

ČESKÁ ZEMEDĚLECKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta životního  
prostředí**

**Technické řešení substráty - intenzivní zelené střechy**

**Technical solution substrates - intensive green roofs**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Bakalant : Marek Šálek

Vedoucí práce: Ing. Tereza Hnátková, Ph.D.

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Marek Šálek

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

**Technické řešení substráty – intenzivní zelené střechy**

Název anglicky

**Technical solutions substrates – intensive green roofs**

---

## Cíle práce

Cílem práce je sumarizovat dostupné informace o systémech intenzivních zelených střech se zaměřením na inovace oblasti substrátů v nich využívaných. A na základě rešerše v odborné literatuře a publikovaných dat od výrobců či dodavatelů těchto substrátů vyhodnotit environmentální a ekonomické benefity těchto materiálů a navzájem je porovnat.

## Metodika

Práce v teoretické části shrnuje základní požadavky na substráty do systému intenzivních zelených střech za základě rešerše v odborné literatuře.

Teoretická část : rozdělena do 4 hlavních částí – požadavky na střešní konstrukce, typy substrátů, vegetace, systém závlahy.

Praktická část : práce je zaměřena na porovnání substrátů a jejich inovace.

**Doporučený rozsah práce**

40 stran

**Klíčová slova**

zelená střecha, substráty, benefity, komponenty, rostliny, vegetace, systém závlahy

---

**Doporučené zdroje informací**

Carlos Vicente Rey, Natalia Franco, Gwendolyn Peyre and Juan Pablo Rodríguez , Green Roof Design with Engineered Extensive Substrates and Native Species to Evaluate Stormwater Runoff and Plant Establishment in a Neotropical Mountain Climate, 2020

Henk-Jan van der Kolk, Petra van den Berg, Thijs van Veen, Martijn Bezemer, Substrate composition impacts long-term vegetation development on blue-green roofs: Insights from an experimental roof and greenhouse study, 2023

Muhammad Shafiquea,b, Reeho Kima,b , Muhammad Rafiqc, Green roof benefits, opportunities and challenges, 2018

Peter Ampim, J.J. Sloan, Raul I Cabrera, Derald A. Harp, Green roof growing media: Types, ingredients, composition and properties, 2010

---

**Předběžný termín obhajoby**

2022/23 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Tereza Hnátková, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra aplikované ekologie

---

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2023

**prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2023

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2023

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/závěrečnou práci na téma:  
.....vypracoval/a samostatně a citoval/a jsem všechny  
informační zdroje, které jsem v práci použil/a a které jsem rovněž uvedl/a na konci  
práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

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

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

V Příbrami dne: 30. 3. 2023

.....  
Šálek Marek



## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Tereze Hnátkové, Ph.D. za odborné rady, trpělivost a pomoc při řešení bakalářské práce. Mé poděkování přísluší také mým blízkým za podporu, kterou mi při studiu a vzniku bakalářské práce prokazovali.

## **Abstrakt**

Autor bakalářské práce se zaměřil na téma technické řešení substráty intenzivní zelené střechy. Cílem práce je sumarizovat dostupné informace o systémech intenzivních zelených střech a inovacích v oblasti substrátů používaných v těchto systémech. V teoretické části práce jsou shrnuty základní principy intenzivních zelených střech, důležité faktory pro jejich úspěšné využití, a konkrétně je věnována pozornost substrátu jako růstovému médiu. Praktická část práce se zaměřuje na inovace v oblasti substrátů, především na nové komponenty, složení, fyzikální a chemické vlastnosti a hloubku substrátu. V praktické části práce jsou také popsány požadované parametry substrátů, výhody a nevýhody jednotlivých komponentů substrátů a porovnání substrátů z environmentálního a ekonomického hlediska. Výsledkem práce je přehledný popis intenzivních zelených střech a inovací v oblasti substrátů, který může být užitečný pro architekty, projektanty, investory a další odborníky v oboru. Práce také přispívá k rozšíření povědomí o významu intenzivních zelených střech jako nástroje pro zlepšení kvality městského prostředí a snížení jeho negativních dopadů na životní prostředí a zdraví obyvatel.

## **Klíčová slova**

zelená střecha, substráty, benefity, komponenty, rostliny, vegetace, systém závlahy

## **Abstract**

The author of this bachelor thesis focuses on the topic of technical solutions for substrates in intensive green roofs. The aim of the thesis is to summarize available information on intensive green roof systems and innovations in the area of substrates used in these systems. The theoretical part of the thesis summarizes the basic principles of intensive green roofs, important factors for their successful use, and specifically focuses on the substrate as a growth medium. The practical part of the thesis focuses on innovations in substrates, especially on new components, composition, physical and chemical properties, and substrate depth. The practical part of the thesis also describes the required parameters of substrates, advantages and disadvantages of individual substrate components, and a comparison of substrates from an environmental and economic perspective. The result of the thesis is a clear description of intensive green roofs and innovations in substrate technology, which can be useful for architects, designers, investors, and other professionals in the field. The thesis also contributes to raising awareness of the importance of intensive green roofs as a tool for improving the quality of urban environments and reducing their negative impact on the environment and the health of inhabitants.

## **Key words**

green roof, substrates, benefits, components, plants, vegetation, irrigation system

# Obsah

ÚVOD .....	1
CÍLE PRÁCE .....	2
METODIKA .....	3
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>4</b>
1.1 ÚVOD DO ZELENÝCH STŘECH.....	4
1.2 STŘEŠNÍ KONSTRUKCE.....	5
1.2.1 Ochranná vrstva.....	5
1.2.2 Hydroizolace.....	6
1.2.3 Izolační vrstva.....	6
1.2.4 Drenáž.....	7
1.2.5 Filtrační vrstva.....	7
1.2.6 Substrát.....	8
1.2.7 Vegetace.....	8
1.3 TYPY SUBSTRÁTŮ.....	9
1.3.1 Komponenty pěstebního substrátu.....	10
1.3.2 Složení pěstebního substrátu.....	11
1.3.3 Fyzikální a chemické vlastnosti.....	13
1.3.4 Hloubka pěstebního substrátu.....	16
1.4 VEGETACE.....	17
1.5 SYSTÉM ZÁVLAHY.....	20
1.5.1 Povrchové zavlažování.....	21
1.5.2 Podpovrchové zavlažování.....	22
1.5.3 Využití dešťové vody.....	23
1.5.4 Kapkové zavlažování.....	23
1.5.5 Tryskové zavlažování.....	24
1.5.6 Zavlažovací hadice.....	24
1.5.7 Sprejové zavlažování.....	25
1.5.8 Střešní žlaby a nádrže.....	26
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>27</b>
2.1 PARAMETRY V SUBSTRÁTECH.....	27
2.2 VÝHODY A NEVÝHODY.....	27
2.3 POROVNÁNÍ SUBSTRÁTŮ.....	33
2.3.1 Vědecké studie.....	33
2.3.2 Komerční substráty.....	36
2.4 INOVACE.....	38
<b>DISKUZE .....</b>	<b>40</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>43</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ .....</b>	<b>44</b>

## Úvod

V posledních letech se stále více mluví o problémech souvisejících s klimatickými změnami a vlivu, který má urbanizace na životní prostředí. Jedním z možných řešení, jak tyto problémy zmírnit, je využití intenzivních zelených střech.

Tyto střechy mohou mít pozitivní vliv na mnoho aspektů, jako je například snižování tepelné zátěže, zlepšování kvality ovzduší a zadržování dešťové vody.

Klíčovým prvkem intenzivních zelených střech je substrát, který slouží jako základ pro růst vegetace.

Tato práce se zaměřuje na inovace v oblasti substrátů používaných v intenzivních zelených střechách. Cílem práce je shrnout dostupné informace o substrátech a prezentovat inovace, které se v této oblasti objevují.

Teoretická část práce se zabývá základním rozdělením intenzivních zelených střech na základě střešní konstrukce, substrátu, vegetace a zavlažování. Největší pozornost je věnována substrátu, který je klíčovým prvkem těchto systémů, a jsou prezentovány informace o jeho složení, komponentech, chemických a fyzikálních vlastnostech a hloubce.

Praktická část práce se zaměřuje na požadované parametry substrátů a na výhody a nevýhody jednotlivých komponentů substrátů. Dále jsou porovnány různé typy substrátů z environmentálního a ekonomického hlediska a jsou prezentovány inovace v používaných substrátech.

V závěru práce jsou shrnuty výsledky a výhody používání inovativních substrátů v intenzivních zelených střechách. Využívání této technologie může přinést významné přínosy pro kvalitu životního prostředí v městských oblastech a pomoci při zvládnání dopadů klimatických změn.

## **Cíle práce**

Cílem práce je sumarizovat dostupné informace o systémech intenzivních zelených střech se zaměřením na inovace oblasti substrátů v nich využívaných.

A na základě rešerše v odborné literatuře a publikovaných dat od výrobců či dodavatelů těchto substrátů vyhodnotit environmentální a ekonomické benefity těchto materiálů a navzájem je porovnat.

## **Metodika**

V této práci jsou shrnuty základní požadavky na substráty do systému intenzivních zelených střech, které byly získány z rešerše odborné literatury.

Teoretická část práce je rozdělena do čtyř hlavních částí, které zahrnují požadavky na střešní konstrukce, typy substrátů, vegetaci a systém závlahy. Důležitost každé z těchto částí je podrobně popsána a vysvětlena.

V praktické části jsou hodnoceny různé parametry substrátů, včetně výhod a nevýhod jednotlivých složek, a porovnány komerční substráty s namíchanými směsmi. Dále jsou zhodnoceny ekonomické a environmentální benefity těchto materiálů a inovace substrátů.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Úvod do zelených střech

Současnými tématy jsou změna klimatu a urbanizace, a v rozvinutých zemích se předpokládá, že urbanizace dosáhne v roce 2030 přibližně 83 % (Antrop M, 2004). Rychlý ekonomický růst v mnoha zemích vede k nárustu urbanizace, která degraduje přírodní krajinu a okolní prostředí (Ewing L, 2008; Bahgat G, 2010). Tyto problémy lze řešit aplikací strategií zelené infrastruktury pro dešťovou vodu. Uplatnění nových strategií rozvoje měst, jako jsou dešťové zahrady, zelené střechy, zelené stěny a bioretenční systémy, může zmírnit nepříznivé dopady urbanizace a zlepšit životní prostředí v dané oblasti (Dunnett & Kingsbury, 2004; Hoffman & McDonough, 2005).

Základním konceptem zelených střech je osazení střechy různými druhy vegetace či rostlin na vrchní části růstového média – substrátu. Tento koncept se zaměřuje na podporu vegetace na střechách budov, aby tak získaly mnohostranné sociální, ekonomické a environmentální přínosy. Zelené střechy obvykle obsahují několik složek včetně vegetace, substrátu, filtrační vrstvy drenážního materiálu, izolace, kořenové bariéry a membrány pro filtraci vody. Správná volba jednotlivých komponentů zelené střechy je velmi důležitá pro dosažení nejlepších výsledků.

Význam každé složky pro úspěšnost zelených střech je zcela rovnocenný a hraje velkou roli při dosahování lepších výsledků v dané oblasti (Vijayaraghavan & Joshi 2015).

Vzhledem k mnoha výhodám jsou zelené střechy v současnosti využívány v mnoha zemích. V posledních desetiletích se stala zelená střecha populární a trvale udržitelnou praxí po celém světě (Berndtsson C, 2010).

Výzkumy ukazují mnoho sociálních, environmentálních a ekonomických výhod této praxe. Zelené střechy mohou přinést řadu přínosů, jako je snížení městského teplotového efektu, zvýšení množství rostlin v městském prostředí, vytvoření rekreační aktivity a zvýšit zelené plochy a estetickou hodnotu ve městě (Berndtsson C, 2010; Getter et al. 2009; Niu H et al. 2010; Brenneisen, 2006; Fioretti et al. 2010).

Zelené střechy také snižují zátěž čistících zařízení v dané oblasti díky zlepšení kvality vody (Voyde et al. 2010; Berardi et al. 2014; Pandey et al. 2012; Alsup et al. 2011; Jim & Peng, 2011; Beck & Johnson 2011). Tento koncept získává popularitu po celém



světě a mnoho zemí implementuje zelené střechy na budovy, což vede k zakládání stále většího množství zelených střech.

Existují čtyři kategorie zelených střech: intenzivní, polointenzivní, jednokruhové extenzivní a vícekruhové extenzivní (GSA, ©2011).

Intenzivní zelené střechy se liší v tloušťce substrátu (> 20 cm), širokém spektru rostlin/vegetace oblíbeného v přízemní krajině, vysoké schopnosti zadržovat vodu, vysokých kapitálových nákladů a nákladů na údržbu a vyšší hmotnosti. Díky větší hloubce půdy mají větší schopnost zadržovat vodu a výběr rostlin může být rozmanitější, jako například malé stromy a keře. Vyžaduje se také zvažovat schopnost stavební konstrukce unést velkou hmotnost. Proto tento typ střech vyžaduje vysokou údržbu v podobě zavlažování, pleťování a hnojení. Zelené střechy s tloušťkou substrátu a obvykle obsahují malé rostliny, drobné keře a trávu. Tyto střechy vyžadují pravidelnou údržbu a vysoké investiční náklady pro lepší výkon. Naopak jednoplášťové extenzivní střechy jsou střechy s tloušťkou substrátu 7 až 10 cm.

## 1.2 Střešní konstrukce

Střešní konstrukce intenzivní zelené střechy se skládá z několika vrstev, které zahrnují hydroizolační vrstvu, filtrační vrstvu, drenážní vrstvu, geotextílii, substrátovou vrstvu a vegetační vrstvu viz. obr.1 (Kibert, 2016).

### 1.2.1 Ochranná vrstva

První vrstvou intenzivní zelené střechy je ochranná vrstva, která chrání střešní konstrukci před poškozením kořeny rostlin. Tato vrstva může být vyrobená z různých materiálů, včetně geotextílií, plastů nebo kovů. Je důležité, aby tato vrstva byla dostatečně silná a odolná, aby dokázala odolat zátěži rostlin a zaručila dlouhodobou stabilitu střechy.

Příklady ochranné vrstvy:

- **Geotextílie** – používá se jako první vrstva na střeše a měla by mít minimální tloušťku 0,5 mm.
- **Pěnová deska s geotextílií** – typ ochranné vrstvy, minimální tloušťka 10 mm.
- **Speciální ochranná fólie** – typ ochranné vrstvy by měl mít minimální tloušťku 0,8 mm.

