ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020 Aneta Johanidesová

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE

ZASAKOVÁNÍ DEŠŤOVÝCH VOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: prof. RNDr. Dana Komínková, Ph. D.
Bakalant: Aneta Johanidesová

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Aneta Johanidesová

Krajinářství
Územní technická a správní služba

Název práce

Zasakování dešťových vod

Název anglicky

Storm water infiltration

Cíle práce

Cílem práce je na základě literární rešerše vyhodnotit využitelnost různých způsobů zasakování a různých materiálů používaných jako náplň do zasakovacích objektů.

Metodika

Literární rešerše týkající se problematiky zasakování dešťových vod.

Doporučený rozsah práce

45 stran

Klíčová slova

dešťové vody, infiltrace, urbanizace,

Doporučené zdroje informací

Bonneau, J., Fletcher, T.D., Costelloe, J.F., Poelsma, P.L., James, R.B., Burns, M.J. 2018: Where does infiltrated stormwater go? Interactions with vegetation and subsurface anthropogenic features, Journal of Hydrology,Volume 567,Pages 121-132

Selbig, W.R., Buer, N., 2018, Hydraulic, water-quality, and temperature performance of three types of permeable pavement under high sediment loading conditions: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5037, 44 p.,

Vítek, J., Stránský, D., Kabelková I., Bareš, V., Vítek, R., 2015: Hospodaření s dešťovou vodou v ČR, Praha: 01/71 ZO ČSOP Koniklec

Woods Ballard B., Wilson S., Udale – Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R. 2015: The SuDS Manual, CIRIA,

---

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FŽP

Vedoucí práce

prof. RNDr. Dana Komínková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2019

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 06. 2020

Poděkování

Ráda poděkovala prof. RNDr. Daně Komínkové Ph.D. za podnětné připomínky a za trpělivost, kterou mi v průběhu psaní bakalářské práce věnovala.

V Kralupech nad Vltavou, dne 28. 6. 2020 Podpis autora ……

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Zasakování dešťových vod zpracovala zcela samostatně, pod vedením prof. RNDr. Dany Komínkové, Ph. D. Prohlašuji, že jsem uvedla veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpala a že se tištená verze práce shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Kralupech nad Vltavou 28. 6. 2020 Podpis autora ……

Abstrakt

Práce řeší problematiku zasakování dešťových vod. Zasakování srážkových vod je důležitým nástrojem k zadržování vody v krajině a k doplňování zásob podzemních vod a také k obnově přirozeného vodního cyklu. S rozvojem lidských sídel a přeměnou přirozených povrchů na povrchy zpevněné vyžaduje zasakování srážkových vod různé způsoby řešení podle daných prostorových podmínek, geologických poměrů a také charakteru a míry znečištění dešťových vod. Díky dostupným technologiím a materiálům lze navrhnout řešení k zasakování dešťových vod i ve složitých podmínkách urbanizovaného území včetně městské zástavby, kde situaci ještě více komplikuje systém inženýrských sítí a jiných podzemních staveb tvořící tzv. urban karst. Pro neznečištěné srážkové vody lze v příznivých geologických podmínkách využít podzemní vsakovací objekty, v husté zástavbě však může být tento způsob problematický právě z důvodu blízkosti staveb a podzemní infrastruktury. Jako příznivější a využitelnější se jeví povrchové způsoby zasakování srážkových vod prostřednictvím propustných povrchů s vhodnými podkladovými vrstvami a případnou drenáží pro odvod přebytečných srážkových vod. Při návrhu nové zástavby lze navrhovat prostorově náročnější bio-retenční objekty, které nabízejí také funkci estetickou a ekologickou. Vzhledem k pokračujícímu rozvoji sídel a dopravní infrastruktury je při návrhu zasakovacích objektů třeba myslet na udržitelnost a ochranu životního prostředí a při výběru materiálů se zaměřit na druhotně využitelné suroviny nejlépe z místních nebo blízkých zdrojů.

Klíčová slova: dešťové vody, infiltrace, urbanizace

Abstract

Stormwater infiltration is an important way for retaining water in the landscape and groundwater recharge, as well as restoring the natural water cycle. With the development of cities and the transformation of natural surfaces into paved impervious surfaces, the infiltration of stormwater requires unique solutions according to the given spatial conditions, geological conditions and also the rate of stormwater pollution. With available technologies and materials, it is possible to design solutions for stormwater infiltration even in difficult conditions of urbanized areas, including dense urban development, where the situation is further complicated by a system of utilities and other underground structures forming the urban karst. Devices for infiltrating stormwater directly into the ground can be, without pretreatment, used for unpolluted stormwater in permeable geological conditions, but in dense buildings this method can be problematic due to the proximity of buildings and underground infrastructure. Surface infiltration devices and permeable pavement will be more useful and applicable. When designing new development area, it is possible to design space-requirement bio-retention objects, which also offer an aesthetic and ecological function. Due to the continuing development of settlements and transport infrastructure, is needed when designing to pay attention sustainability and environmental protection and when designing infiltration devices, it is needed focusing on secondary usable raw materials, preferably from local or nearby sources.

Keywords: stormwater, infiltration, urbanization

Obsah

1. Úvod ... 0
2. Cíle ... 1
3. Přírodní podmínky ... 1
3.1 Voda v půdě ... 1
3.2 Retenční schopnost krajiny a povodně ... 3
3.3 Hydrologická bilance ... 5
3.4 Vodní cyklus, změna klimatu ... 6
4. Zasakování srážkových vod ... 7
4.1 Zasakování ve volné krajině ... 8
4.2 Zasakování v urbanizovaném prostředí ... 9
4.2.1 Specifika odvodnění v městském prostředí ... 11
4.2.2 Urban karst ... 11
4.2.3 Prostorové podmínky ... 13
4.2.4 Vsakování a kontaminace ... 14
4.2.5 Typy vsakovacích opatření v urbanizovaném prostředí a jejich využití ... 14
5. Podzemní vsakovací objekty. ... 14
5.1 Vsakovací šachty z betonových nebo plastových prefabrikátů ... 15
5.2 Vsakovací boxy a tunely ... 16
5.3 Vsakovací jímky (trativody) ... 16
5.4 Vhodnost použití podzemních vsakovacích objektů ... 17
6. Povrchové vsakovací objekty ... 17
6.1 Vsakovací rýhy ... 17
6.1.1 Vlastnosti vsakovacích rýh ... 18
6.1.2 Vhodnost použití vsakovacích rýh ... 18
6.2 Bio-retenční opatření ... 19
6.2.1 Retenční vsakovací nádrže ... 19
6.2.2 Biotopy a dešťové zahrady ... 20
6.2.3 Vhodnost použití bio-retenčních opatření ... 21
6.3 Průlehy ... 22
6.3.1 Vlastnosti průlehů ... 22
6.3.2 Vhodnost použití průlehů ... 24
6.4 Propustné zpevněné povrchy ... 24
6.4.1 Vlastnosti propustných zpevněných povrchů ... 25

6.4.2 Výhody a vhodnost použití propustných povrchů 26
6.5 Další příklady infiltračních opatření 29
6.5.1 Filtrační pásy 29
6.5.2 Prostory pro kořenový systém stromů 29
7. Materiály v infiltračních objektech 30
7.1 Kameniva 30
7.2 Recykláty 32
7.3 Biochar 33
7.4 Geotextilie 33
7.4.1 Geokompozity 34
7.4.2 Protierozní geotextilie 35
7.5 Filtrační materiály 36
8. Diskuse 37
9. Závěr 39
10. Seznam literatury: 42
11. Seznam obrázků: 51

1. Úvod

Hospodaření se srážkovými vodami, zejména jejich zasakování a retence v krajině je považováno za jednu z priorit v ochraně životního prostředí (Dhakal, Chevalier, 2017). Krajina v České republice, do značné míry ovlivněná lidskou činností, se čím dál tím více potýká s extrémními jevy, jako jsou na jedné straně povodně a na straně druhé sucho. Příčinou této nerovnováhy je kromě probíhajících změn klimatu, zrychlený odtok srážkových a povrchových vod způsobený narůstající rozlohou zastavěného území s nepropustnými povrchy, nešetrným hospodařením na zemědělské a lesní půdě a nevhodným způsobem odvodňováním městské zástavby. Tato změna krajiny neumožňuje, aby zde probíhal přirozený vodní cyklus. Odvodňování urbanizované i volné krajiny má za následek přehřívání zemského povrchu. Nad přehřátou krajinou se neudrží oblačnost a téměř se zde nevyskytují srážky. Problém sucha se tak dále prohlubuje. Přestože nutnost zasakování a zadržování srážkových vod co nejblíže místu jejich vzniku je téměř jedno desetiletí součástí závazných právních předpisů, stále není samozřejmostí, a u mnoha staveb není otázka odvodnění řešena uspokojivě. Zaběhnutá praxe z minulých dob, kdy se voda ze zastavěných území kvůli získávání orné půdy i z volné krajiny odváděla, se mění pomaleji, než by bylo třeba. Přitom jde o problematiku, která se týká každého z nás. Na pitné vodě, která pochází z podzemních vod, je závislých 45 % obyvatel naší země a zdroje povrchových vod využívané pro zásobování obyvatel pitnou vodou se potýkají se znečištěním zejména dusíkatými látkami a fosforem. Při vyšších teplotách a nižších průtocích se kromě bodových zdrojů znečištění a znečištění ze zemědělsky obhospodařovaných ploch podílí na vyšším obsahu nutrientů v povrchových vodách vyšší mikrobiální aktivita, při které dochází k rychlejšímu rozkladu organické hmoty nashromážděné ve vodních tocích a nádržích (Verheyen et al., 2015).

Území České republiky leží na tzv. střeše Evropy, odkud odtéká voda do třech úmoří. Znamená to, že na území ČR žádné významné množství vody nepřitéká a máme jen tu vodu, která zde v podobě srážek spadne. S tou bychom proto měli co nejlépe hospodařit. Na opatření, která umožňují hospodaření s dešťovou vodou, její vsakování a zadržování v krajině by Česká republika měla vynakládat mnohem více prostředků. Dle rozsahu škod způsobených extrémními jevy počasí a studií, které nabádají k investicím v této oblasti je situace v České republice podceňována (Sklenička, 2016). Přírodě blízká řešení tzv. zelené infrastruktury jsou pokládána za základní

předpoklad udržitelného rozvoje, a přesto jsou přijímána pomalu, a při implementaci politiky udržitelného rozvoje v oblasti vodního hospodářství, existuje řada překážek. Problémy s přijímáním postupů a realizacemi přírodě blízkých řešení ale existují i v zemích, kde podobná opatření již řadu let existují, což bylo zjištěno např. výzkumem v 10 konkrétních městech Spojených států amerických a dále ve Spojeném království Velké Británie a Severního Irska a v Austrálii (Dhakal, Chevalier, 2017).

Pokud se retenční schopností krajiny nebudeme včas a důsledně zabývat, můžeme čekat horší dopad klimatických změn z důvodu nedostatku podzemní i povrchové vody, ale také z důvodu častějšího výskytu povodní a sucha, tedy meteorologických extrémů, jejich vliv se bude projevovat také do sféry socio-ekonomické a hospodářské, neboť nebude dostatek zdrojů. To se odrazí zhoršením kvality života a negativním vlivem na ekonomiku. Vyloučit nelze ani dopad na životního prostředí (Loučková et. al. 2017).

2. Cíle

Cílem této práce je na základě literární rešerše vyhodnotit využitelnost různých způsobů zasakování a různých materiálů používaných jako náplň do zasakovacích objektů.

3. Přírodní podmínky

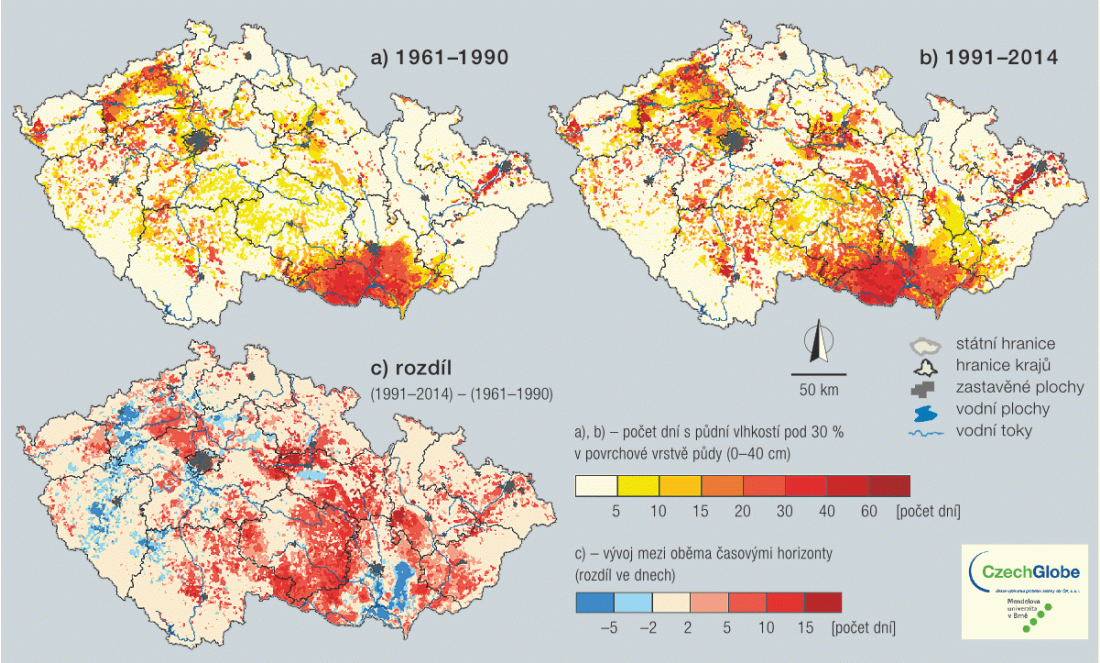
3.1 Voda v půdě

Krajina v České republice přišla o cennou schopnost zadržovat vodu v meandrech a ramenech vodních toků, mokřadech, v zemědělské i lesní půdě. V minulosti zde došlo k nevhodným zásahům v podobě budování meliorací, napřimování a zahlubování koryt vodních toků, scelování pozemků za účelem velkoplošného obhospodařování zemědělské půdy a hospodaření v lesích zejména kvůli nevhodné druhové a věkové skladbě porostů (Bercha, 2019).

V půdě je vody stále méně, ale je jí čím dál tím více v atmosféře, kde jako nejdůležitější skleníkový plyn přispívá k zesílení skleníkového efektu. Při tom v půdě, kam se v rámci oběhu vody (vodního cyklu) dostává, má voda velice důležitou funkci.

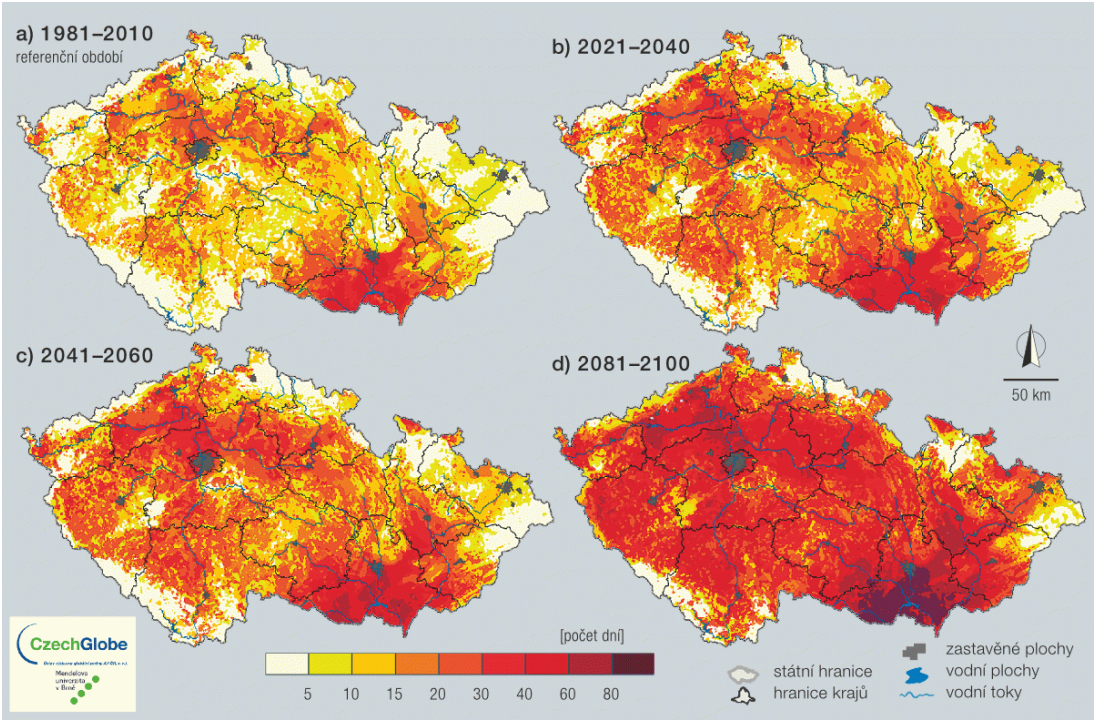
Probíhají díky ní mikrobiální procesy a tím, že rozpouští živiny, je zdrojem kyslíku a vodíku při fotosyntéze, je nezbytná pro růst a vývoj živočichů a rostlin a také tvoří významnou část biomasy. Úbytek vlhkosti v půdě je průvodním jevem měnícího se klimatu. Teplejší klima, vyšší teploty vzduchu způsobují prodloužení vegetačního období, snížení počtu dní se sněhovou pokrývkou a tím ovlivňují proces doplňování vody v půdě. Dřívější nástup vegetace v rámci střídání ročních dob také zkracuje období, kdy dochází k doplňování zásob podzemní vody. K tomu dochází především od podzimu do nástupu jara, protože na jaře, se začátkem vegetační doby, využívají veškerou vláhu rostliny pro svůj růst a do větší hloubky a podzemních kolektorů se již voda téměř nedostává (Trnka, Žalud, 2017).

