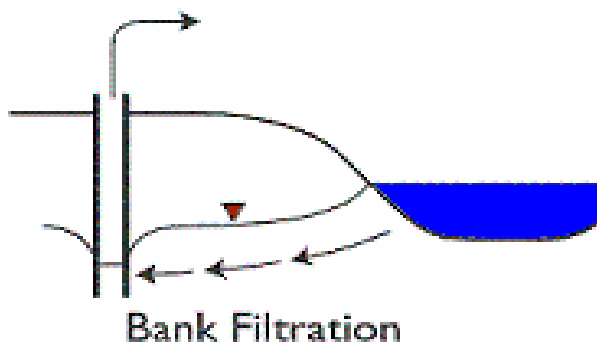
odstranění jemných materiálů a bakteriálního růstu a dále s použitím smáčedla pro odstranění přebytku vzduchu. Vápencové kolektory vykazují nejmenší zanášení, díky postupnému rozpouštění kalcitu, vlivem udržování mírně kyselého prostředí.

Uvedené příklady v kapitolách 8.2.4., 8.2.6., 8.2.10..

## 6.4 Indukované břehové infiltrace (Induced Bank Infiltration)

### 6.4.1 Břehová infiltrace (Bank Filtration)

Infiltrace říčním dnem se obvykle skládá ze soustavy nebo linie vrtů o malé vzdálenosti od břehu nebo rovnoběžně s břehem toku. Čerpání z vrtů snižuje hladinu podzemních vod v blízkosti řek nebo jezer a navádí říční vody do zvodně systému. Pro zajištění uspokojivé purifikace povrchové vody v zemi, doba transportu by měla překročit 30-60 dnů (Huisman & Olsthoorn, 1983). S ohledem na tento fakt musí být zajištěna dostatečná vzdálenost od sebe.



Obrázek 15 Břehová infiltrace (Gale, 2005)

Kontrola jednotlivých faktorů ovlivňuje kvalitu indukovaných filtračních systémů, které jsou pak spolehlivým zdrojem povrchové vody s přijatelnou kvalitou, v závislosti na propustnosti říčních nebo jezerních ložisek a formací přilehlých k povrchové vodě (O'Hare, a další, 1982). Za předpokladu, že propustnost říčního dna nebo jezerního dna a kolektoru je vysoká a zvodně je dostatečně silná, může být získáváno velké množství podzemní vody ze studní nebo galerií, bez závažných nežádoucích vlivů na podzemní vody dále do vnitrozemí (Huisman & Olsthoorn, 1983).

Říční a jezerní vody často nesou značné množství nerozpuštěných látek, a proto, pokud se voda dostane do podzemní vody, jemná frakce se profiltruje a to zanechá



vrstvu na dně jezera. To poskytuje užitečné ošetření infiltrované vody, ale v případě nadměrného zanesení a nepropustného povrchového filmu pak musí být odstraněno během období nízké hladiny vody.

Uvedené příklady v kapitolách 8.2.5., 8.2.9..

#### **6.4.2 Mezidunová infiltrace (Interdune Filtration)**

Zvláštní varianta této metody se používá v pobřežních oblastech, a je známá jako infiltrace mezi dunami. Prohlubně mezi pobřežními písčnými dunami jsou zaplaveny vodou z řeky, aby se infiltrovaly do okolních sedimentů a vytvořily infiltrační val. Val může hrát významnou roli v prevenci pronikání solí, a stejně tak pro zajištění zdroje vody, která by byla odebírána dále ve vnitrozemí. Tato technika se používá po staletí a je vysoce rozvinuta podél pobřeží Nizozemska, kde řeky jsou zdrojem vody pro infiltraci. Srážkové a vyčištěné městské odpadní vody mohou sloužit jako další zdroj vody pro tyto systémy.



**Dune Filtration**

**Obrázek 16 Dunová filtrace (Gale, 2005)**

Hlavním cílem těchto typů programů je zlepšit kvalitu, často nekvalitního zdroje vody, a hodně výzkumů bylo provedeno pro pochopení a optimalizaci řízení pohybu nerozpuštěných látek, srážení a zředění rozpuštěných pevných látek, včetně organických sloučenin, s použitím fyzikálních, chemických a biologických procesů.

#### **6.5 Zadržování srážek (Rainwater Harvesting)**

Zadržování srážkových vod, v nejširším slova smyslu, je zachycení odtoku srážkových vod a jejich využití pro produktivní účely. To obvykle znamená soustředění srážek z větší plochy pro použití v menších oblastech, a to pro závlahy nebo infiltrací do podzemních vod. Využívání srážkových vod ze střech je zvláštní případ, který se stále více používá v městských oblastech pro zadržování v nádržích,

pro městské závlahy, úklidy komunikací a využití pro infiltraci do podzemních vod (Gale I. , 2005).

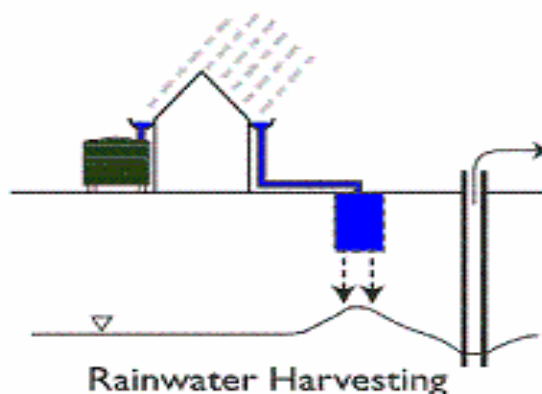
### 6.5.1 Zemědělství v suchých oblastech (Dry Land Farming)

Zemědělské systémy v aridních oblastech využívají mezi 15 a 30% srážek, většina se odpaří (30 - 50%), část jde do povrchového odtoku (10-25%). Zbytek se infiltruje do podzemních vod (10 - 30%) (Rim, 1995). Zásahy v podobě polního ohrázení, hrázky z orby a skalních hrázích v odvodňovacích kanálech se záplavovou vodou odkloněnou do ohrazených sklizňových oblastí, mají za cíl snížení odtoku vody korytem a mají za cíl zajistit, aby voda byla uložena v půdním profilu nebo v hlubším kolektoru. Bez ohledu na systém, který se používá, je cílem výrazně snížit odtok a odpařování za účelem zvýšení zemědělské produkce, a (často neplánovaně) zvýšit zásobu podzemních vod (Gale I. , 2005).

Uvedené příklady v kapitolách 8.2.7..

### 6.5.2 Využívání srážkových vod ze střech (Roof – Top Rainwater Harvesting)

Sběrem srážkových vod ze střech je možno ušetřit srážkovou vodu, buď pro přímou spotřebu, nebo pro doplňování podzemních vod. Tento přístup vyžaduje připojení výstupního potrubí z okapu pro odklon srážkové vody, buď do studní nebo jiných infiltračních struktur nebo zásobníků. Svody, střešní plochy a skladovací nádrže by měly být zhotoveny z chemicky inertních materiálů, jako jsou plasty, hliník, pozinkovaná ocel nebo ze skleněných vláken, aby se zabránilo kontaminaci srážkové vody.



Obrázek 17 Využívání srážkových vod ze střech (Gale, 2005)

Používá-li se voda k přímé spotřebě, prvotní voda ze srážek se často nechá volně odtékat, aby se spláchly nahromaděné nečistoty mimo oblasti sběru nečistot a z okapů. Hlavními zdroji kontaminace je atmosférická depozice, výkaly ptáků, zvířat a uhynulý hmyz. Bakteriální kontaminaci lze minimalizovat udržováním čistoty střešní plochy, ale není možné ji plně odstranit. Výhody sběru a uchovávání srážkové vody v městských oblastech zahrnuje snižování poptávky na vodu ve vodovodech, jakož i snížení množství odtoku srážkové vody, které by jinak mohly způsobit záplavy (Gale I. , 2005).

### **6.6 Kolmatace (Clogging Issues)**

Usazování jemného materiálu s následným zanesením zvodně je hlavním problémem, se kterým se setkáváme ve většině výše popsaných systémů. Zanesení může vznikat následkem akumulace usazenin, mikrobiologického růstu, chemického srážení a, v případě ASR typu (injektáže do vrtaných studní), přítomností vzduchových bublin blokující póry. Pro úspěšné provozování infiltračních systémů je nezbytné důkladné pochopení funkce fungování vlastní filtrace mechanismů, které vedou k zanášení. V případě, že filtrační rychlost je stejného rozsahu jako velikost odparu otevřené hladiny, zůstává otázkou, zda byl zvolen vhodný způsob infiltrace. Pokud je tento jev způsoben zanášením, lze jej obvykle zvládnout snížením potenciálního zanášení předúpravou vody spolu s pravidelnou rekonstrukcí infiltračního povrchu, buď odstraněním povrchové vrstvy, čerpáním nebo jinými fyzickými nebo chemickými prostředky. Metody zahrnují:

- Otvory ve stěnách písečných hrází, kterými může voda protékat v období s nízkým průtokem a s dostatečnou rychlostí pro udržení jemných částic v suspenzi a tím zajištění, že odtokové roury, které jsou součástí přehrady, se nezanášejí jemnými částicemi.
- Řízení procesů v povodí pro snížení pozemního odtoku a eroze půdy; např. prostřednictvím způsobů orby, preventivního zatravňování, zabránění nadměrnému spásání a dále vysazování rostlin, které vede ke stabilizaci půdy, atd.
- Výstavba sedimentačních rybníků „Bahňáků“ předřazených infiltračnímu zařízení. Tyto rybníky umožňují, aby se jemné částice mohly sedimentovat předtím, než se voda dostane k infiltračnímu systému. Mohou být konstruovány různými způsoby i jako průsakové přehradky a hráze.

- Vzhledem k tomu, že v případě injektáže do vrtaných studní je infiltrační plocha malá, je vyžadována mimořádně vysoká kvalita vody. Pro její zajištění může být nezbytná jejich předúprava na pískových filtrech, odplynění, případně jejich dezinfekce.
- Odpadní voda s vysokým obsahem živin musí být čištěna tak, aby byly odstraněny suspendované částice a dusíkaté látky, což se provádí střídáním suchých a mokřých cyklů čištění (Bouwer, 2000).
- Pravidelné odstranění sedimentu sejmutím povrchové vrstvy, aby se zabránilo jemnému materiálu pronikat příliš hluboko do povrchu infiltračního tělesa.

Náklady na správu a údržbu těchto opatření, k zamezení, zanášení, musí být porovnány s výhodami získanými využitím infiltrované vody. V případě, že systém umělého doplňování zásob podzemních vod je komunální aktivita, tak ti, kdo budou mít z tohoto projektu největší výhody, by měli nést většinu nákladů nutných na jeho realizaci.

## **7. Institucionální aspekty MAR**

Pro implementaci managementu přírodních zdrojů, jako je i MAR, byla vyzkoušena celá řada přístupů, kdy zodpovědnost spočívá buď na státu, místní vládě, výzkumných organizacích, privátním sektoru, nevládních organizacích a místním obyvatelstvu. V této části jsou popsány postupy zaměřené na decentralizované aktivity, mající nízké náklady na realizaci infiltračních schémat a jsou často organizovány prostřednictvím státních / vládních partnerství.

Dominantním institucionálním tématem v posledních dvou desetiletích byla decentralizace, často v tandemu s úsilím o podporu větší účasti v plánování “od zdola nahoru”. Např. v Indii při zavádění programů managementu povodí, často se silným zaměřením na MAR, se stále více objevuje potřeba decentralizovaného rozhodování. Vzhledem k tomu, že chudé vrstvy obyvatelstva jsou daleko více závislé na sdílení společných zdrojů jako je voda, decentralizované řízení může významně přispět k zlepšení jejich životních podmínek a to z hlediska práv a povinností, produktivity zdrojů, nebo jejich udržitelnosti (Carney & Farrington, 1998).

Vazba mezi decentralizací a participativním řízením je logická a jasně definovaná. Participativní řízení může být definováno jako proces, ve kterém „ti kteří mají na projektu osobní zájem, mají vliv na rozhodování, které se jich týká prostřednictvím benefitů, které jim projekt přináší“ (ODA, 1995). Je všeobecně uznávanou skutečností, že k posílení a udržení produktivity přírodních zdrojů se ti, kteří se podílejí na řízení těchto zdrojů, se musí podílet i na plánování jejich obnovy a managementu. Jak Farrington (1998) popsal ve své práci, vznikají v této oblasti nové způsoby podnikání – navázání projektů na finanční fondy, management projektu, rozhodovací procesy, atd. – pro celou řadu zúčastněných stran zapojených do budování nových asociací. To také přináší změny rozhodovacích pravomocí a přístupu ke zdrojům. Přes „dobrý pocit“, tato účast nemá zcela neutrální koncept: dochází ke změnám nezadatelných práv a mocenských vazeb a tento nový přístup k tomuto podnikání je často velice konfliktní (Carney & Farrington, 1998).

Klíčový problém MAR je vykonáván samostatně nebo jako součást širšího souboru opatření pro řízení zdrojů. Je nezbytné identifikovat postupy, které zajistí komunikaci mezi venkovskými obyvateli, místními organizacemi a státem, protože jenom tímto způsobem je možné řešit problémy efektivně, s patřičnou zodpovědností a udržitelnými náklady (Carney & Farrington, 1998). Při pohledu na jednotlivé fáze projektového cyklu a při znalosti a zkušenostech z realizace MAR programů v různých povodích v Indii vystávají výše zmíněné otázky jako zásadní.

Jako klíčové je v plánovací fázi nutné vyjasnit cíle MAR a také jak a kým jsou definovány. Zvláště se to týká názorů a zájmů různých skupin - včetně těch, které se vyskytují v navazujících částech povodí, těch, kteří nevládní půdu ani soukromé vodní zdroje – a je také nutné přihlídnout ke skutečnostem, které již byly místně definovány a odsouhlaseny. Zkušenosti ukazují, že nejefektivnější jsou ty projekty, které zapojují místní obyvatele do diskuse o tom, jaké jsou jejich problémy a priority (např. spolehlivost dodávky pitné vody; doplňkové zavlažování), a co které skupiny nejvíce preferují a připravit z tohoto pohledu flexibilní přístupy, které budou respektovat jejich životní styl a lokální přírodní podmínky.

Otázky, které se týkají toho, do jaké míry jsou rozhodnutí učiněna prostřednictvím místní populace nebo bez jejich účasti, jsou:

- Výběr oblasti /obce a vhodnosti
- Povinnosti spojené s účastí (např. sdílení nákladů pro stavbu)
- Technické podmínky (např. pro návrh a umístění staveb)

Zkušenosti opět ukazují, že flexibilita a společné rozhodování jsou pro realizaci takovýchto projektů klíčové. Projekty, kterým je věnováno dostatečné množství času, zdrojů na poradenství a organizování místních obyvatel, a které jasně definují zodpovědnost a povinnosti různých zúčastněných skupin (např. s údržbou a správou) fungují daleko lépe a trvale.

Je důležité zvážit rozdělování benefitů a majetkových otázek spojených s MAR a to již ve fázi plánování. Předpoklad, že z MAR budou benefitovat všichni rovnoměrně je nepřesný a to už jenom z rozdílného přístupu k využití vody a držení vodních práv. U projektů je proto nutné definovat, jak budou rozděleny náklady a výnosy a to obvykle mezi:

- Různé sociální a majetkové skupiny. Např. kdo by měl více přispět k nákladům spojených s projekty.
- Různé oblasti. Jak budou uživatelé po proudu vody ovlivněni, např. v případě, že nadbytek povrchové vody je nyní využit pro infiltraci v povodích proti proudu? Dopady aktivit, vyplývajících z MAR, a to pozitivní i negativní nebudou omezeny pouze v rámci hranic jedné komunity.
- Různá časová období – kdo jsou z hlediska dlouhodobosti či krátkodobosti projektu vítězové a poražení?