## 1.2.2 Hydroizolace

Další vrstvou je hydroizolace, která brání průniku vody do střešní konstrukce. Hydroizolace může být provedena různými způsoby, včetně aplikace tekutých hydroizolací, asfaltových vrstev nebo membrán z PVC (polyvinylchlorid), (Kibert, 2016).

Pro zelenou střechu je nezbytná hydroizolační membrána, která zajistí ochranu před únikem vody na střechy. Vysoká vlhkost způsobená mokrou půdou na zelených střechách zvyšuje riziko úniku vody.

Proto je pro zelené střechy klíčové vybrat vhodnou hydroizolační membránu a při výběru je nutné být opatrný. K dispozici jsou různé druhy membrán, jako jsou modifikované bitumenové fólie, kapalné membrány, fóliové membrány s polymercementovými systémy a termoplastické membrány (Townshend, 2007).

Při aplikaci hydroizolační membrány je třeba být opatrný a zajistit její ochranu před fyzikálním a chemickým poškozením. Výběr vhodné hydroprofilní vrstvy pro zelenou střechu může prodloužit její životnost (Bass et al. 2019).

Při intenzivních zelených střechách je nezbytná kořenová bariéra, která chrání konstrukci střechy před kořeny rostlin. Pokud zelená střecha tuto vrstvu neobsahuje, mohou kořeny způsobit poškození celé konstrukce.

Nejčastěji se používají tenké polyetylenové desky jako bariéra proti kořenům. Při výběru kořenové bariéry je důležité zajistit kompatibilitu s hydroizolační membránou a zohlednit různé klimatické podmínky (Getter et al. 2019).

## 1.2.3 Izolační vrstva

Podle (Shaw et al. 2016) je izolační vrstva na střechách volitelná, avšak může hrát klíčovou roli v zajištění efektivity zelených střech. Tato vrstva pomáhá chránit střechu před tepelnými vlivy v zimě i v létě a zlepšuje izolační vlastnosti střechy.

Při retrofitaci existujících střech se doporučuje použít větší množství izolace (Shaw et al. 2016).

Izolační vrstva by měla být vhodně navržena v závislosti na konstrukci a typu střechy, aby byla co nejefektivnější. Jak uvádí (Cook & Martin 2014), izolační vrstva by měla být umístěna nad vodním profilem, aby chránila membránu střechy před kondenzací a fyzickým poškozením.

#### **1.2.4 Drenáž**

Třetí vrstvou je vrstva drenáže, která slouží k odvodňování vody ze střechy. Tato vrstva se obvykle skládá z plastových rohoží nebo dutých bloků, které umožňují volný průtok vody. Umožňuje udržovat vhodnou úroveň vlhkosti pro rostliny a snižuje riziko povodí.

Drenážní vrstva také chrání hydroizolační membránu a zlepšuje energetickou účinnost budovy (Pérez et al. 2012). Existují dvě hlavní běžné varianty drenážní vrstvy:

1. modulární drenážní panely vyrobené z polyethylenu nebo polystyrenu, které jsou vybaveny otvory pro efektivnější odvodnění
2. drenážní granuláty s vysokou pórovitostí, jako jsou LECA (lehké keramzitové kamenivo), expandovaná břidlice, drcené cihly, hrubý štěrk nebo kamenná drť, které uchovávají více vody.

#### **1.2.5 Filtrační vrstva**

Pro zelené střechy je důležité použít filtrační vrstvu, která odděluje růstové médium od drenážní vrstvy a chrání ji před ucpáváním menšími částicemi, jako jsou půdní finy a rostlinné zbytky. Tato vrstva, nazývaná také geotextilie, zajišťuje lepší flokaci vody v drenážní vrstvě a funguje také jako bariérová membrána pro kořeny rostlin (Vijayaraghavan & Raja 2015).

Filtrační tkaniny mají vysokou pevnost v tahu a propustnost pro vodu, aby umožnily flokaci vody do drenážní vrstvy.

Wong a Jim (Wong & Jim, 2014) provedli výzkum vlastností netkané geotextilie filtrační tkaniny v odhalování vody na zelených střechách. Z jejich výsledků vyplývá, že tato tkanina absorbuje téměř 1,5 litru vody na metr čtvereční. Navíc silnější tkanina zadrží přibližně o 300 % více dešťové vody než zelené střechy bez filtrační tkaniny (Licht & Lundholm, 2006).

Proto je důležité vybrat vhodnou filtrační tkaninu, aby se zvýšila výkonnost zelených střech.

### **1.2.6 Substrát**

Většina výhod, které zelené střechy poskytují, jsou úzce spojeny se substrátem, který se na nich používá. Tyto výhody zahrnují zlepšení kvality vody, snížení množství odtoku, snížení intenzity špičkových povodní a zlepšení tepelné regulace. K dosažení těchto vlastností by měl být růstový substrát charakterizován specifickými vlastnostmi, jako je nízká hmotnost a vysoký podíl organických minerálů, které napomáhají růstu rostlin. Nicméně, praktické splnění všech požadavků na substrát není realizovatelné, a proto je běžnou praxí kombinovat různé složky substrátu. Zatímco mnoho autorů používá komerční substráty, jen málo výzkumníků doporučuje alternativní, nákladově efektivní a lehké materiály, které mohou být přidány do substrátu pro zlepšení jeho vlastností (Mickovski et al. 2013; Bates et al. 2015; Vijayaraghavan & Raja, 2015).

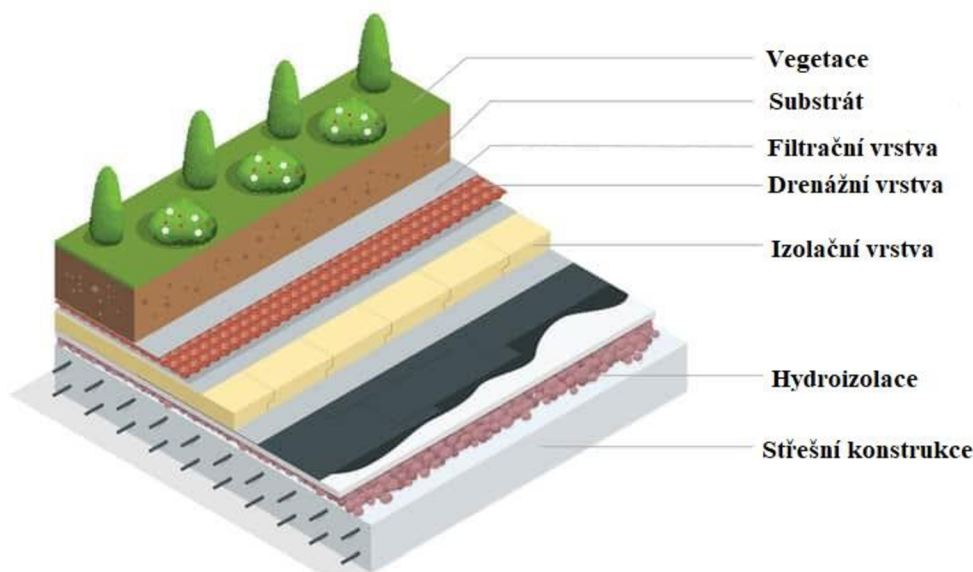
Pro dosažení stability konstrukce zelených střech je důležité, aby růstové médium mělo nízkou objemovou hmotnost, zejména v případě starších budov, které jsou omezeny svou nosností. Proto je vždy žádoucí udržet hmotnost zelených střech co nejnižší. K tomu lze přidáním organického materiálu s nižší hustotou do substrátu dosáhnout. Několik výzkumníků také navrholo, aby se pro substrát zelených střech použilo 80 % anorganických materiálů, což pomůže snížit celkovou hmotnost zelených střech.

Pro zlepšení výkonu pěstebního média je důležité, aby mělo vysokou sorpční kapacitu a menší tendenci vyluhovat se (Vijayaraghavan, 2016; DDC ©2007; FLL ©2002).

### **1.2.7 Vegetace**

Poslední vrstvou je vegetační vrstva, která obsahuje rostliny, keře a stromy. Rostliny zvolené pro intenzivní zelené střechy by měly být přizpůsobeny místním podmínkám, jako jsou slunce, vlhkost a teplota. Mezi běžné druhy rostlin patří trávy, byliny, keře a stromy.

## Zelená střecha



*Obrázek č.1, Základní vrstvy zelené střechy, <https://www.greenroofguide.com/green-roofs/types>*

### 1.3 Typy substrátů

Existují dvě základní kategorie konstrukcí zelených střech, a to podle toho, jak moc jsou náročné na údržbu. Intenzivní zelené střechy jsou navrženy tak, aby připomínaly běžnou pozemní zahradu s rostlinami, které vyžadují pravidelnou a individuální péči. Na druhé straně extenzivní zelené střechy jsou více zaměřené na ekologii než na estetiku a vyžadují méně údržby. Rostliny na extenzivní zelené střeše vyžadují pouze minimální specializovanou pozornost a lidé s touto střechou se s nimi málokdy nebo vůbec nezabývají. V praxi se často setkáváme s kombinací prvků intenzivního i extenzivního provedení na jedné střeše (Dunnet & Kingbury, 2008).

I když existují různé stupně zelených střech, substráty používané pro jejich pěstování jsou u všech typů podobné. Liší se pouze hloubkou substrátu, která je větší u intenzivních střech a menší u extenzivních. Substráty jsou často vyráběny jednotlivci, nebo výzkumníky podle doporučených materiálů a pokynů, zatímco komerční substráty jsou prodávány připravené k použití a jejich složení je chráněno patenty a tajemstvím (Emilsson & Rolf, 2005).

### 1.3.1 Komponenty pěstebního substrátu

Pro zelené střechy se obvykle používají substráty složené z přírodních a umělých minerálů, organických látek a recyklovaných nebo odpadních materiálů. V některých případech mohou být do substrátu přidány plasty, aby se snížila jeho objemová hmotnost. Kromě toho se do substrátu mohou přidávat kompletní hnojiva s pomalým uvolňováním živin, což pomáhá podpořit zakořenění rostlin na vegetační střeše.

Pro pěstební substráty zelených střech se často využívají přírodní minerály, jako je písek, jíl, štěrk a lávová pemza.

Nicméně, mezi umělé, nebo modifikované minerály patří například expandovaná břidlice, jíl, perlit, vermikulit a minerální vlna (Bengtsson et al. 2005; Dunnett & Kingbury, 2008; Durhman & Rowe, 2007; Monterusso et al. 2005; Rowe et al. 2006; VanWoert et al. 2005).

Seznam materiálů, které se využívají pro výrobu substrátů pro zelené střechy, zahrnuje recyklované drcené hliněné cihly a dlaždice, drcené střešní tašky, pórobeton a podloží (Berghage et al. 2005; Cresswell & Sims, 2007; Dunnett & Kingbury, 2008; Emilsson & Rolf, 2005).

Recyklování materiálů má potenciál nejen snížit potřebu dopravy při výstavbě zelené střechy, ale také přetvořit místně dostupné suroviny s nízkou hodnotou na užitečné materiály (Emilsson & Rolf, 2005).

Substráty určené pro pěstování zelených střech mohou obsahovat i syntetické materiály, jako jsou například zapouzdřené polystyreny a pěny z močovinoformaldehydové pryskyřice (Harp et al. 2008; Hutchinson et al. 2003; Panayiotis et al. 2003).

Pro pěstování zelených rostlin je důležité mít substrát bohatý na organické látky. Mezi vhodné substráty patří například rašelina, kompost, kokosové vlákno, rozkládající se piliny, nebo kůra stromů. Tyto materiály poskytují rostlinám potřebné živiny pro růst a vývoj (DeNardo et al. 2005; Dunnett & Kingbury, 2008; Friedrich, 2005).

Při pěstování rostlin na zelených střechách je běžnou praxí přidávat hnojiva do substrátů, aby se rostliny mohly správně vyvíjet a udržet si zdravý vzhled. Mezi typy hnojiv s pomalým uvolňováním, které se využívají pro zelené střechy, patří například

Nutricote Type 100 a 180 od japonské firmy chisso-Asahi fertulizer Co. Nebo izraelské hnojivo Multicote 8 M extra od společnosti Haifa Chemicals. Tyto produkty jsou výbornou volbou pro zajištění optimálních podmínek pro růst rostlin na zelených střechách (Durhman & Rowe, 2007; Emilsson & Rolf, 2005; Monterusso et al. 2005; Rowe et al. 2006). Pro podporu růstu rostlin na zelených střechách se často využívají různé druhy hnojiv, jako jsou listová hnojiva, například Nutrileaf 60 (od firmy Miller, Hanover, PA, USA), nebo tradiční hnojiva, jako je Complezal (6,3N-5,2P-14,1K-1,2Mg-8S, od společnosti AgrEvo Hellas S.A. v Aténách, Řecko). Tyto druhy hnojiv pomáhají zajišťovat optimální živiny pro rostliny, což zase přispívá k jejich růstu a zdraví (Panayiotis et al. 2003). V současnosti se zaměřuje pozornost na lehké a porézní materiály, které jsou schopny zadržovat a pomalu uvolňovat kationty a anionty. Vysoká úrodnost může být pro střešní rostliny problematická, a proto se využívají moderátoři živin, kteří pomáhají vyrovnat dostupnost živin v kořenové zóně, zvýšit odolnost rostlin proti stresu a podpořit jejich zdravý růst.

### **1.3.2 Složení pěstebního substrátu**

Složení substrátu může být různé v závislosti na konkrétním typu zelené střechy zamýšlené vegetaci, klimatických podmínkách a také na faktorech, jako je dostupnost a cena jednotlivých složek. Obvykle se používají specifické složky v substrátech pro pěstování zelených střech. Důležité vlastnosti, které musí substrát pro zelenou střechu mít, zahrnují stabilitu, trvanlivost a lehkost, aby byl snadno manipulovatelný. Dále musí být substrát schopen zajistit dobré provzdušňování, odvodňování a zadržování živin (Friedrich, 2005).

Je doporučeno, aby většina substrátu byla z minerálních materiálů. Minerální složení by mělo objemově tvořit 80-100 %, zatímco organická hmota a malé množství hnojiva s pomalým uvolňováním, obsahující makro i mikroživiny, by měly tvořit zbývajících 0-20 % (Beattie & Berghage, 2004).

Využívání substrátů pro zelené střechy bývá běžně spojováno s použitím materiálů z expandované břidlice, jílu a břidlice (ESCS), protože tyto materiály jsou lehké a mají porézní strukturu. Díky tomu dokážou udržet vnitřní póry substrátu vlhké a zároveň umožňují přebytečné vodě snadno odtékat z velkých vnitroagregátových pórů, což napomáhá růstu rostlin (Sloan et al. 2000).

