



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

MOŽNOSTI VYUŽITÍ RECYKLÁTŮ V KONSTRUKCI ZELENÝCH STŘECH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Markéta Skalková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. NIKOL ŽIŽKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Markéta Skalková
Název	Možnosti využití recyklátů v konstrukci zelených střech
Vedoucí práce	doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Minke, G. Zelené střechy, 1. vydání, Ostrava: HEL, 2001, ISBN 978-80-86167-17-6.

Bates A., J. et al. Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment, Landscape and Urban Planning, Vol. 135, 2015, p. 22-31.

Eksia, M. et al. Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates, Ecological Engineering, Vol. 156, 2020.

Rincón, L. et al. Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment, Building and Environment, Vol. 74, 2014, p. 22-30.

Mickovski, S., B. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs, Ecological Engineering, Vol. 61, Part C, 2013, p. 615-714.

ČSN 73 1901-1 Navrhování střech - Část 1: Základní ustanovení

Další příslušné technické normy a odborná literatura.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Zelené střechy jsou díky svým přednostem stále častějším řešením zejména ve městech, kde se potýkáme s nedostatkem zeleně. Mezi výhody zelených střech řadíme: tepelnou izolaci omezující přehřívání střech, zvukovou izolaci, zádrž vody, snížení okolní teploty a zvýšení vlhkosti v okolí, redukci CO₂ a produkci kyslíku, prostor pro rostliny i živočichy, bezpečnost, dlouhodobou životnost a další benefity včetně estetických. V souladu s aktuálními snahami o zavedení cirkulární ekonomiky lze i v konstrukci zelené střechy využít celou řadu recyklovatelných materiálů, což bude předmětem této BP. Tato práce bude zpracována ve spolupráci s firmou DEK a.s.

V práci proveďte:

1. Za použití tuzemské a zahraniční odborné literatury zpracujte rešerši zaměřenou na historii, druhy, skladbu konstrukcí a popis funkcí zelených střech. Uveďte příklady realizací.
2. Pozornost zaměřte na konstrukce zelených střech, ve kterých lze využít recykláty nebo výrobky z recyklovaných materiálů.
3. Popište vlastnosti využitelných recyklátů a definujte podmínky jejich použití.
4. Navrhněte způsob ověření vlastností recyklátů v laboratorních podmínkách s ohledem na použití v konstrukcích zelených střech.

Rozsah práce cca 50 stran včetně příloh.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou zelených střech a stavebních recyklátů. Studuje historii, funkci, přínosy a negativní dopady, skladbu, rozdělení a konstrukční vrstvy zelených střech. Popisuje produkci, uplatnění a běžné rysy stavebních recyklátů. Stanovuje základní vlastnosti vybraných recyklátů a na jejich výsledcích určuje vhodnost jejich užití jako částečné náhrady některé z vrstev zelené střechy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zelená střecha, retence vody, čisté ovzduší, extenzivní ozelenění, intenzivní ozelenění, hnědá střecha, substrát, vegetace, cirkulace ekonomiky, betonový recyklát, cihelný recyklát, skelný recyklát.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of using recycled building materials in the green roofs. It studies the history, function, benefits and negative impacts, composition, division and structural layers of green roofs. The work describes the production, application and common features of recycled building materials. It determines the basic properties of selected recyclates and evaluates their suitability as some of the layers of a green roof.

KEYWORDS

Green roof, water retention, clean air, extensive greening, intensive greening, brown roof, substrate, vegetation, circular economy, recycled concrete, recycled brick, recycled glass.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Markéta Skalková *Možnosti využití recyklátů v konstrukci zelených střech*. Brno, 2021. 56 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Možnosti využití recyklátů v konstrukci zelených střech* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 23. 5. 2021

Markéta Skalková
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Možnosti využití recyklátů v konstrukci zelených střech* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 5. 2021

Markéta Skalková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování paní doc. Ing. Nikol Žížkové Ph.D., za její cenné rady, doporučení, trpělivost a vstřícnost při vedení mé bakalářské práce, stejně jako pomoc a obdivuhodnou ochotu při konzultacích a získávání potřebných informací. Dále bych chtěla poděkovat paní Blance Bártové za oporu při realizaci experimentální části své práce. Největší poděkování náleží mé setře a její partnerce a především mým rodičům za celoživotní všestrannou oporu. Velké díky také patří mému příteli, Davidu Foldynovi, především za ohromnou, nikdy nekončící a velice potřebnou psychickou podporu.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	CÍL PRÁCE	2
3	ZELENÉ STŘECHY	3
3.1	Historie zelených střech.....	3
3.2	Výhody a nevýhody užívání zelených střech	6
3.2.1	Důvody navrhování zelených střech	6
3.2.2	Nepříznivé vlastnosti zelených střech.....	9
3.3	Typy zelených střech	10
3.3.1	Extenzivní střešní zeleň.....	10
3.3.2	Intenzivní střešní zeleň	11
3.4	Dělení zelených střech podle sklonu střešní roviny a jejich doporučené skladby .	12
3.4.1	Ploché střechy.....	12
3.4.2	Střechy s mírným sklonem.....	12
3.4.3	Střechy s velkým sklonem	13
3.4.4	Strmé střechy	14
3.5	Další rozdělení zelených střech.....	15
3.5.1	Hnědé střechy.....	16
3.6	Vrstvy zelené střechy a jejich funkce	16
3.6.1	Tepelná izolace	17
3.6.2	Hydroizolace a ochrana před prorůstáním kořínků	19
3.6.3	Ochrana před mechanickým poškozením.....	21
3.6.4	Drenážní vrstva.....	21
3.6.5	Filtrační vrstva	22
3.6.6	Hydroakumulační vrstva.....	23
3.6.7	Substrát.....	23
3.6.8	Vegetace.....	24
4	RECYKLÁTY	26
4.1	REbetong.....	26
4.2	Cihelný recyklát	27
4.2.1	Výroba kameniva z cihlové sutě.....	27
4.2.2	Vlastnosti cihelného recyklátu.....	28
4.2.3	Použití cihelného recyklátu	28
4.3	Betonový recyklát.....	29
4.3.1	Technologie recyklace betonu.....	29
4.3.2	Vlastnosti betonového recyklátu	31

4.3.3	Použití betonového recyklátu.....	31
4.4	Asfaltový recyklát.....	32
4.4.1	Použití asfaltového recyklátu.....	32
4.5	Recyklované živičné kamenivo.....	33
4.5.1	Použití živičného recyklátu.....	33
4.6	Recyklace plastů	33
4.6.1	Recyklační linky na plasty	34
4.6.2	Využití recyklovaných plastů.....	35
4.7	Recyklace skla	36
4.7.1	Recyklační linky na sklo.....	36
4.7.2	Využití skelného recyklátu.....	37
5	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	39
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
6.1	Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva dle ČSN EN 1097-3.....	40
6.2	Stanovení objemové hmotnosti zrn kameniva dle ČSN EN 1097-6.....	41
6.3	Stanovení nasákavosti hrubého kameniva nasáklého do ustálené hmotnosti dle ČSN EN 1097-6.....	43
6.4	Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor dle ČSN EN 933-1.....	44
6.5	Stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 1097-11.....	45
6.6	Stanovení pH dle ČSN ISO 10390.....	45
6.7	Diskuze dosažených výsledků	46
7	ZÁVĚR	48
	BIBLIOGRAFIE	49
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ	54
	SEZNAM TABULEK	56

1 ÚVOD

Zelené střechy především ve velkých městech, ale dnes už i v malých vesnicích, navracejí zeleň do obecní zástavby. Vracejí přirozené „zelené“ prostředí tam, kde jej člověk odebral a tím snižují dopad lidské činnosti na životní prostředí. Stejně jako vše na tomto světě, mají své výhody i nevýhody, jejich přínosy ovšem převyšují komplikace, které může jejich výstavba přinášet a obecně zlepšují kvalitu městského života. Díky svému ekologickému přínosu jsou zelené střechy často probíraným tématem, a to především v posledních několika desetiletích, kdy se v důsledku lidské činnosti zhoršují klimatické podmínky. Zelené střechy jsou budovány především díky ekologickému přínosu. Mají sice většinou vyšší pořizovací náklady než běžné konvenční střechy, ale z dlouhodobého hlediska jsou dokonce ekonomičtější řešením.

Stavební suť vzniká v podstatě při všech stavebních činnostech, od výroby materiálů, přes výstavbu až po demolici konstrukcí. Část sutí je přepravována na skládky, kde je uložena a dále se již nijak nezpracovává. Počet a velikost skládek stále roste, čímž se narušuje životní prostředí a v mnoha případech se také snižuje množství neobnovitelných zdrojů. Recyklace stavebních a demoličních odpadů se proto během devadesátých let dvacátého století stala zcela běžnou technologií i v České republice. Největší problém recyklovaných materiálů je jejich konkurenceschopnost, jelikož většinou nedosahují požadovaných vlastností, jako hmoty, ze kterých vznikly. Jejich kombinací s nově vzniklými materiály lze však dosáhnout dostatečných vlastností, omezení materiálu na skládkách a navíc ekonomičtější výroby stavebních výrobků. Se současnými technologiemi lze recyklovat většinu užívaných stavebních materiálů. Použitím recyklátu do konstrukce zelené střechy lze dosáhnout spojení dvou ekologických stavebních činností v jednom a právě ekologickým přínosem použití recyklátu do některé z vrstev zelené střechy se zabývá tato bakalářská práce.

První, teoretická, část práce se obecně věnuje popisu zelených střech a oblasti jejich použití v městské zástavbě. Shrnuje důvody pro jejich realizaci a pozitivní dopady jejich užívání. Zpracovává přehled dnes užívaných systémů zelených střech a detailně popisuje jejich funkci. Dále objasňuje důvody užívání recyklátů, stejně jako oblast jejich užití v nové výstavbě, specifikuje způsob recyklace a uspořádání nejběžněji užívaných recyklačních linek. Také ustanovuje podmínky jejich užití v substrátu či drenážní vrstvě zelené střechy.

Praktická část práce je zaměřena na stanovení vlastností vybraných recyklátů a jejich použitelnost v zelených střechách, vyhodnocením prováděných zkoušek. Práce si klade za cíl stanovení požadovaných vlastností recyklátů, porovnání jednotlivých zkoumaných materiálů mezi sebou a tím stanovení vhodnosti pro jejich užití jako náhrady substrátu nebo drenážní vrstvy.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je rozebrat historii zelených střech od jejich pomyslného vzniku až po současnost, zobrazit stavby na nichž byla tato technologie použita, dále výhody a nevýhody jejich výstavby, popsat užívané typy a možnosti zatravnění plochy střech. Zaměřuje se především na ty části zelených střech, které lze částečně nebo úplně nahradit recyklovanými materiály.

Dále je cílem práce popsat výrobu, tedy způsob recyklace, vlastnosti a použití nejběžněji užívaných recyklátů a stanovit podmínky jejich použití. Především se jedná o recykláty, které je teoreticky možno využít v konstrukci zelené střechy. Záměrem práce je také stanovit vhodně zvolené vlastnosti vybraných recyklátů a na základě výsledků zkoušek zhodnotit míru využitelnosti stavebních recyklátů v substrátu či drenážní vrstvě zelené střechy.

3 ZELENÉ STŘECHY

Pojmem zelená střecha, někdy také označována jako živá nebo vegetační střecha, se rozumí střecha budovy, která je částečně nebo zcela pokryta půdou s vegetací nebo pěstebním substrátem [1]. Není to tedy střecha, která je natřena na zeleno, jak se často lidé domnívají, nýbrž tyto střechy spadají pod tzv. modro-zelenou infrastrukturu, tudíž se jedná o prvek, jenž se snaží o co největší harmonii staveb s jejich okolím a přírodou.

3.1 HISTORIE ZELENÝCH STŘECH

Úplně první zmínky o zelených střechách, o jejichž existenci se stále spekuluje, pochází již ze starověké Mezopotámie. Ovšem první takováto stavba, o níž máme mnoho poznatků jsou visuté zahrady v Babylóně (Obrázek 1), jež nechala postavit královna Semiramis a jež se v dnešní době řadí mezi 7 divů světa. Tyto zahrady byly založeny v 8. st. př. n. l. a již tehdy stavitelé, kteří na realizaci pracovali vytvořili v zahradách zavodňovací systém, jež trvale zajišťoval přísun vláhy k vegetaci [2].



Obrázek 1: Visuté zahrady královny Semiramis [2]

Ve starověkém Římě potom byla střešní zahrada nezbytnou součástí většiny domů a paláců movitějších obyvatel. Stejně jako tehdy starověcí Římané, tak posléze i staří Čechové ve středověku tyto střešní zahrady vytvářeli z rostlin rodu *Sempervivum* (Obrázek 2). Tehdy se domnívali, že jim tyto rostliny ochrání jejich obydlí před silnými větry a dokonce i silnými blesky. Díky čemuž se také později odvodil její český název, tedy netřesk nebo také netřesk střešní. Tato rostlina se na zelených střechách užívá dodnes pro svoji malou náročnost na údržbu a nízkou potřebu závlahy.



Obrázek 2: Sempervivum hybridum 'Bottle of Griotte' (netřesk) [3]

Velké množství střešních a terasových zahrad bylo vystavěno v polovině 11. století především na území Itálie, ale hojně také například ve Francii. Ovšem konstrukční řešení zelených střech tak, jak je známe dnes pochází ze severní Evropy, kde tyto střechy sloužily a dodnes slouží především jako kvalitní izolace proti zdejšími nízkým teplotám.

K zatím největšímu rozšíření technologie zelených střech došlo roku 1867 [4]. V tomto roce byl totiž patentován železobeton, čímž se výrazně zjednodušila otázka statiky zelených střech, jelikož mají díky hmotnosti substrátu a vegetace i několikanásobně vyšší hmotnost než běžně užívané střešní systémy.

V Berlíně dodnes stojí některé ze čtyřpodlažních domů, na kterých se nechávala spontánně vyvíjet vegetace a které byly postaveny již v polovině 19. století. K jejich utěsnění se navíc mezi vrstvy papíru dával dehet, který vznikl jako odpad při zplynování uhlí a výrobě dřevěného uhlí. Říkalo se jim „střechy z dřevěného cementu“ [5].

Na území českých zemí se zelené střechy uchytily až v druhé polovině 19. století, kdy začaly být hojně budovány na objektech majetnějších vrstev obyvatelstva. A již počátkem 20. století se následně staly nedílnou součástí urbanistické koncepce měst po celém světě. Jejich největším tehdejším průkopníkem byl Le Corbusier, švýcarský architekt a urbanista, jenž je považován za největšího architekta 20. století [6].

Dalším přínosem pro zelené střechy se poté bohužel stala také druhá světová válka, při níž nastal vývoj průmyslové chemie, a to zejména plastových hmot.

Mezi nejstarší dochované střešní zahrady na našem území patří například střešní zahrada na zámku Konopiště nebo konírna zámku v Lipníku nad Bečvou (Obrázek 3), která byla založena již roku 1911. Původně byla vystavěna jako okrasná zahrada s ovocnými stromy, po druhé světové válce však začala sloužit k pěstování ovoce a zeleniny. Dnes po nedávné rekonstrukci slouží opět svému původnímu účelu. Její rozloha činí přibližně 600 m² a v době své výstavby byla úplně první střešní zahradou v zemích na sever od Alp [7].



Obrázek 3: Unikátní střešní zahrada na zámku v Lipníku nad Bečvou [8]

Další významný příklad úspěšného budování zelených střech u nás, tentokrát v 2. polovině 20. století je střecha a terasa hotelu Praha (Obrázek 4), který se nachází v našem hlavním městě. Tato stavba funguje ve své původní podobě dodnes [4].



Obrázek 4: Terasy hotelu Praha [9]

V současné době je výstavba zelených střech důležitou součástí především hustě zastavěných území větších měst, díky čemuž v těchto oblastech dochází ke zkvalitňování životního prostředí. Většina světové populace žije v městských oblastech a očekává se, že do roku 2050 bude 68 % lidí žít ve městech [10]. Přitom právě ve městech vzniká mnoho „městských syndromů“, jako zvýšená koncentrace znečištění, poruchy proudění vzduchu, škodlivé místní klimatické systémy s oteplováním v důsledku tzv. efektu městského tepelného ostrova, zhoršení lidské emoční a fyzické pohody, způsobené nedostatečným přístupem k přírodě a další [10]. Všechny tyto problémy lze částečně kompenzovat vytvořením zeleného prostoru v městských oblastech.

Dnes jsou zelené střechy realizovány především na stavbách obchodního či administrativního charakteru a objektech zábavních center. Ale díky dotacím státu i jednotlivých obcí se počínají

hojně užívat i u staveb rodinného bydlení jak ve městech, tak i na venkově a stávají se nedílnou součástí tvorby územních plánů sídel na území České republiky.

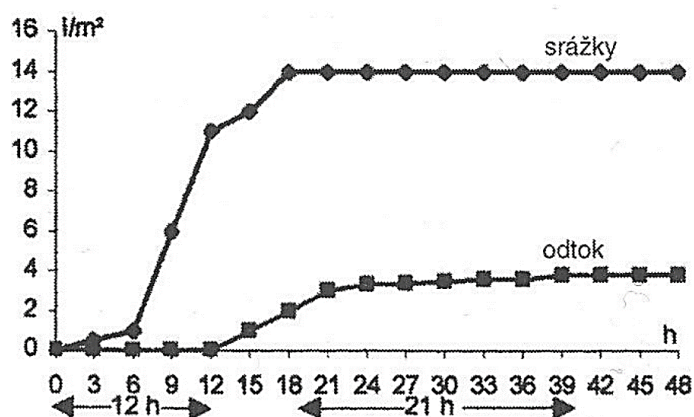
3.2 VÝHODY A NEVÝHODY UŽÍVÁNÍ ZELENÝCH STŘECH

Vlivem vysoké hustoty zastavění dnešních měst je život v nich nepříznivý zdraví člověka. Koncentrace osídlení, hustota dopravních cest, obrovské betonové a asfaltové plochy, to vše přispívá k nezdravému prostředí. Automobily a veškerá topná zařízení spotřebovávají vysoké množství kyslíku a navíc produkují velký nadbytek škodlivin, zatímco betonová monstra způsobují přehřátí klimatu v obcích a tím zvedají ze země částice nečistot a všech škodlivin z provozu a víří je do okolního prostředí, ve kterém se my lidé dennodenně pohybujeme. Experimentálním měřením byla například v létě ve večerních hodinách v centru měst zjištěna teplota vzduchu až o 11 °C vyšší než v jejích okrajových částech. Bylo také zjištěno, že v důsledku vysoké koncentrace provozu ve velkých městech a jeho nepříznivých účincích na ovzduší mají města až o 15 % méně slunečního svitu. Všechny tyto ekologické problémy dnešní uspěchané doby dokáží zelené střechy alespoň částečně kompenzovat.

3.2.1 Důvody navrhování zelených střech

Zelené střechy snižují spotřebu volných ploch a podíl dlážděných ploch. Na většině území měst by se mělo uvažovat s jednou třetinou zástavby, třetinou dlažby a třetinou zelené plochy. Kdyby například byla ozeleněna každá pátá střecha ve městě, zvýšilo by se množství listové plochy dvojnásobně a bylo by tak možné rozšiřovat zastavěné plochy, aniž by měly příliš negativní dopad na ovzduší.