Organizaci řízení, ustanovení výborů uživatelů těch infiltračních projektů nebo realizace rozvojových aktivit pro povodí v širším slova smyslu, může být předpokladem pro získání podpory projektu. Řízení takového projektu příslušnou lokální komunitou často znamená, že obec získá i prostředky na realizaci a následnou údržbu infrastruktury. Účast uživatelů, v realizaci projektu MAR nebo jeho provozu, může být pro účely financování prokázána různými způsoby, např. smlouvami, zálohovými platbami, a příspěvky práce a / nebo materiálu na stavbu.

## 7.1 Vývoj programů rozvoje pro povodí a MAR v Indii

V Indii se MAR ve venkovských oblastech obvykle provádí jako součást souboru opatření zaměřených na rozvoj nebo rehabilitaci povodí. Tyto programy rozvoje povodí kombinují rozvoj územní / jeho ochranu, uchování půdní vlhkosti, zalesňování, rozvoj pastvin a zahradnictví, jakož i specifickou ochranu vodních zdrojů.

Projekty pro rozvoj povodí v různých formách jsou v Indii uplatňovány již od vzniku nezávislosti. Nicméně, hlavní podnět pro vládní zákrok nastal v roce 1970 a 1980, kdy dlouhodobé terénní experimenty potvrdily, že budování fyzických překážek k zamezení odtoku půdou a povrchovými toky, společně s ozeleňování přináší zvýšenou produktivitu zdrojů. Tyto experimenty měly za následek vznik četných vládních projektů, plánů a programů na podporu rozvoje mikropovodí na různých vládních úrovních.

Úvodní rozvojové programy obvykle stanovily ekologické cíle jako výchozí parametry jejich realizace. Ekologické parametry, stanovené pomocí fyzických cílů, určovaly rozsah a měřítko programů povodí a byly řízeny a realizovány prostřednictvím veřejných prací s omezenou účastí místních obyvatel. Vyhodnocení těchto úvodních projektů, realizovaných prostřednictvím vládních agentur ukázalo jen omezený úspěch při plnění environmentálních a hospodářských cílů. Jen malé množství projektů - ty, které byly řízeny nevládními organizacemi a místními agenturami - demonstrovaly lepší a udržitelnější výsledky pro chudé vrstvy obyvatel (Kerr, a další, 1998).

Tento přístup se výrazně změnil v polovině devadesátých let, v důsledku změn v politice vodního hospodářství, jejímž cílem bylo uplatnit více metody plánování více zaměřené na obyvatele. Konkrétně došlo k odklonu od stanovování fyzických cílů na obnovu a rozvoj přírodních zdrojů, směrem k integrovanému environmentálnímu řízení, současně s ohledem na ekonomické potřeby a snížení chudoby. Pokud jde o strategii, byl důraz kladen na participativní přístup zahrnující místní komunity, jak v plánování, tak v realizaci opatření. Mnohé z těchto změn byly urychleny vydáním moderních příruček (často nazývaných „The Common Guidelines“), pro rozvoj povodí a jeho management vydané v roce 1994 ministerstvem pro rozvoj venkova a zaměstnanost (Ministry of Rural Areas and Employment). Tyto „guidelines“

znamenaají odklon od dřívějšího přístupu v několika důležitých aspektech (Gale I. , 2005):

- Podpora rozvoje partnerství mezi vládními a nevládními organizacemi Project Implementing Agencies (PIA).
- Decentralizované řízení programů místními samosprávami tak, kde je to možné, a také prostřednictvím PIA.
- Ustanovování speciálně zaměřených komisí povodí pro vyjednávání účasti místních obyvatel na návrhu a implementaci opatření v povodí včetně MAR.
- Umožnění lokální kontroly distribuce financí z centrálních fondů, určených na obnovu povodí prostřednictvím oblastních agentur pro rozvoj venkova.

V současné době je na management takovýchto mikro-povodí vynakládáno více než 500 milionů dolarů za rok. Tyto prostředky pocházejí především z centrálních vládních zdrojů. Poskytovatelé prostředků vykazují značný zájem o rozvoj povodí, v neposlední řadě i proto, že nabízí možnost zavádět integrované řízení vodních zdrojů (IWRM), ochrany vod, zásobování vodou současně s podporou rozvoje venkova. I když většina programů rozvoje povodí zdůrazňuje význam MARu, neexistují žádná "rychlá řešení" pro zamezení přetěžování vodních zdrojů a omezení poptávky po vodě (Gale, a další, 2002).

## **8. Příklady**

### **8.1 Příklady v ČR**

#### **8.1.1 Káraný**

Úpravna vody Káraný je nejstarší ze 3 úpraven vody, které slouží pro zásobování hlavního města Prahy. Provoz byl zahájen v roce 1914. Dodávána je výhradně podzemní voda, bez chemické úpravy, pouze s nezbytným hygienickým zabezpečením chlorem (Herčík, 2008).

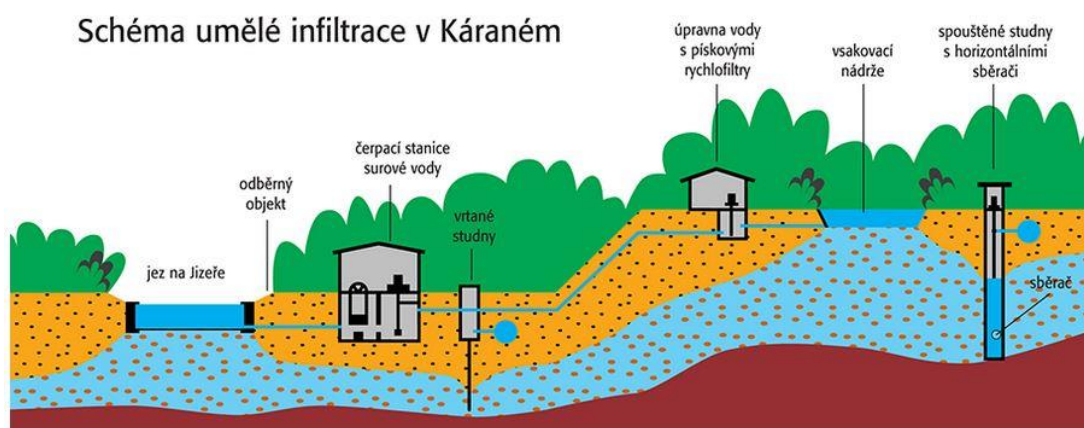
Úpravna vody dodává do pražského distribučního systému směs podzemní a infiltrované vody. Současný průměrný výkon vodárny je 1000 l / s a pitná voda se získává třemi způsoby (Úpravna vody Káraný):



- Přírozená infiltrace – Jizerská voda infiltruje dnem i břehem do okolních štěrkopískových náplavů, kde je ve vzdálenosti 250 m od řeky jímána ve směsi s přírozenou podzemní vodou. Děje se tak prostřednictvím řady vrtaných studní propojených násoskou. Odtud je získaná voda dále dopravována pomocí čerpacích stanic a gravitačního svodného řadu do hlavní čerpací stanice v Káraném.
- Umělá infiltrace – Surová jizerská voda dopravená do úpravny vody je přefiltrována na rychlofiltrech přes filtrační písek. Následně pak přečerpána do vsakovacích nádrží s přírozeným pískovým dnem ve štěrkopískových náplavech. Vsakovaná voda, procházející přes tento přírozený filtr, intenzivně obohacuje přírozené zásoby podzemní vody. Kontaktem s geologickými vrstvami získává vlastnosti vody podzemní. Ve vzdálenosti 200 m od vsakovacích nádrží je, asi po 40 až 50 dnech zdržení, v podzemí jímána takto infiltrovaná voda jako kvalitní voda pitná. Svodným řadem je dopravena do hlavní čerpací stanice.
- Artézská voda – Jde o zdroj mimořádně kvalitní vody, přitékající v hlubokém podzemí do této oblasti ze severní části geologického útvaru „Česká křída“. Voda je jímána ze 7 artéských vrtů. Její stáří bylo stanoveno na 16.000 let. Její složení po jednoduché úpravě (odželeznění) odpovídá požadavkům na vodu pro přípravu kojenecké stravy.

K zajištění stálé hladiny pro odběr povrchové vody byl na řece Jizeře vybudován pohyblivý jez o dvou polích s hrubými a jemnými česly. Odtud surová Jizerská voda teče gravitačně do čerpací stanice surové vody, kde jsou osazeny síťové filtry o velikosti ok 1/1 mm. Čerpací stanice následně dopravuje surovou vodu na horní terasu do úpravny vody. Úprava vody v tomto případě představuje pouhou mechanickou filtraci na pískových rychlofiltrech a filtrát je vlastně meziproduktem, který se čerpá do systému mohutných vsakovacích nádrží o celkové ploše 70.000 m<sup>2</sup>. Zde probíhá další stupeň úpravy vody. Dno vsakovacích nádrží je tvořeno přírodními vrstvami štěrkopísků a pracuje jako pomalý filtr. Po krátké době využití vsakovacích van se na jejich dně vytvoří „biologická blána“, která má hlavní podíl na likvidaci biologického oživení ve vodě. Další proces - zvýšení tvrdosti, vyrovnání teploty atd. probíhá v podzemí – v horninovém prostředí, mezi vsakovacími nádržemi a jímacími objekty. Pro jímání vody byly použity dva způsoby jímání

podzemní vody. V místech, hladina podzemní vody zasahuje do spodní terasy je voda jímána vrtanými studnami propojenými tzv. násoskou, na horní terase, kde hladina podzemní vody je v takové hloubce, která prakticky neumožňuje použití násosky, jsou vybudovány spouštěné studny s horizontálními sběrači. Ze studní je pak voda přečerpávána do gravitačního svodného řadu a přes spojný objekt přiváděna do hlavní čerpací stanice v Káraném, kde je míchána s vodou břehové infiltrace a dále po základním chlorování pouštěna do vodovodních řadů Prahy a dalších 9 okolních měst a obcí (Vodárna v Káraném, 2013).



Obrázek 18 Schéma umělé infiltrace v Káraném

### 8.1.2 Jímací území Tlumačov

Jímací území Tlumačov leží v levobřežní části údolní nivy řeky Moravy mezi Tlumačovem a Otrokovicemi. Vodárensky využívaným hydrogeologickým kolektorem jsou průlinově propustné fluvialní štěrky a písky řeky Moravy a souvrství šedých písků v jejich podloží. Horninové prostředí je zde silně propustné. Povodňové hlíny lze považovat za málo propustné, takže způsobují při vyšších stavech hladiny podzemní vody napjatost zvodně s negativní piezometrickou úrovní. Hladina podzemních vod se pohybuje v hloubkách 1,0 – 3,0 m pod terénem. Průtok na řece Moravě je od roku 1966 řízen bělovským jezem. Nad jezem, kde je situováno jímací území, se výrazně uplatňuje infiltrace z řeky do kolektoru kvartérní fluvialní zvodně. V minulosti byly realizovány pokusy pro navýšení hladiny podzemní vody pomocí vybudování infiltračních zářezů s jímacími vrty, které však nejsou dnes využívány (Wünsch, 1964).

V současné době je v prostoru jímacího území Tlumačov používáno pouze propojení řeky Moravy a Kapříska (slepé rameno), kde je potrubím přepouštěna voda z řeky Moravy do Kapříska, z něhož zákonitě dochází rovněž k infiltraci.

Pro dotování rekreačních chat pitnou vodou na území Jelenice se využívá následující způsob: pramenný vývěr zdrojnice (podzemní voda) poté, co se stane povrchovým tokem, se prostřednictvím filtrační hráze vcezuje do jímacího zářezu, který je součástí hydrogeologického kolektoru vázaného na zvětralinový pokryv krystalinika brněnského masívu a odkud se exploatuje opět jako podzemní voda mělké zvodně.

Obdobných lokalit místního významu využívajících podobné technologie vodárenské exploatace, kdy z důvodu nedostatku podzemní vody je zvoděň obohacen vsakem povrchové vody do hydrogeologického kolektoru v takové míře, že dominantní podíl má voda povrchové vodoteče, je celá řada.

### **8.1.3 Umělá infiltrace v povodí Svitavy**

I když se hydrogeologický rajón nachází administrativně na území Pardubického kraje, historicky náležela k „Zemi Moravské“. Problematika byla řešena pouze ve formě studie a dotýkala se možnosti navýšení odběrů podzemní vody pro město Brno.

Studie chtěla využít občasného pramenního vývěru Hladové prameny k navýšení vodárenských odběrů, především ve vegetačním období, kdy je tento pramenní vývěr aktivní a kdy v letním období rostla i spotřeba vody v Brně. V roce 1982 byla ukončena studie závěrečnou zprávou pod názvem „Zhodnocení využívání zdroje podzemní vody v Březové nad Svitavou“, která zhodnotila na základě kvantity a kvality zdroje Hladových pramenů a která navrhla tři způsoby vodárenské exploatace (Červenková, 2014).

1. způsob spočíval v technickém podchycení občasného pramenního vývěru násoskou v kombinaci s mělkými vrty umístěnými přímo v místě vývěru a v dopravě jímáné podzemní vody potrubím do sběrné studny II. zvodně (kolektor B – spodní turon) a následné připojení na násosku II. březovského vodovodu.
2. způsob předpokládal jímání v úrovni II. zvodně (kolektor B – spodní turon) – napjatá hladina podzemní vod. Principem tohoto řešení bylo převedení vody z prostoru Hladových pramenů na úroveň puklinově propustných vrstev kolektoru B

infiltrací, a těchto vrstev využít k dopravě vody ke stávajícím jímacím vrtům II. zvodně a z těchto vrtů těžít vodu plnou kapacitou stávajících čerpacích stanic, tj.  $393 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ .

3. způsob předpokládal umělou infiltraci do I. zvodně (kolektor C – střední turon) s volnou hladinou, za předpokladu převedení vody z Hladových pramenů na protější stranu údolí řeky Svitavy do míst přirozeného proudu podzemní vody I. zvodně, směřujícího do místa dosahu násosky II. březovského vodovodu.

U všech výše uvedených způsobů podchycení bylo zpracováno technicko-ekonomické řešení s tím, že 1. způsob představoval nejjednodušší technickou a provozní alternativu s plným využitím zachycené vody a to bez nároku na energii, ale s maximální náročností na investiční prostředky a materiál. V případě 2. způsobu pak zde byly technické problémy zapříčiněné především tím, že by do zvodně s kvalitnější podzemní vodou byla infiltrována voda s relativně méně kvalitní, což je v rozporu se Zákonem o vodách (Vodní zákon 254/2001 Sb.). Napjatá hladina II. zvodně by pro umělou infiltraci úplnou vsakovací studnou nebyla technickým problémem.

