

1. PŘEHLED LITERATURY O ŠEDÝCH, ZELENÝCH A HYBRIDNÍCH OPATŘENÍ

V této části je uveden přehled literatury o šedých, zelených a hybridních protipovodňových opatřeních. Při posuzování vybraných opatření byly zohledněny aspekty jako proveditelnost, efektivnost, flexibilita, údržba, dopad na zmírnění klimatických změn. U každého konkrétního opatření je navíc uvedeno krátké shrnutí a případová studie. Než se však budeme podrobněji zabývat jednotlivými opatřeními, je nejprve důležité zmínit, jak byla tato opatření rozdělena mezi tři různé kategorie.

S ohledem na **šedá opatření** byla zvolena tradiční a víceméně konvenční infrastruktura pro zmírnění povodní. Ve srovnání s jinými nástroji, které slouží ke snižování povodňových rizik, představují šedá opatření vizuálně bytelnou infrastrukturu obvykle vyrobenou z nerozložitelných materiálů, jako je beton nebo ocel. Je známo, že mají převládající „šedý“ vizuální efekt. Navíc tento druh opatření obvykle poskytuje omezené nebo téměř žádné ekosystémové služby. **Zelená opatření** na druhé straně mívají ve srovnání s jinými kategoriemi opatření převládající ekosystémové funkce pro snížení povodňových rizik a jsou vyrobena převážně z rozložitelných materiálů. I když je pro vybudování zelených protipovodňových opatření v realizační fázi obvykle potřeba určité technické vybavení, následně po zřízení mají tato opatření spíše „zelený“ vizuální efekt. Co se týče **hybridních opatření**, byla vybrána řešení zmírňující povodně, která zahrnují prvky šedého i zeleného opatření. Je třeba také zmínit, že hybridní opatření se v tomto případě týkají převážně těch řešení, která vizuálně vypadají více zeleně a poskytují ekosystémové služby; stále však obsahují prvky šedé infrastruktury, které pomáhají systému správně plnit jeho funkce.

Tabulka 1 a 2 představuje seznam vybraných šedých, zelených a hybridních opatření a popis parametrů, které byly zkoumány během rešerše literatury pro každé konkrétní opatření.

Tabulka 1: Vybraná šedá, zelená a hybridní protipovodňová opatření

Kategorie	Vybraná opatření
Šedá	Přehrady, protipovodňové stěny, podzemní nádrže na zadržování srážkové vody, propustné betonové dlažby (propustný beton), vsakovací šachty/suché studny.
Zelená	Zalesňování, obnova meandrů řek a obnova záplavových území, dešťové zahrady, městské parky a městské lesy, infiltrační nádrže/plochy
Hybridní	Retenční (mokrý) jímky, retenční (suché) nádrže, zelené střechy, podzemní výsadbové vsakovací rýhy, propustné vegetační povrchy

Tabulka 2: Seznam deskriptorů a jejich vysvětlení

Deskriptor	Vysvětlení
Krátké shrnutí	Krátké vysvětlení/popis zvoleného šedého, zeleného nebo hybridního opatření.
Proveditelnost	Jak náročná je realizace opatření z hlediska návrhu, postupu realizace atd. Kromě toho lze v této části uvažovat i o životnosti opatření.
Nákladová efektivnost	Jak efektivní je opatření z hlediska zmírňování povodní a dalších aspektů (pokud jsou relevantní) na základě výše investic (např. stavebních nákladů).
Flexibilita	Vliv zvoleného opatření na riziko jakéhokoliv jiného nebezpečí, jako jsou sesuvy půdy, eroze, sedimentace, kontaminace podzemních vod atd. (pokud existuje).
Údržba	Údržba potřebná k udržení opatření v chodu. Kromě toho mohou být v této části zohledněny také náklady na pravidelnou údržbu.
Změna klimatu	Vliv zvoleného opatření na změnu klimatu. Zde lze v závislosti na zvoleném opatření uvažovat o zmírnění nebo naopak negativním dopadu na změnu klimatu.
Příklad případové studie	Popis případové studie, kde bylo vybrané opatření realizováno nebo kde byla jeho realizace testována.

1.1 ŠEDÁ OPATŘENÍ

Tabulka 3: Šedá opatření

Deskriptor	Vysvětlení																																																												
1. Opatření: Přehrady																																																													
Příklad skutečného případu, kdy bylo opatření použito: Wivenhoe Dam in Australia (ASDSO, 2023).	 Obrázek 1: Betonová přehrada (Malm et al., 2016)																																																												
Krátké shrnutí	Podle zprávy EEA (2017) jsou přehrady vodní stavby, které regulují průtok vody v řece. Na rozdíl od hrází, které jsou obvykle budovány rovnoběžně s břehy řeky, jsou přehrady ve většině případů stavěny kolmo k řece, čímž vytvářejí bariéru pro průchod vody a v důsledku toho regulují tok vody dále po proudu.																																																												
Proveditelnost	Zpráva EEA (2017) uvádí, že výstavba přehrad vyžaduje obrovské investice kvůli technické náročnosti projektu. Ansar et al. (2014) zmiňují, že stavba přehrady je extrémně nákladný proces, se kterým jsou spojeny i značné náklady na údržbu po jejím vybudování.																																																												
Nákladová efektivnost	Je známo, že přehrady jsou účinné při ochraně oblastí po proudu řeky před povodněmi tím, že regulují vypouštění vody v horní části řeky. Kromě toho mohou mít přehrady multifunkční účely, jako je poskytování vody pro zavlažování, výrobu elektřiny atd. Pokud jde o náklady, následující tabulka shrnuje náklady na přehrady na různých místech v Evropě: <table><tr><th colspan="3">Longitudinal barriers</th><th>Land acquisition and compensation</th><th>Construction and rehabilitation</th><th>Operation and maintenance</th></tr><tr><th>Case</th><th>River/Location</th><th>Source</th><th></th><th>EUR/m</th><th>EUR/m/y</th></tr><tr><td>1</td><td>Maas (NL)</td><td>Hillen et al. (2010)</td><td></td><td>1.82 M</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>Hartel (NL)</td><td>Hillen et al. (2010)</td><td></td><td>0.84 M</td><td></td></tr><tr><td>3</td><td>Scheldt (NL)</td><td>Hillen et al. (2010)</td><td></td><td>1.68 M</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>Ramspol (NL)</td><td>Hillen et al. (2010)</td><td></td><td>0.55 M</td><td></td></tr><tr><td>5</td><td>Ems (DE)</td><td>Hillen et al. (2010)</td><td></td><td>1.02 M</td><td></td></tr><tr><td>6</td><td>Thames (UK)</td><td>Hillen et al. (2010)</td><td></td><td>2.73 M</td><td></td></tr><tr><td>7</td><td>Venice Lagoon (IT)</td><td>Hillen et al. (2010)</td><td></td><td>1.46 M</td><td></td></tr><tr><td>8</td><td>Europe</td><td>Linham and Nicholls (2010)</td><td></td><td></td><td>5–10 % of investment</td></tr></table> Obrázek 2: Cena přehrad (EEA, 2017) Zpráva uvádí, že celkové průměrné náklady na stavbu přehrady včetně nákupu pozemků ze 7 zkoumaných případů v Evropě byly 1,6 milionu eur.	Longitudinal barriers			Land acquisition and compensation	Construction and rehabilitation	Operation and maintenance	Case	River/Location	Source		EUR/m	EUR/m/y	1	Maas (NL)	Hillen et al. (2010)		1.82 M		2	Hartel (NL)	Hillen et al. (2010)		0.84 M		3	Scheldt (NL)	Hillen et al. (2010)		1.68 M		4	Ramspol (NL)	Hillen et al. (2010)		0.55 M		5	Ems (DE)	Hillen et al. (2010)		1.02 M		6	Thames (UK)	Hillen et al. (2010)		2.73 M		7	Venice Lagoon (IT)	Hillen et al. (2010)		1.46 M		8	Europe	Linham and Nicholls (2010)			5–10 % of investment
Longitudinal barriers			Land acquisition and compensation	Construction and rehabilitation	Operation and maintenance																																																								
Case	River/Location	Source		EUR/m	EUR/m/y																																																								
1	Maas (NL)	Hillen et al. (2010)		1.82 M																																																									
2	Hartel (NL)	Hillen et al. (2010)		0.84 M																																																									
3	Scheldt (NL)	Hillen et al. (2010)		1.68 M																																																									
4	Ramspol (NL)	Hillen et al. (2010)		0.55 M																																																									
5	Ems (DE)	Hillen et al. (2010)		1.02 M																																																									
6	Thames (UK)	Hillen et al. (2010)		2.73 M																																																									
7	Venice Lagoon (IT)	Hillen et al. (2010)		1.46 M																																																									
8	Europe	Linham and Nicholls (2010)			5–10 % of investment																																																								
Flexibilita	Tiessen et al. (2011) poukazují na to, že velké přehrady/nádrže mohou být relativně účinné při managementu sedimentů. Studie zejména ukazuje, že dvě zkoumané přehrady, víceúčelová Steppler a suchá přehrada Madill, byly schopny zadržet 77 a 66 procent sedimentů. Kromě výše uvedených informací nebyl v literatuře zjištěn žádný zvláštní vliv přehrad na jiná nebezpečí, jako jsou sesuvy půdy, eroze atd.																																																												
Údržba	Hughes (2023) zmiňuje, že by měly být prováděny pravidelné kontroly, aby se zjistilo, zda se na přehradě nevyskytují trhliny, vady nebo jiné problémy, které by mohly ohrozit bezpečnost stavby. Pokud jde o praskliny, je třeba si uvědomit, že ne všechny praskliny jsou nebezpečné. Během inspekčního postupu je																																																												

	důležité věnovat pozornost následujícím vlastnostem, aby bylo možné definovat závažnost trhlin: délka a šířka trhlin, hloubka, směr a jejich umístění. Kromě toho je nutné správně rozlišovat různé typy trhlin, jako jsou trhliny tepelné, smršťovací, strukturální a další. Obvykle se doporučuje neustálé sledování identifikovaných trhlin. Kromě trhlin by měly být betonové a zděné prvky kontrolovány z hlediska dalších zhoršených vlastností, jako jsou netěsnosti podél konstrukčních částí, povrchové vady, jako je voština a stratifikace, posunutí, prosakování základem atd. Je třeba také vést záznamy o zjištěných vadách. Kromě toho by se v rámci pravidelné údržby měly neustále odstraňovat suť a nežádoucí vegetace (Hughes, 2023; Klun et al., 2021).
Změna klimatu	International Rivers (2007) uvádí, že přehrady mají negativní vliv na změnu klimatu produkcí nebezpečného plynu – metanu (CH_4). Ve skutečnosti plyn vzniká na dně přehrady a uvolňuje se do vzduchu po náhlém poklesu tlaku při vypouštění vody z přehrady. Když však plyn sám vystoupá, dostane se do kontaktu se vzduchem, přemění se na CO_2 . Kromě toho je podle Portland Cement Association (2023) proces výroby cementu považován za jednoho z emitentů oxidu uhličitého do atmosféry. Stejný zdroj však uvádí, že kolem 60 procent oxidu uhličitého uvolněného během procesu výroby cementu je postupně absorbováno povrchem betonu, když se dostane do kontaktu se vzduchem.
Příklad případové studie	Galoie a Motamedi (2014) studovali účinnost retenční přehrady umístěné v malém povodí v Rakousku z hlediska protipovodňové ochrany. Studie odhalila, že dostupnost retenčního objemu přehrady 215 000 m^3 není dostatečná ke snížení 100-leté povodně ve všech zkoumaných oblastech. Ve skutečnosti byla přehrada schopna zadržet pouze polovinu požadovaného objemu, takže bylo nutné v této oblasti postavit další retenční přehradu, aby se vypořádala se zbytkovým rizikem.