Zelené střechy jsou schopny zadržet většinu přirozených vodních srážek (Obrázek 5), které by jinak během velmi krátké doby z užívané plochy otekly do kanalizace bez jakéhokoli užítu. Následně pak díky zadrženým srážkám dlouhodobě zvlhčují své okolí postupným odpařováním, čímž navíc zmírňují kolísání vlhkosti vzduchu. Navíc svojí schopností zadržet přibližně průměrné měsíční množství srážek přispívají ke snížení nebezpečí záplav. Například u zelených střech s výškou substrátu pouhých 10 cm lze počítat s koeficientem odtoku dešťové vody 0,3. To znamená, že pouze 30 % napadených srážek odečte do kanalizace, zatímco zbylých 70 % zůstane ve střeše a následně se postupně vypařuje. Zatímco u jiných střech, které mají sklon alespoň 3 °, se počítá se 100 % odtokem dešťové vody do kanalizace. Také bylo potvrzeno, že zelené střechy díky své schopnosti zadržovat vodu podstatně přispívají ke snížení zatížení městské kanalizace.



Obrázek 5: Množství srážek a odtoku vody u šikmé zelené střechy po osmnáctihodinovém vytrvalém dešti [5]

Díky zeleni na střeších dochází k procesu fotosyntézy a tím ke spotřebovávání oxidu uhličitého a následné produkci kyslíku a tím zelené střechy přispívají ke zlepšování ovzduší ve svém okolí. Je-li růst a přirozený zánik rostlin na střeše v rovnováze, je oxid uhličitý ze vzduchu absorbován a naopak produkován kyslík.

Rostliny v závislosti na své výšce a hustotě osázení jsou poté schopny zachytit většinu prachu a nečistot z ovzduší a tím také zabránit jejich víření. Prachové částice jsou zachycovány zelení, odkud je následně déšť spláchne do půdy. Tímto způsobem jsou schopny zachycovat nejen prach, ale také plynné škodliviny a dokonce aerosoly. Při experimentálních měření na vysoce frekventované švýcarské dálnici bylo zjištěno, že zeleň sousedící s těmito komunikacemi, která měla výšku 1 m a šířku 0,75 m, dokáže zachytit 50 % olova a jiných těžkých kovů a tím ochránit okolní zemědělské hospodářství.

Na rozdíl od běžných průmyslových střech dokáže zelená střecha intenzivně chránit obývané prostory před nadměrným přehříváním v letním období. A naopak zelená střecha velice kvalitně přispívá k výraznému snížení energetických ztrát v období zimním. Názorným příkladem jsou tradiční islandské domy z rašelinových drnů, které není potřeba ani v zimě uměle vytápět. Příjemné prostředí v obývaných prostorách zde zajišťuje teplo uvolňované lidmi, přičemž na ostrově průměrné teploty v tomto období klesají pod 0 °C. Dokáží také regulovat výkyvy teplot v kratších úsecích, jako například změny teplot mezi dnem a nocí. Tento efekt je způsoben vypařováním vody, fotosyntézou a schopností vody obsažené v rostlině akumulovat teplo, jelikož veškeré potřebné teplo rostlina odnímá ze svého okolí. Tento jev lze pozorovat zejména za horkých letních dnů, kdy je zelená střecha schopna spotřebovat 90 % dopadající sluneční energie.

V návaznosti na to zelené střechy fungují nejen jako tepelná, ale i zvuková izolace a dokáží tedy výrazně tlumit hlučnost nejen z pozemní dopravy, ale také letecké. Rostliny totiž redukují zvuk absorpcí, tedy přeměnou zvukové energie na pohybovou a tepelnou, dále reflexí, tedy odrazem a také deflexí, nebo-li rozptylem. Zvukově izolační účinky zelené střechy závisí především na tloušťce substrátu, nikoli na hustotě ozelenění. Při kolmém úhlu dopadu zvuku na střechu rostlinná vrstva absorbuje pouze nepatrné množství zvuku na vysokých frekvencích, zatímco například pouhých 12 cm substrátu učiní zvukovou izolaci o hodnotě 40 dB.

Zelená střecha chrání celou střešní konstrukci včetně její izolační vrstvy před nepříznivými účinky ultrafialového slunečního záření. Také značně dokáží regulovat výkyvy teplot, jejichž negativní účinek lze značně pozorovat téměř na všech jednopláškových střeších s klasickým pořadím vrstev.

Zelené střechy nabízejí ideální protipožární ochranu, jelikož spadají do kategorie nehořlavých střešních konstrukcí.

Životnost hydroizolace je u zelených střech nepoměrně vyšší než u izolace nechráněné a zelené střechy se také vyznačují výrazně nižšími náklady na jejich údržbu.

Zelená střecha přibližuje přírodní prvky do bezprostřední blízkosti obyvatel a tím přispívá k psychickému zdraví lidí obývajících hustě zastavěná území.

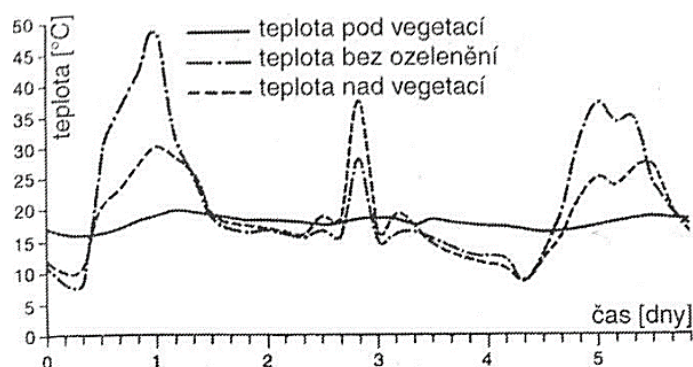
Svojí skladbou zelená střecha výrazně přispívá k úspornému zacházení s půdou. Navíc bylo zjištěno, že i výstavbou pouze extenzivního ozelenění s výškou substrátu 15 cm a výškou vegetace 10-20 cm vytvoří 5-10x více listové zeleně než stejně velký trávník ve veřejném parku.

Zelené střechy se stávají přirozeným prostředím hned několika druhům hmyzu a ptáků. Často poskytují útočiště ohroženým druhům včel, motýlů, čmeláků a střevlíků a tím napomáhají jejich ochraně a opětovnému rozšíření. Stejně tak mohou být zelené střechy užívány záměrně

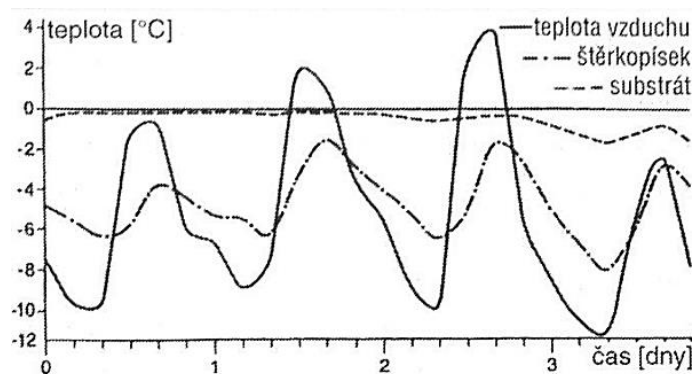
pro pěstování chráněných druhů rostlin, které se v přírodě stávají vzácnými v důsledku postupujícího narušování přírodního prostředí civilizačními faktory.

Za předpokladu vybudování zelené střechy s vyšší vrstvou zeminy a tedy únosnější konstrukcí, je možné její plochu užívat i pro zahrádkářskou činnost, například pro pěstování zeleniny, drobného ovoce, různých druhů rostlin a to i léčicích nebo také skalniček apod.

Trvanlivost všech střech je vzhledem k vlivům, kterým jsou vystaveny, omezená, ať už se jedná o krytinu z tašek, šindelů, živců, plechu či vlnitých desek. Na všechny střechy působí horko nebo zima, vítr, ultrafialové záření, ozón, průmyslové odpadní plyny a jiné negativní vlivy a tím způsobují mechanické poškození těchto materiálů a také chemické a biologické procesy jejich rozpadu. Například běžně užívané asfaltové pásy na střechách v průběhu roku snášejí teplotní rozdíl až 100 °C. Zatímco ozelenění střechy sníží tento rozdíl na 30 °C (Obrázek 6), navíc plně chrání konstrukci střechy před UV zářením a veškerým mechanickým poškozením. Naopak v zimě se, díky vegetaci, teplota v substrátu udržuje stabilně mírně pod nulou i při mrazech až -10 °C (Obrázek 7). Za předpokladu odborného provedení střechy, je její životnost neomezená.



Obrázek 6: Průběh teploty u ozeleněné střechy v hloubce substrátu 10 cm ve srovnání s nezatravněnou střešní plochou a teplotou vzduchu za horkého letního dne [5]



Obrázek 7: Průběh teploty v hloubce 5 cm u ozeleněné střechy a štěrkopískové střechy ve srovnání s teplotou vzduchu za chladného zimního dne [5]

Většina předchozích vlastností zelených střech je dána rostlinnými polštářky samotné zeleně na střeše. Uzavřený vzduchový polštář působí jako přírodní tepelně izolační vrstva, tudíž čím jsou hustší a tlustší, tím je účinek větší. Část dlouhovlnného tepelného záření z budov je listím odrážena a část je absorbována, čímž se zmenšují tepelné ztráty budovy. Rostlinné polštáře také chrání povrch substrátu a tím i samotnou střechu před větrem. Jelikož se vzduch u povrchu substrátu téměř nehýbe, jsou i tepelné ztráty způsobené větrem blízké nule. Dýcháním kořenů vzniká malé množství tepla dokonce i v zimě a tak způsobuje, že zemina nepromrzne.

Při přeměně 1 g vody na led se uvolní přibližně 80 kalorií, aniž klesne teplota, proto si promrzající zemina velmi dlouho uchovává teplotu kolem 0 °C i když je venkovní teplota podstatně nižší. Při zpětném tání ledu je opět spotřebováváno to samé množství energie, tedy 80 cal·g⁻¹ pro přeměnu na kapalně skupenství, ale jelikož je tato energie povětšinou odnímána ze vzduchu, vzniká tímto účinkem v celkové bilanci tepelný zisk pro střechu.

Zelené střechy šíří do svého okolí přirozenou vůni rostlin a tím, jak již bylo zmíněno, přispívají k psychickému zdraví obyvatel. Za tímto účelem jsou také záměrně vysazovány některé druhy divokých bylin, například mateřídouška, levandule, hřebíček nebo hvozdík. Naproti tomu běžně užívané střechy s asfaltovými pásy uvolňují pod vlivem slunečního záření výpary, které mají nepříjemný pach a dokonce mohou být zdraví škodlivé. Zeleň vyvolává v člověku pozitivní stav mysli a pocit uvolnění. Pohledy do zeleně mají dokonce antidepresivní účinky a zvyšují výkonnost lidského organismu. „Louka“ na střeše se přirozeně pohybuje ve větru a toto opticky vnímané vlnění působí na stresované jedince uklidňujícím dojmem a podněcujícím způsobem na unavené lidi. Vzhled střechy se během jednotlivých ročních období mění. Mění se také během počasí, při přenosu rostlinných semen a také vlivem živočichů, kteří ji obývají. Uchytí se zde nové rostliny, naopak poškozené a příliš staré rostliny uhynou například i vlivem mrazu. Po několika uplynulých obdobích na střeše zůstane naživu to společenství rostlin, které odolá mrazu, suchu a větru a tím se vytvoří nové samostatné společenství. Díky akumulaci tepla a svému umístění nad obytnými prostory zůstává střecha zelená i v zimě, díky čemuž působí velmi esteticky a je často užívaná jako místo rekreace a odpočinku (Obrázek 8) [5].



Obrázek 8: Main Point Pankrác v Praze - pobytový prostor [11]

3.2.2 Nepříznivé vlastnosti zelených střech

Případná porucha hydroizolace je u zelených střech velice nepříjemná, jelikož je tato izolační vrstva těžko přístupná a její sanace je proto obtížná a náročná, proto se navrhuje s co největší možnou spolehlivostí, účinností a trvanlivostí.

V případě rekonstrukce střechy, která se má nově přestavět na střechu zelenou namísto původní je vždy nutné provést statické posouzení v jehož důsledku je většinou nutné zesílit nosnou střešní konstrukci nebo přizpůsobit druh substrátu i vegetace tloušťkám vrstev, které respektují únosnost střechy.

U vegetačního pokryvu je nutná intenzivní péče. Této nevýhodě se dá ovšem předejít. Například pro investora s požadavkem na nižší náročnost péče o vegetaci je výhodné pořídit si zelenou střechu s extenzivním zatravněním, při kterém se užívají rostliny s menší náročností na údržbu [5].

3.3 TYPY ZELENÝCH STŘECH

Nejběžněji užívaným dělením se zelené střechy soustřeďují do dvou základních skupin, a to podle intenzity zatravnění, na extenzivní a intenzivní a je to tedy dělení podle druhu vegetace.

3.3.1 Extenzivní střešní zeleň

Pojem extenzivně ozeleněné střechy, označuje osázení podobné stavu v přírodě, kterému stačí malé množství substrátu a tudíž nevyžaduje umělé dodávky vody a živin. Hlavním záměrem vytvoření extenzivního ozelenění je vytvořit zeleň s co nejlepší autoregulací a co nejmenšími požadavky na pravidelnou závlahu a celkově lidskou péči [12]. Vytváří tak trvalou uzavřenou rostlinnou pokrývku. Tloušťka vegetace je u tohoto typu zeleně poměrně nízká, obvykle činí 5 až 15 centimetrů, s čímž je samozřejmě spojeno nižší zatížení střešní konstrukce. Proto je také tento typ vhodný pro většinu střech a to hlavně v městských oblastech. Avšak jejich přínos pro životní prostředí není tak významný jako u intenzivních zelených střech. I přes to přispívají k odstranění znečištění ovzduší, ochlazení měst, úspoře energie v budovách a snížení odtoku dešťové vody [10]. Její únosnost je také nižší a pohybuje se mezi 60 až 300 kg·m⁻². Téměř vždy na ní nalezneme odolné druhy rostlin, s dobrými regeneračními schopnostmi, především různé sukulenty. Také by se mělo jednat o rostliny dostatečně konkurence schopné, aby bylo umožněno vytlačení nežádoucích rostlin v prostoru střechy. Vždy se jedná o nízké rostliny, které se rozšiřují hlavně do plochy a kterým stačí malá tloušťka substrátu. Obsahuje zejména trvalky (Obrázek 9), skalničky, mechy, byliny a suché rostliny (nebo jejich kombinace), které dobře snášejí extrémní podmínky střídání tepla, sucha a mrazu. To znamená, že tyto rostliny musejí mít vysokou schopnost regenerace a proto se téměř výhradně užívají divoké rostliny [13].

Extenzivní zatravnění nevyžaduje příliš velkou údržbu a plní spíše okrasnou, případně izolační funkci. Nejsou tedy určeny pro pohyb lidí jsou tedy téměř vždy nepochozí, přístup na ně je možný v případě kontroly a údržby [12].



Obrázek 9: Extenzivní ozelenění [14]

3.3.1.1 Spontánně vzniklé extenzivní střešní zahrady

Při spontánním osázení se jedná pouze o zpevněné povrchy staveb, které představují potenciální životní prostor pro vegetaci a jsou osídlovány sekundárně. Průběh takového přirozeného osídlování je v podstatě založen na principu „pokus omyl“, který je dán inventářem rostlin, jež se nachází v blízkosti stavby a mohou se zde uchytit. Je zde ovšem možný i nepřímý zásah člověka, který například v okolí střechy vysadí rostliny, které se na daném území přirozeně nevyskytují.

3.3.1.2 Cíleně založené extenzivní střešní zahrady

V případě cíleného založení jde o místně přizpůsobené vegetační formy, které se zde zavádějí cílenými vegetačně-technickými prostředky a opatřeními. Tyto rostliny se poté plošně vyvíjejí na již zmíněných tenkých vrstvách substrátu a zcela samy se také udržují, což znamená, že veškeré zásobení vodou i potřebnými živinami je ponecháno čistě přírodním koloběhům. Vytváření nových forem vegetace a zanikání stávajících je tak ponecháno přírodním procesům a udržovací péče o tento typ zelené střechy je minimální [15].

3.3.2 Intenzivní střešní zeleň

Intenzivní ozelenění zahrnuje křoviny, dřeviny a travnaté plochy tak, jak je to obvyklé v přírodě, je ovšem možné jej realizovat pouze na ploché střeše. Vrstva substrátu je u tohoto typu střechy i několikanásobně vyšší, než při extenzivním zatravnění, proto je možné jej použít pouze u střech, které jsou dimenzovány na velké zatížení. Výška substrátu se pohybuje mezi 30 až 100 centimetry, díky čemuž ovšem dokáže velmi účinně zadržovat velké množství dešťové vody. Musí být prováděna na konstrukci s únosností přibližně $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, tudíž je možné použít zeminu v tloušťce 1 až 1,3 m. Tento typ střechy je nákladný a náročný na péči, vyžaduje, jak sám název napovídá, intenzivní pravidelnou údržbu a v jistém smyslu představuje v podstatě střešní zahradu (Obrázek 10). Je třeba pravidelně substrát zavlažovat, hnojit, odstraňovat nežádoucí rostliny, sekát příliš vysoké rostliny apod. Díky předchozím vlastnostem je nejčastěji užívaná na terasách či střeších, které plní hlavně odpočinkovou a rekreační funkci [13]. Na tomto typu střech můžeme najít téměř jakékoli druhy rostlin, jelikož případná omezení jsou dána pouze konkrétním objektem, na kterém chceme střechu vystavět a lokalitě, ve které se nachází. Mohou ji tedy tvořit jak trávníky, tak trvalky nebo dokonce stromy a také užitkové rostliny, kterými jsou ovoce a zelenina [12].



Obrázek 10: Intenzivní ozelenění [16]

3.3.2.1 Jednoduché intenzivní střešní zahrady

Jednoduché intenzivní zatravnění zpravidla zahrnuje trávníky, trvalky a dřeviny, které mají menší nároky na skladbu půdního profilu, stejně jako na hospodaření s vodou, než náročné intenzivní zatravnění. Také péče o ně není příliš náročná a pořizovací náklady nejsou vysoké.

3.3.2.2 Náročné intenzivní střešní zahrady

Náročné intenzivní ozelenění zahrnují trvalky, travníky, keře a někdy i stromy a mají tudíž velmi vysoké nároky na konstrukci střechy. Také je nutné je pravidelně zásobovat dostatečným množstvím vody a živin. Tato varianta zelených střech je tedy nejnáročnější jak ekonomicky, tak i z hlediska požadavků na její údržbu. Díky tomu ovšem dokáží při vytvoření odpovídajících podmínek dokonale nahradit zahradu na rostlém terénu se všemi souvisejícími možnostmi [15].

3.4 DĚLENÍ ZELENÝCH STŘECH PODLE SKLONU STŘEŠNÍ ROVINY A JEJICH DOPORUČENÉ SKLADBY

Sklon střešní roviny je při návrhu zelené střechy velice důležitým faktorem. Ani u tohoto typu střech nejsou výjimkou velké sklony a proto je často nutné zamezit sesuvu substrátu a veškeré zeleně. Dle sklonu ve stupních se proto dělí do čtyř základních skupin, které jsou popsány níže.