Podle výzkumu (Rowe et al. 2006) bylo zjištěno, že substráty obsahující až 80 % tepelně expandované břidlice a malé množství hnojiva umístěné v hloubce 10 cm pod vrstvou by mohly dostačovat pro podporu růstu sukulentů, jako jsou rozchodníky (*Sedum spp.*).

Pokud by byl substrát hlubší, mohlo by být nutné použít větší množství hnojiva, ale klíčové je použít pouze tolik, kolik je nezbytně nutné pro udržení růstu rostlin a minimalizaci vypouštění živin při odtoku. Materiály ESCS mají schopnost absorbovat až 0,9g/kg<sup>1</sup> anorganického fosforu (Cucarella & Renman, 2009; Forbes et al. 2004) a také uvolňovat absorbovaný fosfor rostlinám (Williams & Nelson, 2000). Písek se na rozdíl od materiálů ESCS používá pro formulaci substrátů pro zelené střechy v mnohem menším množství. Pro extenzivní substráty se doporučuje použít 30 % písku v poměru k hmotnosti, zatímco pro intenzivní substráty by mělo být použito nejvýše 50 %. Pro tento účel se obvykle preferuje hrubý písek s maximálním průměrem 2 mm, který by měl být bezpečný, pokud splňuje specifikace U.S. Golf Association (USGA) pro kořenovou zónu putting greenů (Friedrich, 2005). Přes své příznivé drenážní vlastnosti se štěrk obvykle nevyužívá jako součást substrátů pro zelené střechy, pravděpodobně kvůli své relativně vysoké hmotnosti. Tento faktor je často považován za nevýhodu pro jeho použití na střechách (Köhler et al. 2002). Kromě toho štěrk také není vhodný pro udržení vlhkosti (Miller, 2003). Dalším problémem, který se týká pískových a štěrkových materiálů, je jejich neschopnost poskytnout substrátu pro zelené střechy kationtovou výměnnou kapacitu, což brání zadržování základních živin pro rostliny. Organická hmota je často přidávána do substrátu v kompostu, protože takové substráty obsahují vysoké množství živin, množství mikroorganismů a recyklační hodnotu (Friedrich, 2005).

Pokud jde o použití kompostu na zelených střechách, pak jsou obecně upřednostňovány komposty ze zahradního odpadu před těmi z hnoje, protože mají nižší obsah rozpustných solí (Friedrich, 2005).

Vysoký obsah solí v substrátu může způsobit zvýšenou elektrickou vodivost, což může ovlivnit kořenový systém a růst rostlin. Přestože organická hmota přináší výhody, nedoporučuje se přidávat velké množství do substrátu pro zelené střechy, protože to může zvyšovat nasycenou hmotnost substrátu (Friedrich, 2005), což může vést k jeho zmenšení při rozkladu organické hmoty (Beattie & Berghage, 2004; Dunnett & Kingbury, 2008) a ztrátě živin při odtoku ze střechy (Moran et al. 2005).



Zvýšené množství organické hmoty v substrátech pro zelené střechy může způsobit problémy s plevele, protože poskytuje více vody a živin (Emilsson & Rolf, 2005). Navíc se jemný materiál z rozkladu organické hmoty může dostat až do separační tkaniny a vytvořit kal, který omezuje odtok vody, ovlivňuje růst rostlin a zvyšuje zatížení střechy (Friedrich, 2005). Přidání velkého množství organické hmoty nebo hnojiva do substrátu může podpořit růst bujné vegetace, která však může být náchylná k abiotickým a biotickým stresům (Dunnett & Kingbury, 2008; Getter & Rowe 2006; Reinert, 2009). Naproti tomu výzkum ukázal, že hvězdice hladká (*Aster laevis* L.), jalovec obecný (*Koeleria macrantha regel*) a zlatobýl lesklý (*Solidago speciosa* L.) měly vyšší přežití bez přidání hnojiva, což naznačuje, že menší produkce biomasy může znamenat lepší toleranci k suchu (Rowe et al. 2006). Nízká až střední úrodnost substrátu může podporovat rozmanitější rostlinné společenstvo a minimalizovat dominantní agresivní druhy (Dunnett & Kingbury, 2008). Důležité je přimíchávat pouze stabilizovaný nebo vyzrálý kompost do substrátu, protože nedokončený nebo nestabilní kompost může substrátu připravit o dusík a kyslík a negativně ovlivnit růst rostlin (Dunnett & Kingbury, 2008, Friedrich, 2005).

Přidáváním organického materiálu do substrátu pro zelené střechy je stále diskutovaným tématem, a to zejména kvůli rozdílným klimatickým podmínkám na různých místech. V teplejších a vlhčích oblastech dochází k rozkladu organické hmoty rychleji než v oblastech suchých a chladných. Kromě toho stabilita zdroje organické hmoty také ovlivňuje rychlost jejího rozkladu v substrátu. Například čerstvý kompost se bude rozkládat rychleji než starší a více humifikovaný materiál (White & Snodgrass, 2003). Protože každá oblast má odlišné klimatické podmínky a zdroje organické hmoty, je třeba provést regionální výzkum, aby se zjistilo, jaký druh a jaké množství organického materiálu by mělo být použito v substrátu pro zelené střechy. V současné době odborníci na zelené střechy doporučují, aby substráty obsahovaly ne více než 10-20 % organických látek ve vlhčím klimatu (Friedrich, 2005).

### **1.3.3 Fyzikální a chemické vlastnosti**

#### **Fyzikální**

Důležitými fyzikálními charakteristikami pro zelené střechy jsou určité faktory. Mezi tyto faktory patří:

- objemová hustota
- vzdušná a celková pórovitost
- kapacita pro uchování vody
- schopnost kapilárního vztlínání vody
- pole kapacity
- trvalé zvadnutí
- charakteristiky uvolňování
- desorpce vody

(Beattie & Berghage, 2004; Cresswell & Sims, 2007; FLL ©1995; Miller, 2003).

V rámci studie, která se týkala tříletého substrátu pro zelené střechy, byly naměřeny vyšší hodnoty pórovitosti, volného vzdušného prostoru a vlhkostí (makropóry), obsahu organické hmoty a vodní kapacity na konci experimentu v porovnání s počátkem (Getter et al. 2007).

Z toho vyplývá, že fyzikální vlastnosti substrátu na zelených střechách nejsou stabilní a mohou se měnit v průběhu času, což může vést k problémům.

Podle německých směrnic pro plánování, realizaci a údržbu zelených střech (FLL, ©1995) je vhodné rozmezí sypané hmotnosti v suchu pro substráty extenzivního i intenzivního pěstování mezi 600 a 1200 kg/m<sup>3</sup>, neboť 1000 kg/m<sup>3</sup> substrátu na pěstování o hloubce 1 cm váží 10 kg/m<sup>2</sup>. Většina budov je navržena tak, aby vydržela zatížení mezi 100 a 120 kg/m<sup>2</sup>. Proto maximální hloubka růstového substrátu o hmotnosti 1000kg/m<sup>3</sup> by měla být 10 až 12 cm a pro těžší substráty by se maximální hloubka ještě snížila.

Aby bylo dosaženo maximální dostupnosti vody pro rostliny na extenzivních zelených střechách, pěstební substráty by měly mít minimálně 35 % (v/v) vodní kapacity a zároveň obsahovat alespoň 10 % vzduchu (FLL, ©1995). Na druhé straně substráty pro intenzivní systémy zelených střech by měly mít vyšší hodnoty, konkrétně > 45 % a >15 % pro vodní kapacitu a obsah vzduchu (Friedrich, 2005).

Někteří výzkumníci navrhují, že pro optimální růst rostlin by substrát zelených střech měl mít objemové složení 40 % pevných látek, 40 % a 20 % vzduchu (Beattie & Berghage, 2004). Podle studie jiných výzkumníků (Friedrich, 2005) by měla být pro růstový substrát extenzivní zelené střechy přijatelná propustnost vody >0,36cm/h<sup>1</sup>, zatímco pro intenzivní systémy by měla být >3,6 cm/h<sup>1</sup>.

## **Chemické**

Zelená střecha je schopna plnit svou funkci optimálně díky chemickým vlastnostem.

Důležité chemické vlastnosti zahrnují:

- pH
- pufrovací kapacitu
- kationtovou výměnnou kapacitu (CEC)
- chemickou stabilitu

Organická aktivita je zaměřena na:

- rozklad organické hmoty v substrátu
- recyklaci biomasy a kořenů z usazené vegetace
- nepřítomnost patogenů chorob
- nepřítomnost destruktivních půdních organismů

(Beattie & Berghage, 2004; FLL, ©1995).

pH substrátu je klíčovou vlastností pro růst rostlin na zelených střechách a mělo by se držet v určitém rozmezí, které zajistí dostatečný příjem živin pro rostliny a zároveň bude stabilní pro jejich dlouhodobé zdraví (Beattie & Berghage, 2004; Friedrich, 2005).

Při formulaci substrátu je důležité brát v úvahu místní environmentální problémy, jako jsou kyselá deště, aby byl zajištěn úspěšný růst rostlin.

ESCS mají pufrovací vlastnosti v rozmezí pH 7,0 až 9,0 a jejich přidání do substrátu může být užitečné v oblastech s kyselými dešti. Studie ukázaly, že pH kyselých dešťových vod se téměř vyrovnalo neutrální hodnotě po proniknutí přes keramzitový substrát na zelené střeše (Beattie & Berghage; 2004)

Současně by vysoké pH ESCS mohlo omezit přístup k některým mikroživinám, protože rostlinné živiny jsou obvykle nejlépe dostupné v rozmezí pH 5,5 až 7,0. Jako alternativu lze upravit kyselost a alkalitu pomocí aplikace vápenného prášku nebo síry (Friedrich, 2005).

Organické látky a jíly jsou hlavními zdroji kationtové výměnné kapacity (CEC) v substrátech pro pěstování zelených střech. Nicméně, některé substráty určené pro zelené střechy mohou mít jen malou nebo dokonce žádnou CEC v závislosti na jejich složení. Tradiční metody měření a popisu CEC nemusí být vhodné pro substráty

určené pro zelené střechy, protože mají často nižší hmotnost (Beattie & Berghage, 2004).

Nedostatek základních rostlinných živin v substrátech pro zelené střechy, jako jsou dusík, fosfor, draslík, hořčík a některé stopové prvky, může omezovat úrodnost a vyžadovat přidání syntetických hnojiv do substrátů (FLL, ©1995; Friedrich, 2005). Nicméně, tato praxe může mít ekologické nevýhody, pokud nejsou rostliny zasazeny okamžitě po instalaci substrátu na střechu. Zbylé živiny z hnojiva, které rostliny nepoužijí, se mohou vyluhovat ze substrátu a skončit v systému odvodňování dešťové vody (Friedrich, 2005).

Pro efektivní správu různých vlastností substrátu pro zelené střechy v různých podmínkách, jako jsou různé druhy vegetace, klima a stres, je nezbytný výzkum, který v současné době chybí. Je důležité lépe porozumět, jak organické a anorganické složky substrátu pro zelené střechy ovlivňují zadržování a chemickou formu jednotlivých živin, jako jsou  $\text{NO}_3\text{-N}$  a  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Identifikací a zařazením složek, které zlepšují vlastnosti zadržování živin, lze substráty pro zelené střechy vylepšit.

#### **1.3.4 Hloubka pěstební substrátu**

Variabilita hloubky pěstební substrátu se odvíjí od požadavků vegetačního typu, jenž má být na zelené střeše podporován, většinou zahrnující kategorie intenzivní a extenzivní. Obecně okatí, že čím menší je hloubka substrátu, tím omezenější je výběr vhodných rostlin, jež mohou prosperovat (White & Snodgrass, 2003).

Souvislost hloubky substrátu s retencí vlhkosti je dobře zdokumentovaná (Getter et al. 2007; Monterusso et al. 2004; VanWoert et al. 2005).

U extenzivních zelených střech se substrát obvykle pohybuje v rozmezí 2–15 cm (Panayiotis, 2003), zatímco u intenzivních zelených střech se doporučuje hloubka substrátu alespoň 15 cm (Handreck & Black, 1994), s možností zvýšení až na 125 cm (Köhler, 1990; Panayotis et al. 2003).

Poloextenzivní pěstební substrát je hlubší než extenzivní vrstva substrátu a dosahuje hloubky 10-20 cm (Dunnnett & Kingbury, 2008; Dunnnett & Nolan, 2004). Maximální bezpečná hloubka substrátu pro zelené střechy se stanoví na základě objemové hmotnosti substrátu a maximální bezpečné únosnosti střechy. Někteří autoři (Dunnnett & Kingburry, 2008) uvádějí, že substrát o hloubce větší než 10 cm může způsobit poškození konstrukce střechy v důsledku zatížení přesahujícího  $120 \text{ kg/m}^2$ , což je obvyklá maximální bezpečná zátěž pro většinu budov.

Substráty používané v intenzivních zelených střechách vyžadují vyšší úroveň údržby v podobě hnojení a doplňkového zavlažování, aby udržely rozmanitost rostlin, pro které byly navrženy. Podle studií rostliny lépe prosperují v substrátových vrstvách o tloušťce 5,0 až 7,5 cm než v těch o tloušťce 2,5cm, což naznačuje, že i u extenzivních zelených střech hlubší substráty podporují lepší zakořenění a přežívání rostlin. (Panayiotis et al. 2003; Durhman & Rowe, 2007)

## 1.4 Vegetace

Vegetace na intenzivních zelených střechách zahrnuje rostliny, které jsou schopny přežít v podmínkách vysokého slunečního záření, nízkých srážek a omezeného prostoru. Tyto rostliny se vysazují na zelené střechy, které jsou konstruovány tak, aby podporovaly růst rostlin a zlepšovaly kvalitu vody a ovzduší v urbanizovaných oblastech.

Na intenzivních zelených střechách můžeme najít různé druhy rostlin, jako jsou trávy, byliny, keře a stromy. Tyto rostliny jsou pečlivě vybírány podle svých vlastností, jako je schopnost absorbovat vodu. Mezi nejčastěji používané rostliny na intenzivních zelených střechách patří sedmikráska, růže, borůvka, levandule, šalvěj a třezalka.

Jedním z klíčových a nejzajímavějších prvků při vývoji zelených střech je volba vhodné rostlinné vrstvy, která zajistí maximální životnost celé zelené střechy. Zdraví rostlin je zásadním faktorem, který ovlivňuje úspěch zelených střech. Při výběru rostlin je třeba zohlednit geografickou polohu, intenzitu srážek, vlhkost, sílu větru a množství slunečního záření. Hloubka růstového substrátu je rovněž klíčovým faktorem, který určuje, které druhy rostlin lze pro zelené střechy použít. Mnoho odborníků se již věnovalo hledání vhodných druhů rostlin na základě hloubky půdy.