Vývoj počtu dnů s nedostatečnou zásobou vody v půdním profilu 0-100 cm v uplynulých desetiletích dokládá Obrázek 1.



Obrázek 1: Počet dní s relativním nasycením povrchové vrstvy půdního profilu (0-40 cm) nižším než 50 % v období duben-červen pro období 1961-1990 a 1991-2014.

Trend, jakým se bude vývoj klimatu v ČR ubírat je znázorněn na Obrázek 2:



Obrázek 2: Současná úroveň stresu suchem vyjádřená jako průměrný počet dní s nedostatkem vláhy v referenčním období 1981–2010 (a) a odhad vývoje pro období 2021–2040 (b) a 2041–2060 (c) při relativně mírném nárůstu emisí (tzv. RCP – Representative Concentration Pathways, kdy se zvýší radiační působení o 4,5 W·m^2). Mapa (d) zachycuje odhad pro období 2081–2100 v případě zachování současného tempa růstu emisí, které by vedlo při kombinaci dalších faktorů až k zvýšení radiačního působení o 8,5 W·m^2.

3.2 Retenční schopnost krajiny a povodně

Jednou ze složek krajiny, která ztratila přirozenou schopnost zadržovat vodu, je půda. Jako jednu z příčin výskytu extrémních jevů ji zmiňuje před více než 20 lety zpracovaná „Analýza příčin vzniku povodní a fungování systému řízení protipovodňové ochrany s návrhy preventivních opatření k budoucímu snížení rizik a následků průchodu velkých vod včetně návrhu systému financování“. Její zpracování uložila vláda usnesením č. 416/97 16. července v roce 1997 bezprostředně poté, co území České republiky zasáhly povodně, které v některých oblastech v povodí Moravy, Odry a Labe nabyly charakteru přírodní katastrofy, nemající dosud, podle

dostupných historických pramenů, obdoby. Katastrofální průběh povodní měl tehdy dle předkládané zprávy zmíněného dokumentu za následek ztrátu 50 lidských životů a škody ve výši cca 60 mld. Kč (PSP ČR, 1998).

V úvodu důvodové zprávy této analýzy se hovoří o moderním evropském pojetí povodňové ochrany, která vidí roli státu především v oblasti řízení protipovodňové ochrany a v podpoře přirozeného zadržování vody v území. Ze samotné analýzy příčin vzniku povodní také vyplývá, že přestože jsou povodně přirozenou součástí oběhu vody, jejich průběh a dopad v území ovlivňuje kromě množství a rozložení srážek také schopnost terénu, tj. především půdy, porostu a hydrografické sítě zadržet vodu (PSP ČR, 1998).

Málo rozmanitá krajina není schopna vyrovnávat se s extrémními jevy počasí, které souvisí se změnou klimatu. Velké homogenní celky zemědělské půdy s monokulturami, hojné používání chemických přípravků a rozsáhlé odvodnění půdy, to všechno jsou následky kolektivizace z 50. let minulého století a následné intenzivní zemědělské výroby (Crampton and Crampton, 1997, cit in: Petřík et. al. 2015). Také v 90. letech během transformace zemědělství byla ve prospěch ekonomického hlediska upozaděna péče o přírodní podmínky a zemědělské, lesní a urbánní ekosystémy (Wascher, 2000, cit in: Petřík et. al., 2015). V důsledku výše uvedených změn se v krajině snížil podíl ploch s množstvím různorodé vegetace schopné vázat dostatečné množství vody. Vegetace spotřebovává významnou část sluneční energie při transpiraci a nedochází tak nadměrnému ohřívání okolního prostředí. Nad chladnými místy a např. v noci dochází ke kondenzaci vodní páry a uvolňování skupenského tepla zpět do prostředí, čímž dochází ke zmírnění teplotních rozdílů a podpoře malého vodního cyklu (Pokorný et al., 2017). Povrchy polí po sklizni vystavené slunečnímu záření mají teplotu téměř stejně vysokou jako tmavé nepropustné plochy (48,3 ºC teplota povrchu půdy, resp. 49,1 ºC povrchu přilehlé asfaltové cesty). Na takových plochách nedochází k ochlazovaní evapotranspirací a převažuje zde tok zjevného tepla. Tento jev se ale nevyskytuje pouze na sklizených polích, ale také na plochách s plodinami bez podrostu, kde se povrch půdy přehřívá. Vzestupný proud vzduchu odnáší vlhkost z porostu do atmosféry (Pokorný, Hesslerová, 2018). Vzhledem k tomu, že zemědělsky je obhospodařováno 60 % rozlohy České republiky (Bičík, Jančák, 2005), snížila se v české krajině během uplynulých 60 let významně schopnost zmírňovat extrémní výkyvy počasí (Petřík et. al., 2015).

Z důvodu nerovnoměrnosti a častějšího výskytu období bez deště a extrémních srážek v podobě přívalových dešťů je třeba krajinu měnit, aby byla schopna zmírnit následky uvedených jevů. Retenční schopnost krajiny ovlivnila urbanizace, jejímiž jevy jsou například odlesňování a odstraňování vegetace, což způsobuje snížení odparu a zrychlení odtoku, terénní úpravy, odvodňování a skrývání ornice za účelem výstavby domů a komunikací. To má také za následek snížení schopnosti infiltrace a urychlení odtoku. Následkem nárůstu obyvatel v urbanizované krajině je například snížení hladiny podzemní vody, eroze a soustředěné odvodňování namísto pomalého odtékání vody malými stružkami v povrchových vrstvách půdy (van der Leeden et. al., 1990).

3.3 Hydrologická bilance

Hydrologický cyklus lze popsat a hodnotit na základě jednotlivých složek, které jsou přirozenou součástí oběhu vody na Zemi, pomocí hydrologické bilance.
Do systému vstupují srážky, přítok a zásoby a naproti tomu výstupem jsou výpar, odtok a úbytek zásob vody. K dispozici jsou modely vycházející z této bilance, díky nimž lze podrobně sledovat podíl různých složek na hydrologickém cyklu v dané oblasti, uceleném povodí nebo v jednotlivých vertikálních subsystémech hydrologického profilu. Hydrologická bilance se vztahuje k hydrologickému roku a dílčím časovým úsekům. Pro hodnocení hydrologické bilance se využívají výpočtové modely, jako je například model Bilan, který vznikl na základě potřeby komplexnějšího způsobu hodnocení vodních zdrojů v souvislosti s klimatickou změnou a s ní spojenými riziky. Navazuje na dlouhodobý výzkum hydrologického modelování a modelování dopadů změny klimatu ve vodním hospodářství prováděný ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v.v.i. a Českém hydrometeorologickém ústavu. V české legislativě je hodnocení vodních zdrojů ukotveno vyhláškou Ministerstva zemědělství č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci (Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.).

3.4 Vodní cyklus, změna klimatu

Snížená retenční schopnost krajiny má kromě vlivu na odtokové poměry a s tím spojené povodně ještě další negativní vliv, a to na klima, resp. mikroklima území. Zvýšený odtok srážkových vod způsobuje rychlejší vysychání krajiny a zvyšování teploty zemského povrchu a vzduchu. Tento jev bude zesilovat s tím, jak se bude měnit klima globální. Pokud nebude v krajině voda, která by díky evapotranspiraci snižovala teplotu vzduchu, teplota nadále poroste. Je známo, že nad přehřátým povrchem nedochází ke srážení vodních par, tak jak je tomu např. nad územím porostlém vegetací. Makarieva a Gorškov (2007) popsali tento jev jako princip biotické pumpy. Nad chladným lesem, kde dochází ke srážení vodní páry, je nižší tlak. Proto se nad zalesněné území přesunou vodní páry z okolí, kde je tlak vzduchu vyšší. Les díky teplotní inverzi zadržuje vodu a bylinné patro je ve dne chladnější než koruny stromů. V noci, kdy je teplota vzduchu nad vegetací nižší než v bylinném patru, se voda odpařuje a nad korunami stromů kondenzuje a tvoří se mlha. Kapičky mlhy padají zpět do vegetace, ve které se takto udržuje vlhkost.

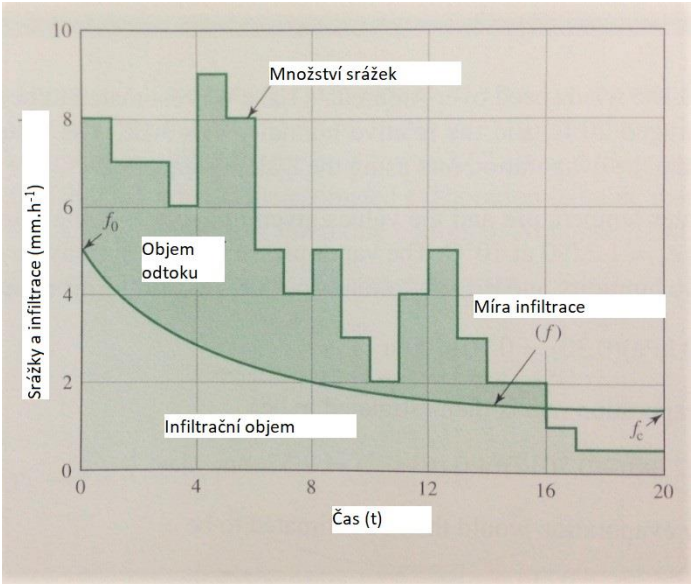
Na odvodněném území dochází k narušení malého vodního cyklu, ale pokud jde o obrovské plochy, může být negativně ovlivňován velký vodní cyklus. Člověk se takto podílí na procesu, který je znám jako globální změna klimatu. V České republice jsou k dispozici časové řady naměřených územních teplot a srážek. Ve stanici Praha – Klementinum se měří teplota od roku 1775 a srážky od roku 1805. Údaje o teplotě z této měřící stanice ale nejsou pro účely popisování vývoje klimatu vhodné z toho důvodu, že se jedná o stanici městskou s nezanedbatelným vlivem tepelného ostrova. Pro pozorování vývoje u základních ukazatelů klimatu je lépe využít časové řady územních teplot a srážek, které jsou založeny na výsledcích měření celé sítě měřících stanic na území České republiky (MŽP, 2015).

Narůstající teplota a teplotní rozdíly s sebou přináší extrémní projevy počasí v podobě častějších povodní a delších období sucha. Povodně mají za následek vodní erozi, smyv půdy, která má vodu v krajině přirozeně zadržovat. Problémy krajiny České republiky, zejména v oblastech s intenzivní zemědělskou činností a velkými sídly, jsou úzce propojené a dále se prohlubují. Zadržování dešťové vody v krajině přispěje k ochlazování povrchu, a tedy k obnově malého vodního cyklu. I přes výrazné odchylky a nepravidelnost mezi jednotlivými roky lze pozorovat trend nárůstu průměrné roční teploty o 0,3 ºC za 10 let. V posledních dvou desetiletích se průměrná

teplota zvýšila o 0,8 ºC. Lze tedy konstatovat, že teplota vzduchu na našem území se skutečně zvyšuje, s čímž koresponduje i zvýšený výskyt tropických a letních dní v roce (MŽP, 2015).

4. Zasakování srážkových vod

Zasakování, též infiltrace, je průnik vody povrchovou vrstvou půdy pod její povrch, případně vstup srážkových vod do půdy v systému odvodnění (Smith, Scott 2005). Při pronikání vody pod povrch klesá míra infiltrace, dokud nedosáhne konstantní hodnoty. Míru infiltrace ovlivňuje řada faktorů. Patří mezi ně především intenzita a doba trvání srážek, typ půdy, morfologie povrchu a rostlinný kryt (Davis, Masten, 2009), struktura půdního povrchu a počáteční vlhkost půdy (Guo, 2017). Pokles míry infiltrace v čase znázorněný na Obrázek 3 je zapříčiněn plněním půdních pórů vodou a snížením kapilárních sil (Davis, Masten, 2009).



Obrázek 3: Pokles míry infiltrace v čase (Davis, Masten, 2009)

Voda, která pronikla do podpovrchových vrstev půdy proniká hlouběji, aby uvolnila prostor pro vodu z povrchu. Je tedy zřejmé, že faktory, které mají vliv na pohyb vody povrchovou vrstvou půdy a podložím, mají vliv také na míru infiltrace (Edwards, 1967). Proces zasakování v půdě je ovlivněn kapilárními silami a hydraulickou vodivostí, s čímž souvisí fyzikální vlastnosti vody, hustota a viskozita. Mezi další vlastnosti půdy, které přímo ovlivňují zasakování, patří obsah vody, velikost a tvar pórů, jejich rozložení a stav povrchové vrstvy půdy. Porozitu, což je poměr mezi objemem mezer a celkovým objemem zvodnělého materiálu (Davis, Masten, 2009),

ovlivňují obsah a bobtnavost koloidních částic, obsah solí, organické hmoty, trhliny vznikající při vysychání půdy, kořeny rostlin a činnost živočichů. Podmínky, které ovlivňují vstup vody povrchovou vrstvou jsou dány způsobem zpracování půdy a překrytím a vnosem částic (Gray et al., 1970). Zasakování do půdních vrstev je nejlepší způsob, jak přímo v místě, kam srážky spadnou, snížit povrchový odtok srážkových vod (Guo, 2017).

Jako příklady vhodných opatření lze jmenovat následující zejména přírodě blízká řešení: vegetační nebo písková vsakovací lože, příkopy, dešťové zahrady, vsakovací studny, různé typy vsakovacích nádrží a poldrů, průlehy a propustné povrchy (Guo, 2017).

Pro návrh vsakovacího zařízení je důležité znát parametry prostředí, aby byla zajištěna jeho funkčnost a potřebná míra infiltrace. Je důležité mít informace zejména o hydrologii povodí, předpokládaném znečištění, množství srážkových vod, proveditelnosti a bezpečnostních požadavcích v místě, struktuře povrchu a jeho infiltrační kapacitě, infiltrační kapacitě podpovrchových vrstev půdy a hydrogeologických poměrech. Dále záleží na srážkových poměrech území, úrovni rozvoje území, vstupního znečištění a míře eroze. Opatření by mělo být navrženo na vyšší četnost srážek a opatřeno bezpečnostním retenčním prostorem pro případ extrémních srážkových událostí (Guo, 2017).

Míra infiltrace se liší u jednotlivých typů půd a jejich vegetačního pokryvu. U hrubozrnného písku může mít hodnotu až 25 mm/h, naopak u hlinité půdy jen 8 mm/h. Nejvyšší míru infiltrace má půda na začátku vsakování a potom klesá k hodnotě, která je téměř konstantní. U písčitých půd k 20 mm/h a u jílovitých až k méně než 1mm/h (Hillel, 2004 cit in: Shelton, 2009).

4.1 Zasakování ve volné krajině

Jedním ze zásadních opatření k zadržení vody v krajině je zlepšení stavu půdy. Půda dokáže zadržet významné množství vody. Díky její pórovitosti v ní dochází k zasakování srážkové vody, v době bez srážek doplňuje zásoby podzemní a povrchové vody, odparem vrací vodu do atmosféry a poskytuje vláhu rostlinám. Díky těmto funkcím je průtočným zásobníkem vody. Schopnost zadržovat vodu je její základní hydrologickou charakteristikou (Tesař, Šír, 2005). Zemědělsky využívaná

půda zaujímá v Evropské unii 40 % celkové rozlohy a v České republice téměř polovinu (Eurostat, 2015). Zdravá černozem pojme 3500 m^3 vody na 1 ha a průměrně půda v České republice zadrží 3000 m^3 vody na 1 ha. V České republice se jedná o celkový objem 8,4 mld m^3 vody, který by zemědělská půda v dobrém stavu zadržela. Nyní má retenční kapacitu pouze 5 mld m^3 a polovina zemědělské půdy je ohrožena erozí (Čáp, 2019). Krajina, která je jako celek do značné míry ovlivněna a přetvořena lidskou činností, vyžaduje realizaci opatření pro zadržení vody nejen v zastavěném území, ale také ve volné a zemědělsky využívané krajině (Čáp, 2019).