3.4.1 Ploché střechy

Střechy se sklonem do 3 ° jsou velmi náchylné na poškození povětrnostními vlivy, proti kterým se zelená střecha brání právě zatravněním, které jí poskytuje dlouhodobou ochranu a tím výrazně prodlužuje její životnost oproti jiným střechám. Zastřešení je také vystaveno silným výkyvům vlhkosti, což může vést k nedostatku kyslíku v půdě a tedy k jejímu zakyselení. Proto je zde užívána zvláštní drenážní vrstva pro odvod přebytečné vody.

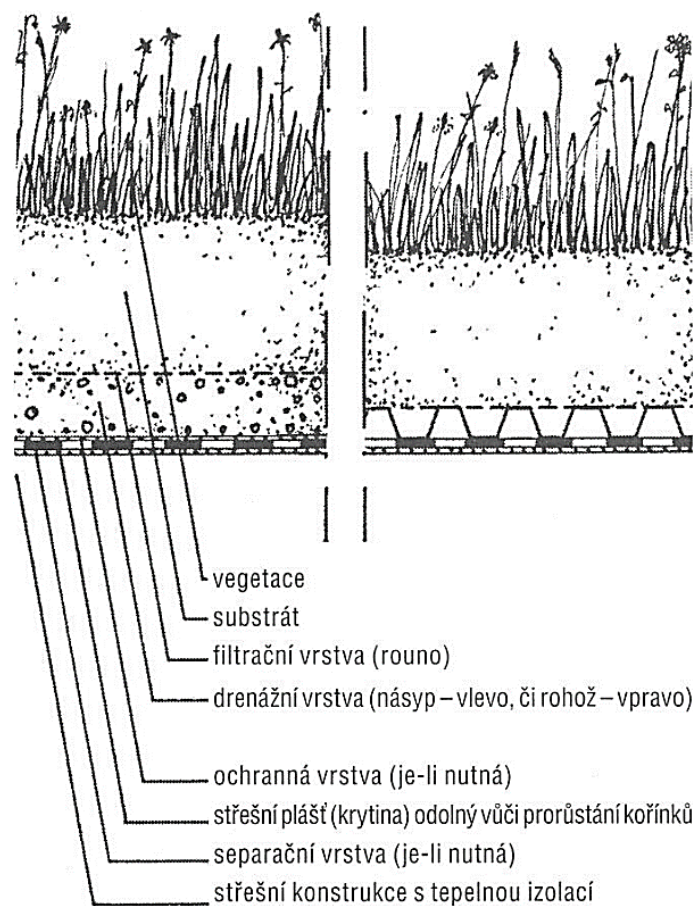
Je nevhodné ji užívat na obytných domech, stavbách pro sociální účely, továrnách a skladovacích halách vzhledem k jejich ceně [5].

Nejobvykleji bývá konstrukce plochých zelených střech řešena následujícím schématem:

- vegetace
- substrát
- filtrační vrstva
- drenážní vrstva
- ochranná vrstva
- střešní plášť

3.4.2 Střechy s mírným sklonem

Střechy se sklonem 3 až 20 ° jsou nejehospodárnějším typem zelených střech z hlediska sklonu (Obrázek 11). Substrát přejímá funkci akumulátoru vody a přebytečnou vodu odvádí z plochy střechy, proto je nutné aby, obsahoval hrubozrnné částice z porézních minerálních látek, nejčastěji je to pemza, struska, keramzit nebo expandit. Tyto částice navíc snižují hmotnost, zvyšují tepelně izolační schopnosti, ulehčují dýchání kořínků a působí proti účinkům kyselého deště, a to díky své hodnotě pH [5]. Hodnota pH pemzy se pohybuje mezi 7 a 8,5 [17], strusky 9 až 12,5 [18] a keramzitu 5,5 až 7,5 [19].



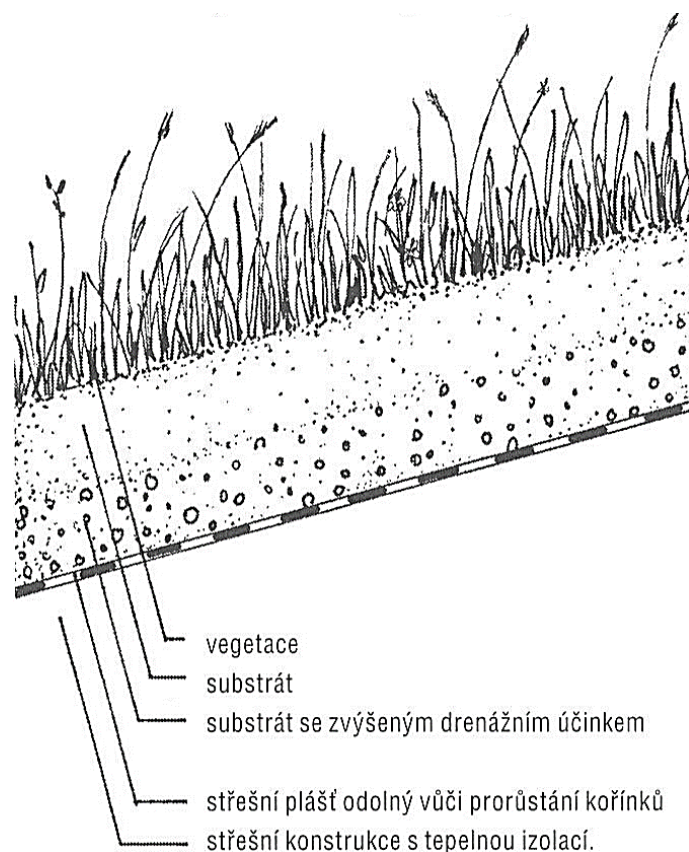
Obrázek 11: Schéma skladby vrstev ozelenění střechy pro ploché střechy i střechy s mírným sklonem [5]

3.4.3 Střechy s velkým sklonem

Sklon střech s vysokým sklonem činí 20-40 ° a proto je v jejich případě nutné zajistit substrát proti sesuvu (Obrázek 12). Při výběru způsobu zajištění substrátu proti sesuvu závisí nejen na sklonu střechy, ale také na délce šikmé střešní plochy, tloušťce a soudržnosti substrátu a také míře prokořenění. V závislosti na těchto parametrech je poté nutné substrát zabezpečovat až při sklonu 15 °, popřípadě 20 °.

Velmi účinným opatřením proti sesuvu substrátu jsou trámy uložené pod střešním pláštěm, přičemž čím je sklon střechy strmější, tím jsou nutné menší rozestupy mezi trámy. Hrany trámů je nutné ovšem zakulatit, aby nepoškozovaly střešní krytinu v místech styku. U kratších střech je možné vytvořit rošty z běžných střešních latí a uložit je do substrátu. Tyto latě sice během dvou až tří let ztrouchnivějí, ale mezi tím se vytvoří dostatečně hustá síť kořenů rostlin a proto není již nutná další ochrana.

V případě menší tloušťky substrátu dostačují proti sesuvu tzv. „zubaté rohože“. Podobný účinek mají také drenážní desky z tvrzeného pěnového polystyrenu nebo recyklovaných bavlněných vláken. Jednoduchým způsobem je také užití předpěstovaných travních koberců nebo vegetačních rohoží, které výrazně snižují riziko sesuvu. Také existuje možnost užití tuhých desek z hlíny, žitné mouky a dřevěné vlny, na které se nanáší tenká vrstva substrátu obsahujícího semena a výhonky. Tyto desky poté slouží jako živná půda pro vegetaci a jakmile jimi prorostou kořeny, dojde k jejich rozkladu [5].



Obrázek 12: Schéma skladby vrstev ozelenění střechy s velkým sklonem [5]

3.4.4 Strmé střechy

Posledním typem jsou střechy se sklonem nad 40° . K jejich zajištění proti sesuvu nestačí pouze trámký, hvězdicové rohože nebo jiné pomůcky tak jako u střechy s velkým sklonem. Nejjednodušší a zároveň nejekonomičtější způsob ozelenění takové střechy spočívá v tom, že se na hydroizolační střešní krytinu uloží travní pásové rohože, ovšem travnatou stranou dolů a na ně se následně položí rohože s mechovou vegetací (Obrázek 13). Na ochranu proti sesuvu je poté možné rohože na hřebeni střechy spojit a upevnit je horizontálně vedenými lany, která zároveň slouží ke stabilizaci proti sání větru.

Velmi účinným způsobem, jak zamezit sesuvu substrátu, je také například systém ochrany tvořený skládacím roštem z profilů z recyklované umělé hmoty, který se opírá o okapovou fošnu, kterou je potřeba dostatečně pevně uchytit na střešní konstrukci [5].



Obrázek 13: Pěstební sáčky naplněné substrátem a uchycené na strmé střeše [5]

3.5 DALŠÍ ROZDĚLENÍ ZELENÝCH STŘECH

Podle funkce:

- Retenční zelené střechy – slouží k zadržení co největšího množství srážkové vody a jejímu pomalejšímu odtékání do kanalizace.
- Zelené střechy podporující biodiverzitu – jsou navrhované s co největší rozmanitostí rostlinných a živočišných druhů pro jejich zachování v přírodě.
- Fotovoltaické zelené střechy – zelená střecha s fotovoltaickými panely.
- Pěstební zelené střechy – tyto střechy jsou využívány k pěstování užitkových rostlin pro zahradnický nebo zemědělský průmysl [12].

Podle prostorové vazby na terén:

- V úrovni s parterem – jejich uživatelé často ani neví, že se pohybují na stropní konstrukci podzemního objektu. Nejčastěji jsou to stavby garáží, stanice metra, obchody, občanská výstavba a další.
- V dotyku s parterem – užitím tohoto typu se dosahuje začlenění budovy okolního prostředí (Obrázek 14).
- Bez dotyku s parterem – jsou nejčastějším typem zelených střech a jejich funkce je omezována pouze funkcí samotného objektu a požadavky uživatele [12].



Obrázek 14: Zelená vlna na přístavbě šumavského domku v Hartmanicích [12].

3.5.1 Hnědé střechy

Zejména ve Velké Británii, ale i v mnoha dalších zemích jsou jedním z typů zelených extenzivních střech „hnědé“ střechy, někdy nazývané také biodiverzní, které získaly oblibu především u ochránců divoké zvěře, jelikož jsou navrženy tak, aby replikovaly tzv. brownfield lokality. Díky tomu představují jedny z ekologicky nejcennějších oblastí a do budoucna se očekává jejich široké rozšíření [10]. Jedná se o střechy, které nejsou osemeněné, ale ponechávají se zcela bez vegetace, za účelem postupného přirozeného ozelenění lokálními druhy rostlin. Nejvýraznější vlastností takových střech je proto dokonalá imitace okolního terénu, díky čemuž jsou ztotožňovány právě s brownfield lokalitami [20].

Při výstavbě zelených střech je ekonomicky nákladnou položkou obecně tvorba, ale především doprava samotného substrátu ke stavbě. U hnědé střechy však náklady spojené s přepravou substrátu výrazně klesají, jelikož se užívají vždy materiály z lokálních zdrojů pro identické zobrazení přilehlé krajiny.

Ustálení alespoň základní trvalé vegetace na hnědých střechách vyžaduje i několik let, přičemž se vlivem okolních vlivů neustále mění. Jakékoli charakteristiky těchto střech jsou proto ve fázi experimentů a není o nich známo tolik podrobných informací, jako obecně o zelených střechách [10].

3.6 VRSTVY ZELENÉ STŘECHY A JEJICH FUNKCE

Ozelenění zelené střechy má specifickou konstrukci. Substrát má například ve většině případů dvě vrstvy, horní nosnou a spodní drenážní, ale u střech se sklonem do 5 % není toto rozdělení nutné.

Ekonomika hraje velkou roli i při výstavbě těchto konstrukcí, tak jako všech jiných ve stavebnictví. Proto je při jejich navrhování vždy snaha o co nejmenší tloušťku substrátu. Příliš tenká vrstva však může vést k přílišnému vysušování, především pokud je střecha orientována na jih. Ovšem při větší tloušťce dochází k velkému nárůstu hmotnosti a také zde hrozí nebezpečí uchycení semen stromů. Proto lidé často volí vegetaci složenou z rozchodníků, různých trav a bylin. V takovém případě potom ale není porost příliš hustý a tím jsou jeho kladné fyzikální a ekologické účinky mnohem menší.

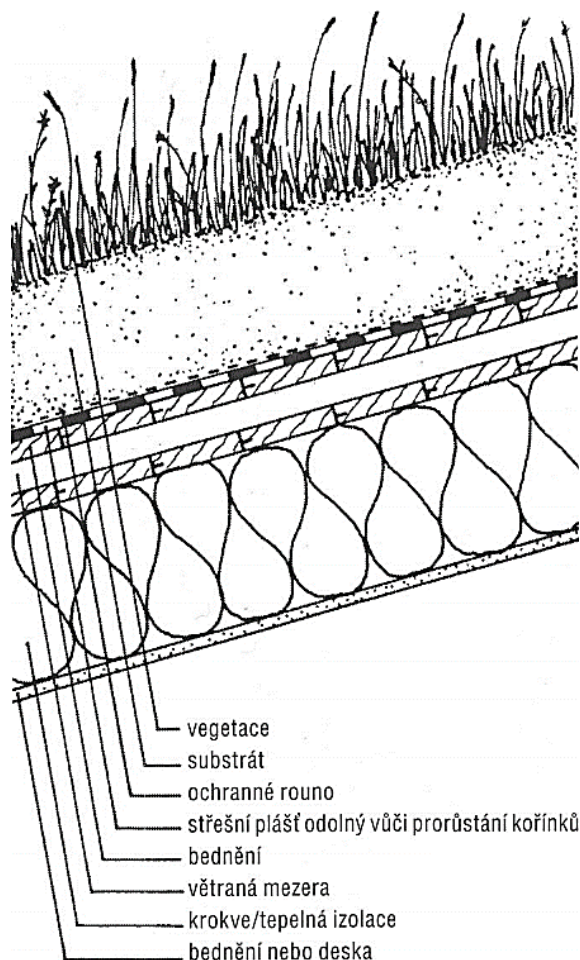
3.6.1 Tepelná izolace

Ozelenit lze každou střechu, která přenesení zatížení substrátu. Podle polohy tepelné izolace v konstrukci rozlišujeme tři typy střech, a to střechu studenou, teplou a obrácenou.

3.6.1.1 Studené střechy (dvoupplášťové)

Mezi tepelnou izolací a samotnou zelení je zde vytvořená tenká vzduchová mezera, která slouží k vyrovnání tlaku páry (Obrázek 15). Vzduchovou mezeru je například nutné vytvářet vždy u konstrukcí bez parozábrany.

Velkou nevýhodou studených střech je ztráta pozitivního účinku letního chladicího efektu a zimního tepelně izolačního efektu ozelenění v místnostech nacházejících se pod konstrukcí zelené střechy [5].

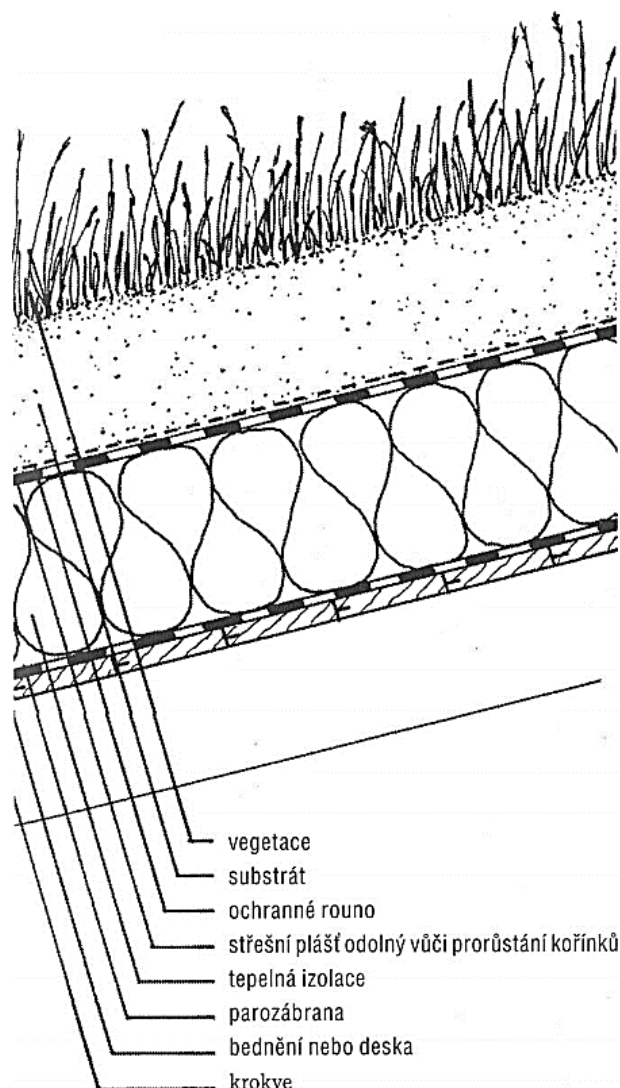


Obrázek 15: Typická konstrukce studené střechy s ozeleněním [5]

3.6.1.2 Teplá střecha (jednoplášťová)

Teplá střecha větranou mezeru k vyrovnání tlaku páry nemá a stavebně fyzikální účinky zelené střechy se proto kladně projevují ve všech místnostech pod střechou. Je zde však nutné zabudovat pod tepelnou izolaci parozábranu, aby vodní pára nepronikala do izolační vrstvy a nemohla v ní kondenzovat (Obrázek 16).

Tento typ střechy je proto ze třech jmenovaných nejvhodnější a nejehospodárnější konstrukcí pro ozelenění [5].



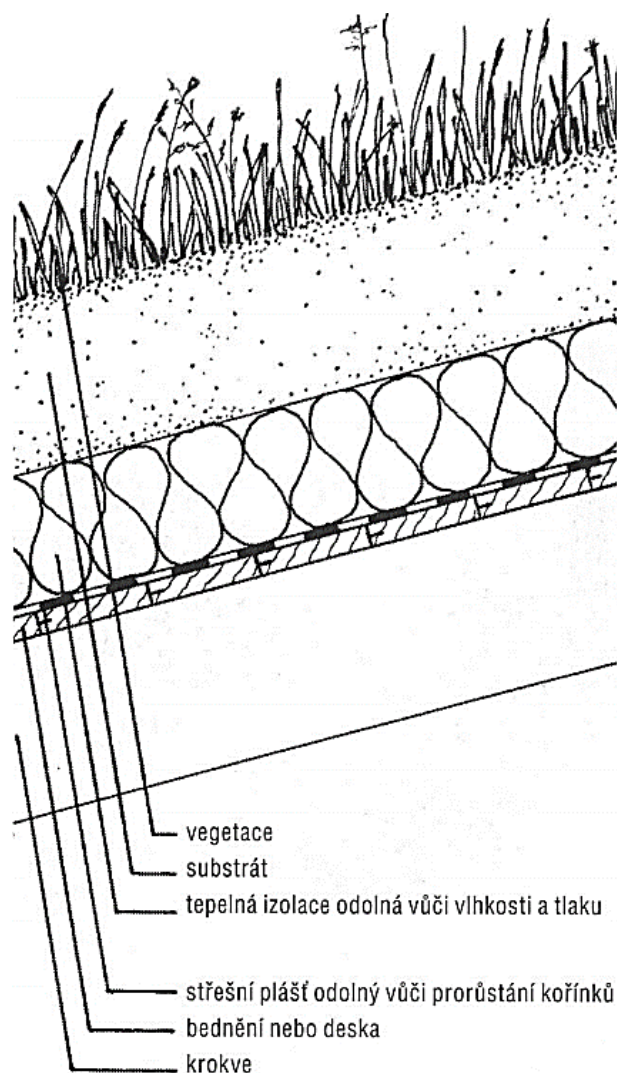
Obrázek 16: Typická konstrukce teplé střechy s ozeleněním [5]

3.6.1.3 Obrácená střecha

U obrácené střechy tepelná izolace leží nad hydroizolační vrstvou (Obrázek 17), proto je nutné, aby byla nepropustná pro srážkovou vodu a také odolná vůči práchnivění. Pro tyto účely se ve většině případů užívají desky z extrudovaného polystyrenu.