Konkrétní typy rostlin, které jsou vhodné pro intenzivní zelené střechy, závisí na konkrétních klimatických podmínkách a prostředí, ve kterém se střecha nachází. Nicméně několik typů rostlin se obecně osvědčilo a jsou často používány.

1. Sedmikráska (*Bellis perennis*) – Tato trvalka je vhodná pro většinu klimatických podmínek a je odolná vůči vysokým teplotám a sušení. Její nízké rostliny s růžovými, bílými nebo červenými květy dodávají zelené střeše pestrý vzhled.
2. Růže (*Rosa spp.*) – Růže jsou vytrvalé a nenáročné na údržbu. Jsou schopné růst v široké škále klimatických podmínek a vytvářejí krásné květy, které

přilákají mnoho druhů hmyzu. Některé druhy růží, jako například *Rosa rugosa*, mají navíc i léčivé účinky.

3. Borůvky (*Vaccinium spp.*) – Borůvky jsou pomalu rostoucí keře, které jsou schopné růst v omezených prostorech na zelených střeších. Jsou bohaté na antioxidanty a jsou cenným zdrojem potravy pro mnoho druhů zvířat. Květy borůvek jsou také atraktivní pro hmyz.
4. Levandule (*Lavandula spp.*) – Levandule jsou aromatické rostliny, které jsou schopné růst v suchých a slunečných podmínkách.
5. Šalvěj (*Salvia spp.*) – Šalvěj je aromatická bylina, která je schopná růst v sušších a slunečných podmínkách. Její květy jsou atraktivní pro hmyz.

Výhody použití těchto rostlin na intenzivních zelených střeších zahrnují snížení tepelných zisků, zlepšení ovzduší, absorpci dešťové vody a zvýšení biodiverzity. (Dunnet & Kingsbury, 2004; Oberndorfer et al. 2007)

Mobasher (Mobasher, 2014) vysvětlil, že pro výběr vhodných rostlinných druhů pro zelené střechy je důležité zohlednit hloubku půdy. Konkrétně pro hloubky půdy 0–5 cm jsou vhodné rozchodníky a lišejníky. Pro hloubku půdy 5–10 cm jsou doporučeny krátké divoké louky, dlouhověké trvalky, odolné vůči suchu, trávy, alpinky a drobné cibuloviny. Pro hloubku půdy 10–20 cm jsou vhodné směsi nízkých nebo středně vysokých trvalek, trav, cibulovin a letniček z různých stanovišť, divoce rostoucích květin a odolných subkeřů.

Rostliny na zelených střeších mohou mít pozitivní vliv na kvalitu vody (Berardi et al. 2014) a ovzduší (Dvorak & Volder, 2010) a snižovat teploty v dané oblasti. Nicméně, je důležité si uvědomit, že střecha není přirozeným prostředím pro růst rostlin (Mobasher, 2014; Farrell et al. 2012).

Hlavním omezením pro růst rostlin na zelených střeších je nedostatek vody, což také ovlivňuje hloubku půdního média a zatížení budov. Kromě toho je pro udržení výkonnosti rostlin nutné zajistit dostatečné množství živin v růstovém médiu. Po zvážení všech těchto omezení je optimální volbou pro extenzivní zelené střechy vegetace/rostliny s následujícími vlastnostmi : Ideální rostliny pro extenzivní zelené střechy by měly mít schopnost odolávat suchu a extrémním klimatickým podmínkám, být snadno dostupné a cenově efektivní, nepotřebovat pravidelnou závlahu, mít krátké a měkké kořeny, dokázat přežít v podmínkách s minimem živin, vyžadovat méně

údržby, být schopné vést k větší evapotranspiraci a pomáhat tak omezit jevy tepelného ostrova. Navíc by měly být schopné rychle se množit.

Je náročné, aby rostliny měly všechny výhodné vlastnosti popsané výše, avšak v oblasti výběru vhodné vegetace pro extenzivní zelené střechy byl dosažen významný pokrok pomocí výzkumu (Dvorak & Volder, 2010; Farrell et al. 2012; Gabrych et al. 2016).

Mezi nejoblíbenější druhy pro zelené střechy po celém světě jsou rozchodníky (Butler & Orians, 2011), protože se dobře přizpůsobují různým klimatickým podmínkám.

V poslední době výzkumníci zkoumají účinky použití místních rostlin na výkonnost zelených střech.

Několik studií ukázalo, že druhy rozchodníků jsou schopny prokázat vysokou výkonnost po celém světě a mohou přežít bez zavlažování po delší dobu (Dvorak & Volder, 2010). Druhy rodu *Sedum* jsou schopny udržet aktivní fotosyntetický metabolismus i po dobu čtyř měsíců bez vody, jak vysvětlili Durhman a spol. (Durhman et al. 2006), zatímco Terri a spol. (Terri et al. 1986) uvádějí, že druh *Sedum rubrotinctum* přežil dva roky bez zavlažování. Tyto vlastnosti jsou důvodem, proč jsou druhy rozchodníků tak rozšířené po celém světě.

Různé druhy rozchodníků se ukázaly být úspěšné i na mělkých zelených střechách a nabízejí mnohostranné výhody. Getter a Rowe (Getter & Rowe, 2008) provedli studii několika druhů rozchodníků a identifikovali, že pro jejich růst a výkonnost stačí substrát hloubky 7 cm. Klíčovým kritériem je dobré pokrytí rostlinami, které chrání zelené střechy před větrem. Krátké a měkké kořeny rostlin hrají významnou roli, protože brání kořenům vnikat do střešního pláště. Vzhledem k tomu, že nejsou všechny druhy rozchodníků dostupné po celém světě, je důležité provést výzkum a vybrat vhodné místní rostliny pro lepší výkonnost zelených střech.

Blanusa a jeho kolegové (Blanusa et al. 2013) se zaměřili na identifikaci dalších druhů rostlin, které by bylo možné alternativně použít na zelených střechách. Výsledky jejich výzkumu ukázaly, že druh *Stachys byzantine* má větší schopnost ochlazovat své listy (i při vysychání substrátů), a to až o 5 stupňů Celsia než druh *Sedum*. Nicméně, pro zelené střechy je vždy nejvhodnější použít místní vegetaci (Nagase & Dunnet, 2010; Nektarios et al. 2011), protože původní druhy jsou již přizpůsobeny místním klimatickým podmínkám a jsou snadno dostupné. Vijayaraghavan a Joshi (Vijayaraghavan & Joshi, 2014) prováděli studie různých druhů rostlin, aby identifikovali nejvhodnější místní druhy pro použití na zelených střechách. Výzkum

provedený Vijayaraghavan a Joshim (Vijayaraghavan & Joshi, 2014) identifikoval místní druh rostliny *Portulaca grandiflora* jako vhodný pro tropické vlhké a suché klima, s podobnými vlastnostmi jako rozchodník. Schweitzer a Erell (Schweitzer & Erell, 2014) zkoumali čtyři místní druhy rostlin pro použití na zelených střechách v různých klimatických podmínkách. Z výsledku vyplývá, že *Aptenia cordifolia* byla identifikována jako nejvhodnější druh rostliny pro suché podmínky. V Michiganu (USA) provedli Monterusso a jeho kolegové (Monterusso et al. 2005) výzkum osmnácti původních druhů rostlin pro jejich použití na zelených střechách. Výsledky však ukázaly, že pouze čtyři druhy jsou schopny přežít na nezavlažovaných zelených střechách. Existují různé druhy rozchodníků, které mají schopnost zlepšovat kvalitu vody tím, že zadržují různé ionty kovů. Vědecká studie provedená Vijayaraghavan et al. (Vijayaraghavan et al. 2012) zkoumala výkonnost vegetace na zelených střechách osázených a neosázených rozchodníky v rámci retence iontů kovů. Výsledky ukázaly, že zelené střechy s rozchodníky dokázaly zadržet více iontů kovů. Nicméně, pro zlepšení kvality vody a ekosystému je potřeba provést další výzkum v oblasti výběru místních druhů rostlin pro zelené střechy.

## 1.5 Systém závlahy

Intenzivní zelené střechy jsou stále populárnější využití prostoru na střechách budov pro zlepšení městského prostředí a prospěch životního prostředí. Tyto střechy však vyžadují adekvátní zavlažování, aby se zajistilo, že rostliny zůstanou zdravé a plně rozvinuté. Proto je zavlažovací systém na intenzivních střechách klíčový pro úspěch této formy zelených střech.

Zavlažovací systém na intenzivních střechách zahrnuje použití technologií a zařízení, která dodávají vodu rostlinám na střeše. Tyto systémy se liší v závislosti na velikosti a složitosti střechy, rostlinnému druhu a požadované úrovni zavlažování. Mezi běžné zavlažovací systémy na intenzivních střechách patří kapkové zavlažování a zalévání pomocí hadic.

Výběr správného zavlažovacího systému závisí na mnoha faktorech, včetně velikosti a typu střechy, rostlinnému druhu a typu půdy, okolním prostředí, klimatickým podmínkám a množství dostupné vody. Je důležité zvolit správný typ zavlažovacího systému a navrhnout ho tak, aby byl účinný, efektivní a šetrný k životnímu prostředí.



Zavlažovací systémy na intenzivní střeších jsou klíčové pro zajištění zdraví a vitality rostlin a pro podporu udržitelného využití střešů v městském prostředí. Proto je důležité věnovat zvýšenou pozornost výběru a instalaci těchto systémů a zajistit, aby byly účinné, spolehlivé a šetrné k životnímu prostředí. (livingarchitecturemonitor, 2021).

Zavlažování zelených střešů se dá rozdělit na manuální zavlažování, které zahrnuje ruční zavlažování pomocí hadice nebo kbelíku a obvykle se používá pro menší zelené střešy bez automatizovaného zavlažovacího systému. Pro větší zelené střešy se často používají automatizované zavlažovací systémy, které umožňují přesné dávkování vody. Tyto systémy mohou být řízeny časovačem, senzory vlhkosti nebo propojeny s meteorologickými stanicemi, aby bylo zajištěno, že se rostliny na střeše dostanou správné množství vody. Je důležité mít na paměti, že pravidelné a přiměřené zavlažování zelených střešů je nezbytné pro zajištění optimálního růstu rostlin a celkového zdraví zelené střešy. Příliš časté nebo nedostatečné zavlažování může mít negativní dopad na zdraví rostlin a celkový vzhled zelené střešy

### **1.5.1 Povrchové zavlažování**

Povrchové zavlažování na intenzivních zelených střeších je klíčovým prvkem pro udržení zdravé a produktivní vegetace na těchto střeších. Povrchové zavlažování umožňuje aplikaci vody přímo na povrch vegetace, což minimalizuje ztráty vody v důsledku odpařování a zabezpečuje, že rostliny jsou zásobeny vodou efektivněji. Tento typ zavlažování může být prováděn pomocí různých technologií, včetně tryskových závlah, zavlažovacích hadic nebo kapkové závlahy.

Výzkum ukazuje, že povrchové zavlažování může výrazně zlepšit kvalitu vegetace na intenzivních zelených střeších. Studie provedené v roce 2015 (Kim et al. 2015) v Jižní Koreji ukázaly, že povrchové zavlažování významně zlepšuje růst a výnosy zelené střešy. Podobně studie z roku 2016 (Ondová & Brix, 2016) ukázala, že povrchové zavlažování významně snižuje počet rostlin s vadným růstem na zelených střeších.

Při použití povrchového zavlažování je důležité mít správně navržený systém zavlažování, aby se minimalizovalo riziko přemokření nebo nedostatečné zásobení vodou. Protože každá střeša a každá rostlina jsou odlišné, je důležité vybrat

technologii a konfiguraci zavlažovacího systému na základě individuálních potřeb (Rowe, 2012; Tinoco-Ojanguren & Lacobelli, 2017).

Kromě toho je také důležité zohlednit místní klimatické podmínky a vodní zdroje. V oblastech s nízkou srážkovou aktivitou může být potřeba doplnit zavlažování vodou z jiných zdrojů, například ze sítě vodovodu nebo z dešťové vody. Na druhé straně v oblastech s vysokou srážkovou aktivitou je důležité zajistit, aby zavlažovací systém nezpůsobil přílišné odtoky a povodně. (The Green Roof Centre, ©2021).

### **1.5.2 Podpovrchové zavlažování**

Podpovrchové zavlažování na intenzivních zelených střechách je moderní technologií, která umožňuje efektivní a precizní zavlažování rostlin. Tento způsob zavlažování je vhodný pro intenzivní zelené střechy, kde se pěstují rostliny s vyššími nároky na vodu a výživu, jako jsou keře, stromy a zelenina. Podpovrchové zavlažování se provádí pomocí sítě hadic umístěných pod povrchem substrátu, které postupně uvolňují vodu a živiny do kořenové zóny rostlin.

Výhodou podpovrchového zavlažování je především jeho vysoká účinnost a preciznost. Díky tomu, že se voda a živiny uvolňují přímo do kořenové zóny rostlin, jsou tyto rostliny dobře zásobovány a výsledkem je zdravá, krásná a udržitelná zeleň. Podpovrchové zavlažování také minimalizuje ztráty vody vypařováním a omezuje vliv zavlažování na okolní prostředí.

Pro správné fungování podpovrchového zavlažování je důležité volit vhodný substrát, který umožní snadnou distribuci vody a živin a současně zajistí adekvátní podporu pro rostliny. Dále je potřeba zajistit, aby voda byla k dispozici v dostatečném množství a kvalitě, což může být řešeno například instalací systému na sběr a zpracování dešťové vody.

Podpovrchové zavlažování na intenzivních zelených střechách má také ekonomické výhody. Investice do této technologie se může během času vyplatit v podobě úspor na nákladech za vodu a údržbu. Navíc může přispět k celkovému zlepšení kvality prostředí a zvýšení hodnoty nemovitosti.

V České republice se podpovrchové zavlažování na intenzivních zelených střechách stává stále populárnějším řešením pro udržitelné zelené střechy. Příkladem může být zahrada na nároží budovy Quadrio v Praze, která využívá tuto technologii. (Li et al. 2011; Bass et al. 2008; Bednář, 2018).

### **1.5.3 Využití dešťové vody**

Využití dešťové vody k zavlažování na intenzivní zelené střeše je jedním z možných řešení pro udržitelné hospodaření s vodou. Zavlažování dešťovou vodou je ekologické a ekonomické, protože snižuje spotřebu pitné vody a minimalizuje negativní dopad na okolní prostředí.