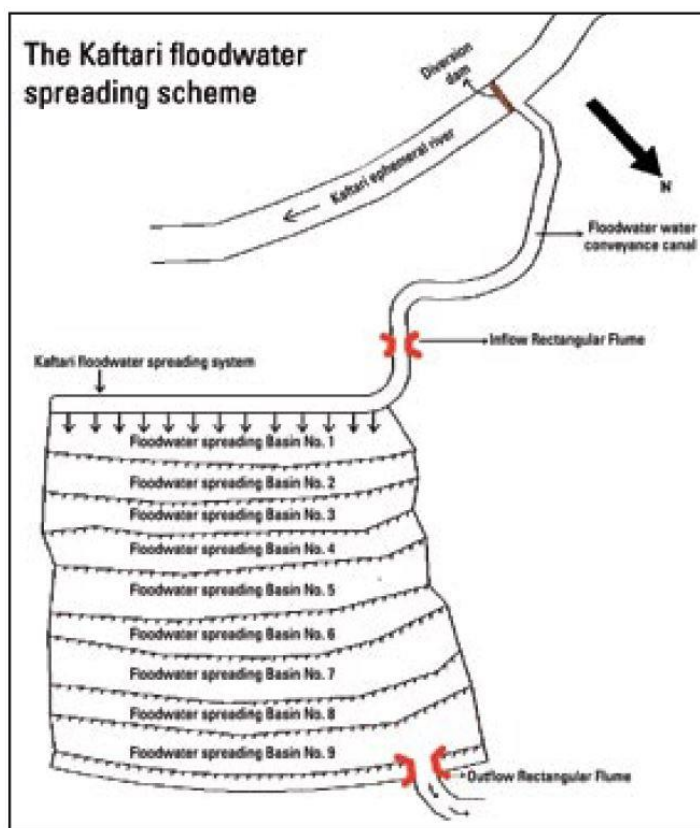
3. způsob s využitím umělé infiltrace do I. zvodně (kolektor C – střední turon) se jevila po ekonomické stránce jako nejvýhodnější řešení. Její realizace byla podmíněna hydrogeologickým průzkumem, který by optimalizoval umístění vsakovacích vrtů a stanovil akumulární schopnost – kapacitu horninového prostředí (Viščor, 2013).

## **8.2 Příklady ve světě**

### **8.2.1 Doplnování zvodní pomocí povrchové plošné infiltrace v Kaftari, Irán**

Nadměrné odběry podzemních vod způsobilo postupné snižování hladiny podzemní vody (1,5 m / rok) doprovázené zhoršením její kvality na Dorz-Saybanských pláních, které se nachází 115 km jihovýchodně od Larestanu v Iránu. 3500 ha pozemků v této oblasti je zavlažováno podzemní vodou.

Pro zmenšení poklesu hladiny podzemní vody bylo v letech 1983 – 2001 vybudováno postupně 5 plošných infiltračních systémů zachycujících vodu z povodní.



Obrázek 19 Schéma distribuce povodňových přítoků v Kaftari (Esfandiari-Baiat & Rahbar, 2004)

Během 9 záplav v Kaftari způsobených v letech 2002-2003, byly měřeny poměry nátoků a odtoků z těchto infiltračních systémů. Poměr maximálního přítoku a odtoku v systému byl 20,3 resp. 7,26 m<sup>3</sup> / s. Měřením bylo stanoveno, že během těchto 9 povodní objem celkového nátoku do systému byl 886.000 a odtok 146.000 m<sup>3</sup>, 83,5% nátoků, tak bylo infiltrováno do kolektoru a pouze malá část byla ztráta způsobená odparem. To poukazuje na vysokou účinnost tohoto infiltračního systému při doplňování podzemních kolektorů.

Vedlejším efektem bylo, že více než 70% plavenin sedimentovalo v systému. To na jedné straně nevyhnutelně vede k zanášení a snížení účinnosti, ale na druhé straně ke zlepšení vlastností zemědělské půdy. Navíc, díky MAR se zlepšila kvalita podzemních vod, protože elektrická konduktivita vody ze záplav je mnohem nižší, než má podzemní voda (0,3 až 0,4 vs. 2,0 - 9,0 dS / m) (Esfandiari-Baiat, a další, 2004).

### 8.2.2 Management v povodí v Rajasthanu, Indie

V roce 1985 došlo v povodí řeky Arvari (společně s dalšími povodími v oblasti) k významné degradaci vodního režimu v důsledku nadměrného čerpání podzemních

vod, odstraňování přirozené vegetace a také díky erozi půdy navíc doprovázené obdobím velkého sucha. Nedostatek jakékoli, i podřadné práce, vyústilo do migrační vlny z této oblasti. Nevládní organizace Tarun Bharat Sangh (TBS) začala řešit problém nedostatku vody zahájením programu retence vody tím, že byly budovány hliněné hráze ve tvaru půlměsíce, tzv. Johad, v odtokových rýhách, jejíž účelem je zachytit vodu stékající z okolních kopců z krátkých, ale intenzivních srážek. Program retence srážkové vody byl v průběhu dalších dvou let postupně doplněn programy pro ochrany půdy, vody a lesa, které navrhli a realizovali obyvatelé z této oblasti. Finanční a poradenská podpora byla poskytnuta organizací TBS, pod vedením Rajendra Singh. Pokroku při realizaci jednotlivých projektů bylo dosaženo uzavíráním výhodných smluv. Např. farmář, poskytující pozemky na Johad, byl primárně zvýhodněným odběratelem z takto zachycené vody na svých přilehlých pozemcích. Současně s tím na tomto opatření benefitoval širší okruh obyvatel.

Implementace tohoto systému ve stále větším počtu obcí (v oblasti tohoto příkladu) vedla k tomu, že v současnosti je více než 70 obcích zapojeno do toho programu, což vedlo k výstavbě tisíců „Johad“ a ostatních projektů sloužících k retenci srážek. Pro management tohoto povodí vznikl „Arvari River Parlament“ tvořený obyvateli v této oblasti. Opatření vedoucí k zvýšené retenci srážek v oblasti, v kombinaci s dalšími iniciativami souvisejícími s managementem v povodí, mají za následek zvyšující se hladiny podzemní vody, od roku 1995 je pozorován trvalý průtok v řece Arvari (Agarwal & Narain, 1997).

### **8.2.3 Doplnění degradovaných zvodní pomocí propustných přehrad v Balochistanu**

Podzemní voda je jediným spolehlivým zdrojem sladké vody v Balochistanu. Její použití se zvýšilo mnohonásobně díky rozvoji zemědělství, rychlému růstu počtu obyvatel a rozvoji průmyslu v posledních dvou dekadách. Odběr podzemních vod ze zvodní se značně zvýšil a to vedlo k vysychání mnoha kopaných studní, pramenů. Situaci ještě zhoršilo prodloužení období sucha (1998-2002) v této oblasti.

Rada pro výzkum vodních zdrojů v Pákistánu – PCRWR (Pakistan Council of Research in Water Resource) proto zavedla koncepci výstavby a provozování propustných přehrad v Balochistanu, jako jednu ze svých výzkumných a vývojových projektů. První propustná přehrada byla postavena v roce 2002 v Margat, což je asi

35 kilometrů vzdálené od Quetta. Monitorovací síť tvořená sedmi piezometry byla instalována pro sledování vlivu výšky hladiny vody v přehradě, na výšku hladiny podzemní vody.

Propustná přehrada slouží jako příčná bariéra pro snížení rychlosti toku a zadržení vody na dobu nezbytnou pro sedimentaci plavenin a tím snížení zanášení makropórů dna koryta pod přehradou.

Tím se zvyšuje infiltrace srážkových vod a také objem vody v podpovrchovém kolektoru. Infiltrací vody se minimalizují ztráty odparem, které tvoří v náhorní oblasti Balochistánu významnou složku hydrologické bilance. Zadržaná voda tak může sloužit k dalšímu využití.

Propustné a zadržovací přehrady byly konstruovány jako nízkonákladové. Na jejich výstavbu se používá místní materiál, jako jsou balvany, štěrk pocházející z říčních koryt a teras. Přehradní materiály byly ukládány do drátěných sítí (gabionů), postavených v 5 patrech do celkové výšky 4,9 m. Odtokové roury byly uloženy v horní části mezi druhým a čtvrtým patrem, aby umožňovaly odtok vody dále po proudu. Horní část přehrady působí jako přeliv, horní a dolní odtok byl konstruován tak, aby zabránil erozi. Přehrada má velikost povodí 1,79 km<sup>2</sup> a zadržovací kapacitu asi 11000 m<sup>3</sup>.

Přestože kvantitativní dopad propustných přehrad bude možné zhodnotit až s odstupem času, zavedení tohoto konceptu ocenili jak odborníci, tak zemědělci. Účinnost této technologie bude postupně zhodnocena, s cílem najít co nejefektivnější řešení, aby mohlo dojít k jejich většímu využití při doplňování zásob podzemních vod.

V současnosti již probíhají práce na zlepšení konstrukce hrází, např. došlo k umístění drobnějšího štěrku na stěny návodní strany hráze, což se ukázalo jako efektivní opatření vedoucí k delší době zadržení srážkové vody v nádrži a tím zpomalování odtoků do koryta toku pod nádrží.

Realizace této technologie musí být doprovázena dalšími zásahy. Mezi nimi jde např. o přísnou ochranu a zákaz pastvy pro celé povodí nádrže, aby došlo ke snížení zanášení sedimentů, dále se jedná o posílení přirozených infiltračních schopností. V tomto případě se jednalo o výsadbu 600 keřů tří druhů xerofitů v povodí. Současně

musí být zabráněno nekontrolovanému kácení stromů a keřů pro energetické využití místními obyvateli, tento deficit je vhodné nahradit dotovanými dodávkami palivového dřeva, LPG, případně zemního plynu. Dotace, ve formě snížení cen elektřiny pro čerpání vody společně, se zavedením managementu celého povodí, by mělo doprovázet výstavbu těchto infiltračních přehrad (Kahlow & Abdullah, 2004).

#### **8.2.4 Zachycování přívalových srážek pomocí injekčních vrtů do brakické zvodně a jejich využití pro závlahy – Austrálie**

V Austrálii byla vyvinuta technika pro získávání vody pro závlahy cestou injektáže vody z přívalových srážek do brakické zvodně. Tato metoda se používá pouze na několika málo místech na světě, ale jejich uplatnění je podstatně širší, zejména v semiaridních místech. Příklady z jižní Austrálie ukazují technické a ekonomické možnosti, jak zachytit dešťovou vodu, s jejíž pomocí je možné doplňovat brakické zvodně a následně využívat pro zavlažování příměstských oblastí.

Hlavním motivem pro recyklaci vody prostřednictvím zvodní je ochrana mořských i sladkovodních ekosystémů prostřednictvím infiltrace srážkových vod, tím jak se postupně zpřísňují limity koncentrací a celkovým zatížením dochází k stále pokročilejšímu řízení procesů v povodí a pokročilé metody úpravy vody poskytují více příležitostí pro doplňování a obnovy kolektoru.

Kvalita vody vhodná pro injektáž do zvodní musí splňovat tři základní kritéria:

- Nesmí dojít k nevratnému zanesení injekčních vrtů
- Zvodně musí být chráněny z pohledu stávajícího, ale i potenciálně budoucího využití podzemních vod (nesmí být nadměrně přetěžovány)
- Kvalita odebírané vody musí vyhovovat jejímu zamýšlenému použití.

Nové předpisy pro kvalitu vody používané pro injektáž do zvodní v Austrálii vstoupily v nedávné minulosti v platnost a zohledňují výše zmíněné cíle. Tyto směrnice se liší od těch, které se používají v jiných zemích, ze dvou důvodů:

(1) zohledňují kromě lidské spotřeby i ostatní benefity, které tato metoda přináší

(2) zohledňují udržitelné procesy čištění probíhající ve zvodní.



Směrnice je v souladu s principy Australian National Water Quality Management Strategy a popisuje příslušné parametry kvality vody pro jednotlivé způsoby využití nebo pro dosažení standardů kvality životního prostředí.

V městských oblastech, které se nacházejí na jílovitých půdách, jako např. většina metropole Adelaide, bylo donedávna zachyceno jenom velmi malé množství srážek a naopak odvodňování urychlovalo jejich odtok do moře. V současnosti, protože jsou vápencové kolektory umístěny přímo pod městem, nemohou být tedy jednoduše využity k infiltraci srážkové vody zachycené v retenčních nádržích. Důvodem je i minimální propustnost povrchových jílových vrstev.

K řešení tohoto problému byly vyvrtány hluboké cca 100 metrové vrty, které dosahují až spodních vápencových kolektorů a do kterých je sváděna srážková voda během zimního období. Tato voda doplněná do podzemního kolektoru je využita následně v letním období jako podzemní zásobník. Městský odtok se shromažďuje v retenčních nádržích a mokřadech, které jsou konstruovány tak, aby se snížilo riziko záplav a došlo ke zlepšení kvality srážkové vody, při současném nárůstu jejího objemu. Zadržovaná voda se přivádí samospádem nebo čerpáním do injektčních vrtů přes základní stupně úpravy vody (filtry atp). Tato voda obvykle nevyžaduje další stupně úpravy a může být použita přímo pro zavlažování.

V severní části města Adelaide, v předměstí Andrews Farm, byla zahájena studie zabývající se touto problematikou. Zdrojem vody pro injektáž je srážková voda z příměstských oblastí (obytné a pastevecké oblasti) o velikosti 55 km<sup>2</sup>.

Pro injektážní vrt byl zvolen kolektor o mocnosti 19 metrů, který se nachází v hloubce 105 metrů pod povrchem. Tři monitorovací vrty byly vybudovány ve vzdálenosti 25, 65 a 325 m podle gradientu injektážního vrtu. Kolektor je tvořen směsí jemných usazenin jemných vápenců a písků s propustností 180 m / den a s koeficientem zachycení  $5 \times 10^{-4}$ , měřeného pomocí čerpacích zkoušek (Gerges, 1996).

Občasné srážky, které by jinak otekly do moře, jsou zachycovány v retenčních nádržích a následně čerpány přes filtry do injektážního vrtu a do zvodně. Od období od srpna 1993 do března 1997 bylo zaznamenáno pět významných období vhodných pro injektáž. Jako první byla pro zkoušku použita voda z vodovodní sítě, následně

byly používány jen srážkové vody. Celkově bylo tímto způsobem infiltrováno 240 000 m<sup>3</sup> vody. Rychlost infiltrace se pohybovala v rozmezí 15 a 20 l / s.

Pro infiltrované vody mohou v ojedinělých případech koliformní bakterie překročit normu pro zavlažování. Výskyt koliformních bakterií způsobuje, že tato voda nemůže být použita pro pitné účely (National Water Quality Management Strategy, 1992). Při odběru vody, vzhledem k tomu, že tyto bakterie postupně odumírají, může být jejich množství akceptovatelné v souladu s regulacemi v období nepřekračující 4 týdny. V současnosti jsou sledovány ostatní patogenní bakterie, které mají delší dobu přežití než koliformní bakterie (Maliva & Missimer, 2012).

Všechny ostatní sledované parametry mají buď malý, nebo žádný vliv na kvalitu podzemních vod, a často mají i pozitivní dopad. Před injektáží podzemní voda nesplňovala kritéria pro kvalitu pitné vody z hlediska celkového množství rozpuštěných látek a vysokého obsahu železa. Ze sledovaných stopových organických sloučenin byl v srážkových vodách identifikován jen atrazin (běžný herbicid) a pentachlorfenol běžně používaný na impregnaci dřeva, a z analýz vzorků pocházejících a pozorovacích vrtů byly koncentrace těchto látek podstatně nižší, než připouští norma pro pitnou vodu.