V současnosti se tento typ střech již nestaví, jednak je jejich tepelně izolační účinek nižší, než v případě uložení v suché oblasti pod střešním pláštěm, a dále je tento typ izolace dražší a také má kratší životnost.

Výjimku tvoří tzv. zdvojená střecha, což je v podstatě teplá střecha, u níž je však nad hydroizolační vrstvou vybudována dodatečná tepelná izolace. Je tomu tak, jelikož hlavní tepelná izolace slouží jako drenážní vrstva a zároveň také jako pojistka proti sesuvu substrátu, proto je nutná druhá vrstva této izolace [5].



Obrázek 17: Typická konstrukce obrácené střechy s ozeleněním [5]

3.6.2 Hydroizolace a ochrana před prorůstáním kořínků

Hydroizolační vrstva zpravidla zároveň slouží jako ochranná vrstva proti prorůstání kořínků. V případě asfaltových pásů, které jsou obvykle za tímto účelem instalovány je však nutné vytvořit samostatnou ochrannou vrstvu.

Dlouhodobě prováděné testy ukázaly, že v běžné živičné izolaci zakořenily všechny testované druhy rostlin (Obrázek 18), jelikož na koncích kořínků žije mnoho mikroorganismů, které mohou živičné látky rozkládat. Při experimentu tyto kořínky prorostly dokonce i navařeným a následně zapečetěnými švy PVC fólie (Obrázek 19). V praxi totiž není vždy možné provést zcela nepropustný navařený svár. Pokud spára není slepená nebo svařená a pokud do ní pronikne kapilární voda, mohou zde proniknout špičky kořínků se svými čidly vlhkosti. Dokonce existují rostliny, jejichž špičky kořínků jsou při zjištění přítomnosti vlhkosti schopny ztvrdnout za pomoci ukládání křemičitých krystalů, aby mohly proniknout štěrbinou nebo spárou. Místa přeložení pásů a fólií by proto měla být zajištěna horkovzdušným nebo vysokofrekvenčním svařením. Samotný povlak nebo nejvrchnější vrstva potom musí být spojena navařenými svary, aby byla spolehlivě uzavřena i na hranách. Pokud není možné užít tuto metodu, je nutné hranu uzavřít tekutou fólií. U asfaltových pásů, jejichž odolnost proti prorůstání kořínků je zajištěna měděnými fóliemi, se může stát, že kořínky případně pronikají vodorovně místy přeložení.

Střešní pásy odolné vůči prorůstání obsahují herbicidy, jejichž účinek se po určité době ztrácí, z ekologického i ekonomického hlediska jsou proto nevhodné.

Pokud nějaký kořínek pronikne do hydroizolační krytiny, nemusí to vždy znamenat poškození stavby. Hlavně u šikmých střech je prorůstání kořínků podstatně méně nebezpečné než u plochých střech, jelikož na šikmých střeších nezůstává stát voda a kořínky navíc zabraňují sesuvu substrátu.

Jedná-li se například o studenou střechu s větranou střechou nebo je-li pod střechou volný nevytápěný prostor, může se případně proniklá vlhkost vypařit.

Jestliže hydroizolační vrstva není odolná vůči prorůstání kořínků, je nejjednodušší položit na ni polyetylenové fólie. Je-li nutné fólie spojovat, musí jejich přeložení činit minimálně 150 cm, jelikož se v něm po dlouhou dobu drží kapilární voda a proto zde velice jednoduše mohou prorůst kořínky. Také je vhodné uložit pod fólii ochranné rouno [5].

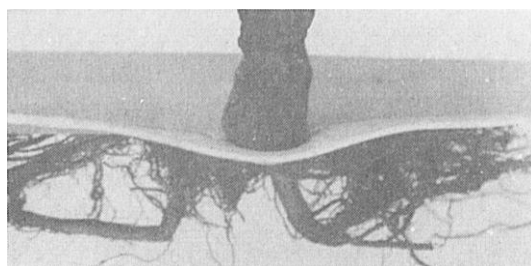
Hydroizolaci je také nutné navrhovat s ohledem na požadavky, které jsou na ni kladené normami. Ve smyslu ČSN P 73 0600 je hydroizolace namáhána tlakovou vodou. Proto je třeba ji dimenzovat tak, aby odolávala tomuto hydrofyzikálnímu namáhání s přihlédnutím k její přístupnosti při případných opravách. Také musí být podle ČSN 73 1901 odolná vůči prorůstání kořenů rostlin z důvodu trvalého zabránění porušení hydroizolace rostlinnými kořeny. Jak už však bylo řečeno, tato vlastnost se dá zajistit pomocí další vrstvy v konstrukci střechy. V České republice také od 1. listopadu 2007 platí norma ČSN EN 13948 Hydroizolační pásy a fólie – Asfaltové, plastové a pryžové pásy a fólie pro hydroizolaci střech – Stanovení odolnosti proti prorůstání kořenů. Podle ní lze odolnost materiálu proti prorůstání kořínků stanovit, tato zkouška však trvá 2 roky. Norma je založena na metodě, kterou vyvinula Asociace FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.) [4].

Ochranné pásy proti prorůstání kořínků mohou být z těchto materiálů:

- Asfaltové svařované pásy, které ovšem samostatně nejsou pokládány za odolné vůči kořínkům a proto vyžadují dodatečný ochranný pás.
- Polymerbitumenové pásy a elastomerbitumenové pásy, které jsou vyrobeny ze směsi živice a umělých hmot.
- PVC pásy z měkčeného PVC.
- Polyetylenové pásy z chlorovaného polyetyleny, vyznačující se vysokou pevností.
- Polyolefinové pásy z tkaniny kaširované polyolefinem jsou z ekologického hlediska velmi vhodné, jelikož neobsahují halogeny ani změkčovadla. Jsou ovšem nákladné a jejich svařování je obtížné.
- Pásy ECB jsou snadno zpracovatelné.
- Pásy z etyl-propylen-terpolymerového kaučuku se vyznačují vysokou mírou elasticity.
- Kapalná těsnění s polyuretanem nebo polyesterovou pryskyřicí se nanášejí v kapalné formě [5].



Obrázek 18: Prorůstání kořene bodláku 15 cm silnou vrstvou živичného pásu po 15 měsících trvání pokusu [5]



Obrázek 19: Kořen prorůstá navařeným a zapečetěným svarem ochranné PVC fólie proti prorůstání kořínků [5]

3.6.3 Ochrana před mechanickým poškozením

U intenzivního ozelenění, a to zvláště pokud je střešní plášť určen k pojíždění mechanismů, je nutné překrýt plášť ochrannou vrstvou, která brání mechanickému poškození. Za tímto účelem se užívá například rouno v minimální plošné hmotnosti $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, nejčastěji poté pěnová rohož a jí podobné materiály. Ekonomicky i ekologicky nejvýhodnější jsou výrobky z recyklovaných umělých hmot, jako je třeba rouno z jogurtových kelímků. Také se užívají pletené rohože kašírované rounem nebo rohože z pěnových vloček z recyklovaných materiálů, polyetylenová a polyuretanová rouna a textilní rohože z recyklovaného vlákna [5].

3.6.4 Drenážní vrstva

Drenážní vrstva slouží jednak k odvedení přebytečné vody ke střešním vtokům a současně k akumulaci vody. Zvětšuje prostor pro růst kořenů a přispívá k ochraně vrstev, které se nachází pod ní. Volba materiálu a dimenzování této vrstvy závisí na nárocích vegetace střechy a na únosnosti nosné konstrukce. Zvolený materiál musí být odolný vůči biologické korozi a snést zatížení od vrstev nad sebou a také zatížení z provozu.

Maximální nerovnost povrchu, na který se drenáž z deskových materiálů ukládá nesmí překročit 0,5 cm na 2 m lati. Zabudováním dalších vrstev nesmí dojít ke stlačení drenáže ani k vyplnění vzduchových mezer. U materiálů s ostrými hranami jako jsou například

ostrohranné kamenivo, nopové fólie nebo smyčkové rohože, je třeba dbát na mechanickou ochranu hydroizolace, která leží pod nimi [4].

Pro účely drenážní vrstvy jsou vhodné porézní, lehké minerální materiály s hrubou zrnitostí jako je například keramzit, expandovaná břidlice, expandovaná láva, struska nebo cihlové recyklované materiály. Nasákavost této vrstvy by se měla pohybovat mezi 15 až 20 %, proto se některé z materiálů užívají drcené, například výše jmenovaný keramzit. Zrnitost sypkých materiálů by měla být co nejrozmanitější s horní hranicí velikosti zrna 16 mm. Hodnota pH má ležet mezi 6,0 a 8,5. Materiály jako je keramzit nebo pemza jsou navíc vhodné, jelikož spadají do daného rozmezí hodnoty pH a tím částečně kompenzují kyselý dešť [5].

Sypké materiály užívané jako drenážní vrstva:

- štěrkopísek, štěrk
- láva, pemza
- keramzit a expandit
- cihelná drť
- expandovaná břidlice
- expandovaná láva
- struska

Drenážní desky nebo rohože:

- strukturované (smyčkové) rohože z plastu nebo pryže
- plastové nopové fólie
- plastové nopové fólie s integrovanou netkanou filtrační textilií
- plastové nopové fólie s perforacemi v horním povrchu
- tvarové desky z pěnových plastů
- mezerovité desky nebo rohože z pěnových plastů [4]

V Turecku se na jaře a v létě roku 2020 prováděla studie, která zkoumala potenciál použití recyklovaných materiálů nebo lokálně dostupné materiály pro založení zelené střechy. Z této studie vyplývá, že nejméně ekologická vrstva zelených střech je právě drenáž především v důsledku výroby a také procesu zabudování vrstvy do konstrukce střechy. Ovšem i při budování této vrstvy lze využít recyklované materiály či místní suroviny, což by mělo přínos nejen ekologický, ale také výrazný ekonomický. Jejich zabudování do systému zelené střechy však může být obtížnější, než u běžně užívaných materiálů [21].

3.6.5 Filtrační vrstva

Filtrační vrstva zabraňuje vyplavování jemných částic ze substrátu do drenážní vrstvy a tím zamezuje jejímu zanášení, omezování kapacity odvodňovacích prvků a také úbytku sypkých vrstev. Je nutné, aby byla dobře vodopropustná, také musí být odolná vůči biologické korozi a nesmí omezovat růst kořenů. Za těmito účely se v současnosti nejčastěji užívají netkané nebo tkané textilie, které se skládají z různě dlouhých vláken. Spojení vláken může být provedeno mechanicky, chemicky nebo tepelně anebo kombinací všech uvedených způsobů. Plošná hmotnost by měla být minimálně $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, ale zpravidla leží mezi 100 a $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ u střech s tloušťkou substrátu do 25 cm. Při větší tloušťce substrátu nebo u střech s velkým sklonem se používají materiály o vyšší plošné hmotnosti. Důvodem je menší deformace textilie, také zachycení většího množství vyplavených částic, vyšší pevnost v tahu a obecně lepší mechanické vlastnosti.

Textilie jako drenážní vrstva je ukládána s přesahy minimálně 10 cm. Položené materiály je nutné během jednoho týdne zasypat, neboť obvykle nejsou odolné vůči UV záření a před zasypáním je třeba je dočasně chránit také proti vlivům větru [4].

3.6.6 Hydroakumulační vrstva

Nutné minimální množství vody pro růst rostlin stejně jako omezení průtoku dešťových vod při krátkodobých intenzivních srážkách zajišťuje hydroakumulační vrstva. Její význam se zvyšuje se snižující se tloušťkou substrátu. Materiál, ze kterého je vytvořena musí být odolný vůči biologické korozi.

Materiály hydroakumulační vrstvy:

- Sypké nasákavé materiály, jejichž největším zástupcem je keramzit. Užívá se drcený, jelikož se tak odhalí jeho vnitřní pórovitá struktura, která je mnohem nasákavější než slinutý povrch zrn.
- Hrubovláknitá rašelina je tradičním materiálem, její nízké pH (2-6) je však značnou nevýhodou, jelikož zvyšuje kyselost okolních vrstev a to zejména substrátu, který může být navíc poškozován kyselými dešti. Jeho další nevýhodou je také omezená trvanlivost, neboť se jedná o organický materiál a tudíž ho ze střechy neustále ubývá.
- Hydrofilní desky nebo svinovatelné rohože z minerálních vláken jsou výhodné především z důvodu rychlé pokládky.
- Netkané textilie, které se pokládají ve více vrstvách.
- Desky z nasákavých pěnových plastů, ve kterých je voda zadržována díky perforaci a také díky vlastní nasákavosti.
- Plastové nopové fólie s perforacemi v horním povrchu. Voda se v tomto případě hromadí v nopech a při jejich úplném naplnění odtéká otvory v horním povrchu a mezi spoji.

Akumulaci vody lze také zajistit vytvořením souvislé hladiny vody v drenážní vrstvě na celé ploše střechy zvýšením střešního vtoku. V tomto případě je nutné použít sypké nasákavé materiály. Také zde musí být zajištěn dostatečný prostor nad maximální hladinou akumulované vody, aby nedocházelo k zaplavení substrátu a tudíž úhynu rostlin [4].

3.6.7 Substrát

Substrát tvoří nosnou vrstvu pro vegetaci a zároveň zásobuje rostliny potřebnou vodou a živinami. Proto by měl být dostatečně pórovitý a také by měl kořenům poskytovat možnost se uchytit.

U extenzivního ozelenění by vrstva substrátu neměla obsahovat mnoho humusu. Pokud je zde užitá ornice, je většinou potřeba ji zlehčit přidáním písku, aby nebyla příliš těžká a jílovitá. Také je výhodné ji vylehčit přidáním malého množství lehkého minerálního plniva jako je pemza, láva, expandovaná břidlice, drcený keramzit nebo cihelný recyklát [5].

Obecně je třeba substrát zakládat pro porost chudých trav, aby na něm vyrostla divoká louka jejíž výška se bude průměrně pohybovat mezi 10 a 20 cm. Pokud by byl substrát příliš výživný, rostliny by v krátkém časovém úseku vyrostly do velké výšky, polámal by je vítr a uschly by [5].

Některé firmy nabízejí jako substrát pouze minerální sypké hmoty, pro jejich jednoduchý transport a montáž, ty ale ovšem obsahují naopak příliš malé množství živin a pro vegetaci je obtížné se na takovémto substrátu vyvíjet. Stejně tak rohože ze skelné vaty nebo pěnové hmoty se příliš neosvědčily, jelikož je nutné rostliny pravidelně hnojit.

Turecké studie prokázaly, že nejlepších výsledků lze dosáhnout smícháním několika druhů materiálů. Každý materiál má výhodné i nežádoucí vlastnosti a při jejich kombinaci mohou příznivé vlastnosti některých látek kompenzovat nežádoucí rysy látek jiných.

Každý substrát musí obsahovat jak anorganickou, tedy minerální složku, organickou složku, tedy humus a obě tyto složky musí být propustné pro vodu. Anorganická část tvoří hlavní složku

substrátu, často se skládá z lehkých částic a také udržuje stabilitu celého substrátu. Organická část podporuje růst rostlin a uchovává jistou rezervu živin. Podle tureckých studií se nedoporučuje její zastoupení v substrátu větší jak 20 % [21].

Při výběru druhu substrátu je potřeba zohlednit následující parametry:

- plnou vodní kapacitu v zabudovaném stavu, nebo-li procento objemu, které může zaujmout voda
- obsah vzduchu
- hodnotu pH
- a obsah soli.

Nedávné studie, které probíhaly v Turecku, ukazují, že pro substrát zelené střechy je vhodné užít recyklované materiály či přírodní materiály z místních zdrojů. Na toto téma byly prováděny výzkumy zejména v severních oblastech zejména Německa, ty však není možno aplikovat v oblastech s teplejším podnebím. Užití recyklovaných materiálů či místních zdrojů snižuje negativní dopad výroby či dopravy surovin a tím uhlíkovou stopu, bylo by tedy vhodné provést výzkumy, které by zkoušely místní druhy zemin a rostlin [21].

3.6.8 Vegetace

Faktory ovlivňující výběr ozelenění:

- tloušťka substrátu
- sklon střechy
- působení větru
- orientace ke světovým stranám
- zastínění okolními překážkami
- průměrné množství srážek
- druh tepelné izolace
- optický efekt

Důležité je při návrhu vegetace zohledňovat, zda má zelená střecha sloužit pouze jako estetický prvek nebo zda-li má plnit i stavebně fyzikální či konstrukční funkci.

U jednotlivých rostlin poté rozhoduje jejich odolnost vůči mrazu a suchu, výška vzrůstu a jejich požadavky na kvalitu půdy [5].

Opět je při výběru rostlin vhodné použít původní rostliny v lokalitě stavby, jelikož tím zvýšíme přínos pro městskou ekologii, biologickou rozmanitost a přežití některých druhů rostlin [21].

3.6.8.1 Druhy vegetace

Osivo se při mokrému způsobu sadby, tedy ozelenění nástřikem, dává v množství 2 g osiva na m² substrátu. Při suchém způsobu sadby je potřeba 3 až 8 g osiva na m² substrátu. Osivo divokých trav a bylin má malou klíčivost a malou čistotu, ale jsou odolnější než jiné druhy rostlin.

Při výsadbě rozchodníků se zpravidla užívají výhonky, tedy nařezané části rostliny, které mají rychlý růst a dokáží odolávat velkému suchu. Při výsadbě je zpravidla potřeba 40 výhonků na m² substrátu.

Rostliny užívané pro extenzivní ozelenění, tedy trvalky, by měly být odolné vůči atmosférickým vlivům a neměly by být hnojeny dusíkatými hnojivy.