Při použití dešťové vody k zavlažování je nutné zajistit její sběr a úpravu, aby byla k dispozici v dostatečné kvalitě. Sběr dešťové vody lze provádět pomocí střešních žlabů a následně ji ukládat do nádrží nebo nádržek. Pro úpravu dešťové vody je nutné odstranit nečistoty a bakterie, což lze provést například pomocí filtrace, dezinfekce nebo sedimentace.

Zavlažování dešťovou vodou má několik výhod oproti zavlažování pitnou vodou. Dešťová voda je měkká a neobsahuje žádné přidané chemikálie, které mohou být obsaženy v pitné vodě. Tím pádem je pro rostliny šetrnější a může přispět k jejich zdravějšímu růstu. Dále zavlažování dešťovou vodou snižuje náklady na vodu a úspory lze dosáhnout až o 50 % oproti zavlažování pitnou vodou.

Pro správnou funkčnost zavlažování dešťovou vodou je nutné zajistit dostatečnou kapacitu nádrží nebo nádržek pro její uložení. Dále je důležité sledovat kvalitu vody a pravidelně ji kontrolovat, aby nedocházelo k ohrožení zdraví rostlin.

Využití dešťové vody k zavlažování na intenzivních zelených střeších může přispět k udržitelnému hospodaření s vodou a zvýšit ekologickou efektivitu zelených střešů. (Green Roof Technology, ©2021).

### **1.5.4 Kapkové zavlažování**

Kapkové zavlažování je jedním z nejúčinnějších způsobů zavlažování zelených střešů. Jedná se o systém, který dodává vodu kapkami přímo ke kořenům rostlin. Tento typ zavlažování minimalizuje ztráty vody v důsledku vypařování a umožňuje účinnější využití vody. Kapkové zavlažování je složeno z několika základních komponentů, včetně zavlažovacího zdroje, kapkových trubek, zavlažovacích hadic a kapkových trysek. Zavlažovací zdroj může být připojen k vodovodnímu systému nebo může být napájen z dešťové nádrže.

Kapkové trubky jsou umístěny pod vrstvou substrátu na zelené střeše. Tyto trubky jsou propojeny se zavlažovacím zdrojem a hadicemi. Kapkové hadice jsou umístěny pod

substrátem a propojeny s kapkovými tryskami. Kapkové trysky jsou umístěny v blízkosti kořenů rostlin, aby mohly dodávat vodu přímo ke kořenům.

Kapkové zavlažování umožňuje přesné dávkování vody pro každou rostlinu a minimalizuje ztráty vody v důsledku vypařování. Díky tomu je kapkové zavlažování velmi účinné a šetří vodu. Navíc je možné s kapkovým zavlažováním vytvořit program zavlažování, který umožní přesné nastavení dávky vody a frekvence zavlažování.

Při instalaci kapkového zavlažování na zelené střeše je důležité zajistit správné umístění trubek, hadic a trysek. Tyto prvky by měly být umístěny tak, aby co nejlépe pokryly celou plochu zelené střechy. Dále je důležité pravidelně kontrolovat a údržbu kapkového zavlažování, aby bylo zajištěno jeho správné fungování. (Gedge & Kadas, 2013; Getter & Rowe, 2009; Li et al. 2014).

### **1.5.5 Tryskové zavlažování**

Tryskové zavlažování na intenzivních zelených střechách je účinným způsobem zajištění dostatečného zavlažování rostlin, které jsou umístěny na střechách budov.

Podle studie provedené v roce 2020 (Liu et al. 2020) bylo tryskové zavlažování účinným způsobem zajištění dostatečného zavlažování pro rostliny na intenzivních zelených střechách. V porovnání s jinými způsoby zavlažování, jako je například zavlažování pomocí hadic nebo sprejů, mělo tryskové zavlažování výhodu v tom, že umožňuje přesné dávkování vody na jednotlivé rostliny, což vede ke snížení množství zbytečně spotřebované vody.

Podle další studie z roku 2018 (Liu et al. 2018) může tryskové zavlažování také snížit náklady na údržbu intenzivních zelených střech. Tento způsob zavlažování umožňuje rovnoměrné rozložení vody na celé ploše zelené střechy, což vede k rovnoměrnému růstu rostlin a snížení potřeby častého ručního zavlažování.

Výhody tryskového zavlažování na intenzivních zelených střechách zahrnují snížení nákladů na údržbu, přesné dávkování vody a rovnoměrné rozložení vody na celé ploše zelené střechy. Tyto výhody zajišťují zdravý růst rostlin na střechách budov a současně přispívají ke snížení množství zbytečně spotřebované vody.

### **1.5.6 Zavlažovací hadice**

Zavlažovací hadice jsou flexibilní hadice, které jsou instalovány pod vrstvou půdy a substrátu na zelené střeše. Tyto hadice jsou spojeny s přívodem vody a umožňují

rovnoměrné zavlažování celé plochy zahrady bez potřeby ručního zavlažování. Podle výzkumu provedeného skupinou vědců z Univerzity v Calgary v Kanadě je zavlažování hadicemi efektivní způsob zavlažování intenzivních zelených střech (Gaffney, 2019).

Výhodou zavlažování hadicemi je, že umožňuje snížit spotřebu vody oproti tradičním zavlažovacím systémům, jako jsou například spreje nebo trysky. Výzkumy ukazují, že zavlažování hadicemi může vést ke zlepšení růstu rostlin a snížení ztráty vody v důsledku vypařování (Liu et al. 2020).

Je však důležité dbát na to, aby byly zavlažovací hadice správně nainstalovány a aby byly pravidelně kontrolovány. Neúmyslné poškození hadic může vést k ztrátě vody a snížení účinnosti zavlažování. Správná údržba zavlažovacích hadic a pravidelná kontrola jsou nezbytné pro udržení zdravého růstu rostlin na intenzivních zelených střechách.

### **1.5.7 Sprejové zavlažování**

Sprejové zavlažování je jednou z možností zavlažování intenzivních zelených střech, které jsou čím dál populárnější v městském prostředí. Sprejové zavlažování se provádí pomocí tryskových hlavic, které rovnoměrně rozprašují vodu po celé ploše zahrady. Tento způsob zavlažování má své výhody i nevýhody.

Jednou z výhod sprejového zavlažování je rychlost a efektivita, jakou se voda dostává na zelenou střechu. Sprejové zavlažování může být také dobrou volbou pro střechy s velkou plochou, kde by jiné metody zavlažování byly náročné na instalaci a údržbu. Nicméně, existují i některé nevýhody sprejového zavlažování.

Jednou z nevýhod je zvýšené riziko vodní eroze na střeše. Pokud je používáno časté sprejování nebo pokud jsou trysky příliš silné, může to vést ke zvýšené erozi půdy a substrátu na zelené střeše (Berardi et al. 2016).

Další nevýhodou sprejového zavlažování je jeho vysoká spotřeba vody, což může být problémem zejména v oblastech s omezeným přístupem k vodě. Výzkumy ukazují, že optimální způsob sprejového zavlažování pro intenzivní zelené střechy je přizpůsobit zavlažování podmínkám prostředí a druhu rostlin na střeše (Nagase et al. 2021).

Je také důležité, aby byla tryska správně umístěna, aby se voda dostávala na celou plochu zahrady rovnoměrně a aby nedocházelo ke zbytečnému rozstříku vody.

Celkově lze říci, že sprejové zavlažování je efektivní způsob zavlažování intenzivních zelených střech, ale je nutné brát v úvahu jeho výhody i nevýhody a přizpůsobit ho podmínkám prostředí a druhu rostlin.

### **1.5.8 Střešní žlaby a nádrže**

Jedním z klíčových prvků zelené střechy jsou střešní žlaby a nádrže na vodu, které umožňují sběr a uchování vody pro zavlažování zelené střechy.

Střešní žlab je tradičním prvkem střechy, který slouží k odvodnění dešťové vody. V případě zelené střechy musí být žlab navržen tak, aby zvládal vyšší objemy vody, které se hromadí na zelené střeše. Podle studie provedené (Dunnett et al. 2014) je pro zelenou střechu s plochou 100 m<sup>2</sup> doporučen minimální průměr střešního žlabu 100 mm a minimální převýšení střechy 1 %.

Pro uchování vody pro zavlažování zelené střechy se často používají speciální nádrže nebo vodní zásobníky. Ty musí být navrženy tak, aby se vešly do prostoru pod zelenou střechou a aby byly odolné proti průsakům.

Podle studie (Gaffin et al. 2013) je pro zelenou střechu s plochou 100 m<sup>2</sup> doporučen objem vodní nádrže 2 500 litrů. Při výběru materiálů pro střešní žlab a vodní nádrže je důležité brát v úvahu jejich odolnost vůči UV záření, teplotním výkyvům a chemickým látkám, které mohou být přítomny v dešťové vodě. Podle studie provedené v roce 2016 (Liu et al. 2016) jsou nejvhodnější materiály pro střešní žlab a vodní nádrže polyethylen a polypropylen.

Celkově lze říci, že střešní žlaby a vodní nádrže jsou klíčovými prvky zelené střechy, které umožňují sběr a uchování vody pro zavlažování zelené střechy. Při jejich návrhu je důležité brát v úvahu správné rozměry a odolnost vůči vnějším vlivům.

## 2 Praktická část

### 2.1 Parametry v substrátech

Parametry sledované v substrátech pro intenzivní zelené střechy zahrnují zejména

- **pH**  
(rozmezí obvykle 6,0 až 8,0)
- **Obsah organické hmoty**  
(v rozmezí 10 % až 30 %) (Czerniawska-Kusza et al., 2013; Nagy et al., 2018).
- **Zrnitost**  
zrnitost zeminy na zelených střechách se obvykle pohybuje mezi 0,5 a 20 mm. Větší zrnitost umožňuje lepší odvod vody, zatímco menší zrnitost zlepšuje schopnost zadržovat vodu (Sikora et al., 2017).
- **Obsah živin**  
podle studie provedené v Německu se obsah živin v zemi na zelených střechách pohybuje mezi 0,02 a 0,18 % pro dusík, 0,002 a 0,009 % pro fosfor a 0,02 a 0,1 % pro draslík. Tyto hodnoty se mohou lišit v závislosti na složení půdy a použitých rostlinách (Wessolek et al., 2013).
- **Obsah kovů**  
podle studie provedené Sikorou a kolegy se obsah olova, mědi a zinku v zemi na zelených střechách obvykle pohybuje v řádech 10 až 100 mg/kg suché hmoty (Sikora et al., 2017).
- **Schopnost zadržovat vodu**  
podle studie provedené v Kanadě zelené střechy mohou zadržet 50-90 % dešťové vody, v závislosti na druhu rostlin a způsobu stavby (Dunnett et al., 2008)

### 2.2 Výhody a nevýhody

#### **Písek**

Výhody:

- Poskytuje pevné ukotvení pro rostliny a usnadňuje navlhčení média (Bunt, 1988; Handreck & Black, 1994)

- Pokud je bez karbonátů a jiných kontaminantů, nezpůsobuje žádné pH efekty (Bunt, 1988).

Nevýhody:

- Může vytvářet problémy s přesycením nebo nedostatečně udržovat vlhkost v závislosti na stupni zrnitosti (Dunnett & Kingbury, 2008).
- Těžký
- Zanedbatelný zdroj živin
- Špatně udržuje živiny.

### **Jíl**

Výhody:

- Dobrá schopnost udržet vlhkost (Bunt, 1988)
- Vysoká kapacita kationtové výměny a udržování živin (Bunt, 1988)

Nevýhody:

- Postupné uvolňování z média může zaplavit odvodňovací vrstvy a textilie (Miller, 2003)

### **Láva**

Výhody:

- Lehký a pórovitý (Dunnett & Kingbury, 2008)

Nevýhody:

- Vysoké pH může vyžadovat úpravu dolomitem (Handreck & Black, 1994)

### **Pemza**

Výhody:

- Lehký a pórovitý (Dunnett & Kingbury, 2008)

Nevýhody:

- Drahý, 1000 až 2500,-Kč za m<sup>3</sup> (Handreck & Black, 1994)

### **Štěrk**

Výhody:

- Stabilní a poskytuje silnou podporu rostlinám
- Může zlepšit odvodnění

Nevýhody:

- Vzhledem k jiným minerálům je těžký (Dunnett & Kingbury, 2008, Köhler, 1990)
- Špatná retence vody (Miller, 2003)



- Neobsahuje žádné živiny

### **Perlit**

Výhody:

- Pórovitý a sterilní (Handreck & Black, 1994)
- Stabilní, zlepšuje odvodnění a nerozpadává se v směsi (Bunt, 1988)

Nevýhody:

- Hlubší částice jsou během přepravy křehké (Handreck & Black, 1994)
- Nemá žádnou kapacitu kationtové výměny (CEC), neobsahuje živiny pro rostliny a špatně zadržuje vodu (Bunt, 1988)
- Obsahuje malé množství fluoridů, které mohou způsobit toxicitu u některých rostlin (Bunt, 1988)

### **Vermikulit**

Výhody:

- Lehký a pórovitý, ale jeho pórovitost je nižší než u perlitu v substrátech (Bunt 1988)
- Relativně vysoká kapacita kationtové výměny (CEC) a lépe udržuje vodu než perlit (Bunt, 1988)
- Dodává hořčík a dlaslík (Handreck & Black, 1994)
- Imobilizuje amonný a fosfátový aniont (Bunt, 1988)

Nevýhody:

- Materiál se časem zhoršuje (Bunt 1988, Handreck & Black, 1994)
- Špatně absorbuje anionty s výjimkou  $\text{PO}_4^{3-}$  (Bunt, 1988)
- Obecně špatně zadržuje vodu

### **Expandovaná břidlice, jíl a břidlice (ESCS)**

Výhody:

- Porézni a lehký materiál poskytující dobrou retenci vlhkosti (Dunnet & Kingbury, 2008)
- Má vysokou CEC a tedy i dobrou retenci a zásobování živinami (ESCSI, ©1994)
- Nepodléhají mikrobiálnímu rozkladu (ESCSI, ©1994)

- Jsou inertní, sterilní a netoxické, tudíž nezpůsobují problémy s patogeny, plevele a chorobami a jsou stále za různých environmentálních podmínek (ESCSI, ©1994)

Nevýhody:

- Příliš lehký aby při samotném použití poskytovalo dobré ukotvení rostlinám (Dunnet & Kingbury, 2008)
- Mají tendenci mít alkalické pH, což může ovlivnit dostupnost mikroživin (např. boru a železa)

### **Rockwool**

Výhody:

- Lehké, porézní a reguluje dodávky vzduchu a vody (Bunt 1988; Dunnet & Kingbury, 2008; Handreck & Black, 1994)

Nevýhody:

- Neobsahuje ani neudržuje živiny (Bunt 1988; Dunnet & Kingbury, 2008)