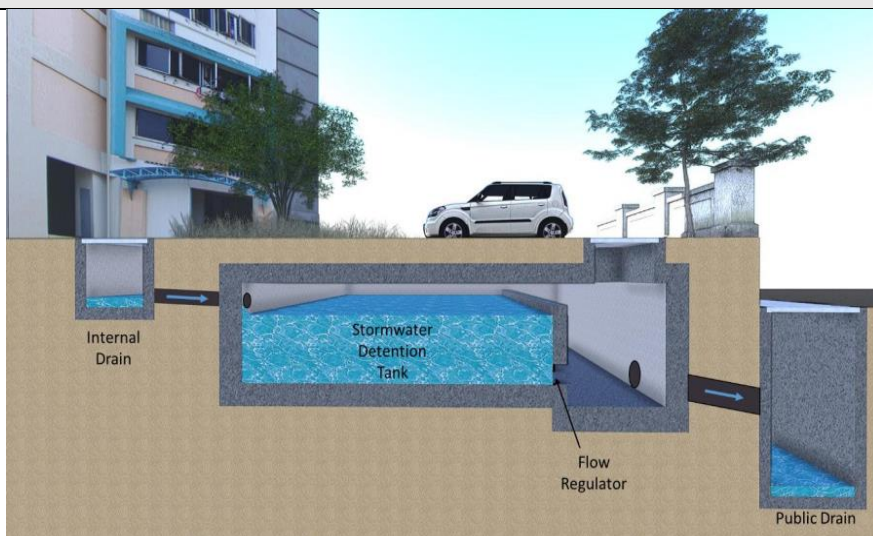
2. Opatření: Protipovodňové stěny

Příklad skutečného případu, kdy bylo opatření použito: Bratislava, Slovakia (Kryžanowski et al., 2014)	 Obrázek 3: Různé druhy povodňových stěn, Bratislava, Slovensko: (a) beton (b) podzemní těsnění, (c) železobeton a (d) mobilní stěny (Kryžanowski et al., 2014)
Krátké shrnutí	Podle FEMA (2013) jsou protipovodňové stěny inženýrská stavba obvykle vyrobená ze železobetonu a oceli a je navržena tak, aby chránila budovy v oblastech náchylných k zaplavení.
Proveditelnost	Kádár (2015) uvádí, že postup instalace například mobilních protipovodňových stěn obvykle nezabere mnoho času, protože jejich konstrukční prvky jsou poměrně lehké, a proto se snadno přemísťují a přepravují. Na stavbu 300 m dlouhé protipovodňové stěny za jeden den je obvykle zapotřebí 8 lidí. Další výhodou mobilních protipovodňových bariér je dále především možnost zachování rázu krajiny po jejich odstranění. Stejný zdroj však uvádí, že mobilní

	stěny mají i řadu nevýhod. Například náklady na instalaci jsou poměrně vysoké a navíc je zapotřebí místo pro uložení stěn. Rickard (2009) uvádí, že protipovodňové stěny jsou obecně jedním z nejprůzračnějších řešení pro záplavové oblasti, kde není dostatek prostoru pro jiné řešení. Dále autor uvádí, že i když se tento typ protipovodňové ochrany může zdát poměrně robustní, přesto může dojít k jeho poškození. Když se konstrukce naruší, může ztratit svou strukturální stabilitu v důsledku destabilizovaného základu, což může nakonec vést k okamžitému zhroucení. Aby se problém vyřešil, měl by být pro obranu implementován speciální tvrdý povrch, aby se snížila pravděpodobnost selhání.
Nákladová efektivnost	Cena protipovodňových stěn závisí především na typu materiálu, který je použit na stavbu (Rickard, 2009). Podle řešení RetainingWall Solutions (2023) existuje mnoho faktorů, které ovlivňují tvorbu ceny protipovodňových stěn, zejména typ použitého materiálu, výška konstrukce, specifická omezení místa výstavby, vlastnosti půdy a měřítko projektu. Obecně platí, že pro 0,675 m vysokou protipovodňovou stěnu postavenou na jílovité půdě jsou náklady kolem 300 liber, zatímco u písčité půdy je cena téměř 350 liber za stěnu stejné výšky (RetainingWall Solutions, 2023). To odpovídá téměř 342 a 399 eurům.
Flexibilita	V literatuře nebyl zjištěn žádný vliv protipovodňových stěn na zmírnění eroze, sesuvů nebo jiných rizik. Naproti tomu Rickard (2009) uvádí, že tento typ protipovodňových zábran může být problematický, pokud hrozí eroze říčních břehů, která obvykle vede k poškození a následnému zřícení konstrukce.
Údržba	Měly by být prováděny pravidelné kontroly stavu protipovodňových stěn. Zejména protipovodňové stěny by měly být pravidelně kontrolovány proti průsakům, zanesení pískem atd. Kromě toho je nutné pravidelně kontrolovat břehy řek, aby byla zajištěna stabilita a funkčnost protipovodňových stěn. Kromě toho by měl být pravidelně odstraňován jakýkoli druh suti a stěny je třeba kontrolovat, aby se vyloučilo jakékoliv poškození konstrukce protipovodňové ochrany (NRC, 1982). Rickard (2009) tvrdí, že ačkoli protipovodňové stěny vyžadují pravidelné kontroly funkčnosti, obecně vyžadují jen malou údržbu.
Změna klimatu	Nebyl nalezen žádný důkaz o vlivu protipovodňových stěn na zmírnění změny klimatu.
Příklad případové studie	Flood Control International (2023) představuje jeden příklad systému protipovodňové ochrany ve Wakefieldu v Anglii. Systém byl navržen tak, aby chránil město před častými záplavami z řeky Calder. Jedinečnou vlastností těchto protipovodňových stěn je, že jsou ovládány pomocí speciální hlavní řídicí jednotky, která spouští systém, jakmile její vodní senzory detekují rizikovou hladinu vody. Protipovodňová ochrana byla postavena v roce 2008 s cílem udržet maximální projektované hydraulické zatížení včetně dalších 30 procent navíc z bezpečnostních důvodů. Obrázek 4: Protipovodňové stěny ve Wakefield (Flood Control International, 2023)

3. Opatření: Podzemní retenční nádrž na srážkovou vodu

Příklad skutečného případu, kdy bylo opatření použito: Gomeznarro Park in Madrid (Climate-ADAPT, 2022).



Obrázek 5: Vizualizace podzemní retenční nádrže (PUB, 2021)

Krátké shrnutí

Podzemní retenční nádrž na srážkovou vodu je speciální zařízení na jímání vody, které se používá k zadržení odtoku srážkové vody během povodní, aby se snížila kulminace. Poté je voda pomalu vypouštěna do kanalizačního systému. S ohledem na PUB (2021), lze retenční nádrže rozdělit do dvou kategorií: nadzemní a podzemní nádrže (PRN). V této části je zvažován druhý typ.

Proveditelnost

Podle US EPA (2020) je obvykle poměrně komplikované najít vhodné a výhodné místo pro umístění PRN, protože oblasti, které jsou často zaplavovány, jsou většinou pokryty bahnitou půdou a sedimentem. Další problém, kterému lze čelit, souvisí se vztakovými silami působícími na podzemní konstrukci. Pokud se PRN nachází v oblasti s vysoce nasycenou půdou, je konstrukce vystavena vztakové síle, která tlačí nádrž nahoru, čímž dochází k poškození potrubí, chodníků a dalších prvků infrastruktury, které se nacházejí nad nádrží. Proto je důležité zajistit, aby se nádrž nezvedla. Za tímto účelem lze na horní část PRN umístit těžké pytle s pískem nebo nádoby s kameny jako další zátěž, která může zabránit tomu, aby se konstrukce zvedla (US EPA, 2020). PUB (2021) uvádí, že systém by měl být navržen tak, aby byl schopen vypouštět nahromaděnou vodu uvnitř nádrže po 4 hodinách po povodni. Tak se zajistí, že v nádrži je k dispozici místo pro případ příští povodně.

Nákladová efektivnost

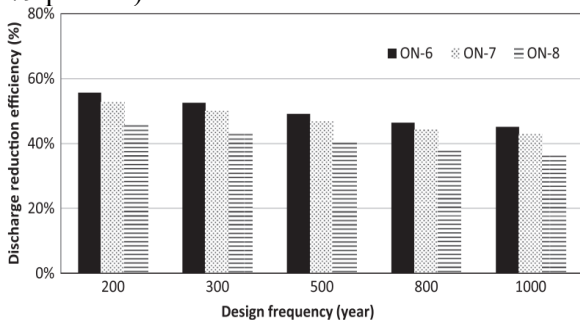
Cena podzemních nádrží na srážkovou vodu je výrazně vyšší než u těch nadzemních z důvodu složitějšího postupu instalace a údržby nádrže. Systém PRN však může být zároveň cenově dostupnější v lokalitách, kde je problém s dostupností pozemků kvůli jejich ceně (Lake superior streams, 2009). Stejně jako u mnoha dalších opatření na zmírnění povodní závisí náklady PRN do značné míry na vlastnostech a umístění místa, typu materiálu nádrže, objemu nádrže potřebného k uložení srážkové vody, mzdových nákladech, objemu vytěžené zeminy, velikosti potrubí a dalších faktorech. Obecně se náklady na PRN pohybují kolem 97–325 eur za m³ (Lake superior streams, 2009).

Flexibilita

V literatuře nebyl zjištěn žádný vliv podzemních nádrží na zadržování srážkové vody na snížení rizika jakýchkoli jiných nebezpečí.

Údržba

Pokud jde o údržbu, Lake superior streams (2009) uvádí, že každý měsíc by měla být provedena kontrola na místě, aby se zkontroloval stav vstupního a výstupního potrubí a vstupní brány proti nahromaděným nečistotám. Dále, v případě, že je potřeba opravit nějaké prvky konstrukce, mělo by to být provedeno včas, aby se vyloučilo riziko špatné funkce nádrže během povodňové katastrofy.

	Doporučuje se také mechanicky odstraňovat nahromaděné usazeniny ve vodní nádrži minimálně 1x ročně. Pokud je nainstalován filtrační systém pro čištění srážkové vody, měl by být za kontrolu správné funkčnosti odpovědný dodavatel.
Změna klimatu	V literatuře nebyl zjištěn žádný zvláštní vliv PRN na změnu klimatu.
Příklad případové studie	Shin a kol. (2022) studovali efektivnost implementace PRN v nejvíce urbanizovaných oblastech povodí Oncheon v Koreji. Studie odhalila, že PRN mohou být docela účinné při snižování povodňových průtoků a v důsledku toho při ochraně oblastí náchylných k záplavám před nadcházející povodňovou katastrofou. Například 200-leté povodně bylo pozorováno přibližně 56, 55 a 53 procent snížení průtoku povodní v toku Sa-jik (ON-6), před Geo-je (ON-7) a po proudu Geo-je (ON-8) (obrázek 5). Obecně bylo pro všechny četnosti povodní zjištěno snížení rozsahu inundace ve všech zkoumaných oblastech o více než 40 procent. Nejvyšší pokles v oblasti inundace byl pozorován u 200- a 300 leté povodně (88 a 79 procent).  Obrázek 6: Redukce odtoku po implementaci PRN na SA-jik (ON-6), před Geo-je (ON-7) a za Geo-je (ON-8) (Shin a kol., 2022)

4. Opatření: Propustné betonové dlažby/povrchy

Příklad skutečného případu, kdy bylo opatření použito: parkoviště Finley stadionu v Chattanooga, Tennessee (US EPA, 2013).	 Obrázek 7: Propustný betonový povrch (Upper Midwest Water Science Center, 2019)
Krátké shrnutí	S rozšiřováním urbanizovaných oblastí se zvyšuje i rozloha nepropustných povrchů. Když dojde k záplavám, hraje městský odvodňovací systém důležitou roli při odstraňování přebytečné srážkové vody z ulic (Huang et al., 2020). Protože však existuje mnoho povrchů, které neumožňují pronikání vody během povodní, drenážní systém zažívá další tlak, když je množství vody příliš vysoké (Bae a Lee, 2020; Mu et al., 2021). V důsledku toho se situace zhoršuje, protože kapacita drenážního systému nestačí pojmout celé množství vody, které se může akumulovat v důsledku nepropustnosti mnoha povrchů. V tomto případě lze propustnou betonovou dlažbu považovat za dodatečné opatření ke snížení rizika pocházejícího z povodní tím, že umožní zadrženou vodu propouštět pomalu, čímž se současně sníží dodatečný tlak na drenážní systém (Ma et al., 2020; Qin et al., 2013).
Proveditelnost	Pro realizaci propustných betonových povrchů je nutno odstranit dosavadní zpevněné plochy, což je ve velkém měřítku poměrně obtížné a téměř nemožné. V tomto případě lze tedy obvykle vybrat malé oblasti, jako jsou parkovací místa

	a cyklostezky, aby se tato myšlenka mohla realizovat. Kromě toho by pro realizaci tohoto opatření měla být vybrána speciální zemina, zejména je zapotřebí zemina s vysokou vsakovací schopností (Bezák et al., 2021). Podle Green Building Alliance (2023) je očekávaná životnost propustného betonu mezi 20 a 40 lety.
Nákladová efektivnost	Náklady na propustný beton obvykle zahrnují výdaje na instalaci propustných povrchů a jejich další údržbu (Bezák et al., 2021). The Environment Agency (2015) uvádí, že náklady na propustnou dlažbu se pohybují mezi 30-40 librami na m² vozovky, což se rovná téměř 34-46 eur za m². Přínosy jsou obvykle následující: snížení odtoku, doplňování podzemní vody a snížení povrchové teploty (Green Building Alliance, 2023). The Stormwater Management Calculator of the CNT (2020a) uvádí, že ve Spojených státech náklady na výstavbu vodopropustného parkoviště, chodníků a ulic odpovídají 8,68 dolaru za stopu čtvereční (~0,0929 m²), což se rovná 67,9 eur za m², zatímco roční náklady na údržbu jsou 0,02 dolaru za stopu čtvereční (~0,2 eura za m²).
Flexibilita	The US EPA (2021a) uvádí, že propustné chodníky jsou schopny odstraňovat znečišťující látky ze srážkové vody. V závislosti na systému vrstvení dlažby lze snížit koncentraci kontaminantů ve vodě v důsledku fyzikální filtrace. Kromě těchto informací nebyl v literatuře zjištěn žádný zvláštní vliv betonové vozovky na jakékoli nebezpečí.
Údržba	Při údržbě propustného betonu je důležité zvážit jeden důležitý aspekt, který se týká především ucpávání jeho pórů kontaminanty (Kryeziu et al., 2013). V důsledku ucpávání pórů se propustnost materiálu snižuje, což vede i ke kratší životnosti (Kia et al., 2017). Silné vysávání a tlakové mytí jsou dvě hlavní techniky pro údržbu propustného betonu. Obě metody zabráňují ucpávání pórů kontaminanty, aby srážková voda mohla snadno proniknout do země (Kryeziu et al., 2013).
Změna klimatu	Propustná dlažba je známá jako jeden z přispěvatelů ke snížení tzv. městského tepelného ostrova. Propustná dlažba napomáhá ke snížení tzv. městského tepelného ostrova. Haselbach (2009) zjistil, že při použití propustného betonu s 23% pórovitostí je rychlost prostupu tepla u nepropustné vozovky o 41 procent vyšší než u propustné. Studie dospěla k závěru, že propustný beton může snížit efekt tepelného ostrova odpařováním vody z jeho pórů. Jak již bylo zmíněno v části o přehradách, cement, který je jednou ze složek betonu se během svého výrobního procesu také stává jedním z emitůrů oxidu uhličitého do atmosféry (Portland Cement Association, 2023).
Příklad případové studie	Případová studie města Shoreview, kde je od roku 2009 implementován propustný beton pro vozovky silnic. Před rokem 2009 město zavádělo infrastrukturu pro řízení odtoku srážkové vody, nicméně za účelem podpory udržitelnějšího designu města a snížení tlaku pocházejícího z nadměrných srážek byly zavedeny propustné chodníky. Studie odhalila, že náklady na běžné betonové vozovky výrazně převyšují náklady na propustné vozovky. Obecně má propustný beton oproti své nepropustné alternativě značnou výhodu díky své schopnosti propouštět vodu. Na druhou stranu se však také ukázalo, že výkonnost propustných vozovek s časem v důsledku zanášení klesá, což ukazuje na nutnost neustálé údržby a kontroly (Izevbekhai a Schroeder, 2017).