Mezi opatření, která mohou přispět ke zlepšení schopnosti půdy zadržovat a vsakovat více vody, jsou, co se kulturní krajiny týče, některé způsoby obdělávání půdy. Bezorebné způsoby obdělávání půdy, střídání plodin nebo například ponechávání zbytku plodin na polích. Tím se zvyšuje podíl organické hmoty, dochází ke snížení odtoku a odparu z povrchu půdy. Zvýšenému povrchovému odtoku lze dále předcházet hlubokou orbou po vrstevnicích. Účinky těchto opatření jsou patrné především při vydatnějších srážkách, kdy snižují účinky vodní eroze. V širším měřítku lze takto plošně zvyšovat infiltrační kapacitu v krajině. Vodní režim lze dále zlepšit přestavbou melioračních zařízení, obnovou přirozených morfologických struktur vodních toků, jejich revitalizacemi, ale také budováním retenčních objektů sloužících k zachycení vod z přívalových srážek (Climate Adapt, 2015).

Na národní úrovni byla za účelem zlepšení tohoto stavu v krajině vytvořena metodická pomůcka, která vymezuje druhy a typy opatření, která je vhodné realizovat a která mají za cíl následující: přispět ke vsakování vody do půdy, zpomalit povrchový odtok a prodloužit tak zdržení vody v krajině, ochranu přirozených ekosystému a jejich obnovu jako kompenzaci přechozích nevhodných zásahů způsobených člověkem. Nejvhodnějšími jsou pak ta opatření, kde je daný prvek kombinován s doprovodnou zelení. Např. zasakovací průlehy, hrázky doplněné o průlehy, příkopy apod. (Dzuráková et al., 2018).

4.2 Zasakování v urbanizovaném prostředí

V urbanizovaná krajině je původní přirozený povrch, půda, do značné míry překryta zpevněnými, nepropustnými nebo málo propustnými povrchy, které brání tomu, aby se voda vsakovala do půdy a ta odtéká rychleji a ve větším množství po povrchu

(Fletcher et al., 2013). Aby srážková voda působila co nejmenší škody na stavbách a umožňovala jejich efektivní využívání, byly budovány systémy k jejímu odvádění. V zastavěném území jsou za tímto účelem využívány systémy jednotné nebo dešťové kanalizace. Tradiční způsoby odvodnění jsou založeny na principu odvádění srážkových vod přímo do vodních toků (Brown et al. 2009). V souvislosti s touto praxí, kdy je cílem se dešťové vody zbavit, se hovoří o likvidaci srážkových vod (Vítek et al. 2015). Dešťová voda, která je ve většině měst odváděna také jednotnou kanalizací, způsobuje při vydatnějších srážkách přetížení stokové sítě a prostřednictvím odlehčovacích komor na jednotné kanalizaci, které slouží k odlehčení vod při mimořádných srážkových událostech, je odváděna do vodních toků. Splaškové vody naředěné balastními vodami představují zátěž pro čistírny odpadních vod a přispívají ke znečištění vod ve vodních tocích (Vítek et. al., 2015).

Změny v kvalitě a vlastnostech povrchu ovlivňují hydrologický režim v povodích. Kvůli vysokému podílu zpevněných povrchů dochází v rozvíjejících se urbanizovaných oblastech ke snížení evapotranspirace a infiltrace a narůstajícímu povrchovému odtoku (Burns et al., 2013). Ten má za následek zvýšenou erozi a degradaci ekologických funkcí městských vodních toků (King et al. 2005). Zatímco dosavadní způsob odvádění srážkových vod měl za cíl dešťové vody z povodí odvádět, koncept hospodaření se srážkovými vodami se snaží o návrat k přirozenému hydrologickému režimu prostřednictvím decentralizace odvodnění. Za účelem zadržení vody v krajině se budují zařízení, která zajistí retenci, vsakování a umožní přirozený odpar (Vítek et. al. 2015) a teoreticky by měla přispívat také k doplňování zásob podzemních vod (Bonneau et al., 2018).

V zemích, jako jsou USA, Austrálie či např. Švédsko, započali s přístupem, kdy se s dešťovými vodami hospodaří přírodě blízkým přístupem před desítkami let, ve Velké Británii koncem 80. a začátkem 90. let 20. století (Butler, Davies, 2004). V České republice se principy hospodaření s dešťovou vodou začínají v rámci jednotlivých projektů objevovat až na začátku 21. století, po vstupu do Evropské unie a implementaci směrnice 2000/60/ES z 23. října 2000 (Vítek et. al. 2015).

Přírodě blízký způsob odvodnění zmírňuje následky povodní, působí preventivně proti vodní erozi a zlepšuje kvalitu vod, přispívá k rozvoji a zachování ekosystémů v krajině i lidských sídlech. Systém hospodaření se srážkovými vodami je víc než pouhé odvodnění (Butler, Davies, 2004).

Srážkové vody je třeba chápat jako přírodní zdroj, který může být využit pro potřeby obyvatelstva. Dále je třeba zmírňovat důsledky urbanizace. Další rozvoj sídel je třeba plánovat s ohledem na udržitelnost a zavádět systémy hospodaření se srážkovými vodami, které přispívají k prevenci povodní a sucha, k protipovodňové ochraně, zajišťují odvodnění staveb a přispívají k ochraně vod obecně (Guo, 2017).

4.2.1 Specifika odvodnění v městském prostředí

Městské vodní hospodářství by mělo zohledňovat specifické podmínky urbanizovaného prostředí a plánovat s ohledem na dané klima, využití území, hydrologické podmínky, rozvoj a ekologické aspekty konkrétního území. Analýzy takových městských vodních cyklů vedly k rozvoji nových přístupů v hospodaření s vodou, které se následně vyvinuly na vodní hospodářství založené na ochraně vod, integrovaném přístupu k nakládání s vodami včetně odpadních a dešťových a jejich recyklaci (Marsalek et al., 2007).

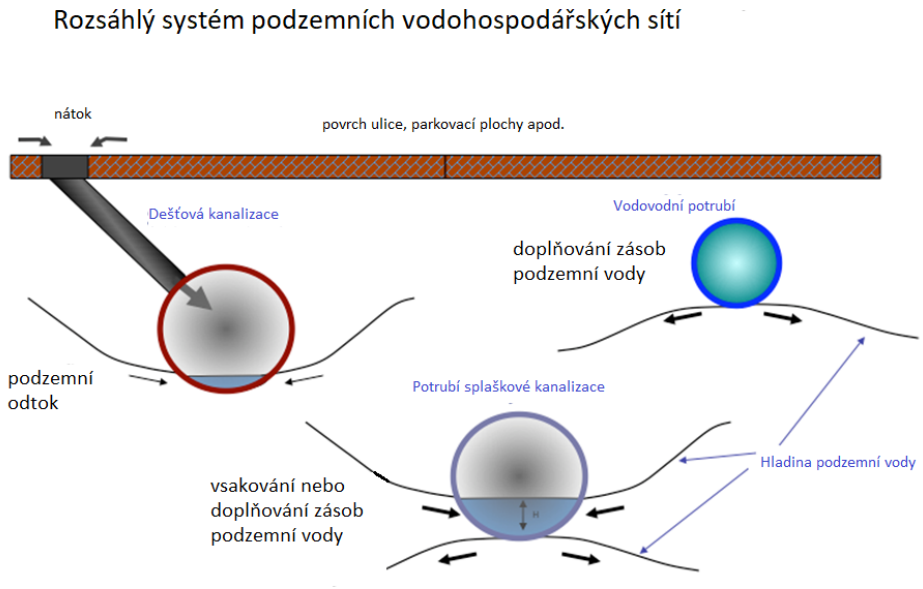
Do městského vodního cyklu vstupují 2 zdroje vody. Pitná voda dodávaná systémem vodovodů a voda srážková. Také v městském prostředí podléhá srážková voda hydrologickým dějům a část se jí odpařuje, část se zadržuje v prostředí, vsakuje se a odtéká po povrchu. Na rozdíl od vody v přirozeném prostředí jsou vody ve městě zatížené znečištěním v závislosti na konkrétních aktivitách a míře využití území. Zdrojem znečištění jsou především oxidy síry a dusíku, těžké kovy, pesticidy, zbytky saponátů, provozních kapalin z dopravních prostředků, látek používaných při údržbě budov, komunikací, půdních částic a výkalů domácích i volně žijících zvířat (Marsalek, Chocat, 2002).

4.2.2 Urban karst

Mapování toho, jak zasakování dešťových vod v městském prostředí ovlivňuje hydrologii povodí, je v začátcích. Existují studie, které říkají, že zasakování dešťových vod v rámci systémů HDV ovlivňuje základní odtok podzemních vod (Loperfido et al., 2014, Bhaskar et al., 2016), ale rovněž existují výzkumy, které k takovému závěru nevedly a podle nich zasakování dešťových vod na podzemní vody vliv nemá (Fanelli

et al. 2017). Vliv systémů hospodaření s dešťovými vodami, zejména jejich zasakování, je obtížně předvídatelný, protože v městské zástavbě je přirozená struktura horninového prostředí narušena existencí inženýrských sítí. Jsou to zejména vodovodní a kanalizační řady, systémy příkopů a drenáží, které mohou vytvářet preferenční cesty proudění podzemních vod a v nich obsažených znečišťujících látek (Sharp et al. 2013). Tento jev, také znázorněný na Obrázek 4, bývá označován jako „Urban karst“ (Kaushal, Belt, 2012). Propustnost tohoto prostředí pro srážkové vody, ale také pro vody unikající z netěsných potrubí, se může v závislosti na směru proudění významně lišit a někde může být nečekaně vysoká.

Městský kras se vyvíjí v čase tím, jak se budují nové struktury, zatímco ty původní, skryté pod zemí často zůstávají. Tak platí, že čím jsou města starší, tím rozsáhlejší a problematičtější systém podzemních struktur skrývají. Vznik těchto podzemních struktur lze zaznamenat s rozvojem měst. Nejstarší systémy „urban karst“ lze najít na středním východě (Garcia-Fresca, Sharp, 2005).



Obrázek 4: Typy podzemních inženýrských sítí tvořící tzv. urban karst. Dešťová kanalizace, vodovod a splašková kanalizace

Jde o městské podzemí, které obsahuje člověkem vybudované objekty, jako jsou základy a sklepy budov, systémy kanalizací a vodovodů, horkovody, tunely metra apod. To vše negativně ovlivňuje přirozený pohyb a kvalitu podzemních vod (Attard

et al., 2015). Podzemní technická infrastruktura v podloží vytváří volné nebo velmi dobře propustné struktury, kde se může voda hromadit a poté zrychleně odtékat. Tvoří jej např. sdělovací kabely, elektrická vedení, vodovodní, kanalizační potrubí atd., jež se při pokládání do výkopů obsypávají propustným materiálem, např. štěrkem či pískem. Díky takto vytvořeným cestám může docházet také k rychlejšímu transportu znečištění (Sharp et al., 2003). S tím souvisejícímu riziku kontaminace podzemních vod bude možné předcházet, pokud budeme umět zmapovat pohyb podzemních vod v těchto podmínkách (Bonneau et al., 2017).

4.2.3 Prostorové podmínky

Nejlepším řešením k omezení povrchového odtoku je zasakování do půdních vrstev přímo v místě dopadu srážek na zemský povrch. Pro navrhování vhodných opatření je třeba zvážit především podmínky v daném místě. Vždy záleží na konkrétním odvodňovaném místě. Velkými limity pro umístění vsakovacích zařízení jsou především sklon terénu, geologické podmínky, vzdálenosti od základů budov a inženýrských sítí a míra rizika znečištění podzemních vod. Zasakování tedy většinou není vhodným řešením pro hustou zástavbu zejména kvůli riziku narušení stability podloží (Guo, 2017).

Tam, kde prostředí umožňuje vsakování, lze budovat následující typy opatření: retenční a vsakovací nádrže s funkcí biotopu či bez, vsakovací příkopy a rýhy, vsakovací jámy či šachty, podzemní vsakovací objekty (z prefabrikovaných bloků), průlehy či propustné povrchy (Minnesota Pollution Control Agency, 2019).

Podzemní vsakovací objekty je vhodné použít pouze tam, kde je hladina podzemní vody dostatečně nízko, aby se zadržená voda mohla vsakovat do podloží v průběhu celého roku. Dno vsakovacího objektu by mělo být alespoň 1 m nad hladinou podzemní vody.

Vsakování neřeší jen problém samotného odvodnění, ale zároveň při něm dochází k procesům, které významně (z 60-85 %) snižují koncentraci znečišťujících látek obsažených ve srážkových vodách. Existují však plochy, jejichž odvodnění vsakováním by představovalo příliš velké riziko kontaminace podzemních vod, a kde lze vody vsakovat po předchozím předčištění, např. přes odlučovač lehkých kapalin (Butler, Davies, 2004).

4.2.4 Vsakování a kontaminace

V kontaminovaných půdách je vsakování obvykle problematické z hlediska dalšího možného šířené kontaminantu, pokud dojde vlivem vsakování k pohybu podzemních vod a následkem toho k mobilizaci znečišťujících látek (U.S. Environmental Protection Agency, 2013).
Lze ale učinit jistá opatření, aby vsakování srážkových vod nepředstavovalo riziko pro podzemní vody v místech s kontaminací, jako jsou např. bývalé průmyslové či zemědělské areály. Návrhu by mělo předcházet vyhodnocení rizik a vyluhovatelnosti kontaminantu. Opatření spočívá v zamezení kontaktu vsakované vody a kontaminovaného podloží. Řešením je např. umístění vsakovacího objektu pod kontaminované vrstvy, odtěžení kontaminované zeminy v bezprostřední blízkosti vsakovacího tělesa a jeho umístění na nekontaminovanou půdní vrstvu. Pro minimalizaci rizika lze kontaminovanou půdu izolovat geomembránou, přičemž je třeba vyloučit negativní působení kontaminantu na membránu (Woods et al., 2015).

4.2.5 Typy vsakovacích opatření v urbanizovaném prostředí a jejich využití

Jedná se o opatření, která brání zvýšenému odtoku z území a umožňují vsakování srážkových vod do podloží. Zároveň jsou vhodná pro instalaci přímo v místě nebo co nejblíže místu, kde srážky dopadají na zemský povrch. Nejlépe využitelná jsou tato opatření v nekontaminovaném území s propustným podložím. Všechny typy opatření vyžadují pravidelnou kontrolu, údržbu, případně čištění či výměnu filtračního materiálu. Jedná se nejčastěji o podzemní vsakovací objekty, propustné povrchy, průlehy, vsakovací rýhy a retenční nádrže (Hamill, 2011).

5. Podzemní vsakovací objekty.

Jedná se o hojně užívaná podzemní zařízení, která jsou zkonstruována z materiálů umožňujících retenci a infiltraci srážkových vod. Jednotlivě jsou využívána nejčastěji např. pro vsakování vody ze střech objektů, nebo se využívají celé systémy složené z těchto objektů, např. k odvodnění liniových staveb. Jejich použití je podmíněno

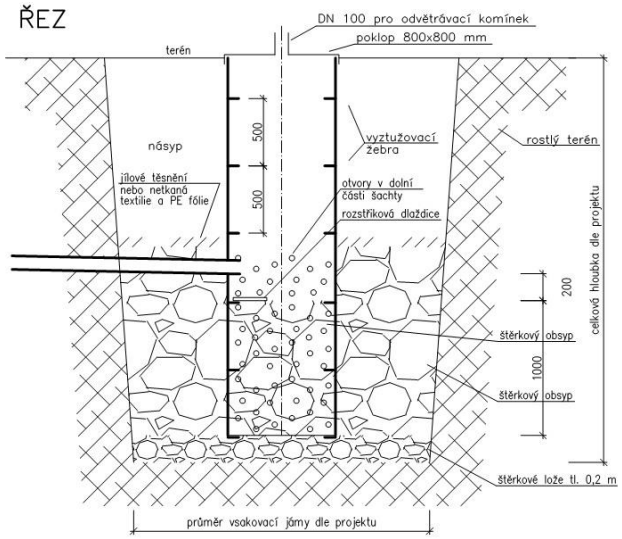
propustností podloží, výškou hladiny podzemní vody a zejména kvalitou vsakované vody. Podzemní vsakovací objekty efektivně odstraňují nerozpuštěné látky a např. bakterie, ale málo efektivní jsou v odstraňování rozpuštěných látek, např. živin, které se pak přirozeným pohybem podzemních vod dostávají i do vod povrchových (Shammas, Wang, 2011). Voda ze střech objektů může být odvedena přímo ke vsaku do podloží, zatímco vody z různých zpevněných a znečištěním zatížených povrchů by měly být před vsakem do podloží předčištěny (Hamill, 2011).

Podzemní vsakovací objekty mají podobu vsakovacích jímek tvořených perforovanými prefabrikáty z polyetylenu či betonu, které jsou obsypané drenážním materiálem, nebo jam vyplněných materiálem o dostatečné pórovitosti, kde minimálně 30 % z celkového objemu tvoří retenční prostor (Woods et al., 2015).

Náplně vsakovacích objektů by měly být od okolní půdy odděleny geotextilií, aby nedocházelo k jejich zanášení jemnými částicemi (Hamill, 2011).