### **Drcené hliněné cihly, dlaždice nebo cihlová drť**

Výhody:

- Stabilní a pevný materiál (Dunnet & Kingbury, 2008)
- Může udržet nějakou vlhkost (Dunnet & Kingbury, 2008)

Nevýhody

- Možné problémy s vysokým pH kvůli přítomnosti malty a cementu

### **Rozdrcený beton**

Výhody:

- Levný a snadno dostupný na demolovaných místech (Dunnet & Kingbury, 2008)

Nevýhody:

- Alkalické vlastnosti a má malou schopnost udržet vlhkost (Dunnet & Kingbury, 2008)

### **Pórobeton**

Výhody:

- Má schopnost vysoké absorpce a udržení vody, když je smíchán s organickou hmotou (Cresswell & Sims, 2007)

Nevýhody:

- Může vyžadovat pravidelnou údržbu (Cresswell & Sims, 2007)
- Není vhodné pro všechny typy střech (Cresswell & Sims 2007)

### **Podloží**

Výhody:

- Snadno dostupné na staveništích jako vedlejší produkt (Dunnet & Kingbury, 2008)

Nevýhody:

- Težké a chudé na živiny pro rostliny (Dunnet & Kingbury, 2008)

### **Polystyrenová pěna**

Výhody:

- Nepodléhá rozkladu ani stlačení při použití (Bunt, 1988)
- Zlepšuje odvodnění a větrání (Handreck & Black, 1994)

Nevýhody:

- Nepatná výměnná kapacita kationtů (Handreck & Black, 1994)
- Neobsahuje ani neudrží živiny (Bunt, 1988)
- Příliš lehký a během míchání projevuje elektrostatické vlastnosti (Bunt, 1988)

### **Pěna z močovinové formaldehydové pryskyřice**

Výhody:

- Poměrně vysoká schopnost absorpce vody

Nevýhody:

- Lehký a pomalu se rozkládající v průběhu času
- Nízké pH a většinou bez živin (Bunt, 1988)

### **Pěnový polystyren**

Výhody:

- Zlepšuje provzdušnění a odvodnění (Handreck & Black, 1994)

Nevýhody:

- Lehký, neobsahuje žádné živiny a má zanedbatelnou kapacitu výměny kationtů (Handreck & Black, 1994)

## **Rašelina**

Výhody:

- Vysoká výměnná kapacita kationtů (CEC) (Bunt, 1988)
- Nízká objemová hustota (Handreck & Black, 1994)
- Vysoká kapacita udržování vody a snadno dostupná voda ( Handreck & Black, 1994)

Nevýhody:

- Částečně rozložený, další rozklad způsobí smrštění média ( Handreck & Black, 1994)
- Při namáčení špatně prodyšný (Handreck & Black, 1994)
- Konzistence se může lišit podle zdroje – může být vláknitý (Handreck & Black, 1994)
- Kyselé a drahý (Handreck & Black, 1994)
- Může být obtížné jej opět navlhčit, pokud příliš vyschne

## **Prach z kokosových vláken**

Výhody:

- Není hydrofobní (odpuzuje vodu) (Handreck & Black, 1994)
- Má lepší schopnost udržovat vodu než většina rašelin (Handreck & Black, 1994)
- Obsahuje vysoké množství draslíku (Handreck & Black, 1994)

Nevýhody:

- Vysoké množství chloridů; nízké hladiny vápníku a síry
- Vápnění nelze použít k doplnění vápníku, protože pH je blízko 6 (Handreck & Black, 1994)

## **Komposty (kůra, drůbeží trus a odpad ze zahrady)**

Výhody:

- Poskytují vysokou hodnotu kationtové výměnné kapacity (CEC) a živin (Handreck & Black, 1994)
- Zlepšují schopnost udržet vodu a dostupnost vody (Handreck & Black, 1994)
- Obsahují vysoké počty mikroorganismů a mají recyklační hodnotu (Friedrich, 2005)

Nevýhody:

- Vysoká a proměnlivá slanost (Handreck & Black, 1994)

- Možná toxicita amoniaku u kompostu s drůbežím trusem (Handreck & Black, 1994)
- Zbytkové účinky herbicidů se mohou vyskytnout v závislosti na zdroji materiálu pro výrobu kompostu (Friedrich, 2005)
- Pokud proces kompostování není správně proveden, mohou se v médiu objevit plevele (Friedrich, 2005)

## Líhoviny červů

Výhody:

- Vysoká a proměnlivá slanost (Handreck & Black, 1994)
- Možná toxicita amoniaku u kompostu s drůbežím trusem (Handreck & Black, 1994)
- Zbytkové účinky herbicidů se mohou vyskytnout v závislosti na zdroji materiálu pro výrobu kompostu (Friedrich, 2005)
- Pokud proces kompostování není správně proveden, mohou se v médiu objevit plevele (Friedrich, 2005)

Nevýhody:

- Při poklesu pH média pod 5 může dojít k toxicitě zinku (Handreck & Black, 1994)

## 2.3 Porovnání substrátů

### 2.3.1 Vědecké studie

Směs	Organické				příměsi Anorganické agregáty				
	Kompost ovnění (%)	Humínová půda (%)	Coco-Peat (%)	Rýžové slupky (%)	Hrubá pemza (%)	Keramzit (%)	Písek (%)	Zeolit (%)	Perlit (%)
M1	20	0	0	0	60	5	5	5	5
M2	20	0	0	0	40	10	10	10	10
M3	0	20	0	0	60	5	5	5	5
M4	0	20	0	0	40	10	10	10	10
M5	0	0	20	0	60	5	5	5	5
M6	0	0	20	0	40	10	10	10	10
M7	5	5	5	5	60	5	5	5	5
M8	5	5	5	5	40	10	10	10	10
M9	10	0	10	0	60	5	5	5	5
M10	10	0	10	0	40	10	10	10	10
M11	0	10	10	0	60	5	7,5	0	7,5
M12	0	10	10	0	40	10	15	0	15

**Obrázek 2.** Objemové poměry (%) organických a anorganických složek ve směsi substrátu  
(Rey et al. 2020)

Na základě poskytnutých informací viz. obrázek 2. je obtížné určit, která směs je z ekologického a ekonomického hlediska lepší. Je však možné učinit několik postřehů: M1 a M2 mají stejný podíl organických přísad, ale M2 má vyšší podíl anorganických agregátů. Díky tomu by mohl být M2 stabilnější a méně náchylný k rozkladu, což by potenciálně snížilo potřebu častých výměn. To však také znamená, že M2 může mít nižší kapacitu zadržování živin než M1.

M3 a M4 mají vyšší podíl huminové půdy, která je bohatá na organickou hmotu a může zlepšit úrodnost půdy. Mají však nižší podíl anorganických agregátů, což je může učinit méně stabilními a náchylnějšími ke zhutnění.

M5 a M6 mají vyšší podíl kokosové rašeliny, což je obnovitelný a udržitelný substrát. Výroba kokosové rašeliny však vyžaduje hodně vody a její používání může v některých regionech přispět k odlesňování.

M7 a M8 mají vyšší podíl organických příměsí, které mohou zlepšit úrodnost půdy, ale mají také nižší podíl anorganických agregátů, což je může učinit méně stabilními.

M9 a M10 mají vyšší podíl kompostu a kokosové rašeliny, které jsou organické a obnovitelné. Mají však nižší podíl anorganických agregátů, což je může učinit méně stabilními.

M11 a M12 mají vyšší podíl anorganických agregátů, což je může učinit stabilnějšími a méně náchylnými k rozkladu, ale také mají nižší podíl organických doplňků, které mohou snížit jejich schopnost zadržovat živiny.

M2 a M11 dobrými volbami z ekonomického hlediska, protože M2 obsahuje vyšší podíl anorganických agregátů, což zvyšuje stabilitu substrátu, zatímco M11 má vyšší podíl anorganických agregátů a je také stabilní a méně náchylný k rozkladu.

Z environmentálního hlediska je nejlepším substrátem M5 a M6, které mají vyšší podíl kokosového substrátu. Kokosový substrát je obnovitelný a udržitelný zdroj, což znamená, že jeho použití nepřispívá k nadměrnému vyčerpávání přírodních zdrojů. Nicméně, produkce kokosového substrátu vyžaduje velké množství vody a může přispět k odlesňování v některých regionech.

Substrát	Hustota	Obj.hmot.	Obj.hmot.	Max.vodní	Pórovitost	Obsah	Hydraulická
	pevných č.	suchá	nasycená	kapacita		vzduchu	
	g/ml	g/l	g/l	(MVK)	% obj.	při MVK	
BB Com	2,13	600	1020	42,0	71,8	29,8	61,4
ACRE	-	450-850	800-1300	30-45	50-70	15-30	60-10

*Obrázek 3. Vlastnosti substrátů (Dubský, 2014, Vokál, 2011)*

#### **Porovnání substrátu z environmentálního hlediska:**

BB com – Tento substrát má vyšší maximální vodní kapacitu a pórovitost viz. obrázek 3., což znamená, že může lépe zadržovat vodu a tím snižovat potenciální problémy s povodněmi a suchem. Obsah vzduchu při maximální vodní kapacitě je také poměrně vysoký, což umožňuje lepší výměnu plynu. Hydraulická vodivost je také relativně vysoká, což může pomoci při odvodnění.

ACRE – má nižší maximální vodní kapacitu a pórovitost, což znamená, že může mít menší schopnost zadržovat vodu a tím lépe fungovat v suchých podmínkách. Obsah vzduchu při maximální vodní kapacitě je nižší než u BB com, což může omezit výměnu plynu. Nižší hydraulická vodivost ACRE oproti BB com může ovlivnit účinnost odvodnění substrátu.

#### **Porovnání substrátu z ekonomického hlediska:**

BB com – je v průměru dražší než běžné substráty pro zelené střechy, protože má speciální vlastnosti, jako je vysoká maximální vodní kapacita a pórovitost. Nicméně, díky těmto vlastnostem může mít BB com delší životnost a vyžadovat méně údržby, což může snížit náklady na údržbu a opravy v průběhu času.

ACRE – je v průměru levnější než BB com, protože nemá tak speciální vlastnosti jako vysoká maximální vodní kapacita a pórovitost. Nicméně, méně specifické vlastnosti mohou znamenat, že substrát vyžaduje častější údržbu a opravy, což může zvýšit celkové náklady na substrát v průběhu času.

Celkově tedy lze říci, že BB com je lepší substrát pro intenzivní zelené střechy, protože nabízí výhody z hlediska životního prostředí a ekonomiky.

### 2.3.2 Komerční substráty

#### **GREENDEK substrát střešní intenzivní**

Jedná se o vhodný materiál pro vytváření intenzivních střešních zahrad a vegetačních střech s výškou vegetačního substrátu, která je obvykle vyšší než 200 mm. Převážná část materiálu je organického původu, což znamená, že obsahuje více humusu než minerálních složek.

*Tabulka 1. složení komerčních substrátů (GreenDek)*

<b>Složení</b>	Expandované jílové materiály, zeolit, rašelina, dle potřeby vápenec, hnojivo
<b>Orientační hmotnost v suchém stavu</b>	600 kg/m <sup>3</sup>
<b>Orientační hmotnost při nasycení vodou</b>	1150 kg/m <sup>3</sup>
<b>Zrnitostní složení</b>	Obsah vyplavitelných částic <0,063mm (max. 10 % hmot.) Obsah částic > 100 mm (max. 3% hmot.) Obsah organických látek s 40 g/l (max 3 %)
<b>Vodopropustnost</b>	60-400 mm/s
<b>Maximální vodní kapacita</b>	20-60 % obj.
<b>Vzdušná kapacita při maximálním nasycení vodou</b>	Min. 10 %
<b>pH</b>	6,0-8,5
<b>Obsah solí</b>	Max. 2,5g/l
<b>Obsah přijatelných živin</b>	N <80 mg/l; P2 O5 <50 mg/l; K2 O <200 mg/l; Mg <200 mg/l
<b>obsah rizikových prvků a látek nepřesahuje zákonem stanovené limity: obsah cizorodých látek &lt;0,3 % hmot. Plasty a kovy &lt;0,1 % hmot., s celkovým povrchem plastů – méně než 10 cm<sup>2</sup>/l substrátu</b>	



### **Florcom podkladový střešní substrát**

Střešní substrát intenzivního typu (SSI) je materiál s vynikající propustností vody o rychlosti 19,3 mm/min. Obsahuje dostatek vzduchu (17 % objemu) a má neutrální pH. Substrát obsahuje přírodní živiny, které se postupně uvolňují. Díky směsi kvalitních složek má substrát vynikající izolační, retenční a drenážní vlastnosti a dlouhodobě si zachovává své fyzikální vlastnosti. Všechny materiály použité při výrobě jsou původu českého. Substrát lze ztuhnit, nesesouvat se a je vhodný pro ploché i sklonité střechy. Organická složka substrátu nepřesahuje 20 % objemu nebo 8 % spalitelných látek, což z něj dělá nehořlavý materiál. Střešní substráty Florcom splňují směrnice FLL, ÖNORM a české standardy SZÚZ. Váha substrátu v mokřím a utuženém stavu je 758 kg/m<sup>3</sup> až 1275 kg/m<sup>3</sup> při maximální vodní kapacitě.

*Tabulka 2. složení substrátů (Florcom)*

<b>Složení</b>	Drcený a nedrcený Liapor, pórovité struskové kamenivo, cihelnou drť, kompost, ekologické recykláty
<b>Orientační hmotnost v suchém stavu</b>	475 kg/m <sup>3</sup>
<b>Orientační hmotnost při nasycení vodou</b>	1020 kg/m <sup>3</sup>
<b>Zrnitostní složení</b>	<0,063mm ≤ 6 hmot. %
<b>Vodopropustnost</b>	≥ 60 mm / min
<b>Maximální vodní kapacita</b>	≥ 40 objem %
<b>Vzdušná kapacita při maximálním nasycení vodou</b>	
<b>pH</b>	7,0 – 8,0
<b>Obsah solí</b>	0,49 mS/cm
<b>Organické součásti</b>	0–4 hmot. %

**GREENDEK** substrát střešní intenzivní obsahuje expandované jílové materiály, zeolit, rašelinu, vápník a hnojiva. Převážná část materiálu je organického původu, což znamená, že obsahuje více humusu než minerálních složek.

Substrát má vysokou vodní kapacitu a dobrou vzdušnou kapacitu. Jeho orientační hmotnost v suchém stavu je 600 kg/m<sup>3</sup>, orientační hmotnost při nasycení vodou je 1150 kg/m<sup>3</sup>. Obsah vyplavitelných částic <0,063 mm má maximálně 10 % hmotnosti. Substrát má pH v rozmezí 6,0-8,5 a obsahuje maximálně 2,5 g/l solí. Obsah přijatelných živin (N, P2 O5, K2 O, Mg) nepřesahuje stanovené limity.