5. Opatření: Vsakovací šachty/suché studny	
Příklad skutečného případu, kdy bylo opatření použito: Oregon, Arizona, Washington (City of Elk Grove, 2023).	<i>Obrázek 8: Drywell (City of Elk Grove, 2023)</i>
Krátké shrnutí	Vsakovací šachta, nazývaná také drywell nebo revizní šachta, je speciální podzemní systém složený z jedné hlavní šachty a dalších atributů nezbytných pro sběr srážkové vody. Systém umožňuje infiltraci přebytečného množství vody do studny, která pak pomalu uvolňuje vsáknutou vodu do okolní půdy (City of Elk Grove, 2023; DWA, 2005).
Proveditelnost	Sasidharan et al. (2021) studovali účinnost dvou opatření na zmírnění povodní: suchých studní a vsakovacích jímek. Kromě toho, Sasidharan et al. (2021) tvrdí, že suché studny nekazí estetický vzhled městských parků, ulic a dalších míst. Kromě toho, ve srovnání s vsakovacími jímkami, suché studny umožňují předúpravu vody před vstupem do studny, aniž by to mělo jakýkoli vliv na výkon konstrukce. Podle City of Elk Grove (2023), během fáze návrhu a realizace je třeba vybrat vhodné místo pro umístění průsakových šachet. Šachty se nedoporučuje umísťovat v blízkosti čerpacích stanic nebo jiných zařízení, která využívají nebezpečné látky, aby se snížilo riziko kontaminace podzemních vod. Kromě toho, i když průsakové šachty mohou používat speciální filtrační mechanismy k odstranění kontaminovaných částic ze srážkové vody, the City of Elk Grove (2023) nedoporučuje umístit šachty do vysoce znečištěných půd, aby se vyloučilo riziko vniknutí půdních kontaminantů do suché studny. Kromě toho zdroj uvádí, že pro snížení koncentrace nebezpečných znečišťujících látek je zapotřebí předúprava srážkové vody.
Nákladová efektivnost	Podle Stormwater Management Calculator of the CNT (2020a) jsou průměrné kapitálové náklady na výstavbu suchých vrtů ve Spojených státech téměř 250 dolarů (~230 eur), zatímco nejvyšší náklady jsou kolem 5 000 dolarů (~4 600 eur). Náklady na údržbu stejné suché studny činí 20 dolarů ročně, což se rovná téměř 18,4 eur ročně. Životnost této protipovodňové infrastruktury je kolem 70 let. Je však třeba také poznamenat, že cena závisí také na velikosti suché studny. Například ve Spojených státech se cena za 1 500 galonů MaxWell Type IV (~ 5,7 m³) a 2 500 galonů MaxWell Plus (~ 9,6 m³) pohybuje mezi téměř 25 750–32 200 a 34 950–41 400 EUR, (Sasidharan et al., 2021; Torrent Resources, 2023). Pokud jde o účinnost tohoto opatření, byla použita Stormwater Management Calculator k definování počtu suchých studní o objemu 265 galonů (~1 m³), které jsou potřeba k tomu, aby došlo k přibližně 90procentnímu snížení odtoku srážkové vody v definované oblasti. Charakteristiky lokality jsou uvedeny na obrázku 9:

	<table><tr><th colspan="3">Total Land Use</th></tr><tr><th>Land Use</th><th>Original Area</th><th>Area including BMP(s)</th></tr><tr><td>Total Impervious Area</td><td>1,885 ft²</td><td>1,885 ft²</td></tr><tr><td>Flat Roof</td><td>400 ft²</td><td>400 ft²</td></tr><tr><td>Pitched Roof</td><td>900 ft²</td><td>900 ft²</td></tr><tr><td>Sidewalk</td><td>585 ft²</td><td>585 ft²</td></tr><tr><td>Total Landscape Area</td><td>4,190 ft²</td><td>4,190 ft²</td></tr><tr><td>Lawn/Turf</td><td>3,850 ft²</td><td>3,850 ft²</td></tr><tr><td>Flower Bed/Garden</td><td>340 ft²</td><td>340 ft²</td></tr><tr><td>Total BMP Area</td><td></td><td>0 ft²</td></tr><tr><td>Total Lot Area</td><td>6,075 ft²</td><td>6,075 ft²</td></tr><tr><td>Other Volume Control</td><td></td><td>530 gallons</td></tr><tr><td>Drywell</td><td></td><td>530 gallons</td></tr></table> V důsledku toho bylo zjištěno, že pro oblast specifikovanou na obrázku 9 a s průměrnými srážkami kolem 830 mm za rok a 59 mm za bouři jsou zapotřebí 2 suché studny, aby se objem odtoku snížil o 90 procent. V tomto případě byl vzat objem suché studny 265 galonů, což odpovídá zhruba 1 m³.	Total Land Use			Land Use	Original Area	Area including BMP(s)	Total Impervious Area	1,885 ft ²	1,885 ft ²	Flat Roof	400 ft ²	400 ft ²	Pitched Roof	900 ft ²	900 ft ²	Sidewalk	585 ft ²	585 ft ²	Total Landscape Area	4,190 ft ²	4,190 ft ²	Lawn/Turf	3,850 ft ²	3,850 ft ²	Flower Bed/Garden	340 ft ²	340 ft ²	Total BMP Area		0 ft ²	Total Lot Area	6,075 ft ²	6,075 ft ²	Other Volume Control		530 gallons	Drywell		530 gallons
Total Land Use																																								
Land Use	Original Area	Area including BMP(s)																																						
Total Impervious Area	1,885 ft ²	1,885 ft ²																																						
Flat Roof	400 ft ²	400 ft ²																																						
Pitched Roof	900 ft ²	900 ft ²																																						
Sidewalk	585 ft ²	585 ft ²																																						
Total Landscape Area	4,190 ft ²	4,190 ft ²																																						
Lawn/Turf	3,850 ft ²	3,850 ft ²																																						
Flower Bed/Garden	340 ft ²	340 ft ²																																						
Total BMP Area		0 ft ²																																						
Total Lot Area	6,075 ft ²	6,075 ft ²																																						
Other Volume Control		530 gallons																																						
Drywell		530 gallons																																						
Flexibilita	Suché jímky jsou považovány za dobré řešení pro zásobování vodonosných vrstev. V roce 2005 byla v Los Angeles provedena 10letá studie, jejímž cílem bylo identifikovat zásobovací výkon podzemních suchých vrtů. Bylo zjištěno, že v tomto regionu by realizace suchých studní mohla zásobit celkem 750 000 domů z hlediska potřeby vody v domácnostech (City of Elk Grove, 2023).																																							
Údržba	Podobně jako mnoho dalších opatření na zmírnění povodní vyžadují vsakovací šachty pravidelnou údržbu. Je důležité neustále čistit konstrukci odstraňováním nahromaděných částic, nánosů a dalších zdrojů nečistot, aby bylo zajištěno, že uvnitř studny nebude žádná stojatá voda (Torrent Resources, 2023). The City of Elk Grove (2023) uvádí, že dekontaminace srážkové vody je vždy nutná předtím, než vstoupí do suché studny, aby se snížila koncentrace nebezpečných znečišťujících látek, které mohou vytvářet riziko kontaminace podzemních vod. The DWA (2005) uvádí, že do vsakovací šachty lze nainstalovat filtrační pytel a použít jej pro proces předčištění.																																							
Změna klimatu	V literatuře nebyl pozorován žádný vliv suchých studní na změnu klimatu.																																							
Příklad případové studie	Studie Sasidharan et al. (2021) analyzovala výkonnost 38 m hluboké průsakové šachty a 70 m široké retenční nádrže o celkové ploše 3 847 m ² . Po srovnání obou opatření na zmírnění povodní studie dospěla k závěru, že realizace pěti vsakovacích šachet může snížit výrazně více odtoků srážkové vody než jedna jediná retenční nádrž, což ukazuje komparativní výhodu suchých studní oproti retenčním nádržím. Sasidharan et al. (2018) analyzovali výkon opatření „Maxwell Type IV“, implementovaného ve Fort Irwin a Torrance v Kalifornii. Studie odhalila, že výkon infiltrace velmi závisí na hydraulické vodivosti půdy. Bylo zjištěno, že první suchá studna umístěná ve Fort Irwin mohla propouštět téměř 53,2 m ³ , zatímco druhá suchá studna pouze 12,6 m ³ za dobu přibližně 18 hodin. S danými charakteristikami pro oba vrty studie dospěla k závěru, že vrt Torrance si vedl méně efektivně kvůli nižší hydraulické vodivosti, což mohlo dokonce vést k ucpání šachty a následnému přetečení.																																							

1.2 ZELENÁ OPATŘENÍ

Tabulka 4: Zelená opatření

Deskriptor	Vysvětlení
6. Opatření: Zalesňování	
Příklad reálného případu, kdy bylo opatření použito: United Kingdom (Open Access Government, 2022).	 <i>Obrázek 10: Zalesňování ve Spojeném království (Open Access Government, 2022)</i>
Krátké shrnutí	Zalesňování je proces přeměny zemědělské půdy, marginálních pozemků nebo jiných typů krajinného pokryvu na lesy. V místech, kde předtím žádné stromy nebyly, lze v důsledku rozšíření lesního porostu snížit koncentraci uhlíku ve vzduchu a kulminační průtok (Arora a Montenegro, 2011; Johnen et al., 2020).
Proveditelnost	K realizaci tohoto opatření je nejprve nutné najít a připravit půdu, kde bude zalesňování probíhat. Následně se vyberou potřebné dřeviny a vhodná hnojiva v závislosti na zvoleném typu vegetace. Po vysazení stromů je nutné je v následujících letech udržovat (Climate-ADAPT, 2020).
Nákladová efektivita	Zalesňování jako možnost zmírnění povodní bylo studováno již v předchozích pracích Johnen et al. (2020) a Bezak et al. (2021), kteří zkoumali toto opatření z hlediska jeho účinnosti při protipovodňové ochraně. První z nich provedla analýzu nákladů a přínosů, aby prozkoumala vliv expanze lesního porostu na kulminační průtok v řece Glinščica po dobu tří období: 2, 10 a 25 let. Ukázalo se, že při 15-60 procentech zalesnění může být kulminační průtok snížen o 9-14 procent. Konkrétně v době návratnosti 2, 10 a 25 let se povodňová kulminace snížila o 14, 10 a 9,5 procenta. V tomto případě tak mohou být sníženy ekonomické ztráty, protože rozsah zaplavené oblasti se v důsledku zalesňování snižuje. Johnen et al. (2020) zjistili, že ze tří zkoumaných opatření, době návratnosti přispěl nejvíce proces zalesňování ke snížení povodňových škod. V případě současných postupů využívání půdy byly náklady na povodňové škody vyčísleny na přibližně 610 752 eur, zatímco s rozšířením lesního porostu proti proudu, po proudu a v celé oblasti byly celkové škody způsobené povodněmi výrazně nižší. V důsledku zvýšení lesního porostu v horních a dolních úsecích se celkové škody snížily o 78, 65 a 80 procent. Kromě toho studie také analyzovala účinnost zkoumaného opatření na různé ekosystémové služby na základě tří různých scénářů zalesňování. Například Johnen et al. (2020) odhalili pozitivní vliv zalesňování na biodiverzitu, kvalitu vody a koncentraci uhlíku. Pokud jde o náklady, stejná studie zjistila, že na 1 ha (10 000 m ²) půdy je zapotřebí přibližně 3 500 stromů. Vzhledem k tomu, že každý strom potřebuje k výsadbě přibližně 1 euro, celkové náklady na výsadbu 3 500 stromů na 1 ha by se pohybovaly kolem 3 500 eur. Průměrná cena orné půdy, kterou lze využít k zalesňování, se pohybuje kolem 60 000 eur za hektar (Johnen et al., 2020).
Flexibilita	Snížením obsahu vlhkosti v půdě pomáhají stromy snižovat pravděpodobnost sesuvů půdy. Kořeny stromů působí jako bariéra proti posunu půdy, zároveň zpevňují půdní vrstvy a připevňují půdu ke skalnímu podloží. Kromě toho mohou lesy také zabránit pádu kamení a sutí, zkrátit vzdálenost sesuvů půdy a