Travní pásy se užívají v malých tloušťkách, převážejí se srolované do kotoučů a ukládají se přímo na střechu jako hotový travní koberec. Při jejich pěstování se většinou užívá standardní

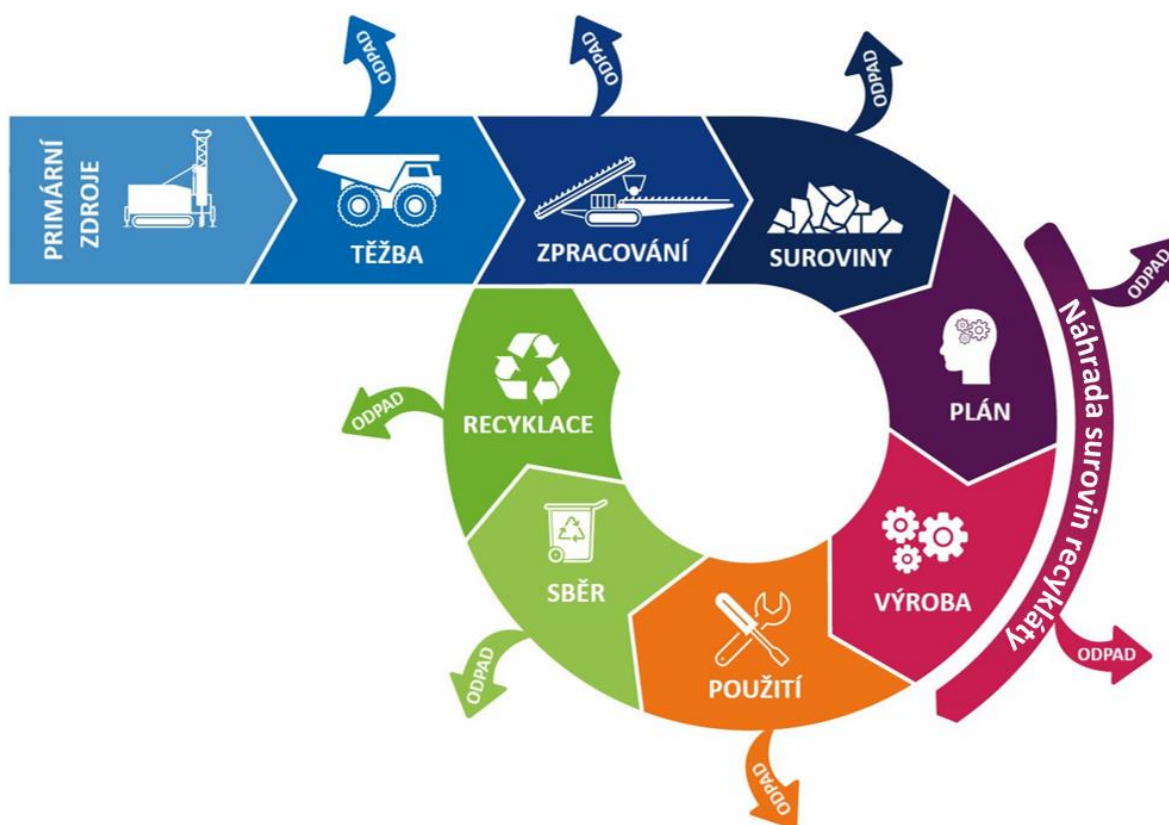
směs osiva pro venkovské trávníky nebo také příměs bylin. Rozměry pásů mohou činit například $0,5 \times 1,0$ m nebo $0,4 \times 2,0$ m.

Vegetační rohože, které obsahují různé směsi mechu, sukulentů, trav, bylin a cibulovin se vyztužují rounem, sítí nebo pletivem. Jejich tloušťka substrátu činí pouhých 1,5 až 3,5 cm a jejich rozměr je většinou $1,0 \times 1,0$ m [5].

4 RECYKLÁTY

Předpisy a normy umožňují použití různých recyklátů v některých fázích stavební výroby. Tyto materiály lze použít pouze v případě, že vyhoví všem kritériím, která jsou dána pro přírodní nerostné suroviny. V současné době se většinou užívá tzv. směsný recyklát, například jako zásypový materiál, pro stabilizaci podkladů nebo nestmelených vrstev vozovek. Kvalitní tříděné recykláty lze potom využívat na daleko vyšší úrovni výstavby.

Vzhledem k tomu, že stavební suť v současnosti tvoří přibližně 45 % celkové produkce odpadů, je využití recyklátů nejen ekonomicky, ale především ekologicky výhodné. I když dnes již mnoho stavebních firem využívá recykláty, 85 % stavební suti je stále ukládáno v deponiích či skládkách a pouze zbylých 15 % je recyklováno a opět využito (Obrázek 20). Zároveň se zásoby přírodních kameniv v České republice snižují a získat povolení k nové těžbě je dnes legislativně čím dál, tím náročnější, s ohledem na životní prostředí. Proto je užívání recyklovaných materiálů pro výrobce výhodné [22].



Obrázek 20: Schéma cirkulace ekonomiky [23].

4.1 REBETONG

Příkladem funkční cirkulace ekonomiky je například tzv. Rebetong, který v roce 2019 představila firma Skanska, a.s. Jedná se o beton, při jehož výrobě je veškeré přírodní kamenivo nahrazeno stavebními recykláty a přitom jsou vlastnosti výrobků z Rebetongu srovnatelné s výrobky z běžného betonu. 100 % dávka kameniva v receptuře, a to i frakce 0-4 mm, je tedy tvořena betonovým, cihelným či směsným recyklátem ze stavební a demoliční suti (Obrázek

21). V zahraničí je většinou nahrazována pouze hrubá frakce kameniva recyklátem, a to jen z 10-35 %. V takovémto rozsahu také náhradu připouštějí evropské technické předpisy, 100 % náhrada je proto ojedinělá [22].

Postup výroby Rebetongu je předmětem patentové ochrany, proto neznáme jeho recepturu. Pro jeho výrobu však není nutné zasahovat do stávající technologie betonárny a k tomuto účelu se užívá běžné vybavení, užívané pro výrobu normálního betonu. Příprava takového recyklátu je výrazně méně nákladná, jako skladování stavebních sutí [22].

Rebetong se vyrábí ve třídě Rebetong C25/30 (100 % cihelné drtě), Rebetong C25/30 (100 % betonové drtě) a Rebetong C25/30 (50 % cihelné drtě, 50 % betonové drtě). Objemová hmotnost se pohybuje mezi 1 950-2 150 kg·m⁻³, modul pružnosti mezi 15-21 GPa, součinitel tepelné vodivosti je 0,96 W·m⁻¹·K⁻¹ a hloubka průsaku vodou max. 50 mm [22].

S využitím Rebetongu se počítá především v konstrukcích, kde je zbytečné plýtvat kvalitním lomovým kamenivem. Jedná se tedy o základové konstrukce, vnitřní nosné i nenosné stěny rodinných a bytových domů, podkladní betony, prefabrikované bloky a další [24].

Výhodami Rebetongu jsou nižší materiálové náklady a náklady na dopravu, úspora přírodních zdrojů kameniv a energie na jejich těžbu a dopravu, snížení skládkování stavební sutí, snížení uhlíkové stopy a snížení energetické náročnosti budov [24].



Obrázek 21: Ukázka Rebetongu, vlevo na obrázku s cihelným recyklátem a vpravo na obrázku s betonovým recyklátem [25].

4.2 CIHELNÝ RECYKLÁT

Cihelný recyklát je tvořen kamenivem ze zdiva, proto se v něm mohou nacházet i jiné materiály použité na stavbě, například malta nebo kousky betonu. Z hlediska množství zpracovaných stavebních odpadů v recyklačních linkách v uplynulých pěti letech zaujímá první místo.

V současnosti se stávají oblíbeným materiálem designérů, kteří se snaží využívat udržitelné stavební materiály. Navíc nabízejí jedinečný rustikální vzhled, který nelze srovnávat s žádnými jinými materiály [26].

4.2.1 Výroba kameniva z cihlové sutě

Výroba cihelného recyklátu ze sutě, kterou získáme při demolici je třístupňová:

1. Při prvním třídění se oddělují nežádoucí materiály, které se do sutě mohou na stavbě dostat. Nejčastěji to jsou železo, dřevo nebo trubky (Obrázek 22).

2. Dalším krokem je primární drcení vytríděného materiálu, které se provádí pomocí čelistových nebo odrazových drtičů. A pokud je to potřeba, tak následně drcení na kuželovém drtiči.
3. Poslední fází výroby je poté třídění nadrceného materiálu podle frakcí. Příliš velké kusy, tedy kusy větší jak 80 mm, se vrací opět do procesu drcení. Zbylý materiál se povětšinou třídí do třech frakcí a to 0/8 (popřípadě 0/16), 8/32 (nebo 16/32) a 32/80 (někdy také 32/85).

V některých zemích se recyklované cihlářské výrobky velmi jemně melou a z poté se z nich opět cihlářskou technologií po vylisování vypalují cihly, které se navíc barví do téměř červených odstínů pro dosažení profesionalizovaného vzhledu [26]. Díky tomuto postupu mají tyto „recyklované cihly“ vlastnosti srovnatelné s původními výrobky a zároveň jsou přibližně o 20 % levnější [27]. Používají se pro terénní úpravy, vnitřní i vnější úpravy stěn a fasád a pro umělecké projekty.

4.2.2 Vlastnosti cihelného recyklátu

Vlastnosti cihelného recyklátu závisí na jakosti surovin původního materiálu, ze kterého byl recyklát vyroben. Vždy je u něj však nevýhodou vysoká nasákavost a tudíž riziko poškození mrazem. Také mají malou odolnost proti otlukovosti a není ani vhodný do konstrukčních vrstev. Jeho cena je ovšem oproti přírodním a umělým kamenivům velmi výhodná [28].

4.2.3 Použití cihelného recyklátu

Cihelný recyklát v dnešní době nabízí podstatně širší možnosti využití než je doposud všeobecně známo:

- Užitím jako kamenivo do betonu se vyrábí cihlobeton, který lze použít jako výplňové zdivo v monolitických konstrukcích nebo také pro výrobu prefabrikovaných prvků k přípravě vibrolisovaných tvárnic a stěnových prvků.
- Plniva malt pro zdění, s užitím drobných frakcí a to do 4 mm. Takovéto malty mají vyšší tepelný odpor než malty s přírodním kamenivem.
- Využití ve stabilizovaných podkladech a nestmelených vrstvách vozovek nebo také jako podklad pro příjezdovou cestu.
- Výroba nepálených lisovaných cihel s užitím frakce recyklátu 0/16 a s nízkých procentem přidané hlíny, jejichž pevnost v tlaku po 14 dnech dosahuje hodnoty 8 MPa. Tyto cihly se uplatňují především u restaurování historických staveb a lze je také užít jako drenážní vrstvu či výplň, která výrazně nezatěžuje nosnou konstrukci [29].
- Zásyp pro zemní práce.

Úlomková a těsná struktura drcených cihel má podle istanbulske studie za následek nízkou retenci vody, vysokou hmotnost a nedostatek pórovitosti pro provzdušňování kořínků. Z těchto, a dalších důvodů, jako je vysoká koncentrace těžkých kovů v cihelném recyklátu, není její užití do substrátu zelené střechy vhodné. Je však výhodné užití malého množství cihelného recyklátu v kombinaci s lehkými materiály, které podporují provzdušňování substrátu [21].



Obrázek 22: Neroztřízený cihlový recyklát [28]

4.3 BETONOVÝ RECYKLÁT

Betonovému recyklátu (Obrázek 25) byla v posledním desetiletí věnována velká pozornost, zvláště potom jako náhrady přírodního kameniva pro výrobu konstrukčních betonů nebo jako levná alternativa ke štěrku.

Mnoho nových projektů má počátek v demolici betonových základů, chodníků, příjezdových cest a jiných betonových konstrukcí. Způsob recyklace závisí na velikosti a tvaru materiálu. Opětovné užití recyklovaného betonu snižuje náklady na novou výstavbu a také náklady při demolici na likvidaci a skládce, je prospěšné pro životní prostředí a prodlužuje životnost skládek [30].

Ve Velké Británii tvoří betonový recyklát více než 25 % z celkového množství použitých kameniv a udané procento stále roste, díky snaze snížení množství odpadu na skládkách [1].

4.3.1 Technologie recyklace betonu

Betonový recyklát se nejprve primárně drtí na čelistových či nárazových drtičích a pokud je to potřeba, užívá se i sekundární drcení. Následně se prosévá kvůli odstranění nečistot a také pro roztřízení na jednotlivé frakce. Pro odstranění nežádoucích prvků z recyklátu se také užívá například vodní flotace, odlučovače, magnety a další [30].

4.3.1.1 Stacionární recyklační linky

Součástí recyklační linky (Obrázek 23) mohou být speciální vysokorychlostní víceúrovňové mlýny, které slouží k mechanicko-chemické aktivaci a ke sjednocení hladkosti materiálu, aby byl lépe využitelný pro další použití a které navíc dosahují těchto výsledků s velmi nízkou spotřebou energie [31].

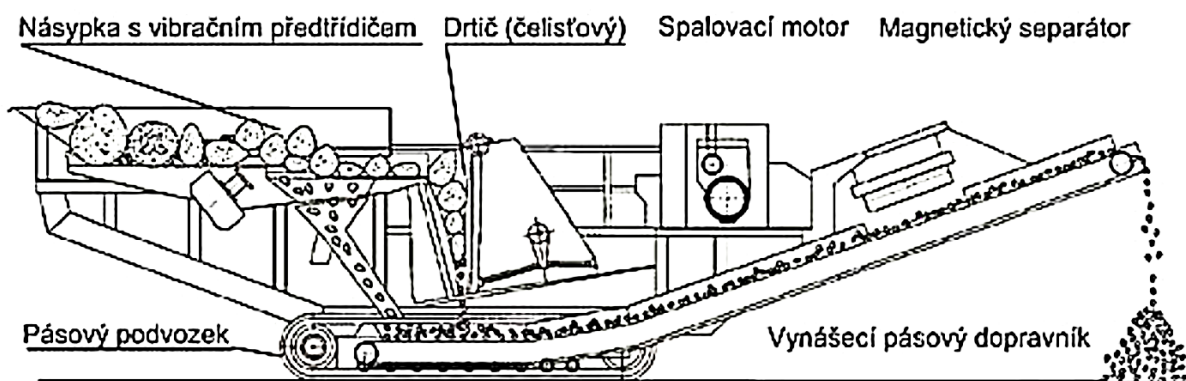


Obrázek 23: Model recyklační linky na betonové odprašky. Zleva: zkrápěcí komora, odsávací zařízení, vysokorychlostní mlýn, vibrační dopravník, třídič materiálu a plnič Big-Bagu [31].

Zkrápěcí komora slouží k odloučení pevných částic z prachu vznikajícího při mletí a je vybavena systémem filtračních trysek. Odsávací zařízení slouží k odsávání namletého materiálu společně se vzduchem, který zde proudí skrz nasýpací otvor mlýna. Součástí odsávacího zařízení je i cyklón, který separuje prach od namleté suroviny, která poté pokračuje dávkovacím turniketem na vibrační dopravník. Odloučený prach putuje do zkrápěcí komory, ve které je eliminován. Vibrační dopravník transportuje materiál do třídiče a je navíc vybaven sítí, na kterém dochází ke zchlazení materiálu a díky vibracím také k prosívání jemných částic. Pro chlazení materiálu na bezpečnou teplotu je v horní části dopravníku umístěn ventilátor. Třídič materiálu rozděluje surovinu podle hrubosti do třech různých frakcí. Jemný a hrubý prach putuje do Big-Bagu, zatímco hrubý materiál zachycený na síti se pomocí šnekového dopravníku vrací do mlýna. Pomocí korečkových dopravníků je materiál dopraven do Big-Bagu, kde jedna násypka slouží pro kamenivo do 0,5 mm a druhá pro kamenivo nad 0,5 mm [31].

4.3.1.2 Mobilní recyklační linky

Výhodami mobilních recyklačních linek (Obrázek 24) jsou kompaktnost a nižší provozní a pořizovací náklady. Naopak nevýhodami jsou velké rozměry a hmotnost stroje, s čímž souvisí i problémy s přepravou celé soupravy [32].



Obrázek 24: Schéma kompletní recyklační linky na beton [32].

Násypka s vibračním předtřídičem separuje drobné zahliněné podíly z podavače. Celý třídící uzel může být tvořen vícesítovým třídícím, ne pouze jedním sítím. Drtič je nejčastěji čelistový, může však být i odrazový či kuželový. Odtahový pás je osazen magnetickým separátorem, který z betonového recyklátu odděluje kovové částice. Tento separátor je nutné užít především v případě recyklace železobetonu [32].

4.3.2 Vlastnosti betonového recyklátu

Zrna recyklovaného betonu vykazují vhodný tvarový index a mají nižší objemovou hmotnost, než některá běžně užívaná kameniva ($2000\text{--}2300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ale vyšší nasákavost (5-10 % i více). Obsah drčeného betonu nepříznivě ovlivňuje konzistenci betonové směsi, proto je nutná vyšší dávka vody, což má za následek nižší pevnosti výsledného produktu. Hrubá frakce recyklátu neovlivní zpracovatelnost směsi, zatímco drobné frakce zpracovatelnost směsi zhoršují. Také je nutné sledovat množství SO_3 (oxidu sírového) v drčeném betonu.

Pevnost v tlaku výsledných výrobků z recyklovaného betonu je o 4-20 % nižší, než v betonech z přírodního kameniva. Stejně tak statický modul pružnosti je nižší a to o 15-30 %. Naproti tomu součinitel dotvarování je přibližně o 50 % vyšší a také smršťování je vyšší o 20-40 % [33].

4.3.3 Použití betonového recyklátu

Betonový recyklát se nejčastěji užívá pro opravy překopů, komunikací a chodníků jako konstrukční vrstva, a to ve všech frakcích. Frakce 0/16 je pak vhodná pro užití do betonových směsí pro podkladní betony. Frakce 9/16 se užívá pod zámkovou dlažbu. Frakce 16/32 do základových desek a pásů, jelikož má vyšší pevnost, než standartní suťový recyklát. Frakce 16/63 poté pro drenáž nově budovaných ploch. A frakce 63/120 pro staveništní příjezdové komunikace, kde je potřeba se zbavit vlhkosti.

Dále se užívá jako kamenivo do nově vyráběných betonů nižších pevností, do asfaltových pásů nebo malt pro zdění, pro nestmelené a hydraulicky stmelené směsi, pro zemní práce, pro posyp a zásyp inženýrských sítí, jako podkladní vrstva komunikací a zpevněných ploch, na stavební komunikace, lesní cesty, protihlukové valy a jiné terénní úpravy. Lze jej také použít do živichných směsí nejen pro výstavbu, ale také opravu živichných vozovek, ovšem za předpokladu dodržení receptur a pracovních postupů daných příslušnými normami [33].

Z provedeného výzkumu v Istanbulu vyplývá, že užití betonového recyklátu není do substrátu zelené střechy výhodné. Podporuje sice provzdušňování a odvodnění kořenů, ale voda odtéká příliš rychle, nepodporuje schopnost retence a má příliš vysokou hmotnost. Je ovšem velice výhodné jej užít v kombinaci s lehkým materiálem, který by pomáhal zadržovat dešťové srážky [21].



Obrázek 25: Betonový recyklát [34]

4.4 ASFALTOVÝ RECYKLÁT

Asfalt je materiál, který lze recyklovat téměř ze 100 %. Například v silničním stavitelství se opětovně využívají materiály získané frézováním vozovek. U každého asfaltového recyklátu je nutné znát obsah dehtu, který se nechává kontrolovat akreditovanou laboratoří, jelikož je dehet klasifikován jako karcinogenní látka.