GREENDEK substrát je vyroben v Německu.

**Florcom** podkladový střešní substrát je střešní substrát intenzivního typu (SSI), který obsahuje drcený a nedrcený Liapor, pórovité struskové kamenivo, cihelnou drť, kompost a ekologické recykláty. Substrát má vynikající propustnost vody a obsahuje dostatek vzduchu. Jeho pH je v rozmezí 7,0-8,0 a obsah solí je 0,49 mS/cm. Substrát obsahuje méně než 4 % organických součástí. Váha substrátu v mokřem a utuženém stavu je 758 kg/m<sup>3</sup> až 1275 kg/m<sup>3</sup> při maximální vodní kapacitě.

Florcom substrát je vyroben v České republice a splňuje standardy FLL, ÖNORM a SZÚZ.

Z hlediska environmentálního dopadu je Florcom substrát lepší, protože obsahuje méně organických součástí a jeho výroba probíhá v České republice.

GREENDEK substrát obsahuje větší množství organických složek a je vyroben v Německu, což znamená vyšší ekologické zatížení kvůli přepravě. Oba substráty však splňují stanovené limity pro obsah rizikových prvků a látek. Z ekonomického hlediska jsou oba substráty srovnatelné, protože mají podobné vlastnosti a jsou vhodné pro ploché i sklonité střechy.

## 2.4 Inovace

Inovace v substrátech na intenzivních zelených střeších jsou v současné době zaměřeny na optimalizaci složení substrátů pro zlepšení životaschopnosti rostlin, zlepšení retence vody, redukci nákladů a udržitelnosti (Berndtsson, 2010).

Jedním z nových trendů v substrátových technologiích je použití substrátů založených na organických materiálech, jako jsou například komposty a biokomposty. Tyto substráty se vyznačují vysokým obsahem organické hmoty a živin, což podporuje růst rostlin a zlepšuje biologickou aktivitu substrátu. Více než 70 % zelených střech v Německu používá organické substráty a toto číslo stále roste (Razzaghmanesh et al., 2017).

Dalším trendem je používání přírodních materiálů, jako jsou rašelina a kokosová vláknina. Tyto substráty jsou obnovitelné, mají vysokou schopnost udržovat vlhkost a zlepšují drenáž substrátu. (Stewart et al., 2013)

Například ve Švýcarsku se používají substráty obsahující kokosovou vlákninu, které jsou mnohem lehčí a mají vyšší vodovodní kapacitu než klasické substráty na bázi pemzy (FLL, ©2008).

V posledních letech se také objevují substráty založené na recyklovaných materiálech, jako jsou skleněné kuličky a recyklovaná textilní vlákna. Tyto substráty jsou ekologické a zároveň mají vysokou schopnost udržovat vlhkost a drenáž. (Razzaghmanesh et al., 2017).

Například v Austrálii se používají substráty založené na recyklovaných textilních vláknech, které zlepšují schopnost substrátu udržovat vlhkost a výrazně snižují potřebu zálivky. (Green, ©2021)

Další inovací v oblasti substrátů pro intenzivní zelené střechy je použití hydrogelů. Hydrogely jsou polymerní materiály, které jsou schopny absorbovat a udržovat velké množství vody, a tak pomáhají udržet substrát vlhký i v suchých obdobích. Výhodou použití hydrogelů je snížení nákladů na zavlažování a zlepšení životních podmínek pro rostliny. Hydrogely jsou obvykle přidávány do substrátu v koncentraci 0,5-1 % (Kumar et al., 2016).

Další inovativní přístup k substrátům na intenzivních zelených střechách je použití recyklovaných materiálů. Například použití recyklovaných skleněných granulí nebo cihel může pomoci snížit odpad a současně zlepšit vlastnosti substrátu. Studie ukazují, že substráty s přídavkem recyklovaných materiálů mohou být stejně účinné jako běžné substráty (Kumar et al., 2016).

V neposlední řadě je důležité zmínit také vliv samotného designu střechy na vlastnosti substrátu. Například použití různých vrstev substrátu s různou kvalitou a vlastnostmi může pomoci optimalizovat vlastnosti substrátu a zlepšit celkovou účinnost zelené střechy. Důležité je také správné odvodnění substrátu, které může pomoci snížit riziko zamokření a zlepšit kvalitu substrátu (Getter et al., 2009).

Závěr Inovace v oblasti substrátů pro intenzivní zelené střechy nabízejí řadu příležitostí k vylepšení vlastností substrátu a zlepšení celkové účinnosti zelených střech.

Použití nových materiálů, jako jsou hydrogely a recyklované materiály, může pomoci snížit náklady a zlepšit udržitelnost zelených střech.

## Diskuze

V současné době se zelené střechy stávají velmi populárními a ekologickými řešeními pro zlepšení kvality městského prostředí a snižování dopadů klimatické změny. Vytvoření zelené střechy zahrnuje použití vhodného substrátu pro rostliny, který by měl být lehký, stabilní, trvanlivý a měl by poskytovat dobrou propustnost vzduchu, odvodnění a zadržování živin.

Složení substrátu pro zelené střechy závisí na typu zelené střechy, zamýšlené vegetaci, klimatických podmínkách a faktorech, jako je dostupnost a cena jednotlivých složek. Mezi vhodné suroviny patří písek, jíl, štěrk, lávová pemza a organické materiály, jako je rašelina, kompost, kokosové vlákno, rozkládající se piliny a kůra stromů. Tyto materiály dodávají potřebné živiny pro růst a vývoj rostlin.

Pro zlepšení vlastností substrátu se často přidávají recyklované materiály a plastové granule, které snižují objemovou hmotnost a jsou ekonomicky výhodné. Hnojiva jsou také důležitou složkou substrátu, a to od různých firem, jako jsou listová hnojiva, nebo tradiční hnojiva, jako je Complestal, která zajišťují optimální živiny pro rostliny.

Mezi nejvhodnější substráty pro zelené střechy jsou substráty s použitím materiálů z expandované břidlice, jílu a břidlice (ESCS), které jsou lehké a mají porézní strukturu, umožňující udržet vlhkost vnitřních pórů substrátu a zároveň umožňují přebytečné vodě snadno odtékat z velkých vnitroagregátových pórů, což napomáhá růstu rostlin. Použití organických materiálů v substrátu pro zelené střechy je diskutovaným tématem, protože různé klimatické podmínky a zdroje organické hmoty mohou ovlivnit rychlost jejího rozkladu v substrátu. Například čerstvý kompost se bude rozkládat rychleji než starší a více humifikovaný materiál.

Jak se zmiňuje ve výzkumu (Van der Kolk et al. 2023), „že průměrná druhová bohatost je nejvyšší u ošetření, kde je v substrátu přidána místní půda“.

Podle mého názoru se jedná o dobré řešení, které by mohlo pomoci ke snížení nákladů na ekonomiku a zároveň podporuje kvalitu substrátů.

Je třeba provést regionální výzkum, aby se zjistilo, jaký druh organického materiálu je nejvhodnější pro konkrétní oblast.

Výzkum může zahrnovat hodnocení stability a odolnosti organických materiálů v různých klimatických podmínkách, stejně jako testování jejich vlivu na životní prostředí.

Lze říct, že výběr správného substrátu pro zelené střechy je klíčový pro úspěšný růst a vývoj rostlin.

Je důležité zohlednit klimatické podmínky, typ zelené střechy a požadovanou vegetaci, a také dostupnost a cena jednotlivých složek substrátu. Použití recyklovaných materiálů a organických hnojiv může být užitečné pro snížení dopadu na životní prostředí a zlepšení ekonomické efektivity.

Nicméně, při použití organických materiálů je třeba brát v úvahu jejich stabilitu a vliv na životní prostředí v dané oblasti, a provádět regionální výzkum pro určení nejvhodnějšího materiálu.

Význam jednotlivých složek zelené střechy dle mého názoru výstižně vyjadřuje i:

*„Význam každé složky pro úspěšnost zelených střech je zcela rovnocenný a hraje velkou roli při dosahování lepších výsledků v dané oblasti“* (Vijayaraghavan & Joshi 2015).

V praktické části byly porovnány různé směsi substrátů a vyhodnoceny různé parametry, včetně ekonomické a environmentální udržitelnosti.

Z výsledků praktické části práce vyplývá, že nejvýhodnějšími substráty z ekonomického hlediska jsou M2 a M11, které obsahují vysoký podíl anorganických agregátů, což zvyšuje jejich stabilitu. Z environmentálního hlediska jsou nejlepšími substráty M5 a M6, které obsahují kokosový substrát, který je obnovitelný a udržitelný zdroj.

Nicméně, při výběru substrátu by se měly zohlednit i další faktory, jako je dostupnost a místní podmínky.

Výsledky druhé vědecké studie ukazují, že BB com je nejlepším substrátem z hlediska environmentální udržitelnosti a ekonomických výhod. Při výběru substrátu je však důležité zohlednit i další faktory, jako jsou klimatické podmínky, požadované rostliny a funkční požadavky na střechu.

V práci je také zdůrazněna důležitost inovace v oblasti substrátů a vývoje nových materiálů, jako jsou hydrogely a recyklované materiály, které mohou pomoci snížit náklady a zlepšit udržitelnost zelených střech.

Správný design střechy a odvodnění substrátu jsou také klíčové faktory pro zlepšení kvality a životnosti substrátu.

Výsledky této bakalářské práce jsou důležité pro vývoj nových substrátů pro intenzivní zelené střechy, které by měly být co nejvíce udržitelné a ekonomicky výhodné. Nicméně, je nutné zohlednit i další faktory, jako jsou místní podmínky a požadavky na střechu, aby byl zvolen optimální substrát pro danou situaci.

## **Závěr a přínos práce**

Cílem této bakalářské práce bylo shrnout dostupné informace o intenzivních zelených střechách, zejména se zaměřením na inovace v oblasti substrátů používaných v těchto systémech.

V teoretické části práce bylo prezentováno základní rozdělení intenzivních zelených střech na základě střešní konstrukce, substrátu, vegetace a zavlažování. Největší pozornost byla věnována substrátu, který je považován za klíčový prvek těchto systémů, a byly prezentovány informace o jeho složení, komponentech, chemických a fyzikálních vlastnostech a hloubce.

Praktická část práce se zaměřuje na požadované parametry substrátů a na výhody a nevýhody jednotlivých komponentů substrátů. Dále byly porovnány různé typy substrátů z environmentálního a ekonomického hlediska a byly prezentovány inovace v používaných substrátech.

Závěrem bych rád zmínil, že díky inovacím v oblasti substrátů se zvyšuje účinnost intenzivních zelených střech a zlepšuje se jejich schopnost absorbovat dešťovou vodu, snižovat tepelnou zátěž a zlepšovat kvalitu ovzduší.

Je důležité, aby byla tato technologie využívána ve velkém měřítku, aby se zlepšila kvalita životního prostředí a zvýšila odolnost měst proti klimatickým změnám.

Celkově lze tedy konstatovat, že tato bakalářská práce přináší užitečné poznatky o technickém řešení substrátů intenzivních zelených střech a přispěla tak k rozvoji udržitelného a ekologického městského prostředí.

## Seznam použité literatury a zdrojů

Alsup SE., Ebbs SD., Battaglia LL., Retzlaff WA., 2011: Heavy metals in leachate from simulated green roof systems. *Ecol Eng* 37. P. 1709–17.

Antrop M., 2004: Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landsc Urban Plan* 67. P. 9-26.

Bahgat G., 2010: Israel's energy security: the Caspian Sea and the Middle East. *Isr Aff* 16. P. 406–15.

Bass B., Kuhn M., Durhman A., 2008: The engineering behind the green roof in Chicago's city hall. *Journal of Green Building*. 3. P. 120-129.

Bass B., Lukowsky D., Luckett, K., 2019: *Green Roof Systems: A Guide to the Planning, Design, and Construction of Landscapes over Structure*. Routledge.

Bates AJ., Sadler JP., Greswell RB., Mackay R., 2015: Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: a six year experiment. *Landsc Urban Plan* 135. P. 22–31.

Beattie D., Berghage R., 2004: Green roof media characteristics: The basics. P. 411–416.

Bednář J., 2018: *Intenzivní zelené střechy v České republice*. Technické listy - Sériová vydání

Bengtsson L.,Grahn L., Olsson J., 2005: Hydrological function of a thin roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology* 36. P. 259–268.

Berardi U., GhaffarianHoseini A. 2016: Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution* 219. P. 386-395.



Berardi U., GhaffarianHoseini A., GhaffarianHoseini A., 2014: State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Appl Energy* 115. P. 411–28.

Berger J., Kölbl A., Filippi A. M., 2015: Effects of substrates on the plant and beetle fauna of green roofs. *Urban Ecosystems*. 18. P. 1291-1305.

Berghage R.D., Beattie D.J. , Jarrett A.R., Rezaei F., Nagase A., 2005: Quantifying evaporation and transpirational water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain. P. 200–207. In: *Proc. World Green Roof Congress/Welt Gründach-Kongress*, Basel, Switzerland, September. P. 15–16.

Berndtsson C., 2010: Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality. *Ecol Eng* 36. P. 351–60.

Blanusa T., Madalena M., Monteiro V., Fantozzi F., Vysini E., Li Y., Cameron RWF., 2013: Alternatives to Sedum on green roofs: can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’? *Build Environ* 59. P. 99–106.

Brenneisen S., 2006: Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats* 4. P. 27–36.

Bunt A.C., 1988: *Media and Mixes for Container-grown Plants*. Unwin Hyman. London.

Butler C., Orians CM., 2011: Sedum cools soil and can improve neighbouring plant performance during water deficit on a green roof. *Ecol Eng* 37. P.1796–803.

Cook J. G., Martin M. E., 2014: *Handbook of Green Building Design and Construction: LEED, BREEAM, and Green Globes*. Butterworth-Heinemann.

Cucarella V., Renman G., 2009: Phosphorus sorption capacity of filter materials used for on-site wastewater treatment determined in batch experiments — A comparative study. *J. Environ. Qual* 38. P. 381–392.

Czemieli Berndtsson J., 2010: Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36. P. 351-360.

Czerniawska-Kusza I., Kusza G., Sadowska U., 2013: Soil properties and plant growth on extensive green roofs using two different lightweight materials. *Ecological Engineering* 57. P. 188-195.

DeNardo J.C., Jarrett A.R., Manbeck H.B., Beattie D.J., Berghage R.D., 2005: Storm water mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Trans. ASAE* 48. P. 1491–1496.