Nejdůležitějším kritériem pro návrh podzemních vsakovacích objektů je míra infiltrace půdních vrstev. Nesmí být málo propustné (např. hlinité, jílovité půdy) ale ani příliš propustné (jako např. písek), aby docházelo ke zdržení vody a filtraci znečištění (Shammas, Wang, 2011). Vsakovací objekty by měly být umístěny minimálně 5 m od základů budov a dna objektů 1 m nad maximální hladinou podzemní vody (Woods et al., 2015, Hamill, 2011).

5.1 Vsakovací šachty z betonových nebo plastových prefabrikátů.



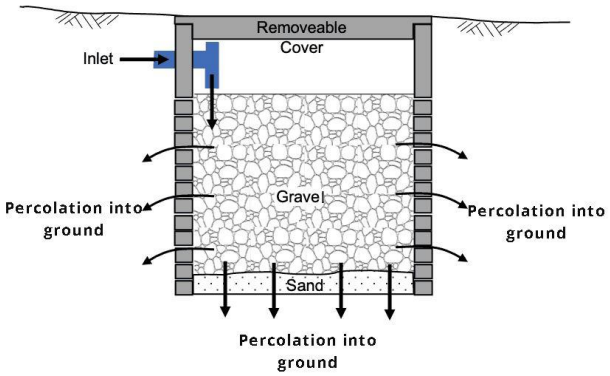
Obrázek 5: Vsakovací betonová šachta (Vodohospodářské služby RT, s.r.o.)

5.2 Vsakovací boxy a tunely

Jedná se o retenční a vsakovací podzemní objekty, ve kterých kamenivo nahrazují plastové boxy, jako na Obrázek 6 či tunely. Boxy mají podobu košů ve tvaru kvádrů a tunely jsou tvořeny plastovými oblouky bez dna, s perforovanými stěnami. Tyto modulární systémy sestavitelné do nízkých objektů umožňují zasakování vody v lokalitách s vyšší hladinou podzemní vody (Zeleňáková et al., 2020).

Obrázek 6: Vsakovací galerie z vsakovacích boxů (tzb-info.cz)

5.3 Vsakovací jímky (trativody)



Obrázek 7: Vsakovací jímka (trativod), civilrule.com

5.4 Vhodnost použití podzemních vsakovacích objektů

Na rozdíl od povrchových objektů, které za příznivých hydrogeologických podmínek nemají jiná než prostorová omezení, mají podzemní vsakovací objekty řadu nevýhod. Například by neměly být použity tam, kde dochází ke splavování půdních částic, dále v místech, kde by mohlo dojít k ohrožení základových struktur jiných objektů či stávajících drenážních systémů (Woods et al., 2015). Dále jsou limitující vlastnosti půdy. V podloží s homogenním prostředím s vysokou hydraulickou vodivostí není použití vsakovacích šachet bez dostatečného předčištění a bez doby zdržení vhodné. Proto je nezbytné znát úroveň možného znečištění srážkových vod, a především geologické a hydrogeologické poměry v místě. Tam, kde jsou srážkové vody znečištěné, by měl být součástí návrhu vsakovacích objektů vhodný způsob předčištění. Tím se sníží riziko kontaminace podzemních vod a půdy a také zpomalí proces kolmatace (Edwards et al., 2016), díky kterému se usnadní jeho následný provoz a údržba. Ztrátu funkčnosti nejčastěji způsobuje znečištění ropnými látkami a pevnými částicemi. Pro pravidelnou kontrolu funkčnosti se zařízení osazují revizními šachtami (Shammas, Wang, 2011).

Nevýhodou je také pravděpodobný pokles funkčnosti v dlouhodobém horizontu nebo při dlouhotrvajících období dešťů. Naopak výhodou těchto zařízení jsou malé prostorové nároky. Při vhodných geologických podmínkách se dají použít i v zastavěném území (Woods et al., 2015).

Pokud není cílem vodu zadržovat pro její využití, jsou vsakovací jímky naplněné hrubým kamenivem vhodným a ekonomicky nenáročným řešením odvodnění. Objekty naplněné kamenivem jsou lépe chráněny před kolapsem, povrch kameniva může být osídlen biofilmem, díky čemuž je voda v jímce čištěny. Vrstva jemného materiálu na dně objektu pomáhá k rovnoměrnému proudění (Eawag, 2010).

6. Povrchové vsakovací objekty

6.1 Vsakovací rýhy

Dalším opatřením používaným ke vsakování jsou vsakovací rýhy. Jsou to podzemní vsakovací objekty, které se nejčastěji budují podél komunikací. Protože jde o zařízení

náchylná k zanášení sedimentem, je třeba, aby do nich voda přitékala předčištěná např. zatravněným povrchem nebo přes filtrační pás (Hamill, 2011).

6.1.1 Vlastnosti vsakovacích rýh

Rýhy jsou lineární vsakovací objekty, výkopy o hloubce 1-2 m vyplněné kamenivem obaleným geotextilií (Woods et al., 2015). V pórovitém materiálu dochází k retenci vody, předtím, než se vsákne do půdních vrstev (Minnesota Pollution Control Agency, 2019). Rýhy mohou být mělčí, než jiná vsakovací zařízení a jsou využitelné i v méně propustných půdách. Vsakovaná voda je v nich distribuována po celé délce. Horní část objektu může být doplněna o drenážní trubku, která tuto distribuci v případě potřeby podpoří. Také do spodní části rýhy lze umístit drenážní trubku, čímž bude zajištěno účinnější odvedení vod a ochrana proti přetečení v případě větších než návrhových srážek. Vsakovací rýhy bývají tradičně vyplněny drceným kamenivem, ale pro zvýšení retenčního objemu lze kamenivo nahradit vsakovacími bloky. Protože bloky nejsou příliš účinné při odstraňování znečištění, je třeba je v případě jejich použití doplnit o filtrační vrstvu, vhodný je např. písek, který je účinný v odstraňování pevných částic, nebo humusová vrstva, která je lepší pro odstranění těžkých kovů či fosforu (Woods et al., 2015).

6.1.2 Vhodnost použití vsakovacích rýh

Jak již bylo uvedeno, jedná se o lineární objekty vhodné k umístění podél komunikací či po stranách jiných ploch s nepropustným povrchem. Jedná se o účinné opatření, jehož výhodou je jednoduchost návrhu i provedení (Hammil, 2011), schopnost filtrace znečištění, a také menší prostorové nároky, než mají například průlehy (Yu et al., 2013). Lze je použít také místo konvenčního způsobu odvodnění nebo jako jeho součást. Vsakovací rýhy lze použít v terénu do sklonu 2 % a to kvůli zachování plynulého pohybu vody filtračním materiálem a doby zdržení.
Vsakovací rýhy nejsou vhodné pro lokality s nestabilním podložím a půdami s malou mírou infiltrace. Jinak je lze použít např. tam, kde z praktických důvodů nejsou vhodné povrchové vegetační objekty (Woods et al., 2015).

Nevýhodou u těchto opatření je obtížně pozorovatelné zanášení a s tím spojené vyšší náklady na případnou obnovu filtračního materiálu. Dále pak i to, že v porovnání s prostorově výraznějšími opatřeními slouží pouze k odvodnění relativně malých ploch (Woods et al., 2007).
Vsakovací rýhy lze přizpůsobit i použití k odvodnění malých ploch v zástavbě a přizpůsobit tomu jejich provedení včetně např. ozelení jejich povrchu okrasnou zelení (Woods et al., 2015).

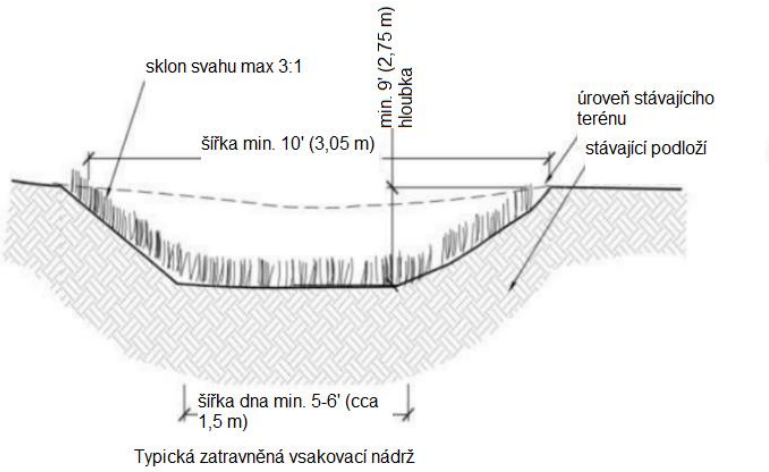
6.2 Bio-retenční opatření

Pod pojem bio-retenční opatření lze zahrnout vsakovací nádrže i dešťové zahrady či biotopy (Davis et al., 2006). Jsou navrhovány za účelem napodobení přirozených ekosystémů, jež jsou účinné v čištění srážkových vod. K tomu dochází díky adsorpci, filtraci, volatilizaci, rozkladu a iontové výměně (Dzurik et al., 2019).
Ty jsou efektivní v odstraňování fosforu a organického dusíku. Dle studie provedené v nádržích o hloubce 0,6 – 0,8 m, zaměřené na odstraňování znečištění, mohou bio-retenční opatření odstranit 70 – 80 % fosforu a 55 – 65 % organického a amoniakálního dusíku. K odebírání těchto živin rostlinami dochází především na jaře a na počátku léta, tedy při maximálním růstu. Poté by měly být rostliny posekány a z nádrže odstraněny, aby nedošlo k jejich odumírání, rozkladu a uvolnění živin zpět do biotopu. Procesem vsakování pak dochází k dalšímu odstranění znečištění (Davis et al., 2006).

6.2.1 Retenční vsakovací nádrže

Parametry nádrží by měly být takové, aby bylo zajištěno vyschnutí nádrže na alespoň 3 dny mezi jednotlivými srážkovými událostmi a aby byla obnovena infiltrační kapacita nádrže (Shammas, Wang, 2011). Požadovaná doba prázdnění by neměla přesáhnout 48 h. Kvůli prostorovým nárokům jsou tyto povrchové vsakovací objekty vhodné zejména pro rezidenční oblasti a komerční areály (Minnesota Pollution Control Agency, 2019). Vhodné jsou půdy písčito hlinité s mírou vsaku 6,9 mm/h a větší. Pro umožnění vsakovací funkce by mělo být dno nádrže alespoň 0,6 – 1.2 m nad hladinou podzemní vody (Shammas, Wang, 2011).

Vsakovací nádrže mají podobu mělkých terénních depresí, ve kterých je zadržována voda, než se vsákne do podloží. Jedná se o opatření náročnější na prostor, které vyžaduje rovný terén (Hamill, 2011). Původ vsakovacích nádrží může být přírodní s využitím přirozené terénní deprese, nebo mohou být umělé, a to buď hloubené nebo ohrázované (Minnesota Pollution Control Agency, 2019). Díky určité době zdržení vody a následnému procesu infiltrace dochází v těchto nádržích k relativně efektivnímu odstraňování znečištění. Vzhledem k tomu, že se většinou jedná o opatření, u kterých se počítá se vsakem veškerých přitékajících vod, je třeba při jejich navrhování provádět vsakovací zkoušky, aby byly ověřeny předpokládané koeficienty vsaku (Shammas, Wang, 2011). Vsakovací nádrže mohou být součástí ploch zeleně, protože se navrhují i jako suché, a zatopené bývají jen v případě vydatnějších srážek (Woods et al., 2015). Při vyschnutí dojde k obnovení čistící schopnosti.



Obrázek 8: Zatravněná vsakovací nádrž (nagsheadnc.gov)

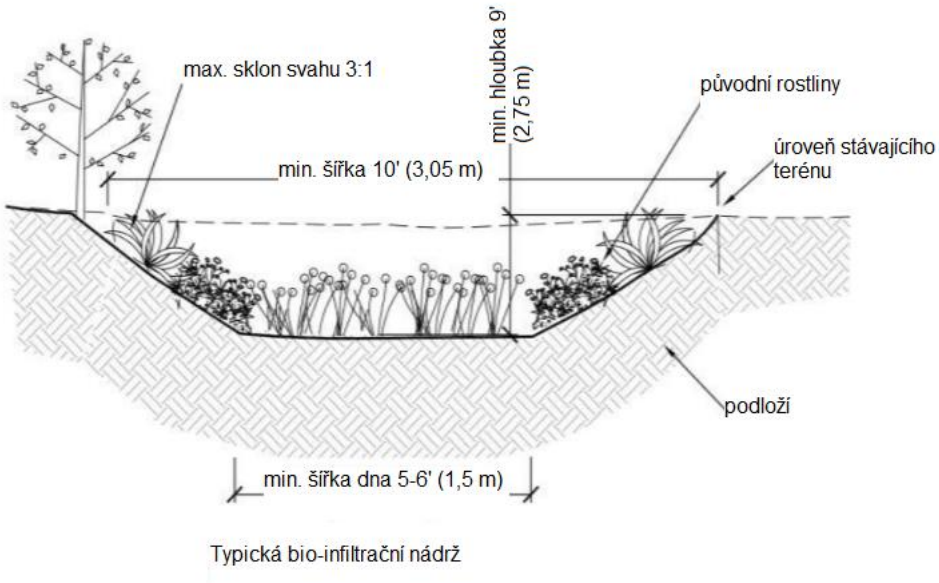
6.2.2 Biotopy a dešťové zahrady

Pro vsakování vody z menších ploch a střech menších objektů, většinou soukromých, lze vytvářet menší zařízení přizpůsobená prostorovým podmínkám na pozemku a estetickým požadavkům, tzv. dešťových zahrad (Woods et al., 2015).

Dešťové zahrady a biotopy jsou příkladem tzv. modrozelené infrastruktury, jejíž princip spočívá v přístupu založeném na přirozených procesech a propojení

suchozemských a vodních ekosystémů. Dna dešťových zahrad jsou osázena rostlinami, které se musí přizpůsobit jak kolísající hladině, tak občasné stojaté vodě. Horní část svahů je třeba osázet rostlinami, které tolerují sucho (Liao et al., 2017). Základní parametry jsou podobné jako u vsakovacích nádrží *(nagsheadnc.gov)*.

Vegetace také chrání půdu před erozí způsobenou dopadem dešťových kapek, prouděním vody a větrem. Snižuje množství vody, která přímo dopadá na povrch tím, že ji zachycuje na listech a stoncích. Snižuje rychlost odtoku a zachycuje sediment. Vegetace působí na půdní mikroklima. Snižuje výkyvy teplot a vlhkosti v půdním prostředí a tím i pravděpodobnost degradace konstrukčních vrstev nádrží (Minnesota Pollution Control Agency, 2000).



Obrázek 9: Bio-retenční vsakovací nádrž (nagsheadnc.gov)

6.2.3 Vhodnost použití bio-retenčních opatření

Vsakovací nádrže jsou opatření s většími prostorovými nároky, a tudíž méně vhodná pro stávající zastavěné lokality (Shammas, Wang, 2011). Jedná se ale o vhodné opatření pro rozvojové lokality s půdami umožňujícími vsakování (Shammas, Wang, 2011). Vzhledem k tomu, že jde o mělké objekty, je jejich použití možné i v místech s relativně vysokou hladinou podzemní vody (Woods et al., 2015).

Vegetace může pomoci udržet propustnost systému, a to díky kořenům pronikajícím pod povrch do filtračních vrstev. Zajišťují jejich větší mechanickou odolnost a vytváří cesty pro vtok vody. Vegetační pokryv nebo vrstva mulče snižují degradaci systému, ke které může dojít jeho zhutněním či sesedáním (VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., 2018).

6.3 Průlehy

Průlehy jsou nejčastěji dlouhé, mělké vegetací pokryté terénní deprese, které jsou budovány za účelem zpomalení odtoku. Obvykle se budují podél komunikací namísto trubního odvodnění. Podporují evapotranspiraci, infiltraci, přispívají ke snížení odtoku z území a zlepšují kvalitu vody (Hamill, 2011). Díky vegetaci dochází v průlezích k filtraci sedimentů a těžkých kovů a díky infiltraci také k odstraňování bakterií (Shammas, Wang, 2011). Průlehy jsou nejčastěji zatravněné a mají pravidelný tvar. Ale mohou mít také podobu přírodě blízkou či okrasnou. Mohou být osety okrasnými travami a osázeny zelení (Virginia Department of Conservation and Recreation, 2011). Kromě veřejných prostranství a komunikací se používají k odvodnění nepropustných povrchů ploch i v průmyslových lokalitách, protože forma otevřeného kanálu umožňuje jednoduchou kontrolu a v případě potřeby snadný přístup a odstranění znečištění dříve, než dojde ke kontaminaci podzemních vod nebo povrchových recipientů. Jedná se o opatření, které má uplatnění i ve volné krajině (Woods et al., 2015). Délka průlehu závisí na odvodňované ploše a ta by neměla být příliš velká, aby nedocházelo ke zvýšenému a rychlejšímu odtoku, který by způsoboval erozi. Voda se do průlehu přivádí většinou přirozeným spádem po povrchu (Virginia Department of Conservation and Recreation, 2011). Infiltrační a filtrační funkci podporuje hustá vegetace, případně instalace příčných hrázek, které také slouží ke zdržení odtoku a podpoře vsaku (Woods et al., 2015).