Jako důsledek infiltrace srážkové vody, byly zjištěny různé formy zanášení. Nejprve se objevil snadno rozpoznatelný zooplankton, který byl jedinou formou zanášení, který dokázal zabránit infiltraci. Tento jev byl omezen použitím stínění a látkového filtru (Filho, 2012). Některé nerozpuštěné látky se vyskytovaly ve větších koncentracích na rozhraní infiltrační zóny a vlastního kolektoru. Zatím to ještě nebylo prokázáno, ale zdá se, že velikost částic na infiltrační vrstvě (medián ~ 4 mm) je mnohem menší než v kolektoru (medián ~ 120 mm), a tedy většina částic proniká do podzemní vody v hloubce kolektoru a usazuje se na větším poloměru okolo injektážního vrtu, ale velikost tohoto radia nebyl dosud studován. Benamar prokázal, že fyzikální kolmatace je příčinou jejich hromadění v injektážním vrtu, ale nevedla k přerušování infiltrace. Kolmataci lze řešit efektivní regenerací vrtu pomocí promývání vzduchem (Benamar, 2010). Při řešení počátečního problému se zooplanktonem, které vyžadovalo častou regeneraci vrtů, bylo v průběhu provozu pomocí různých opatření dosaženo přijatelné frekvence čištění vrtů jednou až dvakrát do roka.

Při sledování suspendovaných částic z vrtů, které byly získány v průběhu provádění aerace, se ukázalo, že jenom velmi malá část (-1%) pochází ze srážkové vody. Většina sedimentu pochází ze samotné pískovcové zvodně a dále rozpouštěním vápenců (Brown, a další, 1996). Organické látky procházejí filtrací v injekčním vrtu a jsou příčinou růstu bakterií, které mohou způsobit ucpání filtru ve velmi krátké době.

Výsledky z této pilotní studie, která je první dobře zdokumentovanou a monitorovanou ASR lokalitou zabývající se zadržováním srážkových vody v Austrálii, dokumentují použitelnost této metody pro získávání vod pro závlahy. Je pravděpodobné, že tento způsob čištění vody ve zvodni, by mohl být úspěšný také pro získávání vody pro pitné účely. Podobně, jako v mnoha pilotních studiích se objevila řada technických problémů, které se však ukázaly řešitelné (Martin, a další, 2000).

### **8.2.5 Infiltrace mezi písečnými dunami v Atlantis, Jihoafrická republika**

Atlantis, město ležící asi 50 km severně od Kapského Města na západním pobřeží Jihoafrické Republiky, získává pitnou vodu (přibližně  $5,5 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{rok}$ ) výhradně prostřednictvím řízené infiltrace do mělkého písčitého kolektoru. Podnebí je zde středomořské, s průměrnou maximální teplotou  $23,3 \text{ }^\circ \text{C}$  a minimální teplotou  $11,8 \text{ }^\circ \text{C}$ . Průměrný úhrn ročních srážek se pohybuje kolem 450 mm, a z toho 65% srážek se vyskytuje během zimních měsíců od května do září.

V této oblasti jsou pod povrchem rozsáhlé cenozoické sedimenty vytvářející neuzavřený písečný kolektor. Celková vrstva tohoto pískového krytu dosahuje mocnosti až 60 m ve své střední části, s průměrnou mocností 25 m. Tyto usazeniny jsou tvořeny břidlicemi a droby, zatímco svrchní část kolektoru tvoří pohybující se písečné duny anebo zarostlé písečné duny. Vzhledem k rychlým změnám povrchu v krátkých vzdálenostech je zvodně nehomogenní, anizotropní, otevřená až polouzavřená, kde transmisivita se pohybuje v rozmezí  $50 - 1300 \text{ m}^2 / \text{d}$ .

V současné době se odběr vody z kolektoru Atlantis omezuje na dvě čerpací zóny. Dvě velké infiltrační zóny pokrývají rozlohu přibližně  $500.000 \text{ m}^2$  a jsou lokalizovány asi 500 metrů proti gradientu zvodně. Pro infiltraci jsou k dispozici tři zdroje vody a to jednak srážkové vody, podzemní vody a vyčištěné odpadní vody. Srážková voda je shromažďována v retenčních oblastech. Systém odvodnění

umožňuje oddělit nekvalitní srážkové vody z industriálních zón a daleko od infiltrační zóny. Podzemní voda je získávána z písečného kolektoru na dvou jímacích polích a je upravována pomocí iontoměníčů a následně se používá pro infiltraci společně s městskými srážkovými vodami.

Aby mohla být využita odpadní voda jako zdroj vody pro infiltraci, byl vybudován kanalizační systém, který umožňuje oddělení odpadních vod z obytných a průmyslových oblastí. Domácí odpadní vody jsou čištěny pomocí aktivovaného kalu a smíchány s městskou srážkovou vodou před napuštěním do infiltrační zóny. Upravená srážková voda z průmyslových oblastí není považována za použitelnou pro městské účely a je odvedena do pobřežních zasakovacích pánví. To poskytuje ekologicky přijatelný způsob nakládání s vodou s nižší kvalitou a současně vytváří hydraulickou bariéru mezi studněmi u pobřeží a případným pronikáním solí mořské vody.

Při infiltraci způsobuje nízký obsah jílu v aluviálním kolektoru omezení zachycování takových rozpuštěných látek, jako je draslík, jehož pohyb lze sledovat na velké vzdálenosti ve směru proudění ve zvodni. Je proto nezbytná pečlivá kontrola kvality vody v retenční pánvi, aby docházelo k zlepšení její kvality. To je však možné dosáhnout pouze kompromisem ve stavu s množstvím infiltrované vody. V případě, že je infiltrace prováděna s maximálním množstvím dostupné vody, kvalita podzemní vody se vážně zhoršuje. Naopak, pokud se používá pouze nejkvalitnější voda, infiltrovaný objem klesá, ale kvalita podzemních vod se významně zlepšuje. Tento fakt vede k různým strategiím při MAR, v závislosti na požadavku kvality odebírané vody. Z toho důvodu musí být celý proces infiltrace velmi flexibilní.

Řízení kvality vody a zejména salinity je jedním z největších problémů pro vodní systém Atlantis. Salinita v kolektoru Atlantis kolektoru se odvíjí od několika zdrojů, například větrem unášené solné aerosoly od Atlantského oceánu, vyplavování břidlic a sedimentů mořského původu. Tento jev je potlačován částečnou recyklací vody v systému, kde vyčištěné městské odpadní vody jsou infiltrovány zpět do kolektoru, což přispívá ke snížení slanosti. Pro svádění omezeného množství sladkých vod zachycených na povrchu tvoří sice omezený, ale významný doplňkový zdroj sladké vody vstupující do kolektoru. Pro infiltraci odpadních vod jsou používány pouze komunální odpadní vody, které jsou čištěny odděleně od průmyslových.

Zanášení odběrných vrtů je složitý jev způsobený různými fyzikálními, chemickými a biologickými faktory, působícími jednotlivě nebo ve vzájemné kombinaci. Pokles objemu odebírané vody z vrtů v kolektoru Atlantis vedl k objevu rozsáhlých problémů se zanášením. Studium kombinací různých faktorů a přítomnost železa a síranů v podzemní vodě ukázaly, že na jednotlivé vrty mají větší vliv na kolmataci biologické mechanismy než mechanické (fyzikální). Za hlavní příčinu vzniku růstu organismů je považován nevhodný způsob čerpání z vrtů, který vede k aeraci zvodně.

Zkapacitnění doplňování zásob podzemních vod zajistilo udržitelnost dodávek vody pro Atlantis v uplynulých více než dvě desetiletí, a bude i nadále hrát klíčovou roli. Tento systém je vysoce efektivní z hlediska nákladů a může zaručit další trvale udržitelný růst města. Tento nově zprovozněný systém je schopen dodávat vodu za cenu 20% ve srovnání s náklady s původně používaným systémem zásobování vodou (Tredoux, a další, 2003). Schéma „Atlantis“ slouží jako prototyp pro další obdobné projekty v aridních a semiaridních oblastech v jižní části Afriky.

#### **8.2.6 Retence v puklinových křemencích ve Windhoeku v Namibii**

Windhoek se nachází v semiaridní centrální vysočině Namibie. Až do roku 1970, kdy byla dokončena velká zásobní přehrada, byla zvodeň ve Windhoeku hlavním zdrojem zásobování města vodou. Nyní tato zvodeň slouží jako rezervní zdroj pro zásobování z povrchových vod a hlavně jako nouzový zdroj během období sucha. Spolehlivost tohoto zdroje byla narušena v důsledku rozsáhlého odběru vody od poloviny 20. století.

Město je závislé především na zásobování z povrchových vod, ale vzhledem k nespolehlivosti srážek bývají často zásoby v přehradách na nízké úrovni. Podzemní voda v současné době zásobuje město zhruba 10% jeho spotřeby, ale díky rozsáhlým kolektorům a dobrému řízení by mohlo dojít významnému navýšení kapacity a v případě dlouhého období sucha by se mohla stát i hlavním vodním zdrojem.

Windhoek kolektor je tvořen především křemenci a břidlicemi. Geologická struktura je velmi složitá s ohledem na několik geologických epizod (zejména tektonických). Intenzivní otřesy společně s protikladnými fyzikálními a mineralogickými vlastnostmi břidlic a křemenců má za následek vysoce puklinový anizotropní kolektor.

Retenční schopnost kolektoru, při vysokých rychlostech infiltrace a udržitelných ekonomických nákladech, byla testována pomocí vrtných infiltračních zkoušek. Nejdelší zkouška trvala 195 dnů a nejvyšší rychlost injektáže byla 59,4 l / s (214 m<sup>3</sup> / hod). Pro injektáž byla používána vysoce kvalitní upravená pitná voda z Windhoek přehrady, která byla ještě dodatečně upravována na granulovaném aktivním uhlí a chlorována. To zajišťuje, že je do kolektoru přiváděna velmi kvalitní voda a riziko kolmatace je tím omezena na minimum.

Město Windhoek přijalo třífázový postup k provádění kapacitních MAR. 1. fáze, s využitím stávajících vrtů je již v provozu a má infiltrační kapacitu 3,7 mil. m<sup>3</sup> / rok.; 2. etapa (také s využitím stávajících vrtů), zvýší kapacitu infiltrace na 8,1 mil. m<sup>3</sup> / rok; 3. fáze (s novými injekčními vrty ve vnějších částech kolektoru) by po dokončení této infrastruktury měl poskytovat kapacitu při infiltrace 16,5 mil. m<sup>3</sup> / rok, což se rovná přibližně 90% běžné roční potřeby městem. Dlouhodobým cílem projektu je zajistit možnost co nejrychlejšího doplňování vody do kolektoru po období zvýšených odběrů (Murray E. , 2004).

### **8.2.7 Retence podpovrchových vod v Keni**

Zvyšující se tlak na využití půdy v aridních a semiaridních oblastech v Keni, kde srážky jsou epizodické a ztráta vody odtokem vysoká, je příčinou rostoucího deficitu vody v oblasti. Zachycené povrchové vody v těchto oblastech jsou využívány pro pěstování plodin a chov hospodářských zvířat. V důsledku zvyšující se frekvence a velikosti suchých period v letech 70.tých a 80.tých 20. století došlo ke zvýšenému zájmu řešení problematiky retence vod v Keni (Thomas, a další, 1997).

V Keni existuje několik metod používaných pro zachycování vody. Patří mezi ně:

- **Zasakovací řádky:** Jsou vytvořeny z rostlinných zbytků - jsou jednoduché a snadné na realizaci a účinné zejména při nízké sklonitosti terénu. Podle řádků postupně vyrůstá tráva a plevel, takže do 2 let dochází ke stabilizaci této struktury.
- **Travnaté pásy** jsou vytvořeny tak, že jsou ponechány pruhy neobdělané půdy s nasetou či nenasetou travou. Stejně jako v případě výše uvedených zasakovacích řádků se voda zachycuje v okolí těchto neobdělaných pásů.
- **Mikropovodí;** jedná se o několik typů retenčních jam, které jsou dále využívány pro výsadbu stromů a pěstování hodnotných plodin jako jsou banány a jiné druhy ovoce.

- Hřebenry a hrázky: jedná se o hrázky postavené po obrysu plochy pro infiltraci, která je vyhloubena, a ze získaného materiálu jsou tyto hrázky budovány. Dochází k přirozenému hromadění podpovrchové vody v těchto depresích. Plodiny pěstované tímto způsobem mají větší výnosy a to zejména v obdobích s nižšími úhrny srážek (pod normálem).
- Retenční hráze: jsou velké příkopy, které zadržují vodu z občasného toku po dobu, než dojde k její infiltraci do podpovrchových vrstev (Thomas, a další, 1997). Jsou používány ke zlepšení retence a zachycení odtoku z komunikací a jeho odvedení na obdělávanou půdu.
- Terasy (Fanya Juu): terasa Fanya Juu je konstruována z materiálu vzniklého vyhloubením rozsáhlého příkopu. Tvoří hřebenovou bariéru občasným průtokům a zadržuje vodu a unášené půdní částice. Toto opatření se používají ke zlepšení retence a protierozní kontroly na obdělávaných pozemcích což má za následek zlepšování rostlinné výroby.
- Zemní hráze a pánve: jsou konstruovány na zvýšených březích ze ztuhlé země na spodní části odtokové pánve. Jsou náchylné k rychlému zanášení tam, kde není povodí těchto hrází jinak chráněno, nebo dochází k jeho poškozování intenzivní živočišnou výrobou. Existuje mnoho příkladů, kde již po 10 let jsou tyto struktury zcela nefunkční. U těchto systémů dochází i k velkým ztrátám způsobeným odparem.
- Písečné přehradry: jsou zhotoveny stavbou hráze přes řečiště, vyplněny pískem, ve kterém je zachycována voda. Tyto přehradry mají minimální ztrátu vody, v důsledku nízkého odparu a vykazují dlouhou životnost. Dochází v nich k vysoké laterální a vertikální filtraci a mají velký potenciál pro realizaci takovýchto mělkých podpovrchových kolektorů.

Náklady na 60 m<sup>3</sup> písku přehradry v Kitui s minimální konstrukční životností 50 let a minimálním množstvím získané vody 2000m<sup>3</sup> / rok jsou 6,000 EUR. To se rovná šesti nádržím 46 m<sup>3</sup>, které stojí 1000 eur za kus. Je evidentně levnější postavit jednu pískovou přehradru, která bude sloužit 50 domácnostem za cenu šesti nádrží, které by sloužily pouze šesti domácnostem (Mutiso, 2003).

### **8.2.8 Retence zvodní pomocí zavlažovacích kanálů v jižní části pohoří Sierra Nevada, Španělsko**

V jižním Španělsku v období od března do června, kdy je k dispozici nadbytek vody v důsledku tání sněhu, je říční voda odváděna prostřednictvím rozsáhlé sítě zavlažovacích kanálů do dobře definovaných vysoce propustných oblastí.

Oblast kolektoru je tvořena tvrdými horninami, hlavně břidlicemi, sekundárním křemencem a vápencem. MAR je realizován prostřednictvím sítě zavlažovacích kanálů, které pozvolna sestupují po vrstevnicích. Tyto kanály jsou vykopány v půdě, nejsou větveny a jsou až 15 km dlouhé.

Voda infiltruje v oblastech s vysokou propustností, což je dané buď zvětralým nadložím nebo horninovou puklinavostí. Příkopy zavlažovacích kanálů příznivě propojují některé pukliny v horninách. Pukliny používané pro infiltraci mají velikost až do 10 cm. V souvislosti s infiltrací vznikly v určitých oblastech dva typy pramenů. Dočasné prameny se objeví v případě cirkulace podzemní vody. Vydatnost těchto pramenů je přímo závislá na zavlažovacím procesu a tyto prameny vysychají v okamžiku, kdy vyschnou zavlažovací kanály. Voda, která je infiltrována do horninových puklin, odtéká i prostřednictvím do trvalých pramenů v této oblasti. Průtok je celoroční, ale může však výrazně klesnout v případě, že nastane dlouhá doba bez infiltrace. Tranzitní doba mezi infiltračním bodem a různými prameny je sledována pomocí monitoringu a je zhruba 5 dní pro vodu cirkulující v mělkých zvodních a odtéká dočasnými prameny, zatímco v hlubokých puklinových zvodních je voda zadržována i více než dvakrát delší dobu. Různě dlouhá doba retence má vliv na kvalitu vody – voda z trvalých pramenů má výbornou kvalitu. Proto tyto prameny slouží k zásobování obyvatel pitnou vodou, zatímco dočasné prameny jsou využívány pouze pro účely zavlažování.