Dunnett N., Kingsbury N., 2004: *Planting green roofs and living walls*. Portland OR: Timber Press.

Dunnett N., Nagase A., Hallam A., 2014: The performance of different green roof configurations

Dunnett N., Nolan A., 2004: The effect of substrate depth and supplementary watering on the growth of nine herbaceous perennials in a semi-extensive green roof. *Acta Hort* 643. P. 305–309.

Dunnett, N., Kingsbury N., 2008: *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press Inc. Portland, OR.

Durhman A.K., Rowe D.B., 2007: Effect of substrate depth on initial growth, coverage, and survival of 25 succulent green roof plant taxa. *HortScience* 42. P. 588–595.

Dvorak B., Volder A., 2010: Green roof vegetation for North American eco regions: a literature review. *Landsc Urban Plan* 96. P. 197–213.

Emilsson T., Rolf K., 2005: Comparison of establishment methods for extensive green roofs in southern Sweden. *Urban Forestry and Urban Greening* 3. P. 103–111.

Emilsson T., Rolf K., 2005: Comparison of establishment methods for extensive green roofs in southern Sweden. *Urban Forestry and Urban Greening* 3. P.103–111.

ESCSI, ©1994: *Introducing the friendly material: Rotary kiln produced lightweight soil conditioner 8600*. P. 2–3.

Ewing L, 2008: Coastal megacities and hazards: challenges and opportunities. *Shore Beach* 4. P. 36–41.

Farrell C., Mitchell RE., Szota C., Rayner JP., Williams NSG., 2012: Green roofs for hot and dry climates: interacting effects of plant water use, succulence and substrate. *Ecol Eng* 49. P. 270–6.

Fioretti R., Palla A., Lanza LG., Principi P., 2010: Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Build Environ* 45. P. 1890–904.

FLL. ©2008: Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-Roof Sites. German Landscape Research, Development and Construction Society, Bonn, Germany

Forbes M.G., Dickson K.L., Golden T.D., Doyle R.D., Hudak P., 2004: Dissolved phosphorus retention of lightweight expanded shale and masonry sand used in subsurface flow treatment wetlands. *Environ. Sci. & Tech* 38. P. 892–898.

Friedrich C.R., 2005: Principles for selecting the proper components for a green roof growing media. P. 262–273.

Gabrych M., Kotze DJ., Lehvävirta S., 2016: Substrate depth and roof age strongly affect plant abundances on sedum-moss and meadow green roofs in Helsinki. *Finl Ecol Eng* 86. P.95–104.

Gaffin S. R., Rosenzweig B., Khanbilvardi R., Parshall L., Mahani S., Glickman H., Hillel D., 2013: Variations in New York City's urban heat island strength over time and space. *Theoretical and Applied Climatology*, 111. P. 3-11.

Gaffney J., 2019: Irrigating green roofs with soaker hoses: The performance of an alternative irrigation method. *Journal of Green Building* 14. P. 105-120.

Gedge D., Kadas G., 2013: *Green Roof Plants: A Resource and Planting Guide*. Timber Press 3.

Getter K.L., Rowe D.B., Andresen J.A., 2007: Quantifying the effect of slope on extensive roof stormwater retention. *Ecological Engineering* 31. P. 225–231.

Getter K.L., Rowe D.B., Robertson G.P., 2019: Carbon sequestration potential of extensive green roofs.” *Environmental Science & Technology*, 43. P.7564-7570.

Getter KL., Bradley Rowe D., Cregg BM., 2009: Solar radiation intensity influences extensive green roof plant communities. *Urban For Urban Green* 8. P. 269–81.

Getter KL., Rowe DB., 2008: Media depth influences *Sedum* green roof establishment. *Urban Ecosyst* 11. P. 361–72.

Green, R. (2021). How Australia's Largest Shopping Centre's Green Roof Is Saving The Planet.

Handreck K.A., Black N.D., 1994: *Growing Media for Ornamental Plants and Turf*. University of New South Wales Press (UNSWP). Randwick, Australia.

Harp D.A., Cabrera R.I., Mackay W.A., Sloan J.J., Arnold M.A., 2008: Preliminary evaluation of open-cell foam for extensive green roof systems in Texas. *HortScience* 43. P. 613.

Hoffman L., McDonough W., 2005: *Green roofs: ecological design and construction*. New York: Schiffer Publishing.

Hutchinson D., Abrams P., Retzlaff R., Liptan T., 2003: Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA. P. 372–389.

Jim CY., Peng LLH., 2011: Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban For Urban Green* 11. P. 73–85.

Kibert C. J., 2016: *Sustainable construction: green building design and delivery*. John Wiley., Sons.

Kim H., Hong S., Ki S., Kang S. 2015: Evaluation of the impact of irrigation on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering* 81. P. 406-414.

Köhler M., 1990: The living conditions of plants on the roofs of buildings. P. 195–207.

Kumar P., Ramachandra T. V., Sreepathi L. K. 2016: Green roofs: A review on the technological solutions and methodology for mitigating urban heat island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58. P. 115-135.

Li X., Ye M., Wong N. H., Hung M. W., 2011: A study of green roof retrofit: the energy savings and rooftop temperature reductions of a school building in the subtropics. *Energy and Buildings* 43. P. 2397-2406.

Li Y., Babcock R W., Zhang M., 2014: Development of a mathematical model for predicting soil moisture dynamics in green roofs with capillary irrigation. *Ecological Engineering* 71. P. 198-209.

Licht J, Lundholm J., 2006: Native coastal plants for northeastern extensive and semiintensive green roof trays: substrates, fabrics and plant selection. In: Paper presented at the proceedings of the fourth annual greening rooftops for sustainable communities conference.

Liu J., Huang Y., Chen B., Li X. 2020: Effects of irrigation on growth and water use efficiency of five herbaceous species on a green roof in a semi-arid city. *Urban Forestry & Urban Greening* 52.

Liu J., Chen B., Zhao X., Zhang J., Huan Y., Zhu Y., 2018: Effects of irrigation methods on growth, water use efficiency, and nutrient uptake of two green roof plant species in a semi-arid city. *Science of the Total Environment* 639. P. 912-922.

Liu M., Jiang M., Wang D., Li J., 2016: Assessment of Rainwater Harvesting Potential and Suitable Roofing Materials for Urban Residential Buildings in Different Climatic Zones of China. *Water* 8. P. 75.

Mickovski SB., Buss K., McKenzie BM., Sokmener B., 2013: Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs. *Ecol Eng* 61. P. 706–14.

Miller C., 2003: Moisture management in green roofs. P. 177–182

Mobasheri H., 2014: Green roofs as a means of pollution abatement. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 12. P. 1-7.

Monterusso MA, Rowe DB, Rugh CL., 2005: Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications. *Hort Sci* 40. P. 391–6.

Moran A., Hunt B., Smith J., 2005: Hydrologic and water quality performance from green roofs in Goldsboro and Raleigh. North Carolina P. 512–525.

Nagase A., Dunnett N., 2010: Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: effects of watering and diversity. *Landsc Urban Plan* 97. P. 318–27.

Nagase A., Kato T., Ohta T., 2021: Optimal irrigation method for rooftop gardens with various vegetation: effects of watering interval, amount, and time on water retention, plant growth, and water use efficiency. *Urban Ecosystems* 24. P. 295-307.

Nagy R., Kádár I., Czúcz B. 2018: Green roof substrates and their components: Review of recent findings and recommended future research. *Urban Forestry & Urban Greening* 31. P. 1-10.

Nektarios PA., Amountzias I., Kokkinou I., Ntoulas N., 2011: Green roof substrate type and depth affect the growth of the native species *Dianthus fruticosus* under reduced irrigation regimens. *Hort Sci* 46. P. 1208–16.

Niu H., Clark C., Zhou J., Adriaens P., 2010: Scaling of economic benefits from green roof implementation in Washington, DC. *Environ Sci Technol* 44. P. 2–8.

Oberndorfer E., Lundholm, J., Bass B., Coffman R. R., Doshi H., Dunnett N., Rowe B., 2007: Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience* 57. P. 823-833.

Ondová M., Brix H., 2016: Effects of irrigation on vegetation and water fluxes in extensive and intensive green roofs. *Ecological Engineering* 97. P. 507-515.

Panayiotis N., Panayiota T., Ioannis C., 2003: Soil amendments reduce roof garden weight and influence the growth rate of lantana. *HortScience* 38. P. 618–622.

Pandey S., Hindoliya DA., Mod R., 2012: Experimental investigation on green roofs over buildings. *Int J Low-Carbon Technol* 1. P. 0–44.

Pérez G., Lasheras F. S., Irabien M. J., 2012: Sustainability of Green Roofs. In Green Roof Ecosystems. P.31-62.

Razzaghamanesh M., Beecham S., Salehi F., Amos B. 2017: The role of substrate in promoting plant growth on green roofs: A review. *Ecological Engineering* 109. P. 356-367.

Razzaghamanesh M., Beecham S., Salemi M., Lehmann S. 2017: Evaluation of green roof substrate for plant growth and nutrient retention. *Ecological Engineering* 106. P. 257-267.

Reinert J., 2009: Personal communication. Professor of Entomology. Texas AgriLife Research.

Rowe D. B., 2012: Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution* 159. P. 2100-2110.

Rowe D.B., Monterusso M.A., Rugh C.L., 2006: Assessment of heat-expanded slate and fertility requirements in green roof substrates. *HortTechnology* 16. P. 471–477.

Shaw K. J., Miller R., Rosales J., 2016: *Green Roof Construction and Maintenance*. John Wiley & Sons.

Schweitzer O., Erell E., 2014: Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. *Energy Build* 68. P. 25–32.

Schweitzer O., Erell E., 2014: Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. *Energy Build* 68. P. 25–32.

Sikora P., Ryzkowski L., Szulc W., 2017: The Impact of Substrate Grain Size Distribution on Water Retention and Drainage in Extensive Green Roofs. *Water*, 9. P. 677.

Sloan J.J., Mackay W., George S., 2000: Growing mediums for porous pavement and rooftop gardens. P.321–327.

- Stewart R. A., Rahman A., Farrelly M. A., 2013: Green roofs in Melbourne and effects on heating and cooling energy needs in buildings. *Energy and Buildings* 59. P. 197-204.
- Terri J., Turner M., Gurevitch J., 1986: The response of leaf water potential and crassulacean acid metabolism to prolonged drought in *Sedum rubrotinctum*. *Plant Physiol* 81. P.678–80.
- Tinoco-Ojanguren C., Iacobelli A., 2017: Green roof technology as a sustainable solution to improve urban environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70. P. 386–396.
- Townshend A., 2007: Roofing membranes for vegetative roofs. *Construction Specifier*. P. 60-63.
- Van der Kolk H.J., Berg P., Veen T., Bezemer M., 2023: Substrate composition impacts long-term vegetation development on blue-green roofs: Insights from an experimental roof and greenhouse study. *Ecological Engineering* 186.
- VanWoert N.D., Rowe D.B., Andresen J.A., Rugh C.L., Fernandez R.T., Xiao L., 2005: Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope and media depth. *J. Environ. Qual.* 34. P. 1036–1044.
- Vijayaraghavan K, Raja FD., 2015: Pilot-scale evaluation of green roofs with *Sargassum* biomass as an additive to improve runoff quality. *Ecol Eng* 75. P. 70–8.
- Vijayaraghavan K., Joshi UM., 2014: Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environ Pollut* 194. P. 121–9.
- Vijayaraghavan K., Joshi UM., Balasubramanian R., 2012: A field study to evaluate runoff quality from green roofs. *Water Res* 46. P. 1337–45.
- Voyde E., Fassman E., Simcock R., 2010: Hydrology of an extensive living roof under subtropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *J Hydr* 394. P. 384–95.
- Wessolek G., Ludewig K., Winkelmann C., 2013: Soil properties of green roofs—a case study from Berlin, Germany. *Ecological Engineering*, 52. P. 20-27.



White J.W., Snodgrass E., 2003: Extensive green roof plant selection and characteristics. P. 166–176.

Williams K.A., Nelson P.V., 2000: Phosphate and potassium retention and release during chrysanthemum production from pre-charged materials: II. Calcined clays and brick chips 125. P.757–764.

Wong C. H., Jim C. Y., 2014: Study on the properties of non-woven geotextile filter fabrics in revealing water retention of green roofs. Building and Environment 80. P. 184-192.

### **Internetové zdroje:**

Cresswell D., Sims V., 2007: A case study of green roof substrate using aerated concrete waste. Accessed February (17.2.2010): [http://www.smartwaste.co.uk/filelibrary/GreenRoof\\_Aeratedconcrete.pdf](http://www.smartwaste.co.uk/filelibrary/GreenRoof_Aeratedconcrete.pdf).

DDC., DDC., ©2007: cool and green roofing manual. dostupné z: Renewable and Sustainable Energy Reviews

Department of Planning and Local Government. Rain Gardens., 2010: Green Roof sand Infiltration Systems. Government of South Australia, Adelaide. P. 12–21.

FLL, ©1995. Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof Sites. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau.

FLL. ©2002: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. Guideline for the planning, execution and up keep of green-roof sites. Bonn.

GSA., US., ©2011: The Benefits and Challenges of Green Roofs on Public and Commercial Buildings. A Report of the United States General Service Administration.

Green Roof Technology. ©2021: Zavlažování zelené střechy

Green, J. (2021). Innovative green roof substrates. World Green Infrastructure Network. dostupné z: <<https://www.worldgreenroof.org/innovative-green-roof-substrates>>

Livingarchitecturemonitor ©2021, intensive-green-roof-irrigation-systems  
<<https://livingarchitecturemonitor.com/news/2021/11/19/intensive-green-roof-irrigation-systems>>

The Green Roof Centre. ©2021: Irrigation of green roofs.  
<<https://www.greenroofcentre.co.uk/green-roofs/irrigation-of-green-roofs/>>

### **Seznam obrázků**

Obrázek 1: Základní vrstvy zelené střechy (online) cit. 2021.11.10, dostupné z  
<<https://www.greenroofguide.com/green-roofs/types/>>

Obrázek 2: Rey C.V., Franco N., Peyre G., Rodríguez J.P., 2020: Objemové poměry (%) organických a anorganických složek ve směsi substrátu dostupné z  
Green Roof Design with Engineered Extensive Substrates and Native Species to Evaluate Stormwater Runoff and Plant Establishment in a Neotropical Mountain Climate.

Obrázek 3: Dubský M., 2014, Vokál J., 2011) Vlastnosti substrátu, dostupné z diplomové práce Vodní režim vegetační vrstvy extenzivní zelené střechy, Jitka Hanzlíková, 2018.