	snížit rizika eroze půdy (RECOFTC, 2012). Nicméně Forbes a Broadhead (2013) uvádějí, že to platí pouze pro mělké sesuvy půdy.
Údržba	Podle Climate-ADAPT (2020), Během prvního roku po zalesnění se průměrné náklady na údržbu lesního porostu pohybují kolem 300 eur na hektar (10 000 m ²), zatímco ve třetím roce mohou náklady klesnout až na 100 eur na hektar. Obecně platí, že proces údržby by měl být prováděn během prvních 3-5 let.
Změna klimatu	Podle Organizace spojených národů lze zalesňování považovat za jedno z nejúčinnějších opatření ve vztahu ke zmírňování změny klimatu (Arora a Montenegro, 2011). Je známo, že stromy absorbují oxid uhličitý, což pomáhá v boji proti problému změny klimatu. Například městská zeleň může zpracovat 0,8 tuny CO ₂ na hektar (10 000 m ²) zeleně ročně (CNT, 2020b). Zároveň je také známo, že stromy zmírňují dopad změny klimatu na odtok srážkové vody. Vliv změny klimatu na tvorbu většího množství srážek a v důsledku toho následný nárůst četnosti a velikosti povodní je totiž dobře znám. Zachycováním srážek lesy snižují množství vody, které by se mohlo potencionálně dostat na zem, a tak vytvářet nadměrné množství odtoku (Zabret a Šraj, 2015). Zabret a Šraj (2015) zjistili, že například <i>Pinus nigra</i> i <i>Betula pendula</i> mohou přinést podstatné výsledky, pokud jde o zachycování srážek. Konkrétně mezi 20-51 procenty srážek. Současně však podle Bonan (1997), lesy mívají nižší koeficient albeda, což je část slunečního záření, které je povrchem odraženo. To znamená, že orná půda má vyšší odrazivost než stromy, a proto se s nárůstem lesního porostu na konkrétní půdě zvyšuje i množství slunečního záření absorbovaného stromy (Arora a Montenegro, 2011). Naproti tomu zase stromy ochlazují prostředí díky vysoké evapotranspiraci (Smith a kol., 2013).
Příklad případové studie	Zde lze vyzdvihnout případovou studii horního povodí řeky Chao Phraya v Thajsku. Studie byla provedena nejen za účelem zkoumání vlivu zalesňování na riziko povodní, ale také za účelem jeho porovnání se změnami způsobenými změnou klimatu. Bylo zjištěno, že zalesňování může mít pozitivní vliv na zmírnění povodní; tento dopad je však relativně malý ve srovnání s mírou globálního oteplování, kterému dnes čelíme (Takata a Hanasaki, 2020).

7. Opatření: Meandrování řek a revitalizace nivy

Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno: Nijmegen, The Netherlands (World Landscape Architecture, 2017).	 Obrázek 11: Meandrování řeky, Nijmegen, Nizozemsko (World Landscape Architecture, 2017)
Krátké shrnutí	Říční inženýrství jako opatření ke snížení rizika povodní čelí mnoha sporům kvůli negativním dopadům na environmentální aspekty. Kromě toho může říční inženýrství v konečném důsledku přispět k výrazně vyššímu průtoku v dolní části upraveného říčního koryta, a tím způsobit silné povodně. V důsledku četných negativních důsledků došlo na mnoha místech k obnově řek s cílem vrátit řekám jejich původní stav a tím zmírnit dopady povodní (Bechtol a Laurian, 2005).
Proveditelnost	Návrat řek do jejich přirozeného stavu může být poměrně problematické, pokud se jedná o městské oblasti, protože ve městech obvykle není k dispozici dostatek prostoru pro přirozené říční meandry (Guimarães et al., 2021).

Nákladová efektivita	Přeměna meandrujících řek zpět do jejich přirozeného tvaru pomáhá zvýšit morfologickou stabilitu řek, snížit sklon a rychlost proudění, čímž se snižuje riziko eroze břehů a množství transportované vody za jednotku času. Kromě toho meandrování řek podporuje biologickou i hydrologickou diverzifikaci řek (Bechtol a Laurian, 2005). Pokud jde o náklady, Szalkiewicz et al. (2018) analyzovali 119 projektů věnujících se obnově řek v Evropě, zejména investice do obnovy jejich přírodních charakteristik. Zjistilo se, že 310 000 eur na hektar (10 000 m²) jsou průměrné náklady na obnovu řeky v Evropě.
Flexibilita	Obnova záplavových území může zabránit usazování sedimentů v řece a snížit rychlost usazování dále po proudu řeky tím, že umožní sedimentaci přímo v místě záplavy. V důsledku usazování sedimentů se může zlepšit kvalita a úrodnost půdy. Vytvořením malé kamenné hráze po stranách záplavového území je navíc možné omezit proces eroze. Kromě toho, když se půda přemění z obyčejné zemědělské půdy na lesní půdu s několika mokřady, lze zlepšit strukturu půdy (Natural Water Retention Measures, 2013).
Údržba	Údržba řek obvykle zahrnuje následující postupy: opravu koryta řeky, odstranění a přezkoumání nepotřebné vegetace, pravidelné kontroly, odstraňování odpadků a překážek a další činnosti. Podle Environment Agency (2015) náklady na čištění řek závisí především na tom, jak se tento proces provádí, zejména, zda se provádí ručně nebo se provádí například speciálním čistícím zařízením (mechanicky). U řek, které jsou již řádně udržovány, jsou náklady na mechanické čištění obvykle nižší než u manuálního čištění. U manuálního čištění se obvykle cena za údržbu pohybují mezi 1 680–17 096 dolary za kilometr ročně, což se rovná téměř 1,6–15,7 eurům za m za rok, zatímco u mechanického čištění se toto číslo pohybuje mezi 5 730 a 51 311 dolary za km za rok (~5,3–47,2 eur za m ročně). Kromě toho tentýž zdroj uvádí, že náklady na údržbu řeky závisí také na konečném cílovém stavu řeky, kterého má být dosaženo. Dále pak hodnotící testy a inspekce řeky obvykle stojí 4049 dolarů za km (~3,7 eur za m) délky řeky. Kromě toho, podle the Natural Water Retention Measures (2013), náklady na údržbu obnoveného záplavového území obvykle odpovídají 0,5-1,5 procentu investičních nákladů.
Změna klimatu	Rozsáhlé projekty obnovy záplavových území mohou výrazně ovlivnit klimatické podmínky. Obnova záplavových území může mít dopad na množství srážek a maximální teploty v důsledku změn ve využívání půdy, a zejména postupů zalesňování. Rychlost evapotranspirace může ovlivnit rozsáhlé zalesňování, což obvykle vede k vyššímu množství srážek. V důsledku zvýšené evapotranspirace lze zaznamenat snížení maximálních teplot. Navíc, protože v tomto případě se zemědělská a umělá půda obvykle přeměňuje na lesy, oxid uhličitý je více absorbován v důsledku procesu fotosyntézy, což zase může vést ke zmírnění změny klimatu (Natural Water Retention Measures, 2013). Podle GeoForschungsZentrum Potsdam a Helmholtz Centre (2021), ve srovnání s rovnými umělými říčními toky jsou přirozeně meandrující řeky schopnější odstraňovat CO₂ ze vzduchu. Děje se tak proto, že přírodě blízké řeky mají mnohem širší prostor pro erozi svých přirozených záplavových území, čímž transportují nahromaděný uhlík po řece přímo do moře.
Příklad případové studie	Room for the river („Prostor pro řeku“) v Nizozemsku je příkladem projektu, kde došlo k obnově řeky. Hlavním cílem projektu bylo zvýšit kapacitu průtoků řeky realizací říčních úprav na 35 různých místech na řece Rýn. Toho bylo dosaženo snížením koryta řeky Rýn následujícími činnostmi: rozšíření řeky, hloubení koryta řeky, umístění hrází ve větší vzdálenosti od řeky, snížení záplavových území tak, jak byly dříve atd. Celkové investiční náklady projektu

	byly vyčísleny na přibližně 2,64 miliardy dolarů, což odpovídá téměř 2,4 miliardám eur (Aerts, 2018). Bechtol a Laurian (2005) ukázali projekt protipovodňové ochrany na řece Napa jako příklad udržitelného snižování rizika povodní. Tato studie ukázala, jak mohou být říční povodně zmírněny pomocí obnovy přírodních charakteristik řeky Napa. Zejména v tomto projektu byly obnoveny původní záplavové oblasti řeky narovnáním do přirozeného stavu (Bechtol a Laurian, 2005).
--	--

8. Opatření: Dešťové zahrady

Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno: St. Paul campus rain garden (The University of Minnesota) (Asleson et al., 2010).	 <i>Obrázek 12: Dešťová zahrada (NOAA's Office for Coastal Management, 2015)</i>
Krátké shrnutí	Dešťová zahrada představuje malou zahradu s vysazenými keři, květinami, trávou a další vegetací, která se obvykle nachází v nízko položených oblastech pod svahem za účelem shromažďování odtoku srážkové vody (NOAA's Office for Coastal Management, 2015). Dešťové zahrady jsou navrženy tak, aby mohly přijímat přebytečné množství vody přicházející ze střech, silnic, trávníků a dalších cest a následně ji propouštět do půdy (Groundwater Foundation, 2022).
Proveditelnost	Dešťové zahrady by měly být umístěny v blízkosti budov, aby byly schopny zachytit odtok srážkové vody pocházející ze střech, trávníků, různých druhů chodníků a dalších cest. Pro vybudování dešťové zahrady je důležité nahradit původní půdu porézním substrátem, aby se mohla příznivě rozvíjet potřebná vegetace a snadno se vsakovalo přebytečné množství vody. Je nutné dbát na to, aby zahrada po každém dešti dostatečně rychle vyschla, aby se nevytvářelo příznivé přirozené prostředí pro množení komárů (Qin, 2020).
Nákladová efektivita	Náklady na dešťové zahrady závisí na různých faktorech, zejména na tom, jaké druhy rostlin jsou vybrány, na ploše zahrady, typu půdy atd. Náklady navíc závisí na tom, zda je zahrada postavena specializovanou firmou nebo zda se jedná pouze o dešťovou zahradu postavenou svépomocí. U zahrad vybudovaných specializovanými firmami se náklady na instalaci pohybují mezi 10-5 dolary za čtvereční stopu (téměř 100-150 eur za m²), zatímco u zahrad vybudovaných svépomocí se cena pohybuje mezi 3-5 dolary za čtvereční stopu, což se rovná téměř 30-50 eurům za m² (Groundwater Foundation, 2022). Podle Stormwater Management Calculator of the CNT (2020a), kapitálové náklady na výstavbu dešťové zahrady o rozloze 100 stop čtverečních (~ 9,3 m²) ve Spojených státech jsou téměř 607 dolarů, což se rovná téměř 558 eurům, zatímco náklady na údržbu zahrady se stejnou plochou jsou 41 dolarů ročně (~37,7 eur ročně). V tomto případě stejný zdroj uvádí, že životnost dešťové zahrady je 22,5 roku. Obecně jsou dešťové zahrady považovány za účinný způsob regulace odtoku, protože shromažďují srážkovou vodu a umožňují ji propouštět hluboko do země, čímž dochází k doplňování podzemní vody. Vegetace zároveň může pomoci filtrovat vodu od nečistot, jako jsou hnojiva, znečištění stelivo nebo strojní olej, které se hromadí ve vodě, když prochází příjezdovými cestami, střechami a dalšími cestami (NOAA's Office for Coastal Management, 2015).

Flexibilita	V literatuře nebyly nalezeny žádné konkrétní důkazy, které by naznačovaly účinnost dešťových zahrad při snižování jakýchkoli jiných rizik. Existují však zdroje, které popisují méně významné přínosy dešťových zahrad ve srovnání se snížením odtoku srážkové vody, jako je odstranění sedimentů a znečišťujících látek v odtoku srážkové vody (Dietz a Clausen, 2005; Groundwater Foundation, 2022).
Údržba	Dešťové zahrady obvykle nevyžadují použití hnojiv nebo pesticidů, s výjimkou prvního roku, protože v tomto případě se obvykle používají původní druhy rostlin. Obecně platí, že během prvních několika let, kdy je dešťová zahrada založena, je nutné odstranit nepotřebný plevel, odumřelé rostliny a další vegetaci, která může bránit udržitelnému růstu vysazených rostlin a zhoršovat estetiku. Když původní rostliny zakoření a dobře se uchytí, budou schopny plevel samy vytlačit. Kromě toho může být v prvních letech v případě nedostatku srážek nutné zahrady zalévat, aby se udržel normální růst rostlin (Groundwater Foundation, 2022).
Změna klimatu	Nebyla nalezena žádná relevantní literatura, která by naznačovala významný vliv dešťových zahrad na zmírňování klimatických změn.
Příklad případové studie	Dietz a Clausen (2005) studoval účinnost dešťových zahrad z hlediska snížení odtoku srážkové vody v Haddamu. Zjistili, že toto opatření ke zmírnění povodní může být vysoce účinné při zmírňování dopadů povodní. Studie zejména odhalila, že 98,8 procent vody, která pocházela ze střech, se infiltrovalo do půdy.