Voda získávána z pramenů je jen zlomkem objemu vody z infiltrace. Velká část vody se používá na udržování vysoké půdní vlhkosti podél svahu zavlažovacích kanálů. To má trvalý vliv na okolí a v důsledku toho zde roste hustá vegetace. Systém nevyžaduje žádnou sofistikovanou infrastrukturu a může být aplikovatelný také v jiných skalnatých oblastech po celém světě (Pulido-Bosch, 1995).



### **8.2.9 Intenzifikace doplňování zásob podzemních vod v Maďarsku prostřednictvím břehové filtrace pro zásobování pitnou vodou**

Voda z přirozené břehové infiltrace tvoří zhruba třetinu spotřeby vody v Maďarsku. Zásobování pitnou vodou v Budapešti je zcela závislá na břehové infiltraci z Dunaje. Odebírané množství je omezeno kapacitou infiltrace břehu; množství vody v Dunaji je řádově vyšší, než odebraná množství. Tento systém je bez omezení ze strany zdrojů, což mu dává vysokou bezpečnost, vzhledem k citlivosti ostatních zdrojů podzemní vody na klimatické změny.

Výhodou oproti přímému odběru povrchové vody je snižování požadavku na stupeň úpravy vody. Tyto přírodní filtrační kapacity určitých říčních úseků jsou velmi efektivní. Žádné mikro polutanty látky nebyly nalezeny ve vzorcích z odebrané vody. Tato výhoda je cenná pro uživatele, kteří vyžadují vysoce kvalitní pitnou vodu pro veřejné zásobování a některá průmyslová využití. Odběrné studny využívající břehovou filtrace jsou většinou podél Dunaje, pouze dva lze nalézt u jiných řek (jeden v jihozápadní části země, a jeden v severní části). Aktuální kapacita je 0,9 mil m<sup>3</sup> / den (75% pro veřejné účely), další budoucí potenciální kapacita je cca 4 mil m<sup>3</sup> / den, z čehož 300 000 m<sup>3</sup> denní kapacity je chráněno jako budoucí vodní zdroje (Simonffy, 2003).

### **8.2.10 Doplňování zvodní pomocí injekčních studní v Mexiku**

Vzhledem k tomu, že se více než polovina mexického území nachází aridních a semiaridních klimatických podmínkách, jsou zdroje podzemní vody dominantním faktorem rozvoje. Celkový odběr podzemních vod se odhaduje na 28000 mil. m<sup>3</sup> / rok. Zemědělství využívá zhruba 71% z tohoto objemu, zatímco spotřeba měst a průmyslu je kolem 26%. Městské obyvatelstvo tvoří 65% z celkového počtu obyvatel Mexika (100 milionů). Např. jenom v metropolitní oblasti Mexico City žije 21 milionů obyvatel. Mexická města mají roční spotřebu 7600 mil. m<sup>3</sup>, podzemní vody se podílejí na dvěma třetinami tohoto objemu. Nadměrné odběry vody získávané z více než 100 regionálních kolektorů s ročním odběrem 5.400 mil. m<sup>3</sup> mělo v posledních čtyř desetiletí významný negativní vliv na stav těchto kolektorů a v důsledku i na životní prostředí.

Pilotní projekt retenčního kolektoru byl realizován v Comarca Lagunera Regionu v severním Mexiku, kde se nachází jedna z hlavních zemědělských oblastí. Voda je

získávána pomocí kontrolovaných odběrů z vodních toků odvodňující region. Z řek Nazas a Aguanaval pro závlahu vodu a dále prostřednictvím více než 3500 vrtů, je získávána voda ze zvodně Comarca Lagunera pro domácí a průmyslové využití.

V současné době se odhaduje, že odběr vody je nejméně třikrát menší než jeho doplňování, což má za následek výrazný pokles piezometrické hladiny a zhoršení kvality podzemní vody. Hlavním problémem je výskyt arsenu v podzemní vodě v koncentracích nad platné WHO směrnice pro domácí použití, tj. 0,05 mg / l, v současnosti byla tato koncentrace díky MAR snížena na 0,01 mg / l.

Pilotní projekt využil upravenou retenční pískovou pánev v blízkosti koryta řeky Nazas v Torreon City, o rozloze 13 ha s kapacitou cca 197.000 m<sup>3</sup>. Stavební práce celého vodního díla zahrnovaly přiváděcí kanály z přehrady Zarco a dále přes zavlažovací kanál Sacramento do povodí retenční pánve. Dále byly vybudovány dva monitorovací vrty, aby bylo možné sledovat reakci kolektoru na objem infiltrace, současně bylo pro účely detailního monitoringu přebudováno dvanáct již existujících studní. V průběhu období mezi květnem a srpnem roku 2000 byl převeden kanálem Sacramento do retenčního kolektoru celkový objem 5,2 mil. m<sup>3</sup>. Z tohoto objemu byla ztráta odparem 0,2 mil. m<sup>3</sup> a 5,0 mm<sup>3</sup> se infiltrovalo do kolektoru. V průběhu infiltrace byla díky kolmatace snížena infiltrační rychlost z 2,4 m / d na 0,116 m / d.

Z realizace tohoto pilotního projektu vyplynulo doporučení pro výstavbu nových přiváděčů pro lepší kontrolu dodávané vody s celkovou kapacitou 0,5 mil. m<sup>3</sup> / týden, dále vybudovat paralelní sedimentační nádrže s cílem redukovat kolmataci a také budovat adsorpční studny hluboké 20 m a 0,3 m v průměru k ochraně horizontu s nízkou konduktivitou (Chavez-Guillen, 2003).

#### **8.2.11 Mapa potenciálních oblastí vytypovaných pro MAR v Amman-Zarqa a Azraq Basins, Jordánsko**

Jordán je považován za jednu ze zemí světa, kde je omezené množství dostupných vodních zdrojů na jednoho obyvatele (150 m<sup>3</sup> / osobu / rok) oproti světu (500 m<sup>3</sup> / osobu / rok). Proto požadavky na množství vody stále roste a s tím souvisí i pokles hladiny podzemní vody ve většině oblastí Jordánu. V některých částech to vedlo ke zhoršení kvality podzemních vod.

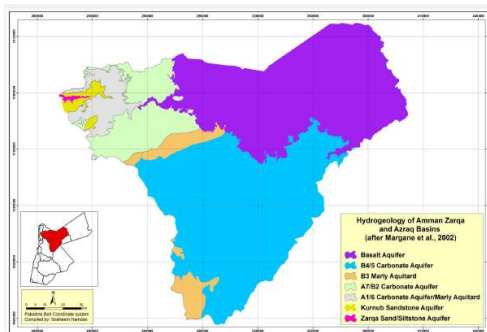


Fig. 2: Hydrogeological classification after [3]

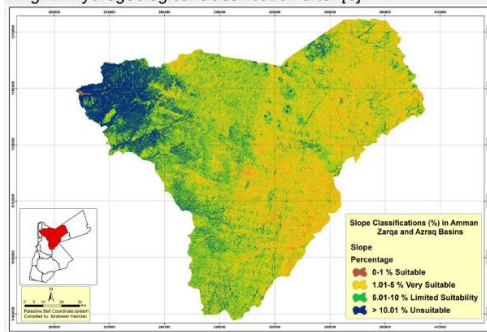


Fig. 3: Slope classification (after ASTER GDEM, 2011)

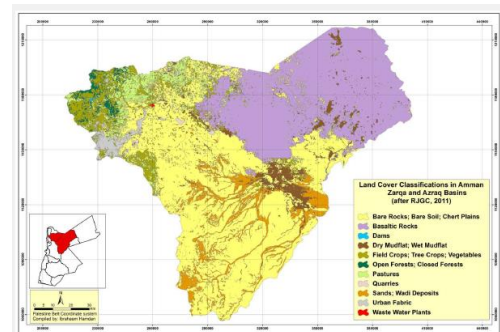


Fig. 4: Land cover classification after [4]

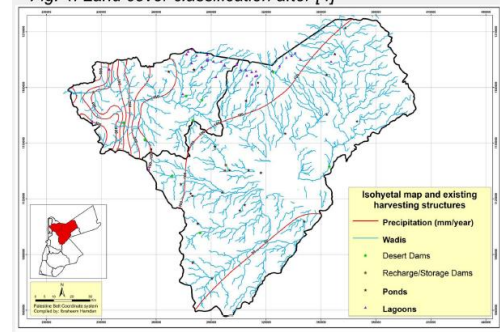


Fig. 5: Long-term rainfall and existing harvesting structures

**Obrázek 20 Hydrogeologická klasifikační mapa, Mapa sklonitosti (Hamdan & Steinel, 2012)**

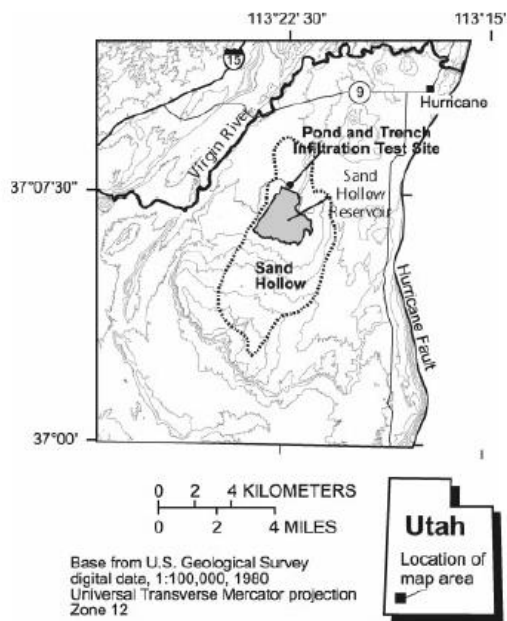
**Obrázek 21 Klasifikace Land Cover, Dlouhodobé odtokové linie (Hamdan & Steinel, 2012)**

Pro lepší nakládání se stávajícími vodními zdroji a zajištění vody pro budoucí generace, se kolektory stávají nádržemi na dočasné zdržení vody pro pozdější použití. Umělá infiltrace byla praktikována po mnoho let; v současné době u pomíjivých toků, které se převážně nepoužívají, protože se větší část vody vypaří dříve, než se infiltuje. Snaha je zadržet vodu v malých nádržích a infiltrovat ve vádí (vyschlé koryto). V bilaterálním projektu, kterého se účastní Německý federální institut geologie a přírodních zdrojů (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover) a Jordánské ministerstvo pro vodu a závlahy (Ministry of Water and Irrigation), je snaha o úspěšnou schopnost používat umělou infiltraci pomocí dešťové vody. Celoroční studie se zaměřuje na Amman - Zarqwa a Azraq nádrže, které se vyznačují průměrnými srážky 125 – 500 mm a 50 – 150 mm a velikostí území kolem 3600 km<sup>2</sup> a 12 000 km<sup>2</sup>. Hlavním úkolem projektu je vytvoření mapy pro potenciál umělé infiltrace v prostředí GIS (Hamdan & Steinel, 2012). Nejdůležitější body pro tvorbu map jsou:

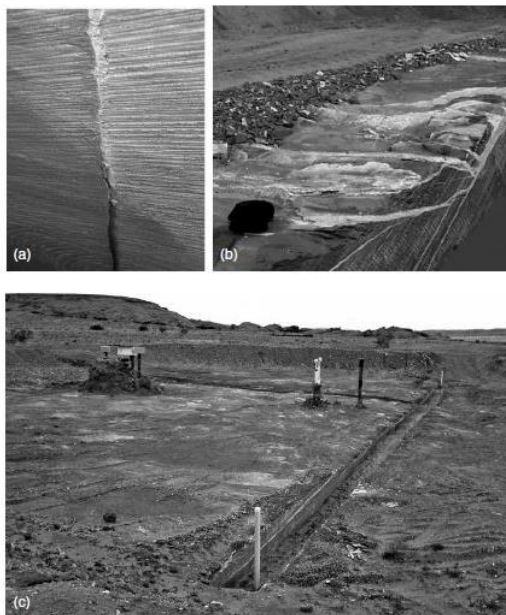
1. Hydrogeologie: Hydrogeologická klasifikace rozmístěných zvodní na použitelné či nepoužitelné pro umělou infiltraci
2. Sklon: Nejúčinnější sklon svahu pro infiltraci, která by zabránila generaci nadměrného odtoku, je 0-5%
3. Území: V urbanizovaných územích jsou možnosti pro výkupy pozemků omezené a vyskytují se zde velká množství zdrojů znečištění a také rozsáhlé oblasti nepropustných povrchů.
4. Blízkost zdrojů pro zásobování vodou a snaha minimalizovat náklady na transport vody.

### **8.2.12 MAR - Příkopová infiltrace do propustného podloží (USA)**

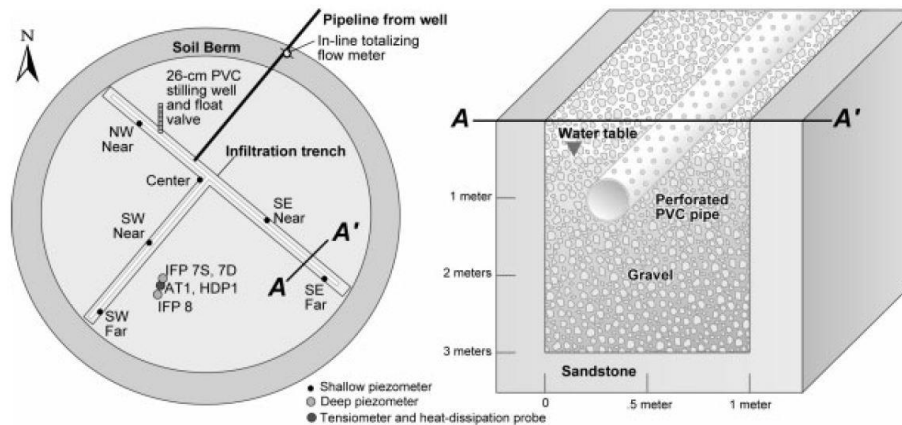
Metoda MAR do propustného podloží je čím dále častěji v praxi používána pro zvýšení zásob podzemních vod a správu jejich udržitelného využití. Jednou z oblastí jsou i Navajo pískovce, rozlehlá oblast situovaná na Colorado Plateau na západě Spojených států. Rozšiřování nádrží a břehová infiltrace v pískovcích na západním okraji jihozápadního Utahu jsou důsledkem zvyšující se poptávky po vodních zdrojích. Práce představuje novou, cenově efektivní techniku povrchové infiltrace, používající zasakovací příkopy pro MAR v propustném podloží. 48 denní experiment v Navajo pískovcích pomocí zasakovacích příkopů potvrdil vhodnost této metody pro MAR. Konečná průměrná rychlost filtrace, pomocí zasakovacích příkopů, byla přibližně 0,5 m / den. Tato infiltrační průměrná rychlost byla řádově vyšší než předchozí experimenty, používající metodu povrchového skrápění ve stejném prostředí. To bylo zapříčiněno kombinací několika faktorů, jako např. absencí přítomnosti málo propustné půdní vrstvy a dílčích nepropustných povrchových vrstev, přístupem k vertikálním pískovcovým puklinám, minimalizací fyzikální kolmatace a tvorby biofilmu, minimalizací viskózního efektu pomocí řízení isotermických podmínek, jakož i minimalizací chemické kolmatace způsobené mineralizovanými skrápěcími vodami spojenými se zvýšenou fotosyntézou řas (Heilweil & Watt, 2010).