Asfaltový materiál na recyklaci (Obrázek 26) se získává recyklací různých vrstev vozovky, z asfaltových směsí, z litého asfaltu, z penetračních a vsypných makadamů, nátěrů a emulsních kalových zákrytů. Obsah asfaltu by měl dosahovat minimálně 3,5 % [33].

4.4.1 Použití asfaltového recyklátu

Dříve se asfaltový recyklát přidával do směsí vyráběných za horka v obalovnách, zatímco v posledním desetiletí se prosazuje tzv. recyklace za studena. V tomto případě se recyklovaný materiál v mísících centrech míchá s emulzí a cementem nebo asfaltovou pěnou.

Následně se asfaltový recyklát užívá na výrobu hutněných asfaltových vrstev, směsí stmelených hydraulickými nebo asfaltovými pojivy, pro nestmelené podkladní vrstvy, při podsypech komunikací, do podkladových vrstev pro betonové a asfaltové plochy nebo také do mokré zeminy pro zlepšení jejího hutnění [33].



Obrázek 26: Asfaltový recyklát [35]

4.5 RECYKLOVANÉ ŽIVIČNÉ KAMENIVO

Staré živičné úpravy často obsahují dehtová pojiva, které není možné zpracovávat za horka a proto je nutné je upravovat před jejich opětovným užitím.

4.5.1 Použití živičného recyklátu

Bez přídavku nového pojiva se živičné recykláty užívají jako spodní podkladní vrstvy pro málo zatížené vozovky a pro zpevnění štěrkopískových podsypných vrstev. Nesmí ovšem obsahovat žádné škodliviny, především dehtové látky.

S přídavkem hydraulického pojiva, například cementu, vápna nebo strusky, a jejich následným zpracováním z živičného recyklátu lze vytvořit nové, spodní i horní stmelené podkladní vrstvy lehce až středně zatížených vozovek (Obrázek 27). Dále také při výstavbě chodníků, parkovišť apod.

Emulze se přidává do recyklátů, které obsahují dehtové pojivo, jelikož obalí staré částice a tím zamezí úniku škodlivých látek do povrchových či podzemních vod. Následně se také užívají do podkladních vrstev méně zatížených vozovek.

Kombinací emulze a cementu, které se přidají k recyklovanému materiálu vznikne směs, která má vyšší pevnost právě díky cementu a svojí hydratací spotřebuje i jisté množství vyštěpené vody. Tento způsob se jeví jako nejvýhodnější [36].



Obrázek 27: Oprava komunikace vsypem živičného recyklátu [37]

4.6 RECYKLACE PLASTŮ

Plasty, které jsou nazývány materiálem 21. století, mají druhé největší uplatnění právě ve stavebnictví. Plast je jedním z nejpobulárnějších materiálů dnešní doby, nyní používáme asi dvacetkrát více plastu, než před 50 lety [38]. Plasty se recyklují termicky, chemicky, mechanicky či biologicky. Při recyklaci plastů je důležité materiál primárně co nejkvalitněji vytřídit. Třídění se provádí hlavně automaticky s pomocí ručního třídění, aby bylo zajištěno, že byly odstraněny všechny znečišťující prvky. Například plastové sáčky nebo počítačové klávesnice může být velice obtížné recyklovat. Šálky na kávu lze také recyklovat, ovšem pouze pomocí speciálního stroje k tomu určenému. Obecně proto platí, že z veškerého odpadního plastu se nakonec recykluje průměrně 30 %. Po kvalitním roztřídění podle druhu plastu se výrobky drtí či melou na menší částice, tzv. vločky nebo se roztaví a vytvoří se z nich pelety. Vločky se promývají a poté se z nich většinou vyrábí granulát, ze kterého jsou následně vytvořeny nové výrobky [38].

V Číně například, je objem recyklovaných plastů dán poptávkou po recyklovaném zboží a také vedením měst, jestliže je poptávka po recyklovaných plastech vysoká, pak recyklační společnosti vykupují odpad z plastových materiálů a recyklují jej [39]. Ve Velké Británii se zase některé

vhodné plasty kompostují, a to buď v městských sběrech zeleného odpadu nebo přímo v domácnostech pomocí kompostérů [38]. Jedná se o kompostovatelné, neboli biodegradabilní plasty, které jsou vyráběny ze zemědělských produktů, tedy z plně obnovitelných přírodních zdrojů [40].

Některé plasty se vyrábějí z cukrů obsažených například v kukuřici nebo jiných rostlin bohatých na škrob, jako je například maniok, ale většina plastů se v současnosti vyrábí z ropy. Ropa je tvořena organickým materiálem a její vytvoření trvá několik milionů až desítek milionů let, z lidského hlediska se tedy jedná o neobnovitelný zdroj, proto je recyklace plastů důležitá [39].

Dnes existují dva typy polymerů, a to elastomery a plastomery. Elastomery jsou polymery, které lze snadno, za použití malé síly, deformovat bez porušení. Vzniklé deformace jsou většinou vratné. Nejčastěji užívanými elastomery jsou kaučuky, z nichž se vyrábí guma. Plastomery jsou oproti elastomerům tvrdé a obvykle i křehké, ale při zvýšené teplotě se stávají plastickými a velice dobře tvarovatelnými. Dále se podle chování při zahřátí a následném ochlazení dělí na termoplasty a reaktoplasty [41]. Pokud je proběhlá změna z plastického stavu do stavu tuhého vratná a opakovatelná, poté hovoříme o termoplastech. Po jejich užití lze opět roztavit a tvarovat do požadovaných tvarů a tudíž jsou zcela recyklovatelné. Pokud je tato změna ovšem nevratná, jedná se o reaktoplasty. Ty totiž ve své struktuře obsahují polymery, které po zahřátí plastu vytvoří v jeho struktuře síť, jenž tvoří nevratnou chemickou vazbu a za použití jakkoli vysoké teploty je nelze přetavit na nový materiál a proto jsou nerecyklovatelné [39].

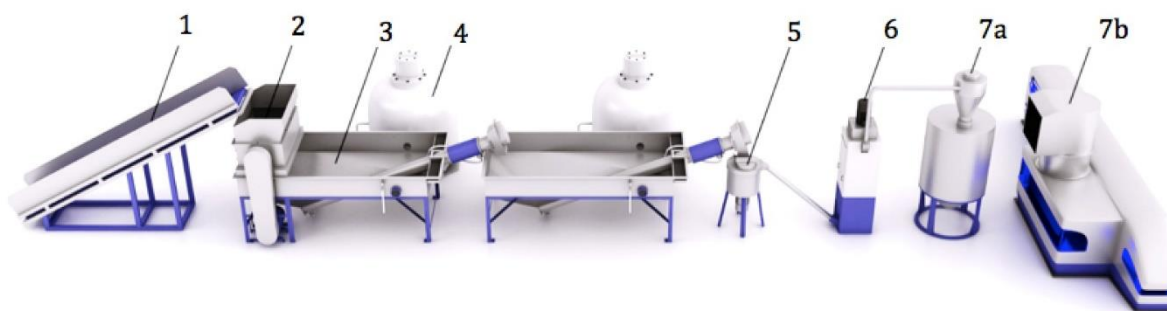
Plasty jsou tvořeny polymerními řetězci uspořádanými do opakujících se jednotek, které jsou mnohem delší než u přírodních materiálů. Díky nim jsou plasty silné, lehké a pružné, ale recyklací se materiál opotřebovává a jeho pro nás výhodné vlastnosti se zhoršují. Běžný plast lze recyklovat 2-3krát, než jeho kvalita poklesne na tolik, že již nebude možné jej užít. Ale i takové materiály lze opět užít, pokud se k nim po recyklaci přidává část nově vzniklého plastu. Díky tomu mají recyklované plasty téměř srovnatelné vlastnosti s nově vzniklými [39].

Doba rozložitelnosti plastu nebyla dodnes stanovena, jelikož se ještě žádný z plastových výrobků zcela nerozložil. Někteří vědci odhadují jeho dobu rozkladu na 450-1000 let, jiní tvrdí, že se nerozloží nikdy. Z tohoto pohledu je při dnešním množství vyráběných plastů důležité recyklovat co nejvíce plastových výrobků [39].

4.6.1 Recyklační linky na plasty

Díky recyklačním linkám (Obrázek 28) je možný proces renovace zbytkových nebo odpadních plastů. Například na výrobní lince PET lahví lze recyklovat samotné PET lahve, zmetky z výroby lahví, odpad z výroby fólií a vázacích pásek apod. Pomletý materiál se usazuje v sedimentační vaně, čímž od použitelné suroviny oddělíme materiál z víček lahví [42].

Při použití recyklátu opět na výrobu PET lahví slouží tzv. in-line metoda, při níž na sebe jednotlivá zařízení přímo navazují a není tak nutná regranulace materiálu a je možno z něj přímo vyrábět tažené fólie, textilní vlákna, obalové pásy a další výrobky, čímž jsou zároveň snižovány náklady na výrobu [42].



Obrázek 28: Schéma recyklační linky na PET lahve. 1 – dopravníkový pás, 2 – nožový mlýn, 3 – sedimentační vana se šnekovým vyprazdňováním PET, 4 – čistička (s chemikáliemi), 5 – nízkootáčková bubnová odstředivka, 7a – silo, 7b – regranulační linka [42].

4.6.2 Využití recyklovaných plastů

Recyklovaný plast má využití ve všech odvětvích lidské činnosti. Z plastu vyrábíme vstřikovací formy, potrubí, chladicí jednotky, vzduchotechniku, ploty a zábradlí, těsnící, filtrační a izolační materiály, hydroizolační membrány, okapové žlaby, okenní a dveřní profily, nádrže a zásobníky, bazény, žumpy, palety, zastřešení, dopravníky, mísiče a míchadla, lapače olejů a tuků, automaty, plexisklo, interiéry automobilů a nárazníky, průmyslová kola, nábytková kolečka a jiné části nábytku, kompostéry, vany, části mobilních telefonů, gumu, podešví do obuvi, oblečení, zátky, lahve, obaly na potraviny, dózy, dávkovače, celofán, tašky, sáčky, pytle, fólie s tiskem, kanistry, formy, bublinkové a balící fólie, zakrývací plachty, květináče, dokonce i jídlo a mnoho dalších [43].

PET láhve slouží pro výrobu polyesterových vláken, které lze posléze užít pro izolační účely. PE fólie se mechanicky a tepelně zpracovávají na aglomeráty a granuláty, ze kterých se opět vyrábí fólie. Znečištěný pěnový polystyren se užije při výrobě lehkého betonu, izolačních omítek, zásypů a také pálených cihel, které díky jemu mají lepší izolační vlastnosti. A směsné plasty lze užít při výrobě dlažeb, obrubníků, plotovek, kabelových žlabů a desek [44].

Plasty mají jen malé nároky na údržbu, dlouhou životnost a za běžných podmínek mají vysokou trvanlivost, a to i jako recyklované materiály. Proto obecně nacházejí největší uplatnění především ve venkovním prostředí, kde často nahrazují jiné stavební materiály, jako jsou dřevo či beton. Nejčastěji jako ploty, střešní krytina (Obrázek 29), terasová prkna nebo zahradní nábytek [45].



Obrázek 29: Střešní tašky z recyklovaného plastu [45]

4.7 RECYKLACE SKLA

Skleněný odpad lze výhodně využívat jako druhotnou surovinu. Sklo totiž, stejně jako kovy, lze na rozdíl od plastů recyklovat nekonečně, aniž by docházelo ke ztrátě kvality nebo chemické čistoty výsledného produktu. Do procesu recyklace není, jako u plastů, teoreticky nutné přidávat čistý materiál, díky tomu je recyklace skla a také kovů konečnou formou oběhového hospodářství, které bylo prezentováno na začátku druhé kapitoly. Proto lze sklo opětovně užívat bez vzniku jakéhokoli odpadu z výroby či recyklace. Recyklované výrobky navíc dosahují stejných vlastností jako původní a jsou zdravotně nezávadné. Sklo jako forma balení bylo objeveno již před více než 5000 lety a i přes výše uvedené vlastnosti sklo často nahrazujeme plast a to ze tří důvodů. Prvním důvodem jsou nižší náklady na dopravu, jelikož sklo je těžší než plast. Dalším důvodem je bezpečnější užívání plastových výrobků a posledním důvodem je zisk, jelikož plast se málokdy rozbije, kdežto sklo je velice křehké, důsledkem čehož mají firmy užívající skleněné výrobky vyšší ztráty [39].

Užívání recyklovaných skleněných výrobků šetří neobnovitelné přírodní zdroje, kterými jsou písk, dolomit, vápenec, živec a další. To znamená méně zásahů do přírody, pokles energetické náročnosti výroby, snížení emisí CO₂ a méně odpadu na skládkách [46]. V porovnání s recyklací jiných materiálů či samotných výrob nových, je recyklace skla časově nenáročná. Například z recyklované lahve nebo sklenice lze do tří dnů vyprodukovat nový skleněný výrobek [47]. Recyklace skla je ovšem náročná z hlediska bezpečnosti. Málokdy dochází k recyklaci plnohodnotných výrobků, většinou se jedná o částice původního výrobku a rozbité sklo představuje bezpečnostní riziko nejen pro pracovníky, ale může také vážně poškodit stroje při své recyklaci. Pokud se sklo rozbije na jemné podíly, je obtížné jej opět zpracovat. Podle portálu „Recycle Across America“ proto více než 28 miliard skleněných lahví a sklenic končí každý rok na skládkách. Problém při recyklaci skla může působit i jeho vysoká hmotnost [48].

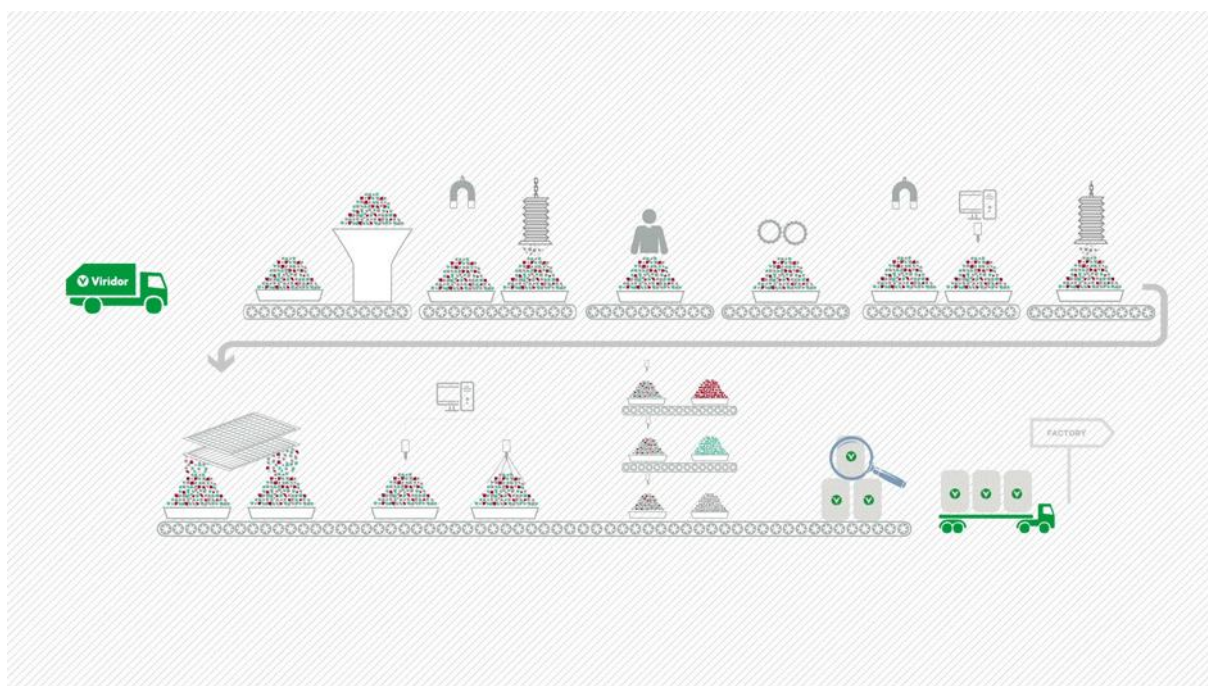
Během posledních dvou desetiletí byly některé skleněné výrobky nahrazeny hliníkem anebo plastem. Nejčastěji se jedná o hliníkové lahve [48].

Skleněný odpad se dělí do dvou skupin. První skupinou je odpad z výroby skla a skleněných výrobků. Do druhé skupiny spadají skleněné obaly, autovraky, skleněný odpad ze stavební a demoliční činnosti a komunální odpad [46]. Ve Velké Británii se ve dvou specializovaných recyklačních zařízeních recyklují všechny druhy barevného skla a ze skleněného recyklátu vyrábějí vysoce kvalitní výrobky pro potravinářský, nápojový a dokonce farmaceutický průmysl. Tyto dvě firmy za rok vyprodukují přibližně 250 000 tun recyklátu, které se opět užívají a podporují tím britskou cirkulární ekonomiku. Skleněný odpad z recyklace skla navíc užívají právě ve stavebnictví [47].

4.7.1 Recyklační linky na sklo

Hlavním recyklátorem skla v České republice je společnost ATM s.r.o. v Příbrami. V roce 2015 firma otevřela jednu z nejmodernějších recyklačních linek na sklo (Obrázek 30) nejen u nás, ale i v celé Evropě, proto na jejím příkladu bude popsán postup recyklace skla. Odpadní sklo je zde pomocí nákladních vozů dopraveno na třídící linky. Na počátku linky se odpad třídí ručně. Vybírají se z něj nežádoucí příměsi a hrubé nečistoty, které nejčastěji tvoří zbytky komunálního odpadu. Poté materiál putuje do drtičů, kde je sklo drceno a síťováno pro oddělení jemných podílů. Dopravní pásy jej poté přivedou k separátorům, které odstraňují železné i neželezné kovy. Následně se materiál suší, jelikož pro jeho další zpracování je nutné, aby byl zcela suchý. Další je hlavní část linky, kterou tvoří soustava separátorů. První z nich slouží k odstranění keramiky, kamení, porcelánu, olovnatého skla a netavitelného skla, které dohromady tvoří přibližně 10 %

ze vstupní vsázky. Další odděluje bílé a barevné sklo, třetí barevné sklo dále dělí na zelené a hnědé. Třídění skla na jednotlivé barvy se provádí na základě měření optoelektroniky. Těchto separátorů je zde celkem šest a celá linka je plně automatická. Bílé sklo se dále třídí, aby byla zajištěna jeho vysoká kvalita. Skleněný recyklát se po vytřídění ukládá do sil v podobě skleněného granulátu. Ten je poté nakládán a transportován do sklářských hutí, kde se z něj vytváří nové výrobky [49].



Obrázek 30: Proces recyklace skla [47].

4.7.2 Využití skelného recyklátu

V dnešní době v sobě téměř každá skleněná lahev částečně obsahuje recyklovaný materiál. Sklářský průmysl byl první, který začal využívat skleněný odpad, a to ze své vlastní výroby skleněných výrobků a vracet jej zpět do výroby. Často se recyklované sklo užívá k výrobě svítidel [50]. Vysoký podíl skleněné bižuterie a šperků tvoří právě recyklované sklo. Lze z něj také vyrábět kompozitní desky, které se užívají v interiérech koupelen či kuchyň. Tyto desky se skládají z 15 % z cementu, z 85 % z recyklovaného skla a mají vysokou trvanlivost [51].