9. Opatření: Městské parky a městské lesy

Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno: Danube-Auen National Park in Vienna, Austria; Park Forest in Ghent, Belgium; Forest Ostend in Belgium (Network Nature, 2023).	 Obrázek 13: Městský park (Minnesota Pollution Control Agency, 2022)
Krátké shrnutí	S rozšiřováním a celkovým rozvojem měst se v posledních letech objevila tendence kácet stromy a odstraňovat vegetační koruny, zároveň se zvýšil počet nepropustných ploch, což následně vedlo k dramatickému zvýšení odtoku srážkové vody a v důsledku toho povodně. Stromy však hrají důležitou roli v hydrologickém cyklu, zejména jejich koruna dokáže zachytit srážkovou vodu a umožnit tak její část odpařit zpět do atmosféry, kořeny stromů pomáhají odtoku srážkové vody prosakovat hlouběji do půdy a zlepšují schopnost půdy zadržovat vodu (Kuehler et al., 2017).
Proveditelnost	Vzhledem k tomu, že nepropustné městské povrchy, jako jsou příjezdové cesty, jsou nedílnou součástí městského prostředí a je poměrně obtížné odstranit všechny nepropustné povrchy, které zvyšují odtok srážkové vody, městské lesy samy o sobě nebudou schopny bojovat s problémem vysokých objemů odtoku (Kuehler et al., 2017). Kuehler et al. (2017) zmiňují také, že pouze v kombinaci s dalšími technikami, které napomáhají ke snižování odtoku srážkové vody, budou městské lesy schopné snížit dostatečné množství odtoku.
Nákladová efektivita	McPherson et al. (2005) tvrdí, že například ve Spojených státech se průměrná cena městského stromu pohybuje v rozmezí 12,87-65 dolarů, což se rovná téměř 11,8-60 eurům. Podle kalkulačky hospodaření se srážkovou vodou CNT

	(2020a) jsou však kapitálové náklady na jeden strom ve Spojených státech téměř 250 dolarů (~230 eur), zatímco náklady na údržbu stromu jsou 180 dolarů ročně (~165 eur ročně). V tomto případě stejný zdroj uvádí, že životnost jednoho stromu odpovídá 80 letům.
Flexibilita	Jak již bylo zmíněno v části o zalesňování, stromový porost může mít vliv pouze na mělké sesuvy, zatímco u hlubokých sesuvů je vliv zanedbatelný. Zejména stromy se dokážou vyrovnat s menšími sesuvy půdy tím, že zabraňují pádu kamení, zpevňují a vysušují půdu, což zase pomáhá snižovat tlak vody v půdě (Forbes a Broadhead, 2013). Zabret a Šraj (2015) ve své studii zmiňují, že stromy mohou také zmírnit dopad změny klimatu, zejména snížením množství srážek, které dopadají na zem v důsledku procesu zachycování.
Údržba	S ohledem na Vogt et al. (2015), městské stromy by měly být řádně udržovány po celou dobu své životnosti, zejména opatření údržby zahrnující prořezávání, hubení chorob a škůdců, mulčování, zalévání, hnojení, poskytování podpůrného systému stromům a další činnosti. Systém podpory stromů znamená zajištění různých podpůrných konstrukcí, jako je úvaz nebo výztuhy, které pomáhají podepřít kořeny stromu v době, kdy je vysoce zranitelný. Kromě toho se takový podpůrný systém obvykle zavádí pro mladé stromy, které jsou obzvláště zranitelné a nestabilní, zejména ve větrných oblastech (Vogt et al., 2015). V návaznosti na tom je důležitým krokem k udržení jejich vitality zalévání: bez dostatečného zalévání nemusí stromy přežít, zvláště v prvních letech. Dalším důležitým krokem údržby je oprava infrastruktury. To zahrnuje poškození drenážního potrubí, příjezdových cest, parkovišť a dalších typů chodníků kořenovým systémem. Poškozené povrchy se poté opraví nebo nahradí novými a v případě potřeby se prořezou kořeny stromů.
Změna klimatu	Podle Nowak a Crane (2002), stromy v městských oblastech pomáhají do půdy ukládat téměř 700 milionů tun uhlíku. Safford et al. (2013) také zmiňují, že více než 708 milionů tun uhlíku ve Spojených státech je uloženo v městských lesích, což se odhaduje na více než desetinu všech emisí CO ₂ , které jsou v zemi ročně vyprodukovány. Kromě toho stromy v urbanizovaných oblastech Spojených států také každý rok absorbují 28,2 milionu tun uhlíku.
Příklad případové studie	Rahman et al. (2023) analyzovali 92 prací s cílem prozkoumat účinnost městského stromového porostu na zvládání povodňových rizik. Studie odhalila, že ve srovnání s různými typy využití půdy mají lesy nejvyšší potenciál při snižování odtoku srážkové vody. Bylo zjištěno, že jehličnan je považován za nejefektivnější typ stromu z hlediska ročního zvládání povodňových rizik, protože má nejvyšší transpirační a intercepční charakteristiky. Jeho schopnost propouštět vodu do půdy je však nižší než u listnatých stromů. Rahman et al. (2023) dospěli k závěru, že dalšího 4% snížení přebytečného množství srážkové vody lze dosáhnout 30% zvýšením počtu jehličnanů v oblastech, kde je během chladného období velké množství srážek, přičemž se očekává, že 20% nárůst zajistí stejné snížení odtoku pro regiony pouze s vlhkými klimatickými podmínkami.

10. Opatření: Infiltrační nádrže/nádrže	
Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno: Lehigh County in Pennsylvania (Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2005).	 <i>Obrázek 14: Infiltrační nádrž (US EPA, 2021b)</i>
Krátké shrnutí	Infiltrační nádrž nebo nádrž je příkladem protipovodňového zeleného opatření. Používá se ke snížení odtoku srážkové vody, která v důsledku nepropustných povrchů v městských oblastech nemá možnost se vsáknout do půdy (Massmann, 2003).
Proveditelnost	The Environment Agency (2015) uvádí, že infiltrační nádrže mají neomezenou životnost; pouze však v případě, že se materiál zaplavovaný do půdy během orby střídá a orba se provádí každých 5-10 let. Massmann (2003) uvádí, že postup návrhu infiltrační nádrže je obvykle poměrně komplikovaný, protože je známo, že predikce infiltrační schopnosti jsou velmi nejisté. Kromě toho je důležité zvolit správné rozměry nádrže kvůli nepříznivým důsledkům, které může způsobit nesprávná konstrukce. Zejména infiltrační nádrž s rozměry menšími, než je požadováno, může vést k záplavám a naopak nádrž s nadměrnými rozměry může být relativně neefektivní s ohledem na množství využívané půdy a náklady (Massmann, 2003). Podle US EPA (2021b) jedním z omezení tohoto typu nádrží je, že ne všechny typy půd jsou pro ně použitelné. Například půda, která prosakuje vodu pomalou rychlostí nebo která je vysoce zhutněná, není považována za dobrou volbu pro tento typ opatření ke zmírnění povodní. Kromě toho je před výstavbou infiltrační nádrže důležité zajistit, aby hladina podzemní vody byla relativně nízká, aby se mohla snadno vsakovat přebytečná srážková voda.
Nákladová efektivita	Podle Environment Agency (2015) ve Spojeném království náklady na jeden m³ objemu nádrže odpovídají téměř 10-15 liber, což je téměř 11,5-17 eur. Podle King a Hagan (2011) ve Spojených státech se celkové náklady na výstavbu retenční nádrže odhadují na přibližně 55 000 až 85 000 dolarů na akr půdy, což odpovídá téměř 12,5 až 19,3 eurům za m². S ohledem na účinnost infiltračních nádrží, Sasidharan et al. (2021) tvrdí, že i když jsou infiltrační nádrže široce využívány pro řízení odtoku srážkových vod, toto opatření stále nemůže zajistit dostatečné snížení objemu odtoku srážkové vody v městských oblastech. Kromě toho vždy zůstává problémem zanášení retenčních nádrží. V důsledku hromadění kontaminantů a sedimentů na dně nádrže se výrazně snižuje vsakovací kapacita nádrže, což vede k častému přelítí. K vyřešení problému je nutná pravidelná údržba, která také vyžaduje dostatečné finanční zdroje (Sasidharan et al., 2021).
Flexibilita	Podle US EPA (2021b) infiltrační nádrže pomáhají odstraňovat znečišťující látky ze srážkové vody, čímž zabraňují vniknutí těchto kontaminantů do podzemních vod.
Údržba	Podle Environment Agency (2015) náklady na plánovanou údržbu infiltrační nádrže se pohybují kolem 0,6 libry na m ² (~0,68 eur na m ²), zatímco u pravidelné (méně časté) údržby se náklady vyšplhají až na 3,0 libry, což se rovná téměř 3,5 eura. Stejný zdroj například uvádí, že jedním z

	občasných/pravidelných postupů údržby nádrží je odstraňování bahna jednou za tři roky, což obvykle stojí kolem 500 liber (~570 eur) za jednu retenční nádrž. U těchto aktivit se cena pohybuje mezi 50-60 librami a 3-5 librami za m² (~57-68,5 a 3,4-5,7 eur za m²). Dokument však nespecifikuje, jak často by se tyto dvě činnosti údržby měly provádět. S ohledem na požadované údržbové činnosti pro infiltrační nádrže US EPA (2021b) uvádí, že v případě ucpání, které vede ke špatné vsakovací kapacitě nádrže, by měla být vrchní vrstva půdy vyměněna za novou. Dále by měly být prováděny pravidelné kontroly, nejlépe jednou za měsíc, aby se zjistilo, zda v nádrži nejsou nečistoty, erodovaná místa, aby se zkontrolovala stabilita konstrukce a v případě potřeby, aby se posekala tráva. Jednou za pět let by měla být nádrž zkontrolována na sedimentaci: nahromaděné sedimenty by měly být v případě potřeby odstraněny ze dna nádrže.
Změna klimatu	V literatuře nebyly nalezeny žádné konkrétní důkazy o účinnosti retenčních nádrží z hlediska zmírňování dopadů změny klimatu.
Příklad případové studie	Helles a Mogheir (2022) zkoumali infiltrační kapacitu a různé další ovlivňující faktory na třech vsakovacích jímkách v pásmu Gazy. Studie ukázala, že rychlost infiltrace nádrží je velmi závislá na množství sedimentace, které se akumuluje uvnitř těchto vsakovacích zařízení v důsledku zanášení spodní vrstvy.

1.3 HYBRIDNÍ OPATŘENÍ

Tabulka 5: Hybridní opatření

Deskriptor	Vysvětlení
11. Opatření: retenční nádrže (mokrý nádrže)	
Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno: Radzyny retention reservoir in Poznan, Poland (Waligórski et al., 2019).	 Obrázek 15: Retenční nádrže Radzyny v Poznani, Polsko (Waligórski et al., 2019)
Krátké shrnutí	Retenční nádrž nebo také mokrá nádrž, je známá jako speciální typ infrastruktury pro zadržování vody, která slouží především ke snížení kulminačního průtoku při povodních. Na rozdíl od záchytných (suchých) nádrží retenční trvale zadržují vodu, což zase umožňuje využití vody pro jiné účely, jako je zemědělství, zásobování obytných oblastí vodou, výroba vodní energie a další (Connecting Nature, 2020; Eastcoast Sitework, 2021).
Proveditelnost	Při realizaci retenční nádrže Podutik bylo pozorováno několik obtíží. Zejména bylo poměrně komplikované získat na projekt dostatek finančních prostředků a povolení od vodohospodářských organizací. Kromě toho dalším faktorem, který tento proces brzdil, byla špatná komunikace mezi zúčastněnými stranami (Connecting Nature, 2020).

Nákladová efektivita	Bezak et al. (2021) ve své studii uvedli, že výstavba retenční nádrže Podutik se pohybovala kolem 500 000 eur, zatímco náklady na výstavbu retenční nádrže Brdnikova, která se nachází nedaleko Lublaně, činily 2 400 000 eur. Podle Connecting Nature (2020), mezi přínosy retenční nádrže Podutik patří: ochrana před povodněmi, zlepšení biodiversity, snížení znečištění vod, rekreační aktivity, závlahové účely apod.
Flexibilita	Jak již bylo zmíněno v části o přehradách, velké nádrže mohou být vysoce účinné při snižování sedimentace po proudu řeky tím, že zadržují významné části živin (Tiessen et al., 2011).
Údržba	Podle Eastcoast Sitework (2021) údržba retenčních nádrží zahrnuje následující postupy: pravidelné odstraňování sedimentů, kontrola nádrží proti erozi, kontrola konstrukce za účelem zjištění škod po přivalových srážkách, odstranění odpadků, zbytečné vegetace apod.
Změna klimatu	V literatuře nebyl nalezen žádný důkaz o vlivu retenčních nádrží na změnu klimatu.
Příklad případové studie	Bezak et al. (2021) studovali vliv retenčních nádrží Podutik a Brdnikova v povodí řeky Glinščica na povodňová rizika. Studie odhalila poměrně vysokou účinnost záchytné nádrže Brdnikova při snižování kulminačních průtoků při povodních po dobu dvou vybraných období. Zde bylo pro dobu návratnosti 2 a 25 let procento sníženého nejvyššího stupně průtoků 32 a 45 procent. U druhé retenční nádrže Podutik však byly výsledky zcela odlišné, s 30% poklesem kulminačního průtoků po dobu 25 let a pouze 5% za 2letou dobu návratnosti (Bezak et al., 2021).