Obrázek 22 Lokace příkopové infiltrace, Utah (Heilweil & Watt, 2010)



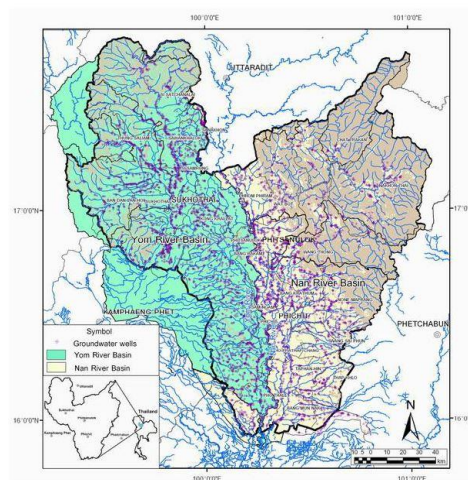
Obrázek 23 A) Filtrační materiál ve vertikálním zlomu 2 – 5 m hloubky; B) filtrační materiál uložený na vrstvě půda / písekovec; C) infiltrační příkop na experimentální ploše, Utah(Heilweil & Watt, 2010)



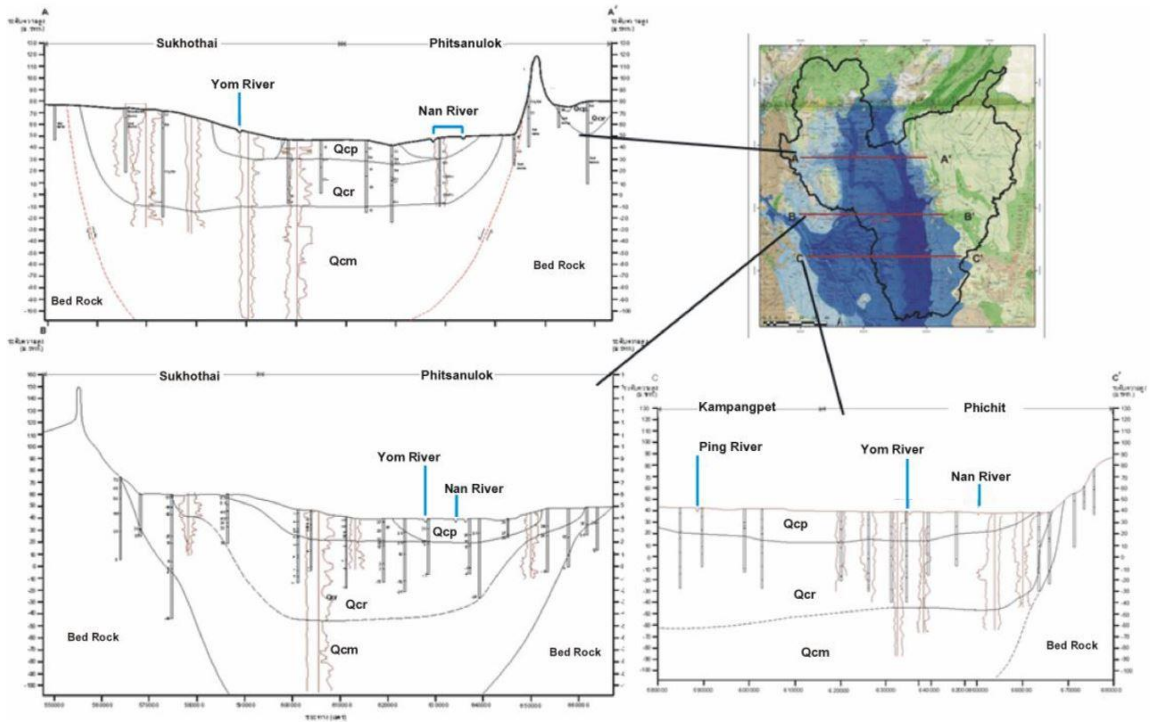
Obrázek 24 Polohové zobrazení a průřez infiltračním příkopem, Utah (Heilweil & Watt, 2010)

### 8.2.13 Výběr vhodných území pro MAR s využitím systému řízeného vsakování v Phitsanulok, Sukhothai and Phichit Provinces, Thailand

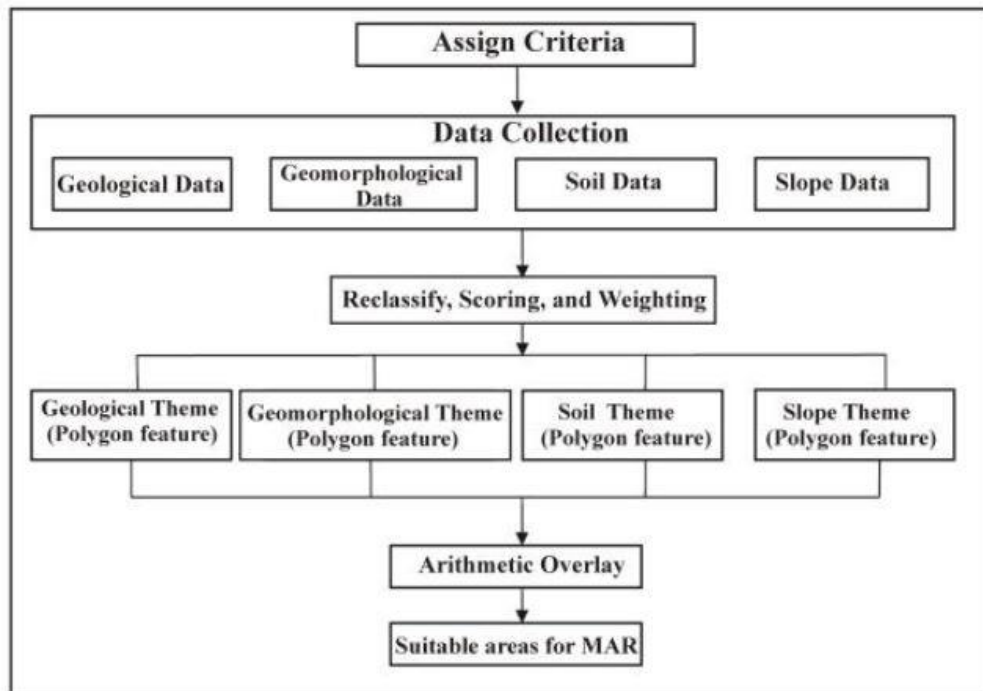
Tato studie si klade za cíl definovat vhodné oblasti a plochy pro pilotní využití MAR pomocí povrchové infiltrace v provinciích Phitsanulok, Sukhothai a Phichit. Metodika studie zahrnuje jak shromáždění hydrogeologických dat, tak terénní průzkumy. Existují čtyři signifikantní skupiny parametrů pro výběr potenciálních lokalit pro realizaci MAR – geologické, geomorfologické, půdní a sklonitostní charakteristiky. Pro vytipování lokality potenciálně vhodné pro MAR je použita metoda překryvné analýzy vážených indexů WIOA (Weighted Index Overlay Analysis). Pro pilotní testování byly vzaty v úvahu jak hydrogeologické charakteristiky, tak i ostatní faktory související s metodou povrchové infiltrace. Ban Nong Na 3 sub-basin o rozloze cca 500 ha byl vytipován jako jedna z nejvhodnějších lokalit pro pilotní testování MAR (Pholkern, a další, 2011).



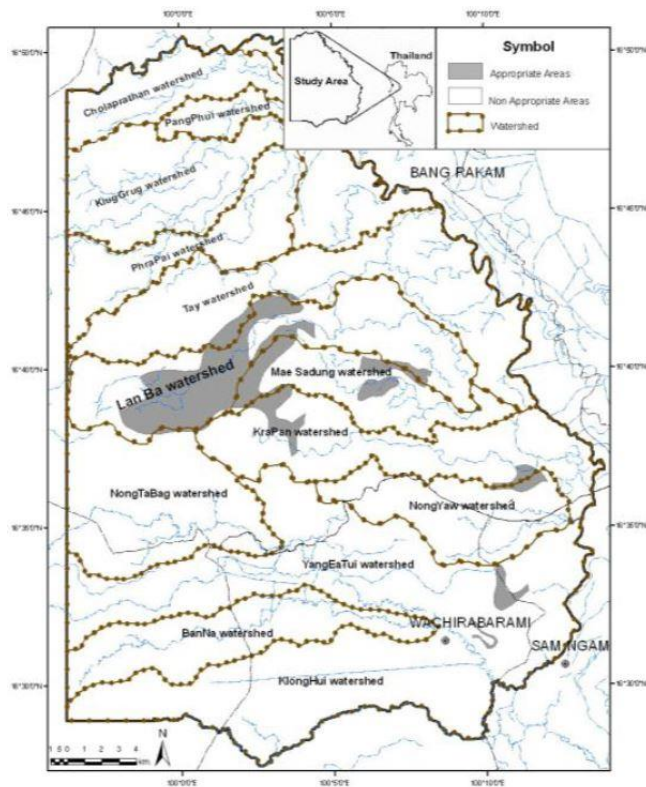
Obrázek 25 Mapa lokalizace studovaného území, Thailand (Pholkern, a další, 2011)



Obrázek 26 Hydrogeologická mapa Lower North Region River Basin (Pholkem, a další, 2011)



Obrázek 27 Diagram ilustrující metodologii MAR ve studii (Pholkem, a další, 2011)



Obrázek 28 Vhodná povodí pro MAR (Pholkem, a další, 2011)

#### 8.2.14 MAR na úrovni vesnice v Indii

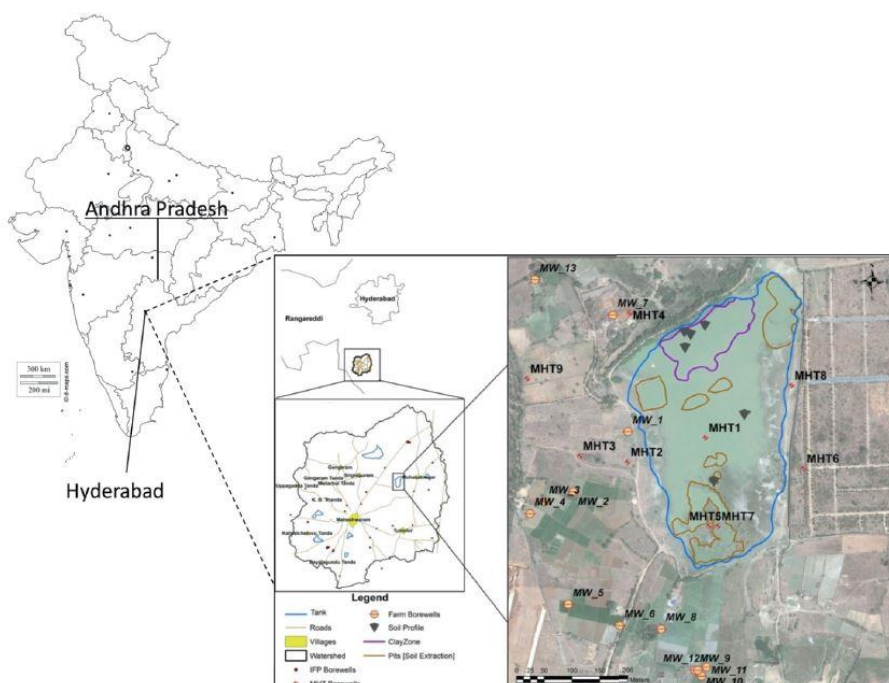
V Indii historie ochrany vody a opětovného zasakování sahá až 3000 let před naším letopočtem. V aridních a semiaridních oblastech historicky budované perkolační nádrže, zadržovací přehrady, rybníky na indickém venkově sloužili nejen pro zachycování vody, ale i nepřímo k doplňování podzemních zvodní. Neregulovaný vývoj podzemních vod, zejména horninových zvodní v suchých a polosuchých oblastech, vyústila v nepřetržitý pokles hladiny vody na ploše zhruba 340.000 km<sup>2</sup>. Z celkových ročních srážek 4000 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> Indii, asi 1240 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> je každoročně ztracena povrchovým odtokem. Odhaduje se, že 870 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> vody je stále k dispozici pro použití k umělé infiltraci a existuje potenciální objem podzemních kolektorů na 200 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. V rámci celkové proveditelnosti plánuje Indie mít úložiště sub-povrchové o objemu 36 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> cestou výstavby asi 230.000 malých a jednoduchých retenčních struktur, jako jsou průsakové nádrže, zadržovací přehrady, podpovrchové hráze, atd. (Gale I. , 2005).



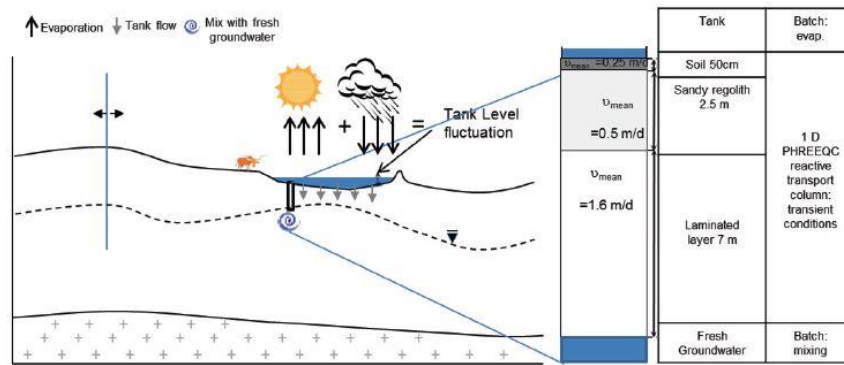
## 8.2.15 Vývoj kvality vody v průběhu MARu v krystalinické zvodni v Indii.

### Reaktivní transportní model v kritické zóně

Studie řeší roli MARu ve vztahu ke kvalitě vody pro nadměrně exploatované zvodně krystalinika v semiaridních podmínkách jižní Indie. Aplikací jednorozměrného modelu přenosu byla simulována umělá infiltrace do zásobního prostoru přes kritickou zónu. Model bere do úvahy hydrodynamiku, evaporaci, kinetické charakteristiky minerálů (srážky/rozpuštění), adsorbci, výměnu kationtů. Výstupy modelu prokazují pozitivní efekt na MARu na kvalitu podzemní vody, zejména na akumulaci fluoridů, což je hlavní problém v indickém kontextu silně závislý na sezonních klimatických vlivech (Pettenati, a další, 2014).