6.3.1 Vlastnosti průlehů

Návrhy konkrétních opatření vždy vychází z podmínek dané lokality, existují pro ně ale určitá kritéria a doporučené parametry. V příčném řezu mají průlehy zpravidla lichoběžníkový nebo parabolický tvar. Pro zajištění rozptýleného a pomalého nátoku

vody jsou svahy průlehů mírné, neměly by přesáhnout sklon 1:3, doporučené jsou svahy pozvolnější, do sklonu 1:4. Dno průlehu je 0,5 – 2 m široké a hloubka průlehu se pohybuje mezi 400 – 600 mm. Pro průlehy s drenážní vrstvou nebo zamokřené průlehy není minimální sklon určen. Konkrétní délka bude vždy vycházet z limitů a hydraulických parametrů lokality. Podélný sklon průlehů se pohybuje v rozmezí 0,5 – 6 %. Od sklonu 3% výše je vhodné průleh budovat s příčnými hrázkami za účelem zkrácení délky svahu a snížení účinků eroze. V případě malého sklonu do 1,5 % je třeba podpořit odtok použitím drenáže nebo využít daných podmínek k vytvoření mokrého průlehu, kde je zamokření žádoucí (Woods et al., 2015). Hrázky v průlezích mohou mít podobu kamenných záhozů, zemních hrází, případně mohou být navrženy jako bariéry ze dřeva či z betonu. Kamenné hrázky jsou propustné a nejsou tedy vhodné do průlehů, pokud v nich chceme podpořit vsakovací funkci. Zemní hrázky se budují z jílovitých půd s nízkou propustností. Protože jsou náchylné k erozi, musí být jejich povrch stabilizován zatravněním. Dřevěné hrázky se navrhují z přírodního nebo tlakově impregnovaného dřeva a jejich návodní i povodní strana bývá doplněna o kamenný zához, který slouží jako prevence proti erozi dna průlehu. V místech, kde se předpokládá zrychlený odtok, který by mohl ohrozit stabilitu hrázek, jsou nejvhodnějším řešením hrázky betonové. Stejně jako u dřevěných je vhodné je doplnit o kamenný zához pro snížení erozních účinků nad i pod hrázkou (Minnesota Pollution Control Agency, 2019). Jako alternativu k uvedeným materiálům lze použít např. také gabiony nebo např. pytle plněné štěrkem či pískem (Woods et al., 2015).

Podle podmínek v daném místě se uplatňují tři základní typy průlehů. Průleh sloužící především k odvádění srážkových vod jako součást odvodňovacího systému, např. dešťové kanalizace, a v případě propustného podloží umožňující vsakování. Dalším typem je suchý průleh s filtračním ložem a drenážní vrstvou, který kromě odvádění srážkových vod zajišťuje i jejich retenci a předčištění. Posledním typem je mokrý průleh v podobě umělého mokřadu. U tohoto typu je na rozdíl od suchého průlehu infiltrace srážkových vod nežádoucí, protože cílem je vytvoření umělého mokřadu s odpovídající vegetací vyžadující nasycenou půdu (Woods et al., 2015).

6.3.2 Vhodnost použití průlehů

Limitující pro použití tohoto způsobu odvodnění jsou prostorové nároky, zejména pokud jde o stávající zástavbu (Shammas, Wang, 2011). Budování průlehů může ale kolidovat také se vzrostlými stromy či navrhovanou výsadbou nebo s inženýrskými sítěmi (Woods et al., 2015). Pokud to tedy nevylučují poměry v daném místě a lze průlehy vybudovat, jsou zatravněné průlehy vhodným řešením pro odvádění srážkových vod zejména z komunikací, včetně dálnic, protože zlepšují kvalitu těchto vod. Jejich použitím se daří odstraňovat znečišťující látky. Ačkoliv průlehy mohou být doplněny o filtrační pásy a hrázky, které zpomalují odtok a podporují usazovaní splavenin a vsakování, jedná se spíše o přidanou hodnotu. Průlehy samy o sobě představují účinný mechanismus k odstranění znečištění z prvotního splachu s vysokou koncentrací polutantů a vliv filtračních pásů či hrázek je ve srovnání s funkcí samotných průlehů zanedbatelný (Stagge et al., 2012). Studií provedenou v rakouském Tyrolsku bylo ověřeno, že průlehy jsou funkčním řešením také pro zimní období. Vzhledem k tomu, že vsakovací zařízení jsou navrhována na základě dat srážkových úhrnů, které zahrnují přívalové srážky běžné v letním období a jsou z bezpečnostních důvodů předimenzované, kompenzuje se tím jejich menší hydraulická účinnost kvůli většímu nasycení půdy v zimním období (Fach et al., 2010). Průlehy lze využít pro umístění shrnutého sněhu z komunikací a parkovišť a k předčištění vody z tajícího sněhu. Pokud jsou odvodňované plochy v zimě soleny, je vhodné průlehy při těchto plochách osít druhy trav odolnými vůči soli. Drenážní trubky by měly být umístěny v nezámrzné hloubce (Minnesota Pollution Control Agency, 2019).

6.4 Propustné zpevněné povrchy

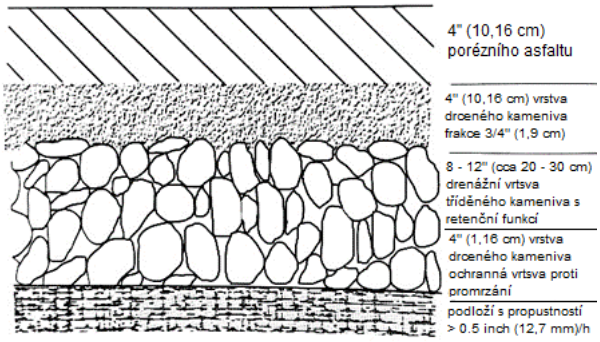
Jedním z často používaných opatření k vsakování srážkových vod v zastavěném území jsou propustné zpevněné povrchy. Jde o povrchy, které tvoří komunikace a veřejná prostranství, umožňují pohyb automobilové dopravy i pěších a zároveň umožňují vsakování srážkových vod do podloží (Shammas, Wang, 2011). Podílí se tak na hydrologických a teplotních poměrech (Sansalone et. al., 2011). Povrch těchto systémů tvoří především různé druhy dlažby, propustný asfalt či beton. V případě

nových staveb, ale i rekonstrukcí stávajících, nahrazují propustné povrchy ve prospěch hospodaření s dešťovými vodami konvenční povrchy. Propustné povrchy z asfaltu a betonu se těm konvenčním do velké míry podobají, rozdíl je pouze v tom, že neobsahují jemný materiál, který zaplňuje mezery a umožní vodě protéci touto vrstvou. Součástí systému propustných povrchů je drenážní vrstva tvořená tříděným drceným kamenivem, které v mezerách kameniva umožňuje vodu zadržovat (Hein, 2014).

Propustné povrchy plní také funkci filtrační (Butler, Davies 2004), s čímž souvisí to, že dochází přirozeně k jejich postupnému zanášení jemnými částicemi (Sansalone et al. 2011). Ty pochází z různých zdrojů. Jsou to například: pevné částice ze vzdušného spadu, z opotřebení pneumatik a výfukových plynů, jemné částice vznikající třením povrchu při pohybu dopravních prostředků. Propustnost je snižována také kolapsy dutin v důsledku zatížení dopravou. Ke zhoršení infiltračních vlastností dochází dále působením mrazu a úniky olejů, které mohou póry přímo ucpat nebo způsobit jejich vodoodpudivost (Kumar et al., 2015). Udržitelnost systémů s propustnými povrchy a zachování jejich funkcí spočívá ve znalosti procesů infiltrace, kolmatace a vhodné údržby (Sansalone et al., 2011).

6.4.1 Vlastnosti propustných zpevněných povrchů

Systém lze rozdělit dle způsobu odvádění vsakovaných srážkových vod z podkladních vrstev na tři základní typy. Pro všechny je společné, že propustným povrchem se srážkové vody vsáknou do podkladních vrstev, kde dochází k jejich zadržení, než jsou dále odvedeny. V prvním případě za ideálních vsakovacích poměrů dochází k vsakování přímo do podloží v daném místě. Jde o způsob plně infiltrační. Další možností je systém částečně infiltrační. Zde jsou podkladní vrstvy částečně odvodněny drenáží, čímž se vytváří prostor pro vsak následných srážkových vod a zároveň se tak zamezí nahromadění vody, které by mohlo ohrozit stabilitu podloží. V případě třetího typu nedochází ke vsaku vod do podloží v daném místě. Systém vrstev umožňujících plošný vsak je od podloží oddělen nepropustnou fólií a používá se tam, kde nejsou vhodné podmínky pro vsakování, např. kvůli geologickým poměrům, nebo z důvodu potřeby zadržení srážkové vody. Dále např. v místech kontaminovaných, kde by vsak a pohyb podzemní vody způsoboval šíření znečišťujících látek (Woods et al., 2015).



Obrázek 10: Profil propustného systému s povrchem z porézního asfaltu, (Zevenbergen, 2011)

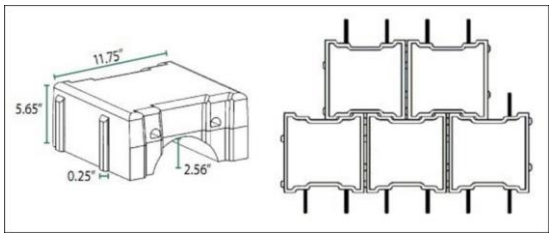
Propustný beton je tvořen směsí cementu, kameniva a vody. Oproti konvenčnímu betonu je v něm malý podíl písku nebo neobsahuje žádný, čímž je dosaženo pórovitosti. Oproti asfaltu je světlejší a odráží sluneční záření, což se může projevit velkým rozdílem teplot (např. v Arizoně naměřený rozdíl téměř 17 °C) mezi těmito druhy povrchu (Pazwash, 2016).

Propustný asfalt vzniká podobně jako propustný beton vynecháním jemných částic použitého kameniva. Asfaltová vrstva se pokládá na kamennou podkladovou vrstvu, poté se lehce uválcuje. K zanášení pórů propustných povrchů dochází jak v povrchové vrstvě, tak ve spodní částí drenážní či podkladové vrstvy. Kvůli zajištění stability podkladových vrstev se využívá drceného ostrohranného kameniva, které i přestože je prané, obsahuje určité množství jemného sedimentu. Spolu s částicemi splavenými dešťovou vodou přispívá k zanášení dna podkladové vrstvy (Lee, et al., 215).

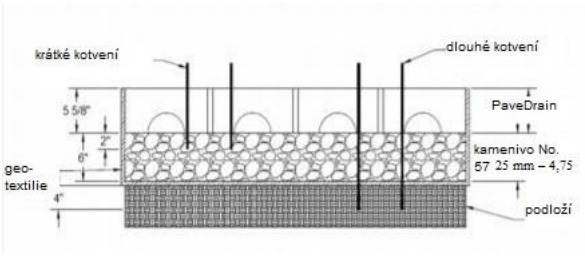
6.4.2 Výhody a vhodnost použití propustných povrchů

Velkou předností propustných povrchů je, že mohou být použity všude tam, kde nebude docházet k zanášení splavenými sedimenty. Kromě uvedené náchylnosti k zanášení sedimenty, která způsobuje rychlou ztrátu jejich funkčnosti, lze uvézt již jen výhody použití propustných povrchů. Patří mezi ně: účinné odstraňování znečištění, možnost použití plošného vsaku tam, kde jiné systémy vsakování mohou narušit stabilitu podloží, nenáročná údržba, eliminace technických prvků jako jsou vpusti, kanalizační poklopy apod., dále minimalizace vzniku louží, náledí a možnost jejich dodatečného použití v rámci rekonstrukcí a při výměně povrchů ve stávající zástavbě (Woods et al., 2015).

Vedle tradiční betonové dlažby pokládané do vrstvy kameniva existují systémy, které nabízejí retenční prostor, který umožňuje odvést z povrchu a akumulovat větší množství vody, která se poté může postupně vsakovat. Jedná se např. o systém PaveDrain, který je znázorněn na Obrázek 11 a Obrázek 12.



Obrázek 11: Dlažba s retenčním prostorem PaveDrain, detail dlaždice



Obrázek 12: Dlažba s retenčním prostorem PaveDrain, profil systému s dlažbou PaveDrain

Vlastnosti propustných zpevněných povrchů byly ověřeny např. během dvouletého výzkumu zaměřeného na hodnocení hydraulického a teplotního výkonu a kvality infiltrované vody. Testovány byly povrchy s následující konstrukcí: propustný asfalt o tloušťce 762 mm na vrstvě kameniva No. 57 (frakce) o mocnosti 457,2 mm, propustný beton o tloušťce vrstvy 152,4 mm na vrstvě kameniva o mocnosti 38,1 cm a betonová dlažba o výšce 89 mm na vrstvě kameniva No. 9 (frakce 9,5 mm – 1,3 mm) o mocnosti 508 mm, kameniva No. 57 o výšce vrstvy 101,6 mm a kameniva No. 2 (frakce 63,5 mm – 12,7 mm) o mocnosti 304,8 mm (kameniva podle klasifikace The American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO). Ve všech případech na nezhutněném podloží, od kterého jsou podkladové vrstvy odděleny nepropustnou izolační geomembránou EPDM, aby se zamezilo vsakování do podloží. Místo toho je voda odváděna do monitorovací komory ke sběru vzorků. Podkladové vrstvy testovaných ploch byly vybaveny teplotními čidly. Testovací plocha byla zatížena větším množstvím srážkových vod a sedimentu, než je běžné. Pro účely testů

byla na testovací plochu odvedena z přibližně 10krát větší plochy, než je výměra plochy testovací. I přes nepříznivý poměr odvodňované a odvodňovací plochy, byla testovací plocha zpočátku schopna vsakovat většinu odtoku. Míra infiltrace během několika měsíců klesala kvůli postupnému zanášení sedimentem. Nejrychleji ze třech testovaných povrchů vsakoval propustný asfalt (přes 2500 mm/h), schopnost si také nejdéle udržel (20 měsíců po realizaci). Přes nejnižší pórovitost zpočátku rychle vsakoval i povrch z betonové dlažby. U něj ale došlo rychleji k zanešení. Propustný beton vsakoval pouze ¼ odtoku, což bylo způsobeno členitějším povrchem a rychlejší kolmatací ve snížených místech. Klesající míra infiltrace ale znamená větší efektivitu v odstraňování znečištění. Bylo také zjištěno, že nejvíce sedimentu zůstává zachyceno ve svrchní části, do 2,5 cm pod povrchem. Znamená to, že pomocí efektivní údržby (použití tlakové čištění a vysávání povrchu) by bylo možné obnovovat vlastnosti propustných povrchů. Zejména na podzim a mezi posledním táním sněhu a prvními jarním deštěm, kdy dochází ke splachu nahromaděného znečištění a nejrychlejšímu zanášení pórů (Selbig, 2018).

Kromě míry infiltrace a schopnosti filtrovat znečištění byla měřena také teplota povrchů a podkladních vrstev. Bylo zjištěno, že díky pod povrchem nakumulovanému teplu zůstávají volné póry, které podporují vsakování tajícího sněhu a ledu. Tento jev může snížit potřebu prostředků proti namrzání a usnadnit zimní údržbu, protože se voda z roztátého sněhu bude vsakovat a nebude tak na povrchu znovu namrzat a tvořit náledí (Selbig, 2018). Propustný asfalt a beton umožní také lepší schůdnost chodníků a stezek za sněhu a deště (Department of Environmental Protection. (2006).

Cílem jiné studie (Al-Rubaei et al., 2015) bylo porovnání dlouhodobého hydraulického výkonu vsakovacích systémů. Cílem bylo určit faktory, které mají vliv na jejich funkčnost. Byly sledovány systémy různého stáří budované mezi roky 1998 až 2012. Jednalo se zpravidla o propustné zpevněné povrchy, ale také o dva zatravněné průlehy. Sedm sledovaných povrchů bylo budováno z betonové zatravňovací dlažby (CGP) a 3 z betonové zámkové dlažby (ICP). První zpevněné povrchy CGP byly prosypány písčitým substrátem a zatravněny a v posledních 3 budovaných byl zatravněný substrát nahrazen makadamem. Zámková dlažba měla široké spáry vyplněné makadamem o zrnitosti 4-8 mm, potažmo 0-8 mm. Systémy byly porovnány také s referenčním místem, které dosud nebylo srážkovým vodám vystaveno. V porovnání s referenčním místem byla u všech sledovaných zaznamenána snížená infiltrační kapacita. Z porovnání stávajících systémů vyšly nejlépe zatravněné

vegetační dlaždice (CGP). Nejhůře vsakovaly zatravněné průlehy, které byly úplně zaneseny, a to v důsledku nežádoucího zhutnění. Přes 10 let sloužící povrchy ze zatravněnými betonovými dlaždicemi (CGP) byly stále schopné infiltrovat intenzivní návrhové srážky, z čehož lze usuzovat, že v udržitelnosti propustných povrchů z betonové a betonové zatravňovací dlažby hraje důležitou roli vegetace, která podporuje infiltrační kapacitu (Al-Rubaei et al., 2015).