12. Opatření: retenční nádrže/nádrže (suché nádrže)

Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno: Meissen, Saxony, Germany (Interreg Central Europe, 2020); Savinja Valley, Slovenia (Glavan et al., 2020).	 Obrázek 16: Malá retenční nádrž (obrázek vlevo) a ucpaný výstup z nádrže (obrázek vpravo) (Sustainable Stormwater Management, 2009)
Krátké shrnutí	Realizace záchytných nádrží je jedním ze způsobů zvládnání povodňových rizik. Hlavním účelem záchytných nádrží při povodních je dočasné zadržení vody, a tím snížení povodňové kulminace a následné zmírnění jejich možných negativních důsledků (Ngo et al., 2016).
Proveditelnost	V oblastech náchylných k záplavám by měly být vybudovány retenční nádrže. Obecně lze bažinaté pozemky a přírodní jezera považovat za pozemky pro výstavbu nádrží, protože je obvykle nelze využít k žádným jiným hospodářským účelům. Při návrhu výstavby je důležité zvážit pravděpodobnost přelití a odpovídajícím způsobem provést návrh protipovodňové infrastruktury (Majidi, 2020). Pokud jde o náklady, Hettiarachchi (2011) se domnívá, že ve srovnání s jinými strategiemi zmírňování povodňových rizik lze zavedení záchytné nádrže pro ochranu před povodněmi považovat za udržitelnou a nákladově efektivní možnost.

Nákladová efektivita	Jak již bylo zmíněno v sekci o mokřých retenčních nádržích, náklady například na výstavbu záchytné nádrže Brdnikova se pohybovaly kolem 2 400 000 eur (Bezák et al., 2021).
Flexibilita	Jak již bylo zmíněno v oddíle o přehradách, studie Tiessen et al. (2011) prokázala účinnost velkých nádrží při snižování nežádoucí sedimentace v oblastech po proudu řeky.
Údržba	Bez správné konstrukce a další údržby se stav nádrže může rychle zhoršit, což nakonec vede ke kratší životnosti a nemožnosti jejího použití. Pokud záchytná nádrž nesplňuje požadované konstrukční a údržbové normy a je letitá, je její spolehlivost zpochybňována. Její pravidelná údržba je tedy zásadním krokem k udržení potřebných vlastností a hlavních účelů nádrže (Majidi, 2020). Podle Rollins (2020) mechanická údržba konstrukčních prvků nádrže, vegetace, suti a regulace sedimentace ve vstupním a výstupním potrubí a v samotné nádrži jsou hlavními kroky údržby během životnosti nádrže. The Environment Agency (2015) zmiňuje, že 50 liber (~ 57 eur) by mělo být měsíčně vynaloženo na odstranění nečistot a jakéhokoliv jiného zdroje odpadu ze vstupního a výstupního potrubí, zatímco za kontrolu ventilů je nutné zaplatit 10 liber (~11.5 eur) jednou za šest měsíců. Vizuální kontrola konstrukce stojí 15 liber měsíčně, což se rovná téměř 17 eurům měsíčně.
Změna klimatu	Nebyly nalezeny žádné relevantní informace o vlivu vyschlých nádrží na zmírnění změny klimatu.
Příklad případové studie	Jedním z příkladů takové nádrže je záchytná nádrž Olmos Creek, která se nachází v San Antoniu v Texasu. Hlavním účelem nádrže je regulace povodní při mimořádných událostech. Nádrž však slouží i k dalším doplňkovým účelům, jako je sedimentace a kontrola nečistot. Záchytná nádrž zachycuje kontaminanty a odpadky, čímž zabráňuje pronikání různých druhů znečišťujících látek do městského vodovodního systému. Kromě toho je jednou z jedinečných vlastností tohoto multifunkčního zařízení pro skladování vody to, že se nachází přímo v městské zástavbě a navíc slouží k rekreačním aktivitám (Majidi, 2020).

13. Opatření: Zelené střechy

Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno: Basel, Switzerland (Climate-ADAPT, 2016).	 <i>Obrázek 17: Zelená střecha (NOAA's Office for Coastal Management, 2015)</i>
Krátké shrnutí	Zelené střechy patří mezi přírodě blízká řešení, která pomáhají nejen řešit povodňová rizika, ale mají i další neméně důležité přínosy, jako je vytvoření vhodného prostředí pro rozvoj biodiverzity, napomáhání k tepelné izolaci budov, snížení energetické náročnosti a znečištění životního prostředí, zlepšení estetického vzhledu budov, atd. (Basu et al., 2021).
Proveditelnost	Podle Climate-ADAPT (2016) zelené střechy mají životnost kolem 50 let. Pokud jde o dobu realizace, například zelené střechy zhotovené v rámci vládních programů v letech 1996 a 2005 vydržely dva roky.
Nákladová efektivita	Pokud by desetina budov měla nainstalované zelené střechy, lze celkový odtok srážkové vody ve městě snížit o 2,7 procenta (Mentens et al., 2006). Studie od

	Jarosińska a Gołda (2020) ukázala, že vysoký počet zelených střech ve městě může přispět ke snížení odtoku srážkové vody a v důsledku toho zlepšit její retenci o 12,2 až 16,9 %. Například propustný beton naopak vykazuje méně efektivní výsledky než zelené střechy, pokud jde o snížení srážkové vody během povodní, a zlepšuje retenci jen o 5,2 až 5,7 procenta. Navzdory pozitivnímu vlivu zelených střech na povodňová rizika může zelená infrastruktura pro odvádění srážkové vody přispět také k úsporám energie. Zelené střechy mohou poskytnout izolaci a snížit vnitřní teplotu v budovách, v důsledku čehož snížit náklady na energie tím, že zastíní budovy před sluncem pomocí vegetačního krytu (CNT, 2020b). Francis a Lorimer (2011) uvedli, že náklady na instalaci jsou jednou z hlavních výzev zelených střech. Z ekonomického hlediska nelze realizaci zelených střech považovat za finančně výhodnou investici, pokud nejsou zohledněny úspory energie. S pomocí zelené vegetace na střechách lze snížit spotřebu energie a ušetřit až 215 dolarů ročně na budovu (~198 eur ročně). Vzhledem k tomu, že návratnost investic bude trvat hodně času, je třeba zvážit více aspektů analýzy proveditelnosti zelených střech před jejich instalací (Francis a Lorimer, 2011). The Environment Agency (2015) zmiňuje, že v závislosti na krycím materiálu zelené střechy se cena obvykle liší. Například u střechy s rozhodníkovou rohoží se náklady pohybují kolem 90 liber za m², zatímco u biologicky rozmanité střechy se snižují na 80 liber za m² (~103 a 91 eur na m²).
Flexibilita	V literatuře nebyly nalezeny žádné důkazy, které by naznačovaly vliv zelených střech na snižování jakýchkoli jiných rizik.
Údržba	Francis a Lorimer (2011) ve své studii zdůrazňují, že hlavní komplikace tohoto opatření se týká jejich údržby. Studie provedená Silva et al. (2015) o opatřeních na údržbu zelených střech ve středomořských oblastech ukázala, že zelená střešní krytina by měla podléhat pravidelné údržbě. Zde se postupy údržby týkají především zahradnických činností, které zahrnují hnojení, odstraňování nežádoucích druhů rostlin, čištění střech, neustálou kontrolu škůdců atd. Kromě toho je zavlažovací systém dalším důležitým aspektem zelených střech, který by měl být řádně kontrolován a udržován. Zavlažovací systém zajišťuje vodu pro potřebný růst rostlin, čímž také zajišťuje správný vývoj vegetace. Kromě toho by měl být drenážní systém zelených střech neustále čištěn od zbytečných nečistot a měla by být pravidelně prováděna technická kontrola (Silva et al., 2015). Podle The Environment Agency (2015) náklady na údržbu závisí také na materiálu, který se používá k pokrytí střechy, například rozhodníková rohož nebo biologicky rozmanitá střecha. The Environment Agency (2015) uvádí, že u prvního se cena pohybuje kolem 2500 liber (~2852 eur) ročně během prvních 2 let po implementaci, zatímco u druhého jsou náklady 1250 liber (~1426 eur) za stejné období. Po 2 letech jsou roční náklady na údržbu 600 a 150 liber, což odpovídá téměř 685 a 171 eurům.
Změna klimatu	Jedním z pozitivních aspektů zelených střech je jejich schopnost bojovat proti klimatickým změnám (CNT, 2020b). Střešní vegetace zároveň podporuje adaptaci měst na rychle se měnící podmínky prostředí (Jarosińska a Gołda, 2020). Stejně jako u zalesňování pomáhají zelené střechy vázat oxid uhličitý ze vzduchu, čímž zpomalují proces globálního oteplování. Podle CNT (2020b), ve Spojených státech se roční hodnota sníženého množství oxidu uhličitého v důsledku snížené spotřeby energie pohybovala kolem 129 eur na hektar (~10 000 m²) stromů. Besir a Cuce (2018) uvádějí, že emise oxidu uhličitého lze ročně snížit použitím dvouplášťových zelených fasád. Přibližně 133 kg oxidu uhličitého ročně lze také snížit stromy střední velikosti (Wong a Baldwin, 2016).
Příklad případové studie	Karteris et al. (2016) analyzovali, jak efektivní by bylo zavedení zelených střech na městském úřadě v Soluni v Řecku. Vedle výhod, jako jsou úspory energie a

	zvýšení biodiverzity, studie odhalila, že pokud by se dosavadní počet zelených střech v obci zvýšil sedmkrát, tak může snížit odtok srážkové vody až o 45 procent.
14. Opatření: Výsadbové podzemní vsakovací rýhy	
Příklad reálného případu, kdy bylo opatření použito: the City of Vancouver, Canada (Vega, 2018).	 <i>Obrázek 18: Schematické znázornění výsadbové podzemní vsakovací rýhy (NOAA's Office for Coastal Management, 2015)</i>
Krátké shrnutí	Podzemní výsadbové vsakovací rýhy (STT) představují vysazené stromy navzájem spojené pod zemí systémem příkopů, který reguluje přebytečné množství srážkové vody (NOAA's Office for Coastal Management, 2015). STT také poskytují zdravé prostředí pro udržitelný růst stromů v městských oblastech, kde převládají nepropustné chodníky. Toto opatření zahrnuje podzemní systém navržený s půdním médiem, přítokem, odtokovým potrubím a speciálním systémem rozvodu vody, který umožňuje vsakování srážkové vody a její odtok do drenážního systému.
Proveditelnost	Pro výsadbové vsakovací rýhy by měly být vybrány konkrétní druhy stromů, aby bylo zajištěno, že budou schopny přežít v městském prostředí. Pokud se jedná o systém hospodaření se srážkovou vodou, je pro správný růst a vývoj stromů zapotřebí dostatek prostoru pro kořeny stromů. Kromě toho je důležité zajistit, aby se kořeny stromů nedotýkaly žádných podzemních struktur, jako jsou značky, potrubí, základy budov, elektrické dráty atd. The Environment Agency (2015) uvádí, že podzemní vsakovací rýhy mají neomezenou životnost; filtrační materiál je však nutné měnit každých 10-15 let.
Nákladová efektivita	Mezi výhody výsadbových podzemních vsakovacích rýh patří doplňování podzemních vod, regulace odtoku srážkové vody, zlepšení kvality ovzduší, zlepšení kvality vody prostřednictvím absorpce kontaminantů vegetací (vegetativní filtrace). Kromě toho, podle McPherson et al. (2005) se očekává, že stromy v městských oblastech ušetří 485,8 milionu dolarů (~447 milionů eur) nebo 2,5 procenta energie vynaložené na klimatizaci ročně. Úspora na spotřebě energie spojené se stromy nastává v důsledku stínícího efektu, snížení počtu nepropustných chodníků, ochlazování v důsledku evapotranspirace, kterou stromy poskytují (Minnesota Pollution Control Agency, 2022). Pokud jde o náklady, The Environment Agency (2015) uvádí, že náklady na podzemní vsakovací rýhy jsou téměř 60 liber na m ² , což odpovídá téměř 68,5 eurům na m ² .
Flexibilita	V literatuře nebyly nalezeny žádné důkazy, které by naznačovaly vliv výsadbových vsakovacích rýh na snížení rizika jiných rizik, kromě filtrace srážkových vod – odstranění znečišťujících látek ze srážkových vod (US EPA, 2013).
Údržba	The NOAA's Office for Coastal Management (2015) uvádí, že STT vyžadují pravidelnou údržbu, aby se systém udržel v žádoucím stavu. Zejména je nutné zalévat stromy, neustále provádět kontroly za účelem odstranění odpadků a jiného zdroje smetek, kontrolovat invazivní druhy a udržovat potrubí pro

	správné proudění srážkové vody. Stejný zdroj navíc zmiňuje, že STT se musí čistit dvakrát ročně. Pokud jde o náklady na údržbu, The Environment Agency (2015) uvádí, že údržba podzemních vsakovacích rýh obvykle stojí kolem 0,2-1,0 liber na m² (~0,23-1,14 eur na m²).
Změna klimatu	Jak již bylo diskutováno v oddílech týkajících se zalesňování a městských lesů, stromy hrají důležitou roli při zmírňování změny klimatu v důsledku sekvence uhlíku. The US EPA (1998) uvádí, že v závislosti na typu a rychlosti vývoje dospělý strom obvykle absorbuje zhruba 50 liber, což se rovná téměř 22,7 kg CO₂ ročně.
Příklad případové studie	Vega (2018) zkoumal účinnost STT ve Vancouveru v Kanadě. Podle odhadů z roku 2016 byla v tomto roce více než polovina povrchu města pokryta nepropustnými povrchy. Vysoký počet nepropustných chodníků, které vedly ke vzniku poměrně velkého množství neodteklé dešťové vody, si vyžádal realizování SST, aby si město zachovalo udržitelný design. Zde zpráva dochází k závěru, že systémy STT mohou být docela úspěšné při řízení odtoku srážkové vody tím, že umožňují infiltraci vody do půdy, zejména v hustě zastavěných městech, jako je město Vancouver. Kromě toho na základě provedeného přezkumu literatury o výkonnosti STT v Evropě, Spojených státech a některých dalších regionech Vega (2018) zjistil, že STT jsou nákladově efektivním řešením infrastruktury.