Drcením skla při recyklaci vzniká podíl podsítné frakce recyklátu, který nelze dále na lince zpracovávat. Tato frakce se využívá na výrobu pěnového skla, které se následně užívá pro zateplení fasád [49]. Recyklované sklo z automobilů se využívá k výrobě sklosilikátových materiálů, ze kterých se nejčastěji vyrábí velkoformátové dlaždice (Obrázek 31) [52]. Povrchy dlaždic z recyklovaného skla mohou být perleťové, lesklé, matné, pískové a další a zákazník si také může určit jakýkoli tvar. Při výrobě asfaltu se může místo písku užít drcené sklo, vzniklý „sklosfalt“ se poté užívá při výstavbě chodníků, díky své trvanlivosti a houževnatosti. Drcené sklo dále může například částečně nahradit suroviny pro výrobu betonu a často se užívá při rekultivaci [50]. Obecně lze jemně podrceným skelným recyklátem nahradit písek ve všech oborech stavebnictví a hrubějším materiálem poté štěrk. Proto se užívá jako zásyp pro základy, zásyp potrubí a příkopů a do povrchu vozovek [51].



Obrázek 31: Sklosilikátové dlaždice z recyklovaného skla [52].

5 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Zelená střecha je vzhledem k probíraným vlastnostem v kapitole 1.2 Výhody a nevýhody užívání zelených střech, ekologicky a ekonomicky prospěšnou náhradou za běžně užívané systémy střech. I přes tuto skutečnost lze stále zelené střechy provádět ekologičtější cestou, vzhledem k užívání některých materiálů, jejichž výroba není šetrná k životnímu prostředí, jako jsou například polypropylenové a polyesterové geotextílie, polystyrénové panely, asfaltové a PVC membrány a další. Stejně tak běžně užívané kamenivo lze v zelených střechách nahradit ekologičtější formou, která bude splňovat potřebné parametry. Tato práce se věnuje právě tomuto tématu. Těžba kameniv a jejich další úprava a zpracování jsou ekonomicky i ekologicky náročné, mají negativní dopad na přírodu a jedná se o neobnovitelné zdroje. Recyklované kamenivo je proto vhodnou náhradou přírodního kameniva při dodržení požadavků na jejich použití.

Ve Španělsku vznikly v roce 2013 experimentální budovy se zelenými střechami, jejichž drenážní vrstva byla tvořena recyklovaným odpadem z pneumatik. Měřením bylo stanoveno, že tento recyklát je o 30- 50 % lehčí, poskytuje 8x lepší izolaci, než štěrk a 10x lepší drenáž, než dobře tříděná půda. Zároveň předběžné studie ukázaly, že užití recyklované pryže z pneumatik nebo gumové drtě není nebezpečné pro lidské zdraví ani pro životní prostředí [53].

Prozkoumáním vlastností a především funkce zelené střechy by teoreticky mělo být, pro užití do její konstrukce, nejvhodnější aplikovat materiály s následujícími vlastnostmi:

- co nejnižší hmotnost na jednotku objemu pro co nejmenší zatížení konstrukcí;
- vysoká nasákavost pro zpomalení odtoku dešťové vody a pro dodání živin vegetaci;
- vysoká mechanická odolnost proti vlivu zatížení;
- vysoká odolnost proti mrazu a povětrnostním podmínkám;
- neutrální nebo lehce kyselá hodnota pH.

Na základě nastíněných požadovaných vlastností byly v experimentální části práce zvoleny vhodné zkoušky pro jejich ověření na vybraných recyklovaných materiálech.

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Na základě rešerše bylo zjištěno, že recykláty lze s nejvyšší účinností teoreticky využít do drenážní vrstvy nebo jako částečná náhrada substrátu zelené střechy. Vzhledem k tomu byly, pro ověření vlastností recyklátů v laboratorních podmínkách, navrženy následující zkoušky:

- Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva
- Stanovení objemové hmotnosti zrn
- Stanovení nasákavosti hrubého kameniva nasáklého do ustálené hmotnosti
- Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor
- Stanovení pevnosti v tlaku
- Stanovení pH
- Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování

Poslední uvedená zkouška, a to stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování, nebyla v rámci této práce prováděna. Vzhledem k vládním epidemiologickým nařízením, byl přístup do laboratoří, v období vypracování této bakalářské práce, omezen a proto tato zkouška nebyla pro svoji časovou náročnost provedena. Pro celkové zhodnocení vhodnosti jednotlivých recyklátů by však bylo vhodné tuto zkoušku provést. Substrát zelené střechy je totiž po celou dobu plnění své funkce vystaven právě účinkům mrazu, především v zimním období.

Zkoušenými vzorky byly tři typy recyklátů, a to betonový recyklát, cihelný recyklát a kamenivo vyrobené ze skelného recyklátu, kterým bylo pěnové sklo Refaglass.

6.1 STANOVENÍ SYPNÉ HMOTNOSTI A MEZEROVITOSTI VOLNĚ SYPANÉHO KAMENIVA DLE ČSN EN 1097-3

Materiál je při vytváření substrátu zelené střechy volně sypán na již vytvořené vrstvy konstrukce střechy a následně není záměrně stlačován či jinak zhutňován. Z tohoto důvodu, byla stanovena sypná hmotnost vybraných recyklátů, která tedy udává hmotnost kameniva na 1 m³ a udává tak hodnotu zatížení nižších vrstev zelené střechy při pokládání substrátu. Pokud by byl substrát hutný, zadržoval by dešťové srážky, což není vhodné jak pro konstrukci střechy, tak především pro samotné rostliny. Pokud by naopak byl mezerovitý, voda by mezi jednotlivými zrny protékla za krátký časový úsek a méně odolné rostliny by uhynuly v důsledku nedostatku vláhy. Proto byla stanovena také mezerovitost.

Zkouška byla prováděna na betonovém, cihelném a kamenivo Refaglass frakce 4/16 mm. Kamenivo bylo před měřením vysušeno v sušárně do ustálené hmotnosti. Zkouška byla prováděna v nádobě o objemu 5 dm³ a hmotnosti 5,33 kg. Sypání bylo prováděno dle postupu daném normou ČSN EN 1097-3. Podstata zkoušky spočívá ve zjištění hmotnosti vysušeného kameniva v odměrné nádobě (Obrázek 32) a vypočtení sypné hmotnosti volně sypaného kameniva. Mezerovitost v procentech se poté vypočte ze sypné hmotnosti volně sypaného kameniva a objemové hmotnosti zrn kameniva. Výpočet sypné hmotnosti volně sypaného kameniva byl proveden podle následujícího vzorce:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

- kde ρ_b sypná hmotnost volně sypaného kameniva [Mg•m⁻³];
 m_2 hmotnost nádoby se zkušební navážkou [kg];
 m_1 hmotnost prázdné nádoby [kg];
 V objem nádoby [l].

Výpočet mezerovitosti volně sypaného kameniva byla provedena podle následujícího vzorce:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100$$

kde v mezerovitost [%];

ρ_b sypná hmotnost volně sypaného kameniva [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$];

ρ_p objemová hmotnost zrn kameniva stanovená dle ČSN EN 1097-6 [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$];



Obrázek 32: Vážení vzorku volně sypaného betonového recyklátu.

Tabulka 1: Výsledky stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva.

Zkoušený materiál	Sypná hmotnost	Mezerovitost
	[$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$]	[%]
Betonový recyklát	1,16	52,7
Cihelný recyklát	0,75	69,9
Refaglass	0,16	54,3

6.2 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ZRN KAMENIVA DLE ČSN EN 1097-6

Zelené střechy nemusí být pochozí, ale minimálně na ně, stejně jako na jiné typy střech, musí být umožněn přístup pro kontrolu a údržbu střešního pláště. U zelených střech je tato možnost kontroly povrchu střechy důležitější než u jiných střech, a to právě z důvodu kontroly zeleně a případného zabránění úhynu rostlin. Většina zelených střech je ovšem pochozích, mnohdy s úzkými dlážděnými chodníky a jsou vybaveny zahradním nábytkem. Samotná vegetace na střeše taktéž zatěžuje substrát, ze kterého vyrůstá. Při tvorbě substrátu je kamenivo volně sypáno, ale při plnění své funkce je po celou dobu zatěžováno různými vlivy a proto byla stanovena i objemová hmotnost zrn kameniva.

Zkouška byla prováděna na betonovém, cihelném a kamenivu Refaglass frakce 4/16 mm. Kamenivo bylo před měřením vysušeno v sušárně do ustálené hmotnosti. Zkouška byla prováděna v pyknometrech o objemu přibližně 2 l. Sypaní bylo prováděno dle postupu daném normou ČSN EN 1097-3. Podstatou zkoušky je stanovení objemové hmotnosti zrn výpočtem z podílu hmotností pyknometru s navážkou kameniva a objemu pyknometru. Pyknometr byl

zvážen nejprve samostatně, poté s navážkou vysušeného kameniva a následně s navážkou kameniva, doplněn vodou až po rysku (Obrázek 33). Objemová hmotnost zrn byla vypočtena z následujícího vzorce:

$$\rho_p = \frac{(M_2 - M_1)}{V - (M_3 - M_2)/\rho_w}$$

- kde M_1 hmotnost pyknometru a nálevky [g];
 M_2 hmotnost pyknometru, nálevky a dílčí navážky [g];
 M_3 hmotnost pyknometru, nálevky, dílčí navážky a vody [g]
 V objem pyknometru [ml];
 ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$]



Obrázek 33: Vážení pyknometru naplněného vzorkem cihelného recyklátu a vodou.

Tabulka 2: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zrn.

Zkoušený materiál	Objemová hmotnost
	$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$
Betonový recyklát	2,45
Cihelný recyklát	2,49
Refaglass	0,35

6.3 STANOVENÍ NASÁKAVOSTI HRUBÉHO KAMENIVA NASÁKLÉHO DO USTÁLENÉ HMOTNOSTI DLE ČSN EN 1097-6

Zelená střecha je po celou dobu plnění své funkce vystavena povětrnostním vlivům. Při dlouhodobých silných srážkách částečně zadržuje vodu a zpomaluje její odtok do kanalizace. Je to možné především právě díky vhodné nasákavosti kameniva, které tvoří substrát nebo drenážní vrstvu. Pokud by kamenivo nebylo dostatečně pórovité a tudíž nasákavé, vody by ze střechy odtekla v krátkém časovém úseku a zatěžovala by kanalizaci. Proto jsou recykláty vhodné pro vytvoření substrátu právě díky vyšší pórovitosti, než jakou mají původní suroviny, ze kterých vznikly. Pokud by ovšem byly příliš nasákavé, zadržovaly by velké množství vody, rostliny by byly podmačeny a uhynuly by. Z těchto důvodů byla stanovena nasákavost zkoumaných materiálů.

Zkouška byla prováděna na betonovém, cihelném a kamenivu Refaglass frakce 4/16 mm, dle postupu daném normou ČSN EN 1097-6. Kamenivo bylo zcela ponořeno do vody a ponecháno v tomto stavu do ustálení hmotnosti. Poté byla stanovena jeho hmotnost. Následně bylo vysušeno do ustálené hmotnosti a opět zváženo (Obrázek 34). Nasákavost byla vypočtena podle následující rovnice:

$$WA_{cm} = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$$

- kde ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 M_1 hmotnost zkušební navážky nasáklé a povrchově osušené na vzduchu [g]
 M_3 hmotnost v sušárně vysušené navážky [g]



Obrázek 34: Vážení vzorku nasáklého cihelného recyklátu.

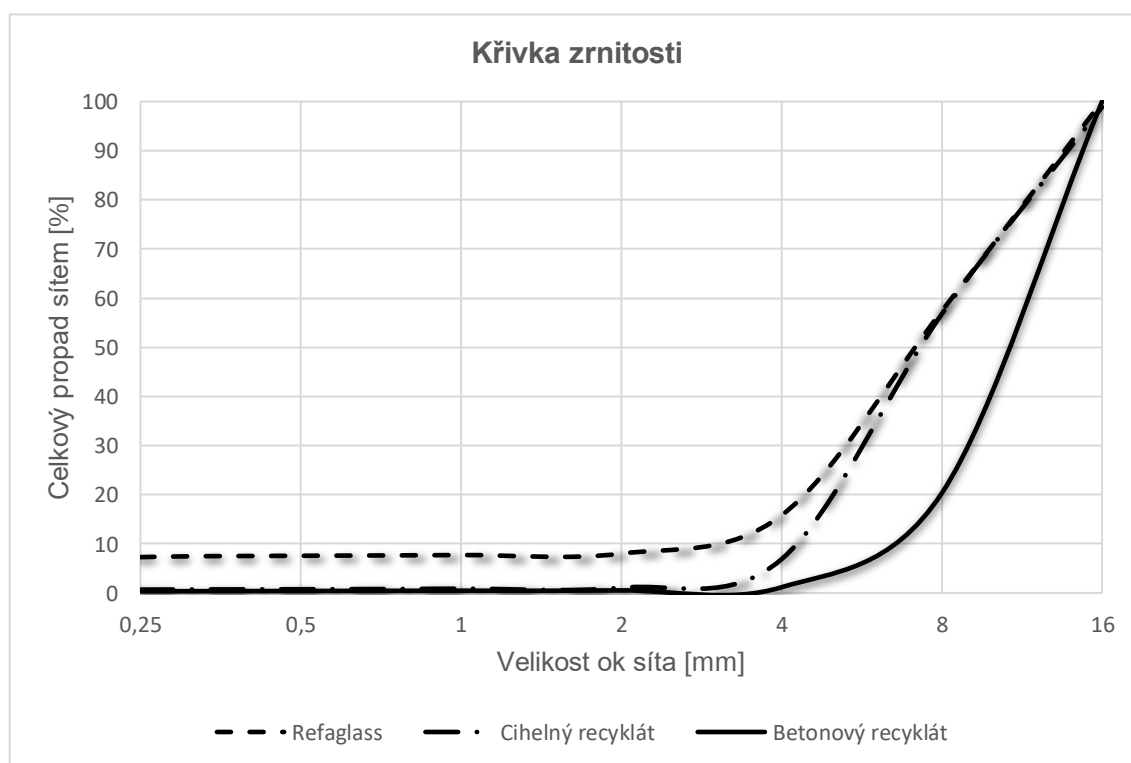
Tabulka 3: Výsledky stanovení nasákavosti.

Zkoušený materiál	Nasákavost
	[%]
Betonový recyklát	5,7
Cihelný recyklát	31,8
Refaglass	79,2

6.4 STANOVENÍ ZRNITOSTI – SÍTOVÝ ROZBOR DLE ČSN EN 933-1

Substrát zelené střechy má vícero funkcí, jednou z jeho nejdůležitějších funkcí je vytvoření vhodného prostředí pro uchycení rostlin a jejich následné zásobování vodou a živinami v ní obsažené. Pokud by kamenivo použité do substrátu mělo nepravidelnou křivku zrnitosti nebo by některá frakce úplně chyběla, voda by protékala mezerami mezi zrna a odtékala by v krátkém časovém intervalu. Rostliny by tak neměly dostatek vláhy. Naopak, pokud by byl substrát příliš hutný, voda by protékala do nižších vrstev ve velice malém množství, zadržovala by se v substrátu a většina rostlin by uhynula podmačením. Z těchto důvodů byl proveden síťový rozbor a byla vytvořena křivka zrnitosti jednotlivých zkoumaných materiálů.

Zkouška byla prováděna na betonovém, cihelném a kamenivu Refaglass frakce 4/16 mm. Kamenivo bylo před měřením vysušeno v sušárně do ustálené hmotnosti. Materiál byl proséván dle postupu daném normou ČSN EN 933-1. Vysušená navážka každého materiálu byla ručně prosívána přes normovou sadu sít o velikosti ok 16, 8, 4, 2, 1, 0,5 a 0,25 mm. Poté byly zváženy zůstatky na jednotlivých sítích, přepočteny na procentuální zastoupení a následně na procentuální propady jednotlivými sítí. Poslední zmíněné hodnoty poté byly vyneseny do grafické podoby, tedy křivky zrnitosti (Obrázek 35).



Obrázek 35: Grafické zobrazení procentuálního propadu materiálu jednotlivými sítí.

6.5 STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU DLE ČSN EN 1097-11

Zelená střecha stejně jako kterákoli jiná, musí být přístupná pro kontrolu pláště, která je možná pouze lidskou přítomností přímo na střeše. Proto je nutné, aby byl substrát dostatečně únosný. Většinu zelených střech tvoří intenzivní porosty, které mohou zahrnovat rostliny většího vzrůstu, jako jsou křoviny nebo dokonce stromy. Často se na nich také vytvářejí umělé chodníky anebo obsahují různý zahradní nábytek pro trávení času na zelené střeše. Z toho důvodu byla stanovena pevnost v tlaku zkoumaných materiálů.

Zkouška byla prováděna na betonovém, cihelném a kamenivu Refaglass frakce 4/16 mm. Kamenivo bylo před měřením vysušeno v sušárně do ustálené hmotnosti. Tlak byl vyvozen způsobem určeným normou ČSN EN 1097-11. Nádoba určená k této zkoušce a specifikovaná v normě, se speciálním víkem, byla naplněna zkoušeným materiálem po horní rysku a poté opatřena víkem. Následně byla vložena do lisu a zatěžována konstantním tlakem až do doby dosažení druhé rysky a tím stlačení vzorku o požadované procento. Zatížení bylo dosaženo do následujícího vzorce a tak vypočtena pevnost v tlaku:

$$C_a = \frac{F}{A}$$

kde C_a pevnost kameniva v tlaku [MPa]

F síla vyvozená lisem [N]

A zatěžovací plocha [mm²]

Tabulka 4: Výsledky stanovení pevnosti v tlaku.

Zkoušený materiál	Pevnost v tlaku
	[MPa]
Betonový recyklát	3,23
Cihelný recyklát	1,20
Refaglass	0,14

6.6 STANOVENÍ pH DLE ČSN ISO 10390

Existují nenáročné rostliny, které snesou kyselou i zásaditou půdu, většině druhů rostlin však vyhovuje neutrální až slabě kyselé pH půdy. Zásadité pH totiž většinou vykazují půdy s vysokým obsahem vápníku a tudíž menším obsahem stopových prvků, jako jsou mangan, železo, bor a další. Tyto prvky však potřebují rostliny pro normální funkci. Naopak kyselé prostředí brzdí činnost mikroorganismů a žížal, čímž se zhoršuje kvalita půdy samotné a tím i prostředí, ze kterého rostliny čerpají energii. Nízké pH ovšem zároveň zlepšuje přijatelnost živin, proto většina rostlin snáší mírně kyselé prostředí. Neutrální pH je ideální, jelikož podporuje biologickou aktivitu. Proto byla stanovena hodnota pH zkoumaných materiálů.