6.5 Další příklady infiltračních opatření

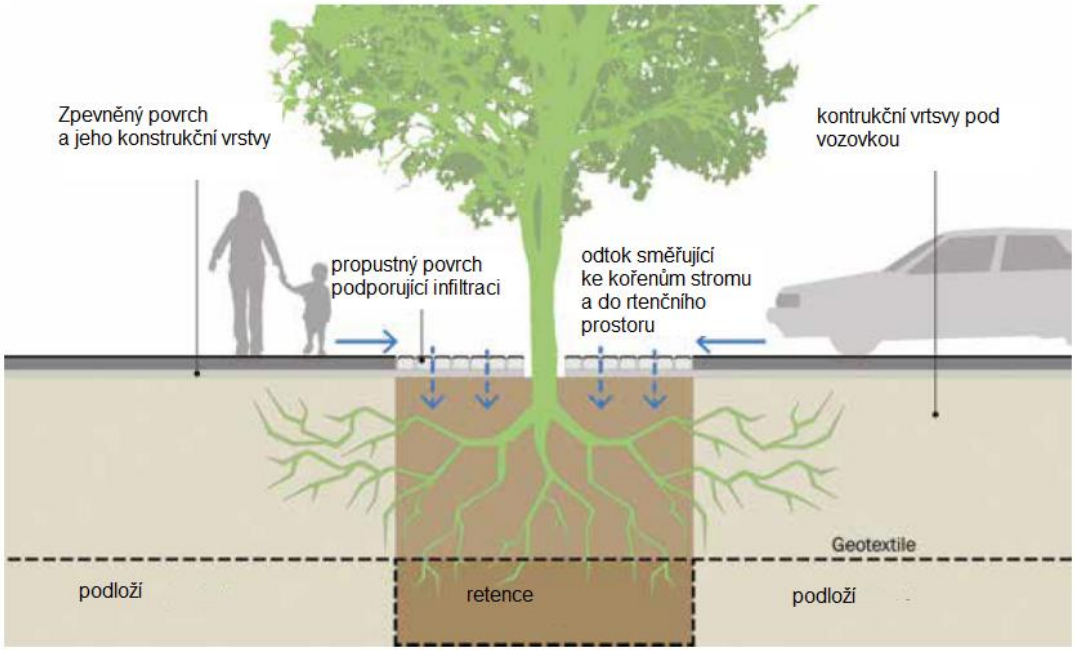
6.5.1 Filtrační pásy

Pro předčištění, rozptýlení a zpomalení povrchového odtoku lze v decentralizovaném způsobu odvodnění použít tzv. filtračních pásů. Jedná se o liniový vegetační prvek v podobě travnatého nebo jinou vegetací osázeného pásu, podobného průlehu, přes který voda protéká např. do vsakovacích rýh, retenčních nádrží apod. (Shammas, 2011). Nejsou určené k zadržení většího objemu srážkových vod, ale mohou přispět k zadržování a zasakování vod z menších srážek (Woods et al., 2015). Jejich hlavní funkcí je filtrace povrchového odtoku. Účinně zachycují zejména sedimenty, organické částice a těžké kovy (Hamill, 2011).

6.5.2 Prostory pro kořenový systém stromů

Pro výsadbu stromů nebo jiné vzrostlé zeleně mimo zelené plochy měst je vhodné pod povrchem vybudovat prostory pro růst kořenového systému stromů, jako je znázorněno na Obrázek 13. Kromě jámy vyplněného vhodným kamenivem a substrátem lze stromy vysadit do boxů, které vymezí kořenům prostor. Tento prostor se plní substrátem dle daných podmínek a druhu dřevin. Substrát by měl být homogenní v celém profilu, s obsahem humusu 5 % a propustností cca 100-300 mm/h. Součástí může být drenáž pro odvedení přebytečné vody (Woods et al., 2015). Díky speciálním substrátům a vsakování dochází i zde k předčištění infiltrovaných vod. Stromy umožňují přirozený odpar a přebytečná voda se vsakuje do půdních vrstev (Minnesota Pollution Control Agency, 2019).

Cílem těchto opatření je, v jinak nevhodných půdních podmínkách, vytvořit prostor, který stromům poskytuje podmínky pro zdravý růst a zároveň chrání okolní inženýrské sítě. Je třeba zajistit zejména prostor umožňující pohyb vzduchu, vody a prostor pro růst kořenů. Součástí mohou být speciální prvky, které kořenový bal stabilizují nebo kořeny stromu nasměrují do větší hloubky, aby později nenarušovaly povrch v okolí stromu a co nejvíce prorostly instalovanou strukturou (GreenBlue Urban, 2016).



Obrázek 13: Uliční profil se znázorněným prostorem pro kořenový systém stromů, (Woods et al., 2015)

Zlepšení podmínek pro růst stromů lze dosáhnout propojením těchto systémů s vhodným způsobem odvodnění a výběrem vhodného substrátu. Substrát zpravidla tvoří štěrk doplněný o rašelinu, písek, jíl či např. lávu. Velkým přínosem se ukázalo být přidávání biocharu (Embrén, 2016).

7. Materiály v infiltračních objektech

7.1 Kameniva

Různé druhy kameniva jsou materiály běžně používané ve stavebnictví jako podkladové vrstvy a jako základ pro výrobu betonu a asfaltových povrchů. V betonu

tvoří 65 – 85 % hmoty a u asfaltu 92 – 96 %. Jde o směsi písku, štěrku, drceného kamene či jiných materiálů minerálního složení. Existují přírodní a umělá kameniva. Mezi přírodní patří drcený kámen, písek, štěrk a mezi umělé např. vysokopecní struska, keramické agregáty apod. Důležitým parametrem, který ovlivňuje vlastnosti a využití kameniva je zrnitost. Velikost a podíl částic různé velikosti ovlivňuje pevnost, schopnost odvádět vodu a odolnost vůči promrzání (Derucher, Heins, 1981). Materiály jsou definovány minimálním a maximálním rozměrem v něm obsažených částic a propustností (podílem jemných částic < 0,063 mm) (Woods et al., 2015). Pro odvádění vody jsou nejvhodnější kameniva bez obsahu jemných částic. Ta jsou také odolná vůči promrzání (Derucher, Heins, 1981).

Kameniva jemnější zrnitosti se používají jako výplň v systémech zpevněných propustných povrchů. Výběr vhodného materiálu k vyplnění spár dlažby hraje důležitou roli. Materiál s obsahem jemných částic může způsobit rychlé zanesení povrchu a omezení nebo ztrátu funkčnosti. Pro systémy z betonové zatravňovací dlažby je vhodný materiál o zrnitosti 4-8 mm (Al-Rubaei, 2015), pro vyplnění spár betonové propustné dlažby pak materiál o zrnitosti 2-5 mm (Borgwardt, 2006).

Kamenivo pro použití v drenážní vrstvě musí být dostatečně propustné a porézní. Podíl volného prostoru mezi částicemi je zpravidla alespoň 30 %, 1 m^3 tedy pojme přibližně 300 l vody. Pro použití v drenážních vrstvách ploch s dopravním zatížením musí být materiál pevný a odolný vůči rozdrcení na malé části, ostrohranný, aby byl stabilní. Běžně užívaná jsou hrubá kameniva o zrnitosti 4/20 a 4/40 (dle BS 7533-13:2009) a pokladové kamenivo type 3, široce požívané kamenivo zrnitosti 0-40 mm s redukovaným obsahem jemných částic (dle klasifikace Specifications for Highway Works (SHW) Clause 805). Použít lze i jiné matriály, pokud jsou dostupnější, a mají požadované vlastnosti, včetně materiálů recyklovaných (Woods et al., 2015). Drenážní vrstva by měla být takové tloušťky, aby její propustnost byla větší než propustnost povrchu a filtračních vrstev, tak aby nedošlo k jejich nasycení a byla zachována jejich funkčnost. Drenážní vrstvy lze doplnit o drenážní trubky, případně zajistit větší retenční objem pomocí bloků nebo jiných zařízení (Woods et al., 2015).

7.2 Recykláty

Ve stavebnictví tradiční suroviny získávané z přírodních zdrojů (písek, štěrk, drcený kámen) lze nahradit i materiály, které lze získat z odpadů a tím podpořit udržitelné využití těchto materiálu (Andela, Sorge, 2017). Recykláty lze použít pouze v souladu s předpisy upravující využívání odpadů. Zásadní podmínkou je, že se z nich nesmí do prostředí uvolňovat škodlivé látky. Nejběžněji používaným recyklátem je drcený beton (Woods et al., 2015). Drcením odpadního skla lze získat drenážní materiál. Náklady na jeho získání jsou srovnatelné nebo nižší než u tradičního kameniva. Skleněný recyklát má i další výhody. Jsou jimi odolnost vůči dopravnímu zatížení a dobré drenážní vlastnosti. Lze ho použít samostatně nebo jako složku kameniva (Andela, Sorge, 2017).

Skleněný recyklát neabsorbuje vodu, je dobře propustný a inertní, díky čemuž jej lze využít ve větší škále podmínek prostředí. Jako drenážní materiál může být vhodnější než písek a štěrk (Terney, 2003). Tyto přírodní materiály lze skleněným recyklátem nahradit např. také při pokládání inženýrských sítí (Andela, Sorge, 2017). Skleněný recyklát má přednosti i vůči betonovému recyklátu, jenž je využíván zejména jako materiál do základů a podkladových vrstev. Betonový recyklát je lehčí než běžné kamenivo, absorbuje více vody a je méně odolný vůči obrušování, kvůli čemuž roste podíl jemných částic způsobující jak sníženou propustnost samotného kameniva, tak ochranných getextilií (Ceylan H. et al., 2014). Tyto vlastnosti vedou k obavám, že betonový recyklát není vhodným drenážním materiálem. Toto však částečně vyvrací práce Z. Behringa, ve které byl betonový recyklát podroben testování uvedených vlastností především za účelem použití ve vsakovacích rýhách, které jsou velice častým odvodňovacím opatřením při stavbě silnic. Zatímco jako podkladová vrstva se tento materiál používá, jeho použití v drenážích je v mnoha státech USA zakázané. Výzkum potvrdil nadměrnou náchylnost k obrušování a vzniku jemných částic, a to již při transportu a manipulaci s recyklátem. Nárůst množství těchto částic dále vede k většímu srážení uhličitanu vápenatého, který způsobuje nefunkčnost ochranných geotextilií. Současně byly zkoumány způsoby úpravy materiálu, které by tyto nechtěné vlastnosti recyklátu eliminovaly. Z testování vyšlo najevo, že funkčním drenážním materiálem může za určitých podmínek (proprání materiálu) recyklát o zrnitosti 4,75 mm (Behring, 2013).

7.3 Biochar

Biochar, česky též biouhel, je materiál s vysokým obsahem uhlíku a minerálů vyrobený tepelným rozkladem z organické hmoty (rostlinné biomasy, hnoje apod.) při omezeném přístupu kyslíku (EBC, 2012).

Biochar je odolný vůči stlačení a zhutnění. Ve stockholmském projektu (Embrén B., 2016) byl použit materiál složený z kameniva frakce 32 – 63 mm a biocharu s pórovitostí cca 40%. Zrnitost biocharu byla 1-10mm a doporučený objem biocharu pro jeden strom 2,25 m^3. Obecné z projektu vyplývající doporučení pro složení substrátu pro keře a trvalkové záhony je směs štěrku o zrnitosti 2-6 mm a biocharu v poměru 3:1. Pro výsadbu stromů postačí směs štěrku o zrnitosti 32 – 63 mm a 15% podílem biocharu. Použit byl materiál certifikovaný European Biochar Certificate (EBC) (Embrén, 2016). Biocharem lze v objektech HDV zcela nebo částečně nahradit organický materiál. Pokud je použit ve větším množství, může docházet k vyššímu vyluhování živin. Pro tyto účely je ale vhodnější použít biochar vyrobený z tvrdého dřeva, u kterého toto riziko není. Dalším rizikem, kterému je třeba předcházet je vyluhování polycyklických aromatických uhlovodíků, které může biochar obsahovat, pokud neprošel důkladnou pyrolýzou. Dále je třeba brát v úvahu, že použití biocharu může měnit pH substrátu, což může mít vliv na výběr vhodných rostlinných druhů V souvislosti s relativně krátkou dobou, kdy se biochar v objektech pro HDV používá, je třeba tato rizika brát v potaz a monitorovat je (Hirschman Water & Environment, LLC Center for Watershed Protection, Inc., 2018).

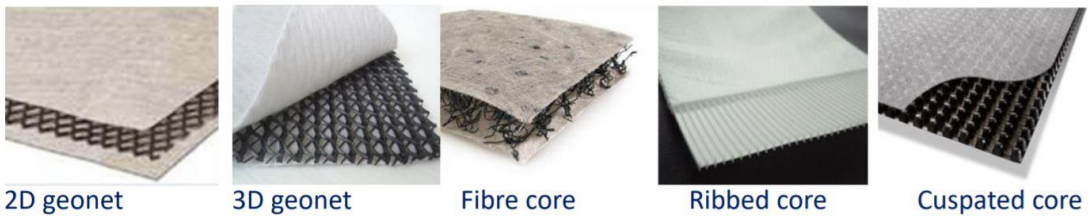
7.4 Geotextilie

Jako geotextilie jsou označovány propustné membrány. Byly vyvinuty za účelem zlepšení vlastností půd a konstrukčních a filtračních materiálů, se kterými jsou v kontaktu. Výsledného efektu je dosaženo spojením dvou hlavních funkcí, filtrační a separační. Geotextilie zajišťují, že při použití materiálů s rozdílnými vlastnostmi a funkcemi nedochází k jejich degradaci, postupnému prolínání těchto vrstev, a tak jsou po dlouhou dobu zachovány jejich původní konstrukční vlastnosti a funkčnost celé stavby. Bez použití membrány dochází např. k zaklesávání a zatlačování pevného a nesoudržného materiálu do měkkého podloží nebo jiných půdních vrstev a ke ztrátě

stability vrstev. V drenážních systémech je důležitá zejména filtrační funkce membrán, díky které nedochází k zanášení drenážního materiálu jemnými částicemi a k postupnému prolnutí těchto vrstev, které by mělo za následek ztrátu propustnosti a retenčního objemu drenážní vrstvy (Rankilor, 1981).

7.4.1 Geokompozity

Dalším materiálem používaným při konstrukcích drenážních systémů jsou drenážní geokompozity. Jde o systémy složené ze dvou či více vrstev, jejichž základem je drenážní jádro a geotextilie. Drenážní geokompozity zajišťuji odvádění vody v rovině, ve které jsou položené, horizontálně např. za účelem zlepšení drenáže podkladové vrstvy nebo vertikálně, kdy odvádí vodu ke vsaku či k drenáži (Wooods et al., 2015) např. jako u obrázku 15.
Geokompozitní textilie se skládají z plastového drenážního jádra, které odvádí vodu a z geotextilie, která je umístěna z jedné nebo z obou stran drenážního jádra, některé typy zobrazuje Obrázek 14.

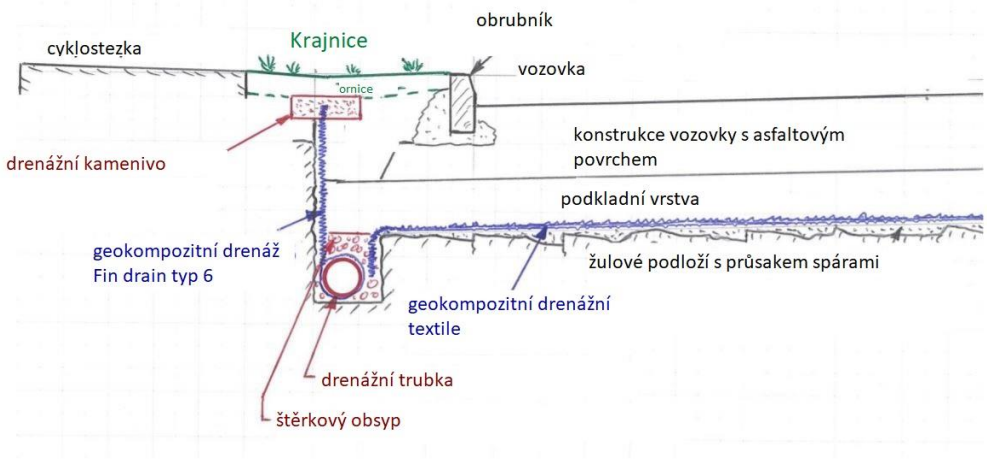


Obrázek 14: Typy drenážních geokompozitů s různými drenážními jádry (https://www.igs-uk.org/).