15. Opatření: Propustné vegetační povrchy (na parkovištích)

Příklad reálného případu, kdy bylo opatření uplatněno: Horizon Village, Oregon (Environmental Oregon Council, 2014).	 Obrázek 19: Zatravněvací betonová dlažba (Atelier GROENBLAUW, 2016)  Obrázek 20: Vzor otevřené dlažby (Atelier GROENBLAUW, 2016)
Krátké shrnutí	Propustné povrchy v městských oblastech umožňují pronikání nadměrného množství vody během dešťů. Ačkoliv o propustných vozovkách jsme již hovořili v sekci pro šedé míry, v tomto případě budou analyzovány propustné vegetační (zatravněné) plochy. Propustné vegetační chodníky, jako jsou například zatravněvací betonové dlažby, mají obvykle betonové pilíře s vegetačními mezerami mezi nimi, které umožňují prosakování vody do půdy. Cihlovou dlažbu vyplněnou zeminou a vegetací, jako je tráva, lze také použít jako typ propustné dlažby (Atelier GROENBLAUW, 2016).

Proveditelnost	Podle The Atelier GROENBLAUW (2016) v případě silných přívalových dešťů není takový druh propustných povrchů vždy dobrým řešením pro řízení odtoku srážkové vody. Při silných deštích nebudou propustné povrchy schopny zpracovat celé množství přebytečné vody, a proto je nutné dodatečně realizovat další protipovodňová opatření. Kromě toho se tento typ povrchu obvykle realizuje na parkovištích, plochách u garáží a jiných chodnících, které nejsou intenzivně využívány. Další omezení, například u takzvaných otevřených vzorů dlažby (obr. 19), se týká především jejich neschopnosti unést velké zatížení.
Nákladová efektivita	Podle The Verity Supply (2023) (komerční stavební společnost), náklady na 240 stop ² (~22,3 m ²) zatravnovací propustné dlažby jsou 1 020 dolarů, což se rovná téměř 938 eurům.
Flexibilita	Kromě snížení odtoku srážkové vody je také známo, že vegetací upravené propustné chodníky odstraňují znečišťující látky z kontaminované srážkové vody, ale postupem času se tato schopnost může zhoršovat (Soil Retention, 2023).
Údržba	The Soil Retention (2023) uvádí, že obecně u všech typů propustných vozovek včetně vegetací ovlivňovaných povrchů není postup údržby složitý, dokud nedochází k ucpávání pórů vozovky. Pokud jde o činnost údržby, je důležité provádět pravidelné kontroly na místě, aby se zajistilo, že nedochází k úniku sedimentované vody z jiných zařízení, která by mohla ucpat otvory v chodníku. Dále je nutné kontrolovat vegetaci proti nežádoucím chorobám a také volit vegetaci, která je odolná vůči soli. Kromě toho by po každé povodni s hloubkou záplavy přesahující 0,5 palce (1,27 cm) měly být provedeny kontroly na místě, aby se vyloučilo riziko stojaté vody (Soil Retention, 2023).
Změna klimatu	Je známo, že vegetace na propustných betonových površích absorbuje CO ₂ a snižuje tzv. efekt městského tepelného ostrova v důsledku procesu ochlazování způsobeného evapotranspirací (Soil Retention, 2023).
Příklad případové studie	The Environmental Oregon Council (2014) představuje jeden příklad rezidenční čtvrti v Horizon Village v Oregonu, kde byla na parkovištích realizována travnatá propustná dlažba. Zde byla zavedena kombinace polyetylenových panelů a trávy, aby se vytvořila propustná dlažba schopná řídit odtok dešťové vody. Samotná dlažba je schopna odolat zatížení 35 842 tun na ft 2 (~0,0929 m ²).  Obrázek 21: Propustná dlažba v Horizon Village v Oregonu (Environmental Oregon Council, 2014)

2. VÝBĚR A VYHODNOCENÍ OPATŘENÍ

V této části bylo provedeno vyhodnocení vybraných opatření. Byly zde na základě provedeného přezkumu literatury posouzeny takové aspekty, jako je proveditelnost, nákladová efektivita, flexibilita atd. (viz tabulka 7, 8 a 9) každého konkrétního opatření. Porovnáním všech opatření mezi sebou ve vztahu k hodnotícím kritériím byla v každé kategorii zvýrazněna nejvhodnější opatření pro zvládání povodňových rizik v povodí řeky Glinščica (viz tab. 7, 8 a 9). Jak již bylo zmíněno v úvodu této výzkumné práce, nejvhodnější protipovodňová opatření budou následně modelována v softwaru HEC-HMS, aby bylo možné dále vyhodnotit jejich výkonnostní charakteristiky z hlediska snížení kulminačních průtoků v povodí řeky Glinščica. Je však také důležité vzít v úvahu, že ne všechna opatření, která byla definována v tomto článku, lze snadno modelovat v softwaru HEC-HMS. Některá z těchto opatření, jako je zalesňování, protipovodňové nádrže a propustné betonové chodníky, byla navíc modelována již v předchozích pracích (Bezák et al., 2021; Johnen et al., 2020). Proto by tyto faktory měly být zohledněny i při výběru opatření pro postup modelování.

Současně je třeba také poznamenat, že proces výběru nejvhodnějších protipovodňových opatření může být poměrně subjektivní, neboť spolu s informacemi získanými z literární rešerše zahrnuje i subjektivní názor osoby, která výběr provádí.

Tabulka 6: Kategorie hodnocení

Míra vhodnosti opatření pro zvládání povodňových rizik v povodí řeky Glinščica	Barevný indikátor	Číselný indikátor
Velmi vhodné		3
Vhodný		2
Částečně vhodné		1
Nevhodné/bez účinku		0

Tabulka 7: Šedá opatření

	Přehrady	Protipovodňové stěny	Podzemní nádrže na zadržování srážkové vody	Propustné betonové dlažby	Vsakovací šachty/suché jímky
Proveditelnost	1	2	2	1	2
Nákladová efektivita	1	3	2	2	2
Flexibilita	1	0	0	0	0
Údržba	1	2	2	1	2
Změna klimatu	0	0	0	0	0
Skóre	4	7	6	4	6

Tabulka 8: Zelená opatření

	Zalesňování	Obnova meandrů řek a záplavových území	Dešťové zahrady	Městské parky a městské lesy	Infiltrační jezírko/nádrž
Proveditelnost	2	1	3	2	2
Nákladová efektivita	3	2	3	3	2
Flexibilita	3	2	2	3	2
Údržba	2	1	3	2	2
Změna klimatu	3	2	1	3	0
Skóre	13	8	12	13	8

Tabulka 9: Hybridní opatření

	Retenční jímky (mokrý nádrže)	Retenční nádrže (suché nádrže)	<i>Zelené střechy</i>	Podzemní výsadbové vsakovací rýhy	Propustné vegetační povrchy
Proveditelnost	1	1	2	2	2
Nákladová efektivita	3	2	3	2	2
Flexibilita	1	1	2	2	2
Údržba	1	2	1	2	2
Změna klimatu	0	0	3	3	1
Skóre	6	6	14	14	11

3. REFERENCES

- Aerts, J.C.J.H., 2018. A review of cost estimates for flood adaptation. *Water* (Switzerland). <https://doi.org/10.3390/w10111646>
- Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., Lunn, D., 2014. Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. *Energy Policy* 69. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.069>
- Arora, V.K., Montenegro, A., 2011. Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts. *Nat. Geosci.* 4. <https://doi.org/10.1038/ngeo1182>
- ASDSO, 2023. Case Study: Wivenhoe Dam (Australia, 2011) [WWW Document]. URL <https://damfailures.org/case-study/wivenhoe-dam-australia-2011/> (accessed 3.20.23).
- Asleson, B.C., Nestingen, R.S., Gulliver, J.S., Hozalski, R.M., Nieber, J.L., 2010. *Stormwater Treatment: Assessment and Maintenance*. Minneapolis, MN.
- Atelier GROENBLAUW, 2016. Water-permeable pavements [WWW Document]. URL <https://www.urbangreenbluegrids.com/measures/porous-paving-materials/> (accessed 3.12.23).
- Bae, C., Lee, D.K., 2020. Effects of low-impact development practices for flood events at the catchment scale in a highly developed urban area. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 44. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101412>
- Basu, A.S., Pilla, F., Sannigrahi, S., Gengembre, R., Guillard, A., Basu, B., 2021. Theoretical framework to assess green roof performance in mitigating urban flooding as a potential nature-based solution. *Sustain.* 13. <https://doi.org/10.3390/su132313231>
- Bechtol, V., Laurian, L., 2005. Restoring straightened rivers for sustainable flood mitigation. *Disaster Prev. Manag. An Int. J.* 14. <https://doi.org/10.1108/09653560510583806>
- Besir, A.B., Cuce, E., 2018. Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Bezak, N., Kovačević, M., Johnen, G., Lebar, K., Zupanc, V., Vidmar, A., Rusjan, S., 2021. Exploring options for flood risk management with special focus on retention reservoirs. *Sustain.* 13. <https://doi.org/10.3390/su131810099>
- Bonan, G.B., 1997. Effects of land use on the climate of the United States. *Clim. Change* 37. <https://doi.org/10.1023/A:1005305708775>
- City of Elk Grove, 2023. Project Factsheets, Presentations And Documents [WWW Document]. URL <https://www.elkgrovecity.org/dry-well-project-prop-84/project-factsheets-presentations-and-documents> (accessed 3.10.23).
- Climate-ADAPT, 2022. The refurbishment of Gomeznarro park in Madrid focused on storm water retention [WWW Document]. URL <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/the-refurbishment-of-gomeznarro-park-in-madrid-focused-on-storm-water-retention> (accessed 3.26.23).
- Climate-ADAPT, 2020. Afforestation and reforestation as adaptation opportunity [WWW Document]. URL <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/afforestation-and-reforestation-as-adaptation-opportunity> (accessed 3.18.23).
- Climate-ADAPT, 2016. Green roofs in Basel, Switzerland: combining mitigation and adaptation measures [WWW Document]. URL <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/green-roofs-in-basel-switzerland-combining-mitigation-and-adaptation-measures-1> (accessed 3.10.23).
- CNT, 2020a. Stormwater management calculator [WWW Document]. URL <https://greenvalues.cnt.org/index.php> (accessed 3.7.23).
- CNT, 2020b. Green Values Strategy Guide: Linking Green Infrastructure Benefits to Community Priorities [WWW Document]. URL <https://cnt.org/publications/green-values-strategy-guide-linking-green-infrastructure-benefits-to-community> (accessed 3.15.23).
- Connecting Nature, 2020. Water Retention Reservoir - Podutik [WWW Document]. URL <https://connectingnature.eu/oppla-case-study/17577> (accessed 3.14.23).
- Dietz, M.E., Clausen, J.C., 2005. A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment. *Water. Air. Soil Pollut.* 167. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-8266-8>
- DWA, 2005. *Standard DWA-A 138E Planning, Construction and Operation of Facilities for the Percolation of Precipitation Water, Buildings*.
- Eastcoast Sitework, 2021. What is a retention pond and why is maintenance important? [WWW Document]. URL <https://eastcoastsitework.com/what-is-a-retention-pond-and-why-is-maintenance-important/> (accessed 3.28.23).
- EEA, 2017. *Green infrastructure and flood management. Promoting cost-efficient flood risk reduction via green*