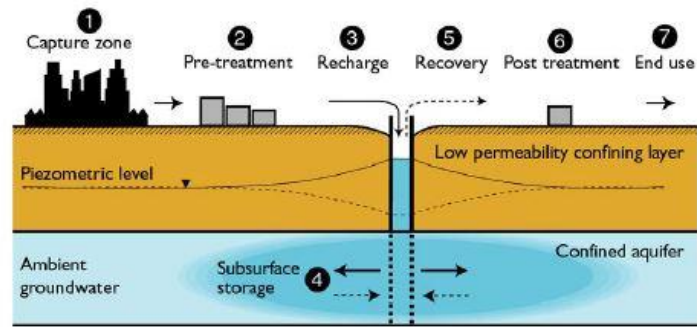
Obrázek 29 Lokace povodí Maheshwaram a infiltrační nádrž v blízkosti vesnice Tumulur (Pettenati, a další, 2014)



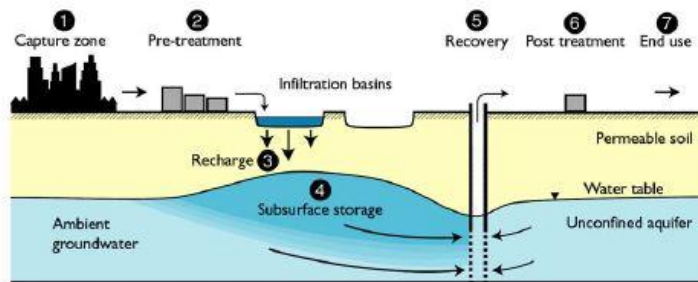
Obrázek 30 Konceptuální model v horninové zvodni v jižní Indii, s využitím MAR realizovaným prostřednictvím infiltrační nádrže, použití pro vývoj 1D modelu průměrné rychlosti proudění (Pettenati, a další, 2014)

### 8.2.16 Zásadní principy pro politiku MAR v Austrálii

Uvedený výzkum byl částečně podpořen „Australian National Water Commission“, jako jedna část „Raising National Water Standards Programme. Studie představuje první kapitolu projektu „Zvýšení využití recyklace dešťové a odpadní vody cestou doplňování zvodní v Austrálii“. Výzkum měl za účel informovat politickou reprezentaci a ostatní řídicí orgány určující politiku MAR o možnosti doplňování zásob podzemních vod metodami, které nejsou součástí žádné schválené vládní politiky. To, co vládní politice z hlediska recyklace vod a MAR dosud chybí, je ucelený a komplexní pohled na tuto problematiku obsažený v jednotlivých „politikách“. Tato zpráva se zabývá nutností jednoznačně definovat bezpečná pravidla pro tržně založený přístup k řešení otázky MAR. Tento přístup zavádí cenově založené pobídky spojené s nízkými transakčními náklady bez vytváření nepředpokládaných externalit. Zpráva přináší komplexní shrnutí MAR, včetně zahraničních příkladů a dále detailně rozebírá jednak přístup jednotlivých států Austrálie, a současně i možnosti uplatnění v těchto jednotlivých státech. Kromě technického, studie shrnuje i ekonomické a politické přístupy k řešení MAR (Dillon & Ward, 2009).



(a) Confined Aquifer



(b) Unconfined aquifer

Obrázek 31 2 příklady MAR: A) ASR; B) SAT, popisující 7 shodných prvků pro oba systémy. (Dillon & Ward, 2009)

1	3	5	7
Capture Zone	Recharge	Recovery	End use
Source waters	Aquifer characteristics <sup>1</sup>	Extraction	
Surface waters Other Groundwater Stormwater Recycled water Reclaimed waters Desalinated	Sensitivity of aquifer dependent ecosystems (volume and water quality) Vulnerability of confining layers to pressure changes Mineral dissolution Aquifer thickness Porosity Potential Injection rates Vertical and horizontal hydraulic gradient Landform/ topography Groundwater salinity Vulnerability of other groundwater users to pressure changes Pathogen/contaminant fate and attenuation	Declining or rising aquifer Independence of injection and extraction well or consortium of well heads managed collectively	Demand for potable non-potable water Industrial commercial or agricultural use Consumptive non-consumptive use Change in water quality through use Potential for salt or metal mobilisation in receiving zone Depth of receiving water table Hydraulic conductivity
↑	↑	↑	↑
2 Treatment <sup>2</sup>	4 Aquifer storage	6 Post treatment and end use licence	
Monitor source water quality in relation to water quality requirements for recharge  Right to recharge is contingent on compliance with water quality requirements	Monitor groundwater pressures / levels to assess against criteria  Monitor groundwater water quality to assess against criteria  Monitor injected volume to assess against allowable volume	Monitor volume and quality of extracted water to assess against criteria for use  Comply with demand requirements and associated water quality standards  Comply with water use licence conditions	

Obrázek 32 Příklad hodnotících kritérií, a klíčové body pro hodnocení rizik zdrojů vody, charakteristik zvodní a koncové využití (Dillon & Ward, 2009)

### 8.2.17 Politické preference pro MAR při zabezpečení udržitelného zásobování vodou Chennai City, Indie

Předmětem této studie je přinést změnu politického přístupu k MAR (zaměřeného zejména na infiltrační nádrže), který může v důsledku přinést z hlediska uživatelů zmírnění problému úbytku podzemních vod v okolí Chennai City. Podzemní voda je klíčovým prvkem pro zásobování pitnou vodou a nadměrná exploatace vede k poklesu hladiny podzemní vody a infiltraci mořské vody do podzemních zdrojů. Současný přístup municipalit, ale i politika na regionální a státní úrovni podporuje využití umělé infiltrace k doplňování zásob podzemních vod cestou zachycování srážek a znovuvyužitím recyklované vody. Přestože je uplatňována tato politika, legislativní rámec a administrativní praxe nepodporují systémový přístup k praktickému řešení problému. Tato studie popisuje tyto vzájemné souvislosti. V okolí Chennai je asi 25 zájemců o aplikaci MAR, nesdílí však jednotnou vizi jak cíle dosáhnout. Např. různé zájmy potenciálních uživatelů ovlivňují výběr metody umělé infiltrace, a v důsledku vede tento přístup k nedohodě. K překonání tohoto problému většina zájemců o aplikaci MAR podpořila ideu vytvoření státní autority pro povolování odběru podzemních vod a dohled na jejich řízené doplňování (Brunner, a další, 2014).

Figure 1. Reservoirs around Chennai.



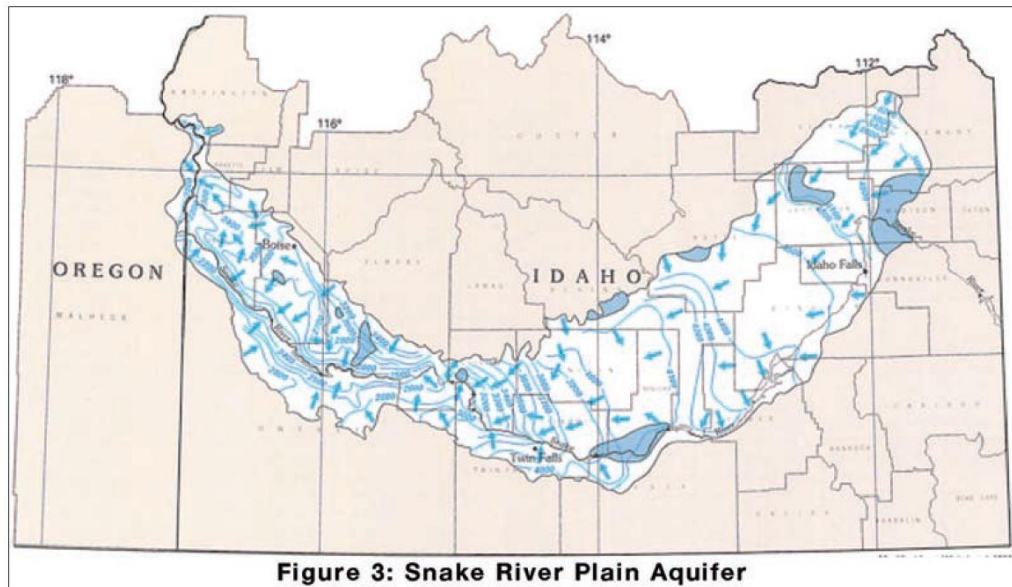
Obrázek 33 Rezervoáry kolem Chennai (Brunner, a další, 2014)



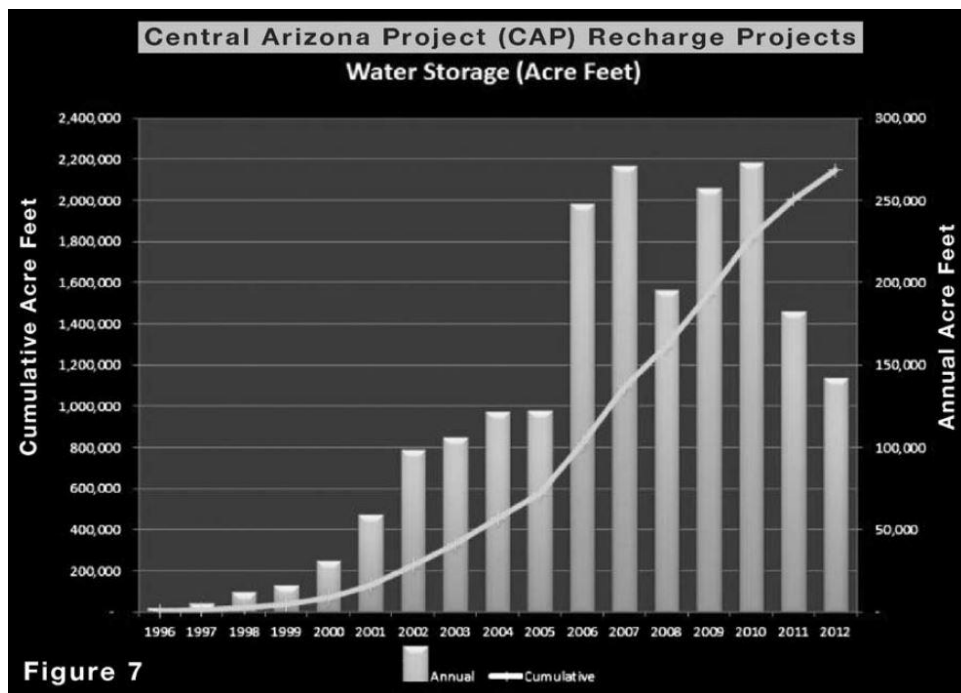
Obrázek 34 Ukázka ohrázování na efemerním toku v Indii ([www.tribune-intl.com](http://www.tribune-intl.com))

### **8.2.18 MAR, přehled legislativního přístupu ve vybraných západních státech USA**

Vzhledem k stále se zvyšující poptávce po omezených vodních zdrojích na západně Spojených států, je efektivní fungování existujících zvodní nadále nanejvýš důležité. Četné zdroje na západě přináší střední až velkou nerovnováhou poměru čerpání a přirozeného doplňování. Toto nadměrné odčerpávání má za následek významné poklesy hladiny podzemních vod, pokles zásob a řada přirozených kolektorů je v současnosti na cestě ke stoprocentnímu vyčerpání. Tento stav bude pokračovat do té doby, dokud se neučiní kroky k zastavení nadměrnému čerpání. Jak se exploatace kolektorů stává čím dál víc problémem, objevují se současně snahy stabilizovat zvodně a podporovat jejich správné doplňování. Tento jev bude mít zásadní význam pro hospodářský a sociální stav na západě USA. Některé aktivity již probíhají a v řadě západních států soukromé i veřejné subjekty pracují na stabilizaci zvodní pomocí různých metod, včetně využití MAR. Jeden nedávný příklad pochází z Idaho, kde počátkem roku 2014 byl schválen zákon, který určuje 5 milionů dolarů ročně pocházejících z daně na cigarety na použití pro Idaho Water Resource Board na celostátní stabilizaci zvodní. Ve státě Kalifornie nedávno zákonodárci odhlasovali vypsání dluhopisů za 7 545 miliard dolarů. Významná část z těchto prostředků je určena na umělé doplňování zvodní. Tato studie shrnuje technické aspekty MAR a dále přináší základní informace o zákonech, které mají vliv na realizaci MAR ve státech Kalifornie, Colorado, Arizona, a Idaho. Současně popisuje některé podrobnosti a rozdíly mezi těmito státy (Mortimer, 2014).



Obrázek 35 Mapa zvodní v údolí řeky Snake (Mortimer, 2014)



Obrázek 36 Central Arizona Project - množství projektů (Mortimer, 2014)

### 8.2.19 Umělá infiltrace ve starém řečišti u řeky Dunaj, Maďarsko

V roce 1992 byl Dunaj odkloněn bočním kanálem k vodní elektrárně u slovenských hranic. Aby byla ve starém řečišti zajištěna ekologická stabilita, nechali jím malou část řeky Dunaj téct. Důsledkem toho byl značný pokles hladiny podzemní vody, ohrožení citlivého ekosystému v bočních větvích Dunaje a ve větších vzdálenostech od řeky hrál dříve Dunaj dominantní roli v ovlivňování kolísání hladiny podzemní vody. Obnova vzniklých okolností s hladinou podzemní vody je řešen prodlouženou

dobou umělé infiltrace vody v místech původního koryta, v bočních záplavových ramenech či v bývalých zavlažovacích kanálech. V tomto případě je cílem umělé infiltrace zmírnit dopady lidského zásahu. Řešení vyžaduje velké množství vody (20 – 40 m<sup>3</sup>/s v závislosti na ročním období). Vzhledem k tomu, že průtok Dunaje je vydatný, jsou všechny plochy dostatečně zásobovány pro navrácení původních stavů hladin podzemní vody (Tuinhof & Heederik, 2002).

## 9. Diskuze

Práce se snažila shromáždit metodické postupy MAR z celého světa. Ukázat, kde se problematice ve světě dlouhodobě věnují, a kde by byla možnost brát informace o možných způsobech její aplikace. V 60.tých a 70.tých letech se slibný trend v ČR v podobě experimentálních pokusů různých metod umělé infiltrace na různých lokalitách rozplynul. Vše zůstalo na bázi studie s výjimkou úpravny vody Káraný. Jelikož je ČR zásobována pouze srážkovou vodou a nemá jiný zdroj vody, je důležité co nejdéle vodu udržet na našem území, aby měla šanci se infiltrovat. Kvůli poklesu hladin podzemních vody se nyní otevírá otázka, která byla dříve aktuální spíše v aridních a semiaridních oblastech.

V Československu byla v 70.tých a 80.tých letech minulého století vybudována celá řada velkoplošných melioračních soustav a to v mnohdy nevhodných lokalitách. Tyto meliorace dodnes negativně ovlivňují hydrologický režim v krajině. Ve stejné době došlo i k celé řadě technických úprav malých vodních toků s následkem výrazného urychlení odtoku vody z krajiny. Období od konce 60.tých do konce 80.tých let můžeme proto nazvat obdobím „odkanalizování krajiny“. Postupně si hydrologové začali uvědomovat neudržitelnost tohoto stavu a začalo období, kdy přehradní díla nebyla budována primárně jako součást energetické soustavy a ochrany před povodněmi, ale i jako zdroje pitné vody zejména pro velké aglomerace (např. VN Švihov v 70.tých letech). Řešení otázky zadržení vody se za minulého režimu omezilo na výstavbu celé řady přehradných děl, které významně ovlivnily hydrologický režim na území ČR.

Poslední přehrada, která byla postavena na území ČR, je Slezská Harta z roku 1997. O této nádrži začali vodohospodáři uvažovat už na počátku 60 let 20. století. Už v té době věděli, jaké problémy mohou v ČR nastat v podobě nedostatku vody jak už pitné, tak užitkové. Výstavba začala až v roce 1987 a vlivem společenských změn po

roce 1989 byla dokončena až v roce 1997 (Míka, 2012). Stavby přehrad nejsou v současnosti jednoduchou záležitostí a už příprava a projednání možných lokalit pro umístění vyvolává mnohdy vášnivou celospolečenskou diskuzi. Z tohoto pohledu by navýšení zásob podzemní vody cestou MAR mohla být jednodušší i společensky přijatelnější varianta.