V případě vrstvy geotextilie po obou stranách jádra, může jednu stranu tvořit nepropustná membrána, díky které mohou být při vertikální instalaci chráněny, zdi, zemní valy a svahy před nežádoucími účinky vody. V porovnání s drenážemi z kameniva jsou geokompozitní drenáže díky nízké hmotnosti a skladnosti méně náročné na manipulaci a dopravu. Oproti kamenivu je jejich aplikace jednodušší také ve svazích a hůře přístupných místech či k odvodnění a zpevnění vrstev v nestabilním podloží. V porovnání s drenážními vrstvami z kameniva je aplikace geokompozitní

vrstvy méně nákladná. Na konkrétním příkladu 600 m úseku vedené v zářezu o šířce 30 m a hloubce 6 m bylo spočítáno, že lze použitím geokompozitní drenáže ušetřit 3 420 m^3 výkopu a 3 480 m^3 dovezeného kameniva. Zároveň se o cca 600 sníží počet jízd nákladní dopravy (Stephen, 2015).

Voděodolné nepropustné membrány a geokompozity, jsou určeny pro použití v místech, kde vsakování není žádoucí. Slouží např. jako izolační vrstva zelených střech a retenčních objektů (Woods et al. 2015).



Obrázek 15: Odvodnění komunikace a stezky pomocí geokompozitní drenážní vrstvy, (Christopher et al. 2000). Geokompozitní drenáž odvádějící vodu z krajnice se skládá z drenážní trubky, která je zabalena do dvou vrstev geotextilie s plastovým jádrem.

7.4.2 Protierozní geotextilie

Dalším druhem geotextilií, které se používají ve vsakovacích objektech jsou rohože a sítě z přírodních materiálů, které se používají pro zpevnění svahů u přírodě blízkých opatření. Jejich funkcí je zabránit erozi, tedy zpomalit rychlost stékající vody a zpevnit substrát na svazích nádrží a průlehů, dokud se nevytvoří zapojený porost. K tomuto účelu se využívají především přírodní materiály, jako je jutové či kokosové vlákno. Především jutové sítě jsou určeny k prvotnímu zpevnění svahů a během několika vegetačních období se rozkládají. Kokosové rohože jsou určeny pro dlouhodobější zpevnění svahů průlehů a poldrů. Pokud má mít protierozní opatření delší životnost, používají se sítě a rohože ze syntetických materiálů (Woods et al., 2015).

7.5 Filtrační materiály

V případě, že je třeba odváděnou vodu před vsakem do podloží předčistit, se v některých případech používají filtrační opatření, jejichž primární funkcí je odstraňování znečištění. Dochází k němu pomocí usazování a filtrace pomocí písku či jiného filtračního média. Voda je ve filtračním médiu zdržena před tím, než je odvedena do podzemních nebo povrchových vod. Filtrační zařízení napodobují filtrační funkci vsakovacích zařízení, ale mají menší prostorové nároky. Chceme-li dosáhnout většího filtračního účinku, musí se prodloužit doba zdržení vody ve filtračním mediu, což zároveň vyžaduje větší retenční prostor. Delší doby zdržení lze dosáhnout zmenšením průměru drenážního potrubí, pokud je vsakovací objekt doplněn o drenáž nebo použitím filtračního materiálu s menší propustností. Filtračním médiem je nejčastěji písek (Shammas, Wang, 2011).

Malé částice disponují relativně velkým povrchem vzhledem ke svému objemu. Čím menší je průměrná velikost jednotlivých částic materiálu, tím je větší plocha na jednotku obejmu. V závislosti na tom může být zachyceno větší množství polutantů. Mezi malými částicemi jsou menší póry, což také přispívá k lepšímu filtraci znečištění. Jednou ze sledovaných vlastností je poréznost, tedy poměr pórů a pevných částí v materiálu. Dalším sledovaným parametrem je permeabilita neboli propustnost. Vychází z poréznosti a udává, do jaké míry materiál umožňuje pohyb vody. Tato vlastnost je ovlivněna nejen velikostí pórů, ale i jejich prostorovým uspořádáním.

U hrubozrnného písku se jedná o materiál s převahou makropórů, jejichž průměr je větší než 80 μm, relativně malou porézností ale vysokou propustností. Jíly mohou mít naopak poréznost relativně vysokou, ale kvůli vysokému podílu mikropórů a nanopórů s průměrem menším než 80 μm mají velmi malou propustnost a hydraulickou kapacitu. Pro efektivní proces odstraňování znečištění je třeba zajistit určitou dobu zdržení vody v objektu, tedy v kontaktu s filtračním materiálem a je třeba zvolit materiál, který zajistí dostatečnou dobu zdržení bez rizika zaplavení i při déle trvajících a intenzivních srážkách (VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., 2018). Tato zařízení nejsou zpravidla vhodná pro silně urbanizované území a lokality s vysokou hladinou podzemní vody (Shammas, Wang, 2011).

8. Diskuse

Z praxe spojené s působením na vodoprávním úřadu mohu posoudit, jak se opatření pro hospodaření s dešťovými vodami včetně zasakování, které je vyžadováno legislativou, uplatňují v praxi, a do jaké míry jsou využívány způsoby a prostředky umožňující vsakování srážkových vod. Většina předkládaných projektových dokumentací, ke kterým dává vodoprávní úřad vyjádření a stanoviska, obsahuje návrhy odvodnění objektu. V souladu s legislativou je odvodnění řešeno u průmyslových areálů, staveb soukromých vlastníků, tedy i rodinných domů. Negativní zkušenosti jsou spojené většinou s přípravou větších projektů, zejména staveb komunikací. V průběhu projednávání a teprve na základě našich připomínek bývá projekt upraven. Za problematické lze také označit nyní relativně časté návrhy rekonstrukcí komunikací ve městě i menších obcích. Návrhy většinou počítají s odvodněním dešťovou kanalizací, a to i tam, kde komunikace sousedí se zelení. Požadavek legislativy na vsakování zde naráží na předpisy, které řeší dopravní bezpečnost a bezbariérové užívání stavby. Vyhláška č. 398/2009 Sb., o obecných technických požadavcích zabezpečujících bezbariérové užívání staveb, sice umožňuje přerušení obrubníků s funkcí vodících linií pro nevidomé a slabozraké, ale v praxi se dle mých zkušeností toto řešení nenavrhuje a vody jsou spádem odváděny na komunikaci a do vpustí místo toho, aby odtékaly do zeleně k přirozenému vsaku. Projednávání některých staveb v malých obcích se kvůli problematickému řešení odvodnění prakticky zkomplikovala či prakticky zastavila. Ve městě je situace ještě složitější. Velké množství dešťové vody odtéká do jednotné kanalizace a nastává zde problém s odpadními vodami v odlehčovacích komorách, které poměrně často přetékají do vodního toku. Jediným, ale zdlouhavým řešením v hustě zastavěném území je postupné odpojování dešťových kanalizací těch objektů, kde lze najít vhodnější způsob odvodnění. V hustě zastavěném území je to ale velmi obtížné. Z práce vyplývá, že i pro místa s méně příznivými podmínkami pro vsakování, jako jsou např. brownfieldy, lokality s vyšší hladinou podzemní vody apod., lze za pomoci dostupných materiálů a kombinací opatření, najít uspokojivá řešení pro zpomalení odtoku a vsakování srážkových vod.

Odvodnění každého místa je třeba posuzovat jednotlivě. V dosud nezastavěném území je třeba ponechat co nejvíce přirozených povrchů, případně budovat přírodě blízká řešení podporující vodní cyklus. V již zastavěném území jsou realizace opatření ke

snížení odtoku složitá. Situaci komplikují prostorové podmínky, základy budov, podzemní infrastruktura a také to, že majitelé nemovitostí především v centrech měst nemají k dispozici pozemky vhodné k realizaci vsaku nebo dostatečné retence. Opatření k hospodaření se srážkovými vodami nejsou u stávajících staveb vymahatelná, pokud se nejedná např. o stavební úpravy, změny staveb apod., kdy lze opatření požadovat na základě ustanovení § 5, odst. 3 zák. č. 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon).

Velký podíl na odtoku srážkových vod mají komunikace a zpevněné plochy. Srážkové vody z komunikací pro motorová vozidla nelze dle Normy pro hospodaření se srážkovými vodami, TNV 75 9011, kvůli znečištění vsakovat přímo do podloží, aniž by byly předčištěny. Optimálním způsob předčištění pro takřka všechny druh ploch je přes zatravněnou humusovou vrstvu s využitím ploch zeleně, průlehů, vsakovacích rýh. Tento způsob však lze v zastavěném území jen obtížně aplikovat. Ve většině případů je ale umožněno vsakování plošné přes zatravňovací dlažbu nebo jiné propustné povrchy, které lze považovat za součást opatření k infiltraci a zmírnění odtoku srážkových vod. Protože jiná vsakovací zařízení mají většinou velké prostorové nároky, je použití zpevněných propustných povrchů vhodným a ekonomicky přijatelným řešením odvodnění komunikací a jiných zpevněných ploch (Borgwardt, 2006).

Širší využití propustných zpevněných ploch je v souladu s českou normou TNV 75 9011, která je řadí mezi opatření ke snížení či prevenci vzniku srážkového odtoku u zdroje (podobně jako např. zelené střechy). Tato norma přímo požaduje zachování přirozených propustných povrchů (především v nízkých místech terénu) a dále např. budování místních komunikací z propustných a polopropustných materiálů, jako jsou dlažba, zatravňovací dlažba, porézní asfalt a zatravněné štěrkové vrstvy.

Z některých citovaných studií srovnávajících či hodnotících stav vsakovacích zařízení po dlouhodobějším provozu vyplynulo, že zásadní vliv na jejich udržitelnost má znalost podmínek (zejména míra a druh znečištění srážkových vod). Dalším aspektem je kvalita provedení a výběr použitých filtračních a drenážních materiálů. Ty musí mít především potřebnou zrnitost a obsah jemných částic. Příkladem špatně provedené stavby byly realizace propustných zpevněných povrchů, u kterých se během studie projevilo použití nevhodného kameniva, což způsobilo výrazné snížení propustnosti. Z téže studie (Al-Rubaei et al., 2015) dále vyšlo najevo, že zatravněné zpevněné povrchy si dlouhodobě lépe zachovávají propustnost než povrch vyplněný pouze

kamenivem. Zde se zřejmě potvrdilo to, že kořenové systémy vytvářejí cesty pro průnik do filtrační vrstvy, a že její použití je na málo exponovaných plochách vhodnější než povrchy bez vegetace, které jsou náchylnější ke kolmataci.

Výše uvedené příklady provedených studií dlouhodobé udržitelnosti propustných zpevněných povrchů potvrzují, že jejich funkčnost, resp. infiltrační kapacita, sice časem přirozeně klesá, ale za určitých podmínek, mohou sloužit min. desetiletí. Těmi podmínkami jsou: důkladné zhodnocení daných podmínek a tomu odpovídající volba materiálu, kvalita provedení včetně kontroly použitých filtračních materiálů (zejména zrnitost a obsah jemných částic) a následná údržba.

Vzhledem k pokračujícímu rozvoji sídel a dopravní infrastruktury je při návrhu zasakovacích objektů třeba myslet na udržitelnost a ochranu životního prostředí. Dle zjištěných informací existují k tradičně používaným materiálům z přírodních zdrojů, ať už je to kámen, štěrk či písek, alternativy pocházející ze zpracování odpadů. Jedná se o skleněný a betonový recyklát nebo například biochar, který vzniká pyrolýzou biomasy. Tyto materiály mohou mít srovnatelné nebo lepší vlastnosti při použití v drenážních vrstvách a substrátech než kameniva. V případě drceného skla je to nízký obsah jemných částic a větší propustnost. Při výběru materiálů by bylo vhodné se zaměřit na druhotně využitelné suroviny nejlépe z místních nebo blízkých zdrojů a materiály, které svými vlastnostmi přispívají k udržitelnému rozvoji např. tím, že nejsou náročné na dopravu a manipulaci.

9. Závěr

Typy opatření umožňující vsakování srážkových vod se navzájem liší jak podobou a konstrukcí, tak i funkcemi, které určují vhodnost jejich použití. Typ opatření musí vždy vycházet z poměrů v daném místě. Jedná se především o infiltrační schopnosti podloží, prostorové podmínky a využití povrchu a uložení inženýrských sítí.

V rámci urbanizovaného území, které klade vysoké nároky na vybavenost inženýrskými sítěmi a jinou veřejnou infrastrukturou, je vhodné v maximální míře použít taková opatření, která hospodaří se srážkovými vodami v místě jejich dopadu na povrch. Taková opatření jednak nezatěžují kanalizační systémy a pak také přispívají ke snížení odtoku povrchových vod. V případě, že se jedná o opatření na povrchu,

která umožňují evapotranspiraci, přispívají také ke snižování teploty a tím zlepšují mikroklima v daném místě. Jedná se především o řešení vegetační, se vzrostlou zelení. Pro veřejná prostranství a komunikace uvnitř měst, kde se nepředpokládá velké zatížení dopravou ani riziko kontaminace závadnými látkami jsou vhodným řešením propustné zpevněné povrchy. Ty lze budovat i v místech, kde je relativně vysoká hladina podzemní vody, kvůli které zde nelze umístit podzemní vsakovací objekty, a z důvodu nedostatku prostoru ani povrchové retenční objekty. V místech s vyšší hladinou podzemní vody nebo tam, kde nejsou vhodné podmínky pro vsakování, lze drenážní vrstvu pod propustným povrchem doplnit o drenážní potrubí, případně geokompozity s nepropustnou vrstvou, které přebytečnou vodou odvedou na místo vhodné ke vsaku nebo do recipientu.

Podzemní vsakovací objekty představují řešení pro místa, kde není prostor pro přírodě blízká řešení. Zároveň je jejich použití v silně urbanizovaném prostředí omezeno existencí podzemní infrastruktury, zejména základů budov. Oproti přírodě blízkým řešením realizovaným na povrchu podzemní objekty nepřispívají ke zlepšení mikroklimatu přirozeným odparem. A kvůli složitým poměrům v prostoru plném inženýrských sítí a podzemních objektů označovaným pojmem „urban karst“ lze obtížně posoudit přínos v podobě doplňování zásob podzemní vody.

Co se týče podoby navrhovaných objektů, je třeba zohlednit prostorové nároky a v případě omezeného prostoru volit systémy s výhodným poměrem retenčního a celkového objemu opatření. Zde vychází nejlépe použití vsakovacích bloků a tunelů. Pokud je k dispozici více prostoru, je vhodnější použít náplně s filtrační funkcí, to znamená kameniva, pískové filtry apod., které nejenže umožňují retenci vody a vsak, ale zároveň zlepšují kvalitu vsakované vody.

V ulicích, kde není prostor pro parkové plochy s přirozeným povrchem a porostem, je vhodné propustné povrchy a další způsoby odvodu srážkových vod funkčně propojit se zelení. K tomu lze využít podobné struktury, jaké se používají ve vsakovacích objektech. Jde o jámy či vsakovací rýhy vyplněné drenáží a substrátem, prefabrikáty v podobě plastových boxů, pomocí kterých se vytvoří místo pro růst kořenového systému stromů a zásobárnu vody, kterou stromy potřebují k tomu, aby prospívaly.

Potenciál z hlediska využití v zastavěném lze vidět především v možnosti výměny nepropustných povrchů za propustné. Nedochází při něm k většímu záboru pozemků, který vyžadují téměř všechna ostatní řešení pro vsak dešťových vod. Oproti podzemním vsakovacím zařízením mají propustné povrchy schopnost zadrženou vodu

také odpařovat a podporovat tak přirozený vodní cyklus. Výhodou je také různorodost dostupných povrchů včetně vegetačních. Díky dalším materiálům (zejména izolačním a drenážním geomembránám či v kombinaci s vegetačními opatřeními) lze propustné zpevněné povrchy realizovat i v místech s nepříznivými geologickými poměry. Velký potenciál lze vidět také, co se týče výsadby nové zeleně v ulicích. Problematika modro-zelené infrastruktury, konkrétně potřeba vysazovat v ulicích více stromů, se stále více diskutuje také v souvislosti s existencí inženýrských sítí a jejich ochranných pásem. Nové způsoby výsadeb stromů by také měly zaručit jejich dlouhodobou perspektivu i v hustě zastavěných částech města. Obnova povrchů v obcích a městech by měla napomoci ke snížení odtoku povrchových vod a díky filtrační funkci použitých materiálů, ať už jsou součástí systémů propustných povrchů či např. vegetačních opatření, také ke snížení jejich znečištění. V rámci území obcí by bylo např. vhodné zpracovat generely odvodnění, tzn. zmapovat objekty silničních vpustí a dešťové a jednotné kanalizace a v návaznosti na to vytipovat objekty, které lze od kanalizace odpojit a současně s tím vytipovat plochy, u nichž je možné nahradit povrchy za propustné, např. v kombinaci s vhodnými opatřeními k odvádění přebytečných srážkových vod nebo novými prvky zeleně, které umožní alespoň snížení množství a zdržení odtoku.