- infrastructure solutions. <https://doi.org/TH-AL-17-013-EN-N>
- Environment Agency, 2015. Cost estimation for SUDS - summary of evidence. Bristol.
- Environmental Oregon Council, 2014. CASE STUDY: Horizon Village Grassy Pavers [WWW Document]. URL <https://oeonline.org/stormwater/> (accessed 3.28.23).
- FEMA, 2013. Floodwalls [WWW Document]. Free Univ. Berlin, Dep. Earth Sci. URL https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/iwrm/Implementation/technical_measures/Flood-protection-measures/structural_measures/Floodwalls/index.html#:~:text=Floodwalls%2C which are typically constructed,ice away from the building. (accessed 3.20.23).
- Feng, H., Hewage, K., 2014. Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings. *Energy Build.* 75. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.039>
- Flood Control International, 2023. Wakefield Flood Defenses [WWW Document]. URL <https://floodcontrolinternational.com/case-studies/wakefield/> (accessed 3.5.23).
- Forbes, K., Broadhead, J., 2013. Forests and landslides: The role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia. RAP Publ.
- Francis, R.A., Lorimer, J., 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *J. Environ. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>
- Galoie, M., Motamedi, A., 2014. Flood Control using Retention Dams (Case Study: A Small Catchment in Austria). *SimHydro* 36, 1–10.
- GeoForschungsZentrum Potsdam and Helmholtz Centre, 2021. Meanders in riverbeds help the climate: Riverbeds that can shift naturally are more efficient carbon sinks than straightened rivers [WWW Document]. ScienceDaily. URL www.sciencedaily.com/releases/2021/10/211029113959.htm (accessed 3.16.23).
- Glavan, M., Cvejić, R., Zupanc, V., Knapič, M., Pintar, M., 2020. Agricultural production and flood control dry detention reservoirs: Example from Lower Savinja Valley, Slovenia. *Environ. Sci. Policy* 114, 394–402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.012>
- Green Building Alliance, 2023. Permeable Pavement [WWW Document]. URL <https://gba.org/resources/green-building-methods/site-solutions/permeable-pavement/> (accessed 3.15.23).
- Groundwater Foundation, 2022. What is a rain garden? [WWW Document]. URL <https://groundwater.org/rain-gardens/> (accessed 3.16.23).
- Guimarães, L.F., Teixeira, F.C., Pereira, J.N., Becker, B.R., Oliveira, A.K.B., Lima, A.F., Veról, A.P., Miguez, M.G., 2021. The challenges of urban river restoration and the proposition of a framework towards river restoration goals. *J. Clean. Prod.* 316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128330>
- Haselbach, L., 2009. Pervious concrete and mitigation of the urban heat island effect. *Transp. Res. Board* 88th Annu. Meet. No. 09-0098.
- Helles, Z., Mogheir, Y., 2022. Factors Affecting the Infiltration Rate of Stormwater. *Tech. Int. J. Eng. Res.* 9.
- Hettiarachchi, P., 2011. Detention Reservoirs as a Flood Control Measure. *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka* 44. <https://doi.org/10.4038/engineer.v44i2.7023>
- Huang, Y., Tian, Z., Ke, Q., Liu, J., Irannezhad, M., Fan, D., Hou, M., Sun, L., 2020. Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management. *Wiley Interdiscip. Rev. Water.* <https://doi.org/10.1002/WAT2.1421>
- Hughes, A., 2023. A Guide to Inspecting Concrete and Masonry Dams [WWW Document]. URL <https://www.cedengineering.com/courses/a-guide-to-inspecting-concrete-and-masonry-dams> (accessed 3.14.23).
- International Rivers, 2007. Greenhouse Gas Emissions from Dams FAQ [WWW Document]. URL <https://archive.internationalrivers.org/resources/greenhouse-gas-emissions-from-dams-faq-4064#:~:text=Most of the global warming,much less powerful greenhouse gas.> (accessed 3.9.23).
- Izevbekhai, B.I., Schroeder, C., 2017. Seven Year Performance of City of Shoreview's Pervious Concrete Project. *Urban Clim.* 34. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100695>
- Jarosínska, E., Gołda, K., 2020. Increasing natural retention – Remedy for current climate change in urban area. *Urban Clim.* 34. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100695>
- Johnen, G., Sapač, K., Rusjan, S., Zupanc, V., Vidmar, A., Bezak, N., 2020. Modelling and Evaluation of the Effect of Afforestation on the Runoff Generation Within the Glinščica River Catchment (Central Slovenia), in: *Handbook of Environmental Chemistry.* https://doi.org/10.1007/698_2020_649
- Kádár, I., 2015. Mobile flood protection walls. *Pollack Period.* 10. <https://doi.org/10.1556/Pollack.10.2015.1.13>
- Karteris, M., Theodoridou, I., Mallinis, G., Tsiros, E., Karteris, A., 2016. Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: Assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.098>

- Kia, A., Wong, H.S., Cheeseman, C.R., 2017. Clogging in permeable concrete: A review. *J. Environ. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>
- King, D., Hagan, P., 2011. Costs of Stormwater Management Practices In Maryland Counties.
- Klun, M., Zupan, D., Kryžanowski, A., 2021. STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CONCRETE GRAVITY DAMS. *Acta Hydrotechnica* 34. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2021.09>
- Kryeziu, D.R., Qaflehi, M., Kadiu, F., 2013. Pervious Concrete-New Solution for Sustainable Urban Street Construction Case: Prishtina and Tirana. <https://doi.org/10.33107/ubt-ic.2013.8>
- Kryžanowski, A., Brilly, M., Rusjan, S., Schnabl, S., 2014. Review Article: Structural flood-protection measures referring to several European case studies. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/nhess-14-135-2014>
- Kuehler, E., Hathaway, J., Tirpak, A., 2017. Quantifying the benefits of urban forest systems as a component of the green infrastructure stormwater treatment network. *Ecohydrology*. <https://doi.org/10.1002/eco.1813>
- Lake superior streams, 2009. Underground Storage [WWW Document]. URL [https://www.lakesuperiorstreams.org/stormwater/toolkit/underground.html#:~:text=On-site%2C underground stormwater retention,interconnected storage pipes or chambers. \(accessed 3.23.23\).](https://www.lakesuperiorstreams.org/stormwater/toolkit/underground.html#:~:text=On-site%2C underground stormwater retention,interconnected storage pipes or chambers. (accessed 3.23.23).)
- Ma, Y., Jiang, Y., Swallow, S., 2020. China's sponge city development for urban water resilience and sustainability: A policy discussion. *Sci. Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139078>
- Majidi, A., 2020. Design of detention reservoir. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17345.02400>
- Malm, R., Nordström, E., Nilsson, C.-O., Tornberg, R., Blomdahl, J., 2016. ANALYSIS OF POTENTIAL FAILURE MODES AND RE- INSTRUMENTATION OF A CONCRETE DAM.
- Massmann, J., 2003. IMPLEMENTATION OF INFILTRATION PONDS RESEARCH. Washington, DC.
- McPherson, G., Simpson, J.R., Peper, P.J., Maco, S.E., Xiao, Q., 2005. Municipal forest benefits and costs in five US cities. *J. For.* 103.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M., 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landsc. Urban Plan.* 77. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Minnesota Pollution Control Agency, 2022. Green Infrastructure benefits of tree trenches and tree boxes [WWW Document]. URL [https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Green_Infrastructure_benefits_of_tree_trenches_and_tree_boxes \(accessed 3.12.23\).](https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Green_Infrastructure_benefits_of_tree_trenches_and_tree_boxes (accessed 3.12.23).)
- Mu, D., Luo, P., Lyu, J., Zhou, M., Huo, A., Duan, W., Nover, D., He, B., Zhao, X., 2021. Impact of temporal rainfall patterns on flash floods in Hue City, Vietnam. *J. Flood Risk Manag.* 14. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12668>
- Natural Water Retention Measures, 2013. Floodplain restoration and management.
- Network Nature, 2023. Case studies tagged with Urban Forests [WWW Document]. URL [https://networknature.eu/network-nature-case-study-keywords/2284 \(accessed 3.15.23\).](https://networknature.eu/network-nature-case-study-keywords/2284 (accessed 3.15.23).)
- Ngo, T.T., Yoo, D.G., Lee, Y.S., Kim, J.H., 2016. Optimization of upstream detention reservoir facilities for downstream flood mitigation in Urban areas. *Water (Switzerland)* 8. <https://doi.org/10.3390/W8070290>
- NOAA's Office for Coastal Management, 2015. Green Infrastructure Options to Reduce Flooding.
- Nowak, D.J., Crane, D.E., 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environ. Pollut.* 116, 381–389. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
- NRC, 1982. A levee policy for the National Flood Insurance Program. <https://doi.org/10.17226/19600>
- Open Access Government, 2022. Afforestation in temperate rainforests could lessen climate change [WWW Document]. URL <https://www.openaccessgovernment.org/temperate-rainforests-climate-change/128532/>
- Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2005. Case Studies: Innovative Stormwater Management Approaches and Practices.
- Portland Cement Association, 2023. CARBON FOOTPRINT. Washington, DC.
- PUB, 2021. ON-SITE STORMWATER DETENTION TANK SYSTEMS.
- Qin, H. peng, Li, Z. xi, Fu, G., 2013. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *J. Environ. Manage.* 129. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- Qin, Y., 2020. Urban flooding mitigation techniques: A systematic review and future studies. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w12123579>
- Rahman, M.A., Pawijit, Y., Xu, C., Moser-Reischl, A., Pretzsch, H., Rötzer, T., Pauleit, S., 2023. A comparative analysis of urban forests for storm-water management. *Sci. Rep.* 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28629-6>
- RECOFTC, 2012. Forests and Landslides: The Role of Forests and Forestry in the Prevention and Rehabilitation of

- Landslides in Asia [WWW Document]. URL <https://www.recoftc.org/publications/0000049> (accessed 3.8.23).
- RetainingWall Solutions, 2023. Flood wall costs [WWW Document]. URL <https://retainingwallsolutions.co.uk/flood-defence/flood-wall-costs/> (accessed 3.7.23).
- Rickard, C.E., 2009. Floodwalls and flood embankments, Fluvial Design Guide.
- Rollins, C., 2020. DETENTION PONDS: MAKING A CASE TO MAINTAIN YOUR POND REGULARLY [WWW Document]. Constr. EcoServices. URL <https://www.constructionecoservices.com/blog/detention-ponds-do-they-really-need-to-be-maintained/#:~:text=What type of maintenance is,in and around the pond.> (accessed 3.8.23).
- Safford, H., Larry, E., McPherson, E.G., Nowak, D.J., Westphal, L.M., 2013. Urban Forests and Climate Change.
- Sasidharan, S., Bradford, S.A., Šimůnek, J., DeJong, B., Kraemer, S.R., 2018. Evaluating drywells for stormwater management and enhanced aquifer recharge. *Adv. Water Resour.* 116. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.04.003>
- Sasidharan, S., Bradford, S.A., Šimůnek, J., Kraemer, S.R., 2021. Comparison of recharge from drywells and infiltration basins: A modeling study. *J. Hydrol.* 594. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125720>
- Shin, E.T., Lee, S., Lee, J., Song, C.G., 2022. Effectiveness of an adaptive flood management strategy using riparian risk assessment and a tolerability criterion. *J. Flood Risk Manag.* 15. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12756>
- Silva, C.M., Flores-Colen, I., Coelho, A., 2015. Green roofs in Mediterranean areas - Survey and maintenance planning. *Build. Environ.* 94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.029>
- Smith, P., Ashmore, M. R., Black, H. I., Burgess, P. J., Evans, C. D., Quine, T. A., ... & Orr, H. G. (2013). The role of ecosystems and their management in regulating climate, and soil, water and air quality. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 812-829
- Soil Retention, 2023. Design Considerations for Vegetated Permeable Pavement. Creating open, multifunctional spaces and providing green benefits [WWW Document]. URL https://soilretention.com/wp-content/uploads/2015/06/0305151237SoilRetention_Final.pdf
- Sustainable Stormwater Management, 2009. Stormwater 101: Detention and Retention Basins [WWW Document]. URL <https://sustainablestormwater.org/2009/05/28/stormwater-101-detention-and-retention-basins/> (accessed 3.19.23).
- Szalkiewicz, E., Jusik, S., Grygoruk, M., 2018. Status of and perspectives on river restoration in Europe: 310,000 Euros per hectare of restored river. *Sustain.* 10. <https://doi.org/10.3390/su10010129>
- Takata, K., Hanasaki, N., 2020. The effects of afforestation as an adaptation option: A case study in the upper Chao Phraya River basin. *Environ. Res. Lett.* 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7462>
- Tiessen, K.H.D., Elliott, J.A., Stainton, M., Yarotski, J., Flaten, D.N., Lobb, D.A., 2011. The effectiveness of small-scale headwater storage dams and reservoirs on stream water quality and quantity in the Canadian Prairies. *J. Soil Water Conserv.* 66. <https://doi.org/10.2489/jswc.66.3.158>
- Torrent Resources, 2023. NEW DRYWELL INSTALLATION [WWW Document]. URL <https://torrentresources.com/services/drywell-installation/maxwell-type-iv-drywell/> (accessed 3.14.23).
- Upper Midwest Water Science Center, 2019. Evaluating the potential benefits of permeable pavement on the quantity and quality of stormwater runoff [WWW Document]. URL <https://www.usgs.gov/centers/upper-midwest-water-science-center/science/evaluating-potential-benefits-permeable-pavement#overview> (accessed 3.26.23).
- US EPA, 2021a. Stormwater Best Management Practice. Permeable Pavements.
- US EPA, 2021b. Stormwater Best Management Practice. Infiltration Basin.
- US EPA, 2020. Underground Storage Tank FLOOD GUIDE.
- US EPA, 2013. Stormwater to Street Trees. Washington, DC.
- US EPA, 1998. Method for Calculating Carbon Sequestration by Trees in Urban and Suburban Settings.
- Vega, O., 2018. Application of Stormwater Tree Trenches in the City of Vancouver. Vancouver.
- Verity Supply, 2023. Soil Retention, Inc - Drivable Grass® Permeable Pavement [WWW Document]. URL <https://veritysupply.net/products/soil-retention-inc-drivable-grass®-permeable-pavement> (accessed 3.27.23).
- Vogt, J., Hauer, R.J., Fischer, B.C., 2015. The costs of maintaining and not maintaining the urban forest: A review of the urban forestry and arboriculture literature. *Arboric. Urban For.* <https://doi.org/10.48044/jauf.2015.027>
- Waligórski, B., Sojka, M., Jaskuła, J., Korytowski, M., 2019. Analysis of the use of selected reservoirs in the Wielkopolska province. *Ann. Warsaw Univ. Life Sci. – SGGW. L. Reclam.* 50. <https://doi.org/10.2478/ssggw-2018-0029>

- Wong, I., Baldwin, A.N., 2016. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region. *Build. Environ.*
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.028>
- World Landscape Architecture, 2017. Room for the River | Nijmegen, The Netherlands | H+N+S Landscape Architects [WWW Document]. URL <https://worldlandscapearchitect.com/room-for-the-river-nijmegen-the-netherlands-hns-landscape-architects/?v=ce774d9cab3a> (accessed 3.9.23).
- Zabret, K., Šraj, M., 2015. Can urban trees reduce the impact of climate change on storm runoff? *Urbani Izziv* 26.
<https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-011>