Snahou státu bylo a je budovat vodní díla pokud možno velkého rozsahu s velkými investičními náklady z centrální úrovně, mnohdy bez ohledu zájmů místních obyvatel pod záminkou osvícenectví centrálních orgánů. Drobná opatření v krajině (mokřady, tůně, rybníky, atd.) jejíž součástí mohou v budoucnu být i programy MAR, jsou ponechávána většinou místním iniciativám a ochráncům přírody. Příklad Indie, uvedený v této práci, popisuje změnu přístupu centrální vlády k otázce managementu povodí. Převod kompetencí na místní úroveň a zapojení místních obyvatel do projektů k zlepšení vodního režimu přinesl nečekaně dobré výsledky a zejména dlouhodobou udržitelnost takto realizovaných projektů. Úlohou centrální vlády bylo vytvořit legislativní podmínky, zajistit technickou asistenci a vytvořit finanční fondy s průhledným a jednoduchým způsobem čerpání. Tento přístup může být inspirací i pro ČR.

Díky shromážděným příkladům ze světa je možné získat přehled o metodách, možnostech, technických řešeních, ale i různých „politikách“ a přístupech k řešení problematiky MAR. Najít vhodné realizované projekty a získat informace o využití různých metod MAR umožňuje rozsáhlý seznam literárních zdrojů a odkazů. V současnosti v ČR zpracovává VÚV TGM komplexní studii o problematice umělé infiltrace v ČR. Výzkum je zatím v první fázi, nemá proto žádné konkrétní výstupy. Samotný fakt, že takovýto projekt vznikl a je prostřednictvím VÚV TGM zpracováván, signalizuje pro budoucnost pozitivní změnu.

## **10. Závěr**

Diplomová práce si vytyčila několik cílů. Měla shromáždit souhrnnou informaci o využití různých technologií MAR, vytvořit přehledný popis geologicky vhodných kolektorů, shrnout poznatky a zkušenosti při aplikaci umělé infiltrace z různých oblastí světa a současně popsat jejich použití na konkrétních příkladech realizovaných projektů.



V České republice se umělá infiltrace stala diskutabilním tématem v posledních letech, kdy odborná veřejnost usoudila, že je potřeba trend snižování zásob podpovrchových vod zastavit. I když se ČR nachází v mírném pásu bohatém na srážkový úhrn, je třeba brát tento problém v potaz. V různých semiaridních oblastech, které byly bohaté na vodu, se po zásahu člověka drasticky změnila tvář krajiny. Po změně myšlení místních komunit se pomocí MAR podařilo zvrátit tento negativní trend.

MAR je závislý na hydrogeologických poměrech, které byly ve stručnosti vysvětleny v rešerši. Pro nacházení nejvhodnějšího řešení v potencionálních oblastech se v rešerši nachází metodologie řízeného doplňování podzemních vod, kde jsou popsány různé způsoby využití MAR.

Pro popis jednotlivých způsobů řízeného doplňování podzemních vod byly nalezeny reprezentativní příklady ze světa a přiloženy studie, které vysvětlují jednotlivé fáze MAR.

Z pohledu zpracovatele se podařilo výše popsané cíle naplnit a práce tedy splňuje vypsání zadání.

Hlavním přínosem zpracovatele je ucelená publikace týkající se problematiky MAR s odkazy na světové příklady.

Tato práce může být použita jako zdroj informací pro řešení konkrétních projektů v České republice týkajících se zadržování podzemních vod, umělého zavlažování, umělé infiltrace, atd.

## 11. Seznam literatury

- Aertgeerts, R., & Angelakis, A. (2003). *Health risks in aquifer recharge using reclaimed water - State of the art report*. Získáno Duben 2015, z World Health Organization: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/wastewater/wsh0308/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/wsh0308/en/)
- Agarwal, A., & Narain, S. (1997). *Dying Wisdom*. Indie: Centre for Science and Environment.
- Benamar, A. (2010). *Soil Clogging Phenomena in Vertical Flow*. IAHR.
- Beneš, V. (1995). *Hydrodynamika transportních a transformačních procesů polutantů v podzemních vodách*. Praha: Academia Praha.
- Bouwer. (November 1996). Issues in artificial recharge. *Water Science and Technology*, stránky 381 - 390.
- Bouwer. (2000). Integrated water management: Emerging issues and challenges. *Journal of Agricultural Water Management*, 217 - 228.
- Bouwer. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *H in Hydrogeology Journal*, 121 - 142.
- Bouwer, E., Martin, R., & Hanna, L. (1991). Determination of Bacterial Collision Efficiencies in a Rotating Disk System. *Environmental Science Technology*, 1068 - 1074.
- Brown, J., Rattray, E., Paton, G., Reid, G., Caffoor, I., & Killham, K. (1996). *Comparative assessment of the toxicity of a paper mill effluent by respiratory and luminescence based bacteria assay*. Chemosphere.
- Brunner, N., Starkl, M., Sakthivel, P., Elango, L., Amirthalingam, S., Pratap, C., a další. (2014). Police Preferences about Managed Aquifer Recharge for Securing Sustainable Water Supply to Chennai City, India. *water*, 3739 - 3757.
- Carney, D., & Farrington, J. (1998). *Natural Resource Management and Institutional Change*. London: Routledge/ODI.
- Červenková, M. (2014). *Návrh způsobu monitorování zdrojů podzemní vody*. Brno: Fakulta stavební VÚT v Brně.
- Dillon, P., & Ward, J. (2009). *Robust Design of Managed Aquifer Recharge Policies in Australia*. Australian: National Water Commission.
- Dooge, J. (2003). *Linear Theory of Hydrologic Systems*. Reprint Series 1.
- Eagleson, P. (2003). *Dynamic Hydrology*. Reprint Series 2.
- Eckhardt, P., & Kučera, J. (2008). *Vsakování odpadních vod - ano, či ne?* Praha: Vodní hospodářství.

- Escalante, E. F. (2010). *La Gestión De La Recarga Artificial De Acuíferos En El Marco Del Desarrollo Sostenible: Desarrollo Tecnológico*. Madrid: GRAFINAT . C / Albasanz.
- Esfandiari-Baiat, M., & Rahbar, G. (2004). *Monitoring of inflow and outflow rate from Kaftari artificial recharge of groundwater system in dorz-sayban region in South-eastern Iran*.
- Fastenau, F., van der Graaf, J., & Martijnse, G. (1990). Bottlenecks in the Implementation of On-Site Wastewater Treatment Plants on a Large Scale in The Netherlands. V *Water Science & Technology* (stránky 291 - 298). Deventer, The Netherlands: IWA Publishing.
- Filho, W. (2012). *Climate Change and the Sustainable Use of Water Resources*. Hamburg, Německo: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Foster, S., & Chilton, P. (2004). Downstream of downtown. *Urban wastewater as groundwater recharge in Hydrogeology journal*, 115 - 120.
- Gale, I. (2005). *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Gale, I., Neumann, I., Calow, R., & Moench, M. (2002). *The effectiveness of Artificial Recharge of groundwater: a review*. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- Gerges, N. (1996). *Proposals for injecting effluent for aquifer storage nad recovery scheme*. Helsinki: Proc. Int. Symp. Artificial Recharge of Groundwater.
- Hamdan, I., & Steinel, A. (2012). *Managed aquifer recharge (MAR) potential map for Amman-Zarqa and Azraq Basins, Jordan*. Stuttgart.
- Heilweil, V., & Watt, D. (2010). Trench infiltration for managed aquifer recharge to permeable bedrock. *Hydrological precesses*, 141 - 151.
- Heinzmann, B., & Sarfert, F. (1995). An integrated water management concept to ensure a safe water supply an high drinking water quality on an ecologically sound basis. *Water Science and Technology*, 281 - 291.
- Herčík, L. (2008). 40 let provozování umělé infiltrace v Káraném (1968 - 2008). *Pitná voda 2008* (stránky 289 - 294). Č. Budějovice: W&ET Team.
- Historie káranské vodárny*. (nedatováno). Získáno 31. Březen 2015, z Vodárna Káraný, a.s.: <http://www.vodarnakarany.cz/historie-karanske-vodarny>
- Horton, R. (1933). *The role of infiltration in the hydrologic cycle*. American Geophysical Union Transactions.
- Hrkal, Z. (2010). *Zpracování metodiky pro posuzování problematiky umělé infiltrace v ČR*. Praha.

- Huisman, L., & Olsthoorn, T. (1983). *Artificial Groundwater Recharge*. Boston: Pitman.
- Huntzinger, D., McCray, J., Cuyk, S., & Siegrist, R. (2001). Mathematical modeling of unsaturated flow in wastewater soil absorption systems with clogging zones. *The Ninth National Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems*, (stránky 106 - 115). Fort Worth, Texas, USA.
- Chavez-Guillen, R. (2003). *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage*. NCC-IAH.
- Chilton, P., Lawrence, A., & Stuart, M. (1998). Pesticides in groundwater: some preliminary results from recent reserach in temperate and tropical environments. *The Geological Society*, 333 - 345.
- Chow, V. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Jenssen, P., & Siegrist, R. (1990). Technology assessment of wastewater treatment by soil infiltration systems. *Water Science Technology*, 83 - 92.
- Kahlowan, M., & Abdullah, M. (July - December 2004). Leaky Dam to Rejuvenate Depleting Aquifers in Balochistan. *Pakistan Journal of Water Resources*, stránky 29 - 33.
- Kerr, J., Pangare, G., Lokur-Pangare, V., George, P., & Kolavalli, S. (1998). *The role of watershed projects in developing rainfed agriculture in India*. Washington DC., USA: World Bank.
- Krásný, J., Císlarová, M., Čurda, S., Datel, J. V., Dvořák, J., Grmela, A., a další. (2012). *Podzemní vody České republiky - Regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. Praha: Česká geologická služba.
- Kravčík, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kováč, M., & Tóth, E. (2007). *Voda pre ozdravenie klímy - Nová vodná paradigma*. Žilina: Krupa Print.
- Máca, P. (2014). *Hydrologie pro bakaláře*. Praha: ČZU v Praze.
- Maliva, R., & Missimer, T. (2012). *Arid Lands Water Evaluation and Management*. Springer Science & Business Media.
- Martin, R., Gerges, N., & Dillon, P. (2000). Aquifer Storage and Recovery (ASR) using water treated to irrigation standards. *Proc. 20th IAH Congress, Cape Town, South Africa*.
- McFarlane, J., Bekele, E., Simpson, J., & Tapsuwan, S. (2007). Using treated wastewater to save flow-through wetlands impacted by climate change. *2nd IWA-ASPIRE Conference and Exhibition Water and Sanitation in the Asia-Pacific Region: Opportunities, Challenges and Technology*. Perth.
- Mihaljevič, M., & Moldan, B. (2000). *Otázky biochemie*. Praha: Nakladatelství Karolinum Univerzity Karlovy v Praze.

- Míka, R. (25. Listopad 2012). *Nejmladší přehrada v ČR, Slezská Harta, slavá patnáctiny*. Získáno 13. Duben 2015, z Arciweb: [www.archiweb.cz](http://www.archiweb.cz)
- Mortimer, E. (15. Září 2014). Managed Aquifer Recharge an overview of laws affecting aquifer recharge in several western states. *The Water Report*, stránky 11 - 25.
- Mukhopadhyay, A., Al-Sulaimi, J., Al-Awadi, E., & Al-Ruwaith, F. (1996). *An overview of the Tertiary geology and hydrogeology of the northern part of the Arabian Gulf region with special reference to Kuwait*. Kuvajt: Earth-Science Reviews.
- Murray, E. (2004). *Wise water management for towns and cities*. Získáno 2015, z Water Research Commission, S. African : <http://www.wrc.org.za/>
- Murray, E., & Tredoux, G. (1998). *Artificial recharge: A Technology for sustainable water resource development*. Pretoria: Water Research Commission Report.
- Mutiso, S. (2003). *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage*. NCC-IAH.
- Němec, J. (1964). *Inženýrská hydrologie*. SNTL, Řada staveb. lit.
- ODA. (13. Duben 1995). *ISO*. Získáno 5. Duben 2015, z Information technology - Open Document Architecture (ODA) and interchange format: Dokument structures - Part 2: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:8613:-2:ed-1:v1:en>
- O'Hare, M., Neville, A., & Edwards, P. (1982). *Human - human hybridomas*. Lancet.
- Pettenati, M., Picot-Colbeaux, G., Thiéry, D., Boisson, A., Alazard, M., Perrin Jérôme, a další. (2014). Water quality evolution during managed Aquifer recharge (MAR) in Indian crystalline basement aquifers: reactive transport modeling in the critical zone. *Geochemistry of the Earth's Surface meeting* (stránky 82 - 87). Elsevier.
- Pholkern, K., Chusanatus, S., Munyou, S., Archwichai, L., Uppasit, S., Nadee, S., a další. (2011). Selection of Suitable Areas for Managed Aquifer Recharge Using Ponding Recharge System in Phitsanulok, Sukhothai and Phichit Provinces, Thailand. *International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Infochina*, (stránky 371 - 377). Khon Haen, Thailand.
- Pulido-Bosch. (1995). Centuries of Artificial Recharge on the southern edge of the Sierra Nevada. *Environmental Geology*, 57 - 63.
- Pyne, R. (1995). *Ground water recharge and wells - A guide to Aquifer Storage and Recovery*. Florida, USA: Lewis Publishing.
- Rim, C.-S. (1995). *Daily estimation of local evapotranspiration using energy and water balance approaches*. Arizona: The University of Arizona.
- Rozman, D., Hrkal, Z., Eckhardt, P., Novotná, E., & Vencelides, Z. (2013). Zkušenosti se zasakováním odpadních vod na lokalitě Řevničův. *Vodohospodářské Technicko-Ekonomické Informace*, 6 - 10.

- Simonffy, Z. (2003). *Management of Aquifer Recharge and Surface Storage*. NCC-IAH.
- Stránský, D., Kabelková, I., Bareš, V., Vitek, J., Suchánek, M., Plotěný, K., a další. (2012). *Technická pomůcka k činnosti autorizovaných osob - Srážkové vody a urbanizace krajiny*. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o.
- Šálek, J. (1996). *Vliv závlah odpadními vodami na životní prostředí*. Praha: ÚZEI.
- Šráček, O., Datel, J., & Mls, J. (2000). *Kontaminační hydrogeologie*. Praha: Nakladatelství Karolinum Univerzity Karlovy v Praze.
- Thomas, D., Eriksson, A., Grunder, M., & Mburu, J. (1997). *Soil and Water Conservation for Kenya*. Nairobi: Soil and Water Conservation Branch, Ministry of Agriculture, Livestock Development and.
- Todd, D. K. (1959). *Ground water hydrology*. Wiley.
- Tredoux, G., Murray, E., & Cave, L. (2003). Infiltration systems and other recharge systems in Southern Africa. V *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage* (str. Chapter 8). NCC-IAH.
- Tuinhof, A., & Heederik, J. P. (2002). *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage - Making Better Use of Our Largest Reservoir*. Wageningen.
- Úpravna vody Káraný. (nedatováno). Získáno Duben 2015, z Obec Káraný: <http://www.karany.cz/firmy-v-obci/prazske-vodovody-a-kanalizace-as-vodarna-karany/>
- Viščor, P. (Květen 2013). 100 let I. březovského vodovodu. *SOVAK Časopis oboru vodovodů a kanalizací*, stránky 1 - 4.
- Vodárna v Káraném. (2013). Získáno Duben 2015, z Vodárna Káraný, a.s.: <http://www.vodarnakarany.cz/>
- Zeelie, S. (2002). *A self-evaluation system for quality assessment in nursing research*. Unpublished.
- Žabička, Z., & Vrána, K. (2011). *Hospodaření se srážkovou vodou v nemovitostech*. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o.