10. Seznam literatury:

Al-Rubaei A. M., Viklander M., Blecken G. T., 2015: Long-term hydraulic performance of stormwater infiltration systems Urban Water Journal, Vol. 12, No. 8, 660-671,

Andela C., Sorge E. V., 2017: Handbook Of Alternative Uses For Recycled Glass, Andela Products,Ltd., Glass Brokers, Inc., (online) [cit. 2020.06.27], dostupné z: https://wasteinitiatives.com.au/wp-content/uploads/2017/10/Glass-Uses-Handbook-Complete.pdf

Attard G., Winiarski T., Rossier Y., Eisenlohr L., 2015: Review: Impact of underground structures on the flow of urban groundwater, Hydrogeology Journal; Heidelberg Sv. 24, Čís. 1, (Feb 2016): 5-19,

Behring Z., 2013: Evaluating the use of recycled concrete aggregate in french drain applications, University of Central Florida, (online) [cit. 2020.06.28], dostupné z: https://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3733&context=etd

Bercha Š., 2019: Srážek je teď hodně, ale vyhráno nemáme, Vodárenství.cz, (online) [cit. 2020.03.12], dostupné z: http://www.vodarenstvi.cz/2019/01/11/simon-bercha-z-ceskeho-hydrometeorologickeho-ustavu-srazek-je-ted-hodne-vyhrano-ale-nemame/

Bičík I., Jančák V., 2005: Transformační procesy v českém zemědělství po roce 1990, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra sociální geografie a regionálního rozvoje, (online) [cit. 2020.03.24] dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~ksgrrsek/jancak/download/zemedelstvi_ceska.pdf

Bonneau, J., Fletcher, T.D., Costelloe, J.F., Poelsma, P.L., James, R.B., Burns, M.J. 2018: Where does infiltrated stormwater go? Interactions with vegetation and subsurface anthropogenic features, Journal of Hydrology,Volume 567,Pages 121-132,

Borgwardt S., 2006: Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement, in Proc. of the 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, USA. (online) [2020.06.19]

Brown R. R., Keath N; Wong, T H F. 2009: Urban water management in cities: historical, current and future regimes, Water Science and Technology; London Sv. 59, Čís. 5, (Mar 2009): 847-855, (online) [cit. 2020.06.19] dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/b421/5dd70ea07af2eb0f77d444b9f56fbbe04d8d.pdf?_ga=2.242955522.1255574566.1592564298-1957109179.1592564298

Butler D., Davies J. W., 2004: Urban drainage, Urban drainage. 2nd ed. Abingdon: Spon Press

Ceylan H., Kim S., Gopalakrishnan K., 2014: Use of Crushed/Recycled Concrete as Drainable Base/Subbase & Possible Future Plugging of Pavement Systems, Program for Sustainable Pavement Engineering and Research, Institute for Transportation, Iowa State University, (online) [cit. 2020.06.28], dostupné z: https://www.extension.iastate.edu/registration/events/conferences/ascegeotech/presentations/Ceylan%20-%202014%20ASCE%20Iowa%20Geotechnical%20Engineering%20Conference.pdf

Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities Ltd., 2015: Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems, (online) [2020.06.19], dostupné z: https://watersensitivecities.org.au/wp-content/uploads/2016/10/AGSBS-C1-Appensix.pdf

Čáp P., 2019: (online) [cit. 2020.03.12] https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2018/cislo-6/zabran-erozi-zmirni-sucho.html

Čekal R., 2018: Srážkové a odtokové poměry na území České republiky za období 2014-2018, Praha, ČHMÚ

Davis M. L., Masten, S. J., 2009: Principles of Environmental Engineering and Science, Boston : McGraw-Hill Higher Education

Davis, A. P. et al., 2006: Water Quality Improvement through Bioretention Media: Nitrogen and Phosphorus Removal, Water Environment Research; Alexandria, Blackwell Publishing Ltd., str. 284-93,

Department of Environmental Protection. (2006). Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual, (online) [2020.06.14] dostupné z: https://pecpa.org/wp-content/uploads/Stormwater-BMP-Manual.pdf

Derucher K. N., Heins C. P., 1981: Materials for civil and highway engineers, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632
Dhakal K. P., Chevalier L. R. 2017: Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application, Journal of Environmental Management 203(1):171-181(online) [cit. 2020.03.12]

Dzuráková M., Štěpánková P., Levitus V., 2018: Katalog přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině a jeho uplatnění ve webové mapové aplikaci pro veřejnost, VTEI/2018/5, 6-11

Dzuráková M., Zárubová K., Uhrová J., Rozkošný M., Smelík L., Němejcová D., Zahrádková S., Štěpánková P., Macků J., 2017: Potenciál aplikace přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině a zlepšení ekologického stavu vodních útvarů, VTEI, roč. 59, č. 4, str. 25–32.

Dzurik A. A., Kulkarni T. S., Boland B. K., 2019: Water Resources Planning: Fundamentals for an Integrated Framework, Rowman & Littlefield Publishers; Fourth edition

EAWAG, Gensch R., Sacher N., Staubli D., 2010: Soak Pits. Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox - SSWM.info, (online) [cit. 2020.06.18], dostupné z: https://sswm.info/water-nutrient-cycle/reuse-and-recharge/hardwares/recharge-and-disposal/soak-pit

Embrén B., 2016: Planting Urban Trees with Biochar, the Biochar Journal (tBJ), pp 44-47, Arbaz, Switzerland, dostupné z: www.biochar-journal.org/en/ct/77

Edwards W. M., 1967: Infiltration of water into soils as influenced by surface conditions, Retrospective Theses and Dissertations. 3153.Digital Repository @ Iowa State University, (online) [cit. 2020.03.12] dostupné z: https://lib.dr.iastate.edu/rtd/3153

Fach, S., Engelhard, C., Wittke, N., & Rauch, W. (2010): Performance of infiltration swales with regard to operation in winter times in an Alpine region. Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research, 63 11, 2658-65,

Fanelli R., Prestegaard K., Palmer M., 2017: Evaluation of infiltration-based stormwater management to restore hydrological processes in urban headwater streams. Hydrological Processes. 31:3306–3319 (online) [cit. 2020.03.12] dostupné z: https://doi.org/10.1002/hyp.11266

Fletcher T. D., Andrieu H., Hamel P., 2013: Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art, Advances in Water Resources, Elsevier

Gray D.M., 1970. Handbook on the Principles of Hydrology: with special emphasis directed to Canadian conditions in the discussions, applications and presentation of data. New York: Water Information Center, Inc.

Guo J. C. Y., 2017: Urban flood mitigation and stormwater management, CRC Press, Taylor & Francis Group

Hamill, L., 2011: Understanding Hydraulics, Macmillan International Higher Education, Red Globe Press

Hein, D. K., 2014: Permeable Pavement Design and Construction Case Studies in North America, Conference: Transportation Association of Canada 2014 Annual MeetingAt: Montreal, Quebec, (online) [cit. 2020.03.12], dostupné:

https://www.researchgate.net/publication/290946871_Permeable_Pavement_Design_and_Construction_Case_Studies_in_North_America

Hillel, D. 2004: Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier Academic Press, Amsterdam,

Kaushal S. S., Belt K. T., 2012: The urban watershead continuum: Evolving spatial and temporal dimensions Urban Ecosystems; Salzburg Sv. 15, Čís. 2, str. 409-435

Kumar K., Kozak J., Hundal L., Cox A., Zhang H., Granato T., 2015: In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot – A four-year study, Journal of Environmental Management, Volume 167, 1 February 2016, Pages 8-14,

Lee, J., M. Borst, R. Brown, L. Rossman, AND M. Simon, 2015: Modeling the Hydrologic Processes of a Permeable Pavement System. Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA, 20(5):04014070,

Liao, K., Deng, S., Tan, P.Y., 2017: Blue-Green Infrastructure: New Frontier for Sustainable Urban Stormwater Management

Loučková B., Pártl A., Vačkář D., 2017: Predikce důsledků negativních socio-ekonomických vlivů na krajinu a vodní hospodářství, Generel vodního hospodářství krajiny České republiky, Státní pozemkový úřad, 423 s., (online) [cit. 2020.03.12], dostupné z: https://www.spucr.cz/frontend/webroot/uploads/files/2017/09/generel_final6906.pdf

Makarieva A. M., Gorshkov V. G., 2007: Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1013-1033, (online) [cit. 2020.03.12], dostupné z: https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007, 2007

Marsalek J., Cisneros J. B., Karamouz M., Malmquist P. A., Goldenfum J. A., Chocat B., 2007: Urban Water Cycle Processes and Interactions, UNESCO-IHP, Taylor & Francis Group,

Marsalek J., Chocat B., 2002: ChocatInternational Report: Stormwater management, Water Sci Technol (2002) 46 (6-7): 1–17.

Ministerstvo životního prostředí v meziresortní spolupráci s využitím klimatologických podkladů Českého hydrometeorologického ústavu, 2015: Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR, (online) [cit. 2020.03.12], dostupné z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf

Minnesota Pollution Control Agency, 2000: Stormwater best management practices manual (online) [cit. 2020.03.12] dostupné z: https://www.pca.state.mn.us/water/stormwater-best-management-practices-manual

Pazwash H., (2016): Urban storm water management, 2nd edn. CRC Press, p 684 Ferguson BK

Rankilor, P. R., 1981: Membranes in ground engineering, John Wiley & Sons Ltd., New York

Rožnovský J., 2014: Změny podnebí, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. Labem, Fakulta životního prostředí

Sanicola O., 2018: Using permeable pavements to reduce the environmental impacts of urbanistaion, (online) [cit. 2020.03.12] dostupné z: https://www.semanticscholar.org/paper/USING-PERMEABLE-PAVEMENTS-TO-REDUCE-THE-IMPACTS-OF-Sanicola/5434317733269d0bf78e0e691448e0d50c930636

Sansalone J., Kuang X., Ying G., Ranieri V., 2011: Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage, Water Research, Volume 46, Issue 20, 15 December 2012, Pages 6763-6774,

Selbig, W.R., Buer, N., 2018, Hydraulic, water-quality, and temperature performance of three types of permeable pavement under high sediment loading conditions: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5037, 44 p.,

Sklenička P., 2016: Voda, krajina, společnost, Vesmír 95, str. 562-563

Smith P. G., Scott J., 2002: Dictionary of Water and Waste Management, Elsevier Science & Technology, ProQuest Ebook Central

Stagge J. H., Davis A. P., Jamil E., Kim H., 2012: Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff, Water Research, Volume 46, Issue 20, 15 December 2012, Pages 6731-6742,

Stephen M., 2015: Geocomposite Drainage in Highway Engineering and Earthworks, Institution of Civil Engineers, (online) [2020.06.16], dostupné z: https://www.igs-uk.org/wp-content/uploads/2016/02/MS-Presentation-Preston-2017.pdf

Terney B., 2003: Pulverized glass aggregate, Road Business, Vol. 18, No. 1, (online) [2020.06.16], dostupné z: https://t2.unh.edu/sites/t2.unh.edu/files/documents/newsletters/2003/PGA.pdf

Tesař M., Šír M. 2005: Vyhodnocení vodního režimu půd na lokalitách lišících se vegetačním krytem v Národním parku Šumava. In: Hruška, J. (ed.): Biogeochemické cykly ekologicky významných prvků v měnících se přírodních podmínkách lesních ekosystémů Národního parku Šumava. Výzkumná zpráva. Praha, Česká geologická služba: 17 s.

Trnka M., Žalud Z., 2017: Klimatická změna a zásoba vody v půdě, Vesmír 96 (147), 580-582

van der Leeden F., Troise F. L., Todd, D. K. 1990: The Water Encyclopedia, Second Edition, CRC Press; 2 edition

Verheyen D., Van Gaelen N., Ronchi B., Batelaan O., Struyf, E., Govers G., Merckx R., & Diels J., 2015. Dissolved phosphorus transport from soil to surface water in catchments with different land use. Ambio, 44 Suppl 2, S228–S240. (online) [cit. 2020.03.23.] dostupné z: https://doi.org/10.1007/s13280-014-0617-5

Vítek J., Stránský D., Kabelková I., Bareš V., Vítek, R., 2015: Hospodaření s dešťovou vodou v ČR, Praha: 01/71 ZO ČSOP Koniklec

VTT Technical Researche Centre of Finland LTD, 2018: Filtration Systems for Stormwater Quantity and Quality Management Guideline for Finnish Implementation, (online) [cit. 2020.03.10] dostupné z: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2018/T338.pdf

Virginia Department of Conservation and Recreation (VA DCR), 2011: VA DCR Stormwater Design Specification No. 10, Dry swales, version 2.0 January 1, 2013, (online) [cit. 2020.03.07] dostupné z: https://www.swbmp.vwrrc.vt.edu/wp-content/uploads/BMP_Spec_No_10_DRY_SWALE.pdf

Woods Ballard B., Wilson S., Udale – Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R. 2015: The SuDS Manual, CIRIA (online) [cit. 2020.03.07], dostupné z: http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf

Yu J.; Yu H. Xu L., 2013: Performance evaluation of various stormwater best management practices, Environmental Science and Pollution Research International, Heidelberg, 6160-71,

Zeleňáková M., Hudáková G., Stec A., 2020: Rainwater Infiltration in Urban Areas, Springer, Cham

Další zdroje:

Analýza příčin vzniku povodní a fungování systému řízení protipovodňové ochrany s návrhy preventivních opatření k budoucímu snížení rizik a následků průchodu velkých vod včetně návrhu systému financování, Sněmovní tisk 438/0, Poslanecká sněmovna, VII. Volební období, 6. 4. 1998, Praha, (online) [cit. 2020.03.12] dostupné z: https://www.psp.cz/eknih/1996ps/tisky/t043800.htm

Bilan, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., (online) [cit. 2020.03.12] dostupné z: http://bilan.vuv.cz/bilan/

Climate-ADAPT, 2015: Improved water retention in agricultural areas, (online) [cit. 2020.03.12] dostupné z: https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/adaptation-options/improved-water-retention-in-agricultural-areas/#ao_category

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

EBC, 2012: European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.'European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. Dostupné z: http://www.europeanbiochar.org/en/download. Version 8.2E of 1st September 2019

Eurostat, 2015: Land use statistics, (online) [cit. 2020.03.24], dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Land_use_statistics&oldid=389803#Land_use

GreenBlue Urban, 2016: Tree Roots in soil cells – An investigation, dostupné z: https://www.greenblue.com/wp-content/uploads/2016/05/Tree-Roots-in-Soil-Cells.pdf

Hirschman Water & Environment, LLC Center for Watershed Protection, Inc., 2018: Performance Enhancing Devices for Stormwater BMPs, Biochar, dostupné z: https://cbtrust.org/wp-content/uploads/15781_PED_and_RDM_Practices.pdf

Sweco Hydroprojekt a.s., 2013: TNV 75 9011 Hospodaření se srážkovými vodami

TNV 75 9011 Hospodaření se srážkovými vodami, 2013, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 65 str.

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)

Zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích)

11. Seznam obrázků:

Obrázek 1: Generel vodního hospodářství krajiny České republiky 2014-2017, https://www.spucr.cz/frontend/webroot/uploads/files/2017/09/generel_final6906.pdf

Obrázek 2: Generel vodního hospodářství krajiny České republiky 2014-2017, https://www.spucr.cz/frontend/webroot/uploads/files/2017/09/generel_final6906.pdf

Obrázek 3: Davis, M. L., Masten, S. J., 2009: Principles of Environmental Engineering and Science, Boston: McGraw-Hill Higher Education

Obrázek 4: Typy podzemních inženýrských sítí tvořící Urban karst, BES Urban lexicon, http://besurbanlexicon.blogspot.com/search/label/Urban%20Karst

Obrázek 5: Vsakovací betonová šachta, Vodohospodářské služby RT, s.r.o., http://www.vhs-rt.cz/vsakovaci-sachty

Obrázek 6: Retenční a vsakovací podzemní objekt., MEA Water Management s.r.o., 2017: První realizace vsakování dešťové vody s biologickým dočištěním od ropných látek v České republice, tzb-info.cz

Obrázek 7: Vsakovací jímka, https://civilrule.com

Obrázek 8: Zatravněná vsakovací nádrž, dostupné z: http://nagsheadnc.gov/DocumentCenter/View/2029/503-Infilitration-Basin?bidId=

Obrázek 9: Bio-retenční vsakovací nádrž, (online) [cit. 2020.03.24] http://nagsheadnc.gov/DocumentCenter/View/2029/503-Infilitration-Basin?bidId=

Obrázek 10: Profil propustného systému s povrchem z porézního asfaltu, Zevenbergen Ch., Cashman A., Evelpidou N., Pasche E., Garvin S., Ashley R., 2010: Urban Flood Management, CRC Press

Obrázek 11, 12: Schéma dlažby PaveDrain, https://www.pavedrain.com/

Obrázek 13: Uliční profil se znázorněným prostorem pro kořenový systém stromů, Woods Ballard B., Wilson S., Udale – Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R. 2015: The SuDS Manual, CIRIA,

Obrázek 14: Typy drenážních geokompozitů s různými drenážními jádry https://www.igs-uk.org/wp-content/uploads/2016/02/MS-Presentation-Preston-2017.pdf

Obrázek 15: Odvodnění komunikace a stezky pomocí geokompozitní drenážní vrtsvy, https://www.igs-uk.org/wp-content/uploads/2016/02/MS-Presentation-Preston-2017.pdf