Zkouška byla prováděna na betonovém, cihelném a kamenivu Refaglass. Kamenivo bylo před měřením vysušeno v sušárně do ustálené hmotnosti. pH bylo stanoveno dle ČSN ISO 10390. Podstata zkoušky spočívá ve vytvoření suspenze ze zkoušených vzorků a následném změření pH vytvořené suspenze pH metrem. Vzorky byly před stanovením pH namlety na jemné frakce (Obrázek 36), z té byla vytvořena suspenze, u níž byla stanovena hodnota pH pomocí pH metru.



Obrázek 36: Pomleté vzorky pro stanovení pH. Zleva - cihelný recyklát, skelný recyklát, betonový recyklát.

Tabulka 5: Výsledky stanovení pH.

Zkoušený materiál	pH
	[-]
Betonový recyklát	12,01
Cihelný recyklát	9,40
Refaglass	10,78

6.7 DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Studiem pěnového skla Refaglass byly odvozeny následující skutečnosti. Sypná hmotnost tohoto kameniva dosahovala nejnižší hodnoty ze zkoušených materiálů, a to pouhých $0,16 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Po vytvoření substrátu zelené střechy, využívající tento materiál, bychom dosáhli nejnižšího zatížení spodních vrstev střechy a také nosných konstrukcí celé stavby, ale takto nízká hodnota má i negativní stránku. Při silných poryvech větru, které nejsou na území České republiky výjimečné, by mohl být materiál jednoduše nadnesen proudem větru a odváť mimo plochu střechy. Tato hrozba by mohla být částečně vykompenzována po uběhnutí časového úseku, a to alespoň několika měsíců, během kterých by materiál právě vlivem větru, dešťových srážek a dalších povětrnostních vlivů „dosedal“ na střechu. Tímto procesem, stejně jako postupným prorůstáním kořínků substrátem by se samovolně zhutňoval a tím snižoval riziko odváť jednotlivých částic. Tato vlastnost byla částečně prozkoumána stanovením objemové hmotnosti, která ovšem dosahuje pouze hodnoty $0,35 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a ani tato hodnota není dostatečně spolehlivá pro vyřešení nastíněného problému. Právě díky své nízké objemové hmotnosti, z ní vyplývající vysoké pórovitosti a tudíž i velice nízké schopnosti vést teplo, se nejčastěji užívá jako izolační materiál. Kamenivo Refaglass mělo také zároveň nejvyšší hodnotu nasákavosti, 79,2 %, tudíž dokáže nasáknout velké množství vody, která by měla být po ustání deště postupně uvolňována do okolí, což je jedna z hlavních funkcí zelených střech. Přestože byl materiál před prováděním praktické činnosti roztřízen na jednotlivé frakce a pro měření byla využita pouze frakce 4/16 mm, po sestavení křivky zrnitosti byla patrná přítomnost jemných podílů, a to v hodnotě téměř deseti procent z hmotnosti vzorku. Materiál se tudíž mělní na menší podíly již při běžné manipulaci s ním. O jeho nízké odolnosti vůči „opotřebení“ svědčí i nízká hodnota, $0,14 \text{ MPa}$, pevnosti v tlaku. V důsledku této vlastnosti by nebylo možné použít toto umělé kamenivo ani do drenážní vrstvy ani do substrátu intenzivně ozeleněné střechy či na pochozí střechu, jelikož u něj nelze bezpečně zaručit dostatečnou odolnost vůči zatížení. Hodnotu pH má

stejně jako ostatní testované recykláty vysokou, 10,78. Podle běžně užívaného zatřídění tudíž spadá do slabě zásaditých látek, podle stupnice užívané přímo pro pěstební půdy však spadá do skupiny silně alkalických půd, která počíná již hodnotou 7,7.

Cihelný recyklát dosahoval vyšší sypné hmotnosti, $0,75 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, než kamenivo ze skelného recyklátu, jeho užitím bychom tedy příliš nezatěžovali nosné konstrukce a zároveň je svojí hmotností dostatečně chráněn před odvátím. Na základě těchto výsledků se tedy jeví být ideální volbou pro užití jak do drenážní vrstvy, tak do substrátu zelené střechy. Objemová hmotnost však nabývá přibližně trojnásobné hodnoty jak hmotnost sypná a to $2,49 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, což vypovídá o vysoké pórovitosti recyklátu. Velký rozdíl mezi sypnou a objemovou hmotností poukazuje na vysoké procento otevřené pórovitosti v materiálu. Právě v důsledku této vlastnosti je využití cihelného recyklátu značně omezené například při použití do betonu. Ovšem v případě jeho užití do konstrukce zelené střechy se jedná o výhodu umožňující jeho vhodné užití jak do drenážní vrstvy, tak do substrátu. Hodnota nasákavosti 31,8 % je velice příznivá. Materiál dokáže zadržet relativně vysoké procento srážek a tím nejen zpomalit odtok dešťové vody do kanalizace, ale také poskytnout vegetaci dostatek výživy. Ze zkoumaných materiálů měl cihelný recyklát nejplynulejší křivku zrnitosti, tudíž by při užití do substrátu vytvořil dostatečně hutnou strukturu pro uchycení kořenů. Jeho pevnost v tlaku dosahuje relativně nízké hodnoty 1,20 MPa, ta je ovšem mnohem příznivější, než u pěnového skla, i přes to je to stále velice nízká hodnota a pro jeho užití do substrátu například pochozích nebo intenzivně zatravněných zelených střech, by bylo třeba provést další experimenty. Nejpriznivější ze zkoumaných vlastností cihelného recyklátu, vzhledem k ostatním recyklátům, byla jeho hodnota pH 9,40. Podle stupnice je tedy slabě zásaditý, podle zatřídění pěstebních půd je však silně alkalický.

Hodnocení betonového recyklátu z hlediska sypné hmotnosti vykazuje protikladný problém, než kamenivo vyrobené ze skleněného recyklátu a to vysokou hodnotu sypné hmotnosti $1,16 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jeho hmotnost není závadou, v jejím důsledku se však zvedá požadavek na únosnost a s tím spojené náklady na provedení nosných konstrukcí, stejně jako při užití cihelného recyklátu. Objemová hmotnost je srovnatelná s hodnotou, která byla stanovena u cihelného recyklátu, $2,45 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. U betonového recyklátu byla zjištěna velice nízká, u recyklátů netypická, nasákavost, pouhých 5,7 %. Díky nízké hodnotě nasákavosti je betonový recyklát mnohem více užívaným materiálem, například jako částečná náhrada kameniva při výrobě betonu, než cihelný recyklát. Pro jeho užití do substrátu či drenážní vrstvy je to ovšem nežádoucí vlastnost, jelikož nedokáže alespoň dočasně nasáknout dostatečné množství vody, v důsledku čehož ztrácí střecha retenční funkci. Tuto funkci mohou ovšem plnit další vrstvy střechy, větším problémem, plynoucím z nízké nasákavosti betonového recyklátu, je jeho neschopnost zadržet dostatečného množství vody nutného pro výživu vegetace. Tuto jeho negativní vlastnost ještě více umocňuje vlastnost následující a tou je jeho zrnitost, jelikož je téměř z 80 % tvořen frakcí 8/16 mm na úkor frakcí ostatních. Předpokladem je tudíž méně hutná struktura substrátu vytvořená tímto kamenivem a v důsledku toho zvýšení propustnosti vody substrátem a samozřejmě také drenážní vrstvou. Následující vlastnost, pevnost v tlaku, je ze všech zkoumaných materiálů nejpriznivější právě u betonového recyklátu, kdy dosahuje hodnoty 3,23 MPa. Tento materiál je tedy nejúnosnější ze tří zkoumaných a teoreticky by proto byl nejvyužitelnější například pro tvorbu intenzivně zatravněných střech, pokud by ovšem vykazoval vyšší hodnotu nasákavosti. Ze tří sledovaných druhů recyklátů má betonový recyklát nejvyšší a nejméně vhodnou hodnotu pH 12,01. Jako jediný spadá do zásaditých látek dle běžné stupnice a do silně alkalických půd podle kategorií pěstebních substrátů. Jeho užití by i přesto bylo možné, například okyselením přídavkem rašeliny.

7 ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce je složena ze dvou hlavních kapitol. V první z těchto dvou kapitol byla shrnuta historie zelených střech od starověké Mezopotámie až po současnost, byly zde interpretovány ekologické, estetické, ekonomické a další důvody výstavby zelených střech, kterými jsou navrácení zeleně do měst, vyrovnání kolísání vlhkosti, snížení zátěže kanalizace, zachycování prachových částic, ochrana před přehříváním interiéru v létě a úspora energie na vytápění v zimě, výrazné snížení hluku, především z dopravy, vytvoření přirozeného prostředí pro některé z ohrožených druhů živočichů a v neposlední řadě podpora psychického zdraví člověka. Byly také zhodnoceny negativní dopady spojené s výstavbou zelených střech, kterými jsou především obtížná sanace při poškození, nutné zesílení nosných konstrukcí při rekonstrukci, náročnější péče v průběhu provozu a další. V práci byly následně vysvětleny typy ozelenění, jimiž je intenzivní a extenzivní střešní zeleň. Popsáno bylo také dělení podle sklonu střechy a předloženy možnosti uchycení substrátu při velkých sklonech. Blíže přiblíženy byly jednotlivé vrstvy zelených střech, jimiž jsou tepelná izolace, hydroizolace, ochrana proti prorůstání kořínků, ochrana proti mechanickému poškození, drenážní vrstva, filtrační vrstva, hydroakumulační vrstva, substrát a vegetace. Následující kapitola se věnuje recyklovaným stavebním materiálům. Uvádí příklad užití cihelného a betonového recyklátu například jako 100 % náhradu kameniva v betonu, tzv. Rebetong. A dále rozebírá výrobu, vlastnosti a užití cihelných, betonových, asfaltových, živičných, plastových a skleněných recyklátů.

Na základě znalostí funkce zelených střech a jejich jednotlivých vrstev byly stanoveny zkoušky pro ověření vhodnosti užití vybraných recyklátů do substrátu nebo drenážní vrstvy zelené střechy. Zkoumanými materiály byly betonový recyklát, cihelný recyklát a kamenivo Refaglass vyrobeného ze skleněného recyklátu. A provedenými zkouškami byly stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva, stanovení objemové hmotnosti zrn, stanovení nasákavosti hrubého kameniva nasáklého do ustálené hmotnosti, stanovení zrnitosti, stanovení pevnosti v tlaku a stanovení hodnoty pH.

Experimentálním měřením bylo stanoveno, že všechny zkoumané materiály jsou teoreticky použitelné do substrátu nebo drenážní vrstvy zelené střechy a každý je více či méně vhodný, podle typu střechy. Negativní vlastnosti recyklátů lze kompenzovat jejich kombinací s materiály protikladných vlastností. Nízkou sypnou a objemovou hmotnost skelného recyklátu Refaglass lze vyrovnat například jeho smísením s těžším kamenivem. Výhodným spojením by mohlo být mísení skelného a betonového recyklátu. Tím by mohlo být dosaženo přiměřené hmotnosti materiálu, pěnové sklo by mohlo vyrovnávat nepříznivě nízkou hodnotu nasákavosti betonového recyklátu a ten by naopak zajišťoval dostatečnou nosnost substrátu. Největším problémem, u všech zkoumaných vzorků, je vysoká hodnota pH, ten však lze vyřešit například jejich okyselením přidávkou vhodného materiálu při tvorbě substrátu, či pravidelným hnojením kyselými hnojivy v průběhu užívání zelené střechy.

Závěrem lze konstatovat, že na základě zjištěných skutečností se jako nejvhodnější pro užití do drenážní vrstvy i pro použití jako složky substrátu jeví cihelný recyklát, na který bude zaměřena pozornost v navazující práci.

BIBLIOGRAFIE

1. Mickovski, Slobodan B., a další. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction. *ScienceDirect*. [Online] 11. únor 2013. [Citace: 8. květen 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857413000943>.
2. Nemeček, Petr. 7 divů světa, #5 Visuté zahrady Semiramidiny. *MEMENTO HISTORIA*. [Online] 6. listopad 2019. [Citace: 25. září 2020.] <https://www.memento-historia.cz/clanek/38/7-divu-sveta-5-visute-zahrady-semiramidiny>.
3. Krump, Ing. Miloš. Sempervivum hybridum 'Bottle of Griotte' (netřesk). *encyklopedie rostlin*. [Online] 17. březen 2018. [Citace: 25. září 2020.] <https://www.rostliny-cs.com/e/cz/03263-netresk-sempervivum-hybridum-bottle-of-griotte/>.
4. Bohuslávka, Petr, Horský, Vladimír a Jakoubková, Štěpánka. *Vegetační střechy a střešní zahrady*. místo neznámé : DEKTRADE a.s., 2009.
5. Minke, Gernot. *Zelené střechy*. Ostrava : nakladatelství HEL, 2001.
6. Glenn, Martina. Le Corbusier. *ARTMUSEUM.CZ*. [Online] 22. duben 2008. [Citace: 25. září 2020.] http://www.artmuseum.cz/umelec.php?art_id=226.
7. Žůrek, Karel a Mlčák, Leoš. Zámek, zámecký park, střešní zahrada. *Turistické informační centrum Lipník nad Bečvou*. [Online] 13. říjen 2016. [Citace: 25. září 2020.] <https://info.mesto-lipnik.cz/zamek-zamecky-park-stresni-zahrada/d-1042>.
8. Kotrbová. Konírna v Lipníku září. Unikátní střešní zahrada je nejstarší v Evropě. *idnes.cz*. [Online] 11. květen 2020. [Citace: 25. září 2020.] https://www.idnes.cz/bydleni/rekonstrukce/lipnik-nad-becvou-zamek-konirna-zahrada-kavarna-sgrafita.A200505_183343_rekonstrukce_web.
9. Ministerstvo kultury odmítlo prohlásit Hotel Praha památkou. *StavbaWEB*. [Online] 19. červen 2013. [Citace: 25. září 2020.] <https://www.stavbaweb.cz/ministerstvo-kultury-odmitlo-prohlasit-hotel-praha-pamatkou-9604/clanek.html>.
10. Bates, Adam J., a další. Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment. *ScienceDirect*. [Online] 8. srpen 2014. [Citace: 18. březen 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169204614002709>.
11. Georgiadisová, Alena, Ing. Soutěž Zelená střecha roku 2019 zná vítěze. *STAVEBNICTVÍ3000.CZ*. [Online] 24. červen 2019. [Citace: 26. září 2020.] <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/soutez-zelena-strecha-roku-2019-zna-viteze>.
12. Jana, Šimečková. *ZELENÉ STŘECHY, NADĚJE PRO BUDOUCNOST II*. Brno : Svaz zakládání a údržby zeleně, z.s., 2016.
13. Jaký je rozdíl mezi extenzivní a intenzivní zelenou střechou? *ECOSEDUM PACK*. [Online] listopad 2019. [Citace: 26. září 2020.] <https://www.ecosedum.cz/ecosedum-pack/jaky-je-rozdil-mezi-extenzivni-a-intenzivni-zelenou-strechou/>.
14. Zelená střecha je krásná i užitečná. *isover*. [Online] 12. listopad 2018. [Citace: 26. září 2020.] <https://www.isover.cz/aktuality/zelena-strecha-je-krasna-i-uzitecna>.
15. ZELENÉ STŘECHY - NADĚJE PRO BUDOUCNOST: DRUHY A TYPY ZELENÝCH STŘECH. *Krytiny - střechy*. [Online] 3. říjen 2013. [Citace: 26. září 2020.] https://www.krytiny-strechy.cz/technicke_info-k-navrhovani-strech/zelene-strechy/9774-zelene-strechy-nadeje-pro-budoucnost-druhy-a-typy-zelenych-strech-a.html.

16. Leischner, Jaroslav. DOKUMENTACE - STŘECHY. *Sika CZ*. [Online] [Citace: 26. září 2020.] <https://cze.sika.com/cs/produkty-pro-stavebnictvi/strechy/dokumenty.html>.
17. r.o., Palkowitschia spol. s. Pemza. *Sukulenty, kaktusy, cibuloviny*. [Online] [Citace: 3. únor 2021.] <https://www.palkowitschia.cz/sukulenty/cs/index.php?goto=pumice>.
18. Bohm, Petr. Vliv různých anionů fixaci Cu v alkalicky aktivované strusce. *Bakalářská práce*. [Online] 21. květen 2018. [Citace: 3. únor 2021.] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=172612.
19. Tichý, Radek. Keramzit vitalink clay pebbles. *Speciální zahradnictví*. [Online] 2021. [Citace: 3. únor 2021.] <https://www.specialnizahradnictvi.cz/keramzit/keramzit-vitalink-clay-pebbles/>.
20. Selník, Petr, Ing, Bečkovský, David Ph.D., Ing. a Rebrová, Tatiana, Ing. arch. Zelené a modré střechy jako adaptační opatření v městské zástavbě z pohledu hospodaření se srážkovou vodou. *tzbinfo*. [Online] 23. březen 2020. [Citace: 23. březen 2021.] <https://stavba.tzb-info.cz/strechy/20393-zelene-a-modre-strechy-jako-adaptacni-opatreni-v-mestske-zastavbe-z-pohledu-hospodareni-se-srazkovou-vodou>.
21. Eksi, Mert, a další. Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates. *ScienceDirect*. [Online] 27. leden 2020. [Citace: 30. březen 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09255857420302548>.
22. Ing. Bohuslav Slánský, Ph. D. a Sedlák, Ing. Pavel. Rebetong: Beton s přírodním kamenivem stoprocentně nahrazeným stavebními recykláty. *iMateriály*. [Online] 13. říjen 2020. [Citace: 14. duben 2021.] https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/rebetong-beton-s-prirodnim-kamenivem-stoprocentne-nahrazenym-stavebnimi-recyklaty_48251.html.
23. Bochnig, Katja. Spring School on Circular Economy. *RawMaterials*. [Online] 2019. [Citace: 19. březen 2021.] <https://eitrawmaterials.eu/events/spring-school-on-circular-economy/>.
24. Janoušková, Iva. Rebetong. *SKANSKA*. [Online] 4. říjen 2019. [Citace: 14. duben 2021.] <https://www.skanska.cz/co-delame/specialni-cinnosti/vyroba-dodavka-a-cerpani-betonu/rebetong/>.
25. Brabec, Richard. Twiittaa. *Twitter*. [Online] 29. červenec 2020. [Citace: 14. duben 2021.] <https://twitter.com/ribrarichard/status/1288483179771330560?lang=fi>.
26. What are recycled bricks and why you should use them? *LOHAS AUSTRALIA*. [Online] 25. únor 2020. [Citace: 5. únor 2021.] <https://lohasau.com/blog/what-are-recycled-bricks-and-why-you-should-use-them>.
27. Recycled Bricks. *green*. [Online] [Citace: 5. únor 2021.] <https://greenmagazine.com.au/product/ecogroup/8607/>.
28. Co je cihelný recyklát? *Radílek.cz*. [Online] 2018. [Citace: 3. říjen 2020.] <https://www.radilek.cz/slovník-pojmu/cihlový-cihelný-recyklát/>.
29. AZoBuild. A Guide to Brick Recycling. *AZO BUILD*. [Online] 2. leden 2013. [Citace: 5. únor 2021.] <https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8123>.
30. Rodriguez, Juan. Ways to Recycle and Reuse Concrete. *the balance small business*. [Online] 7. leden 2019. [Citace: 5. únor 2021.] <https://www.thebalancesmb.com/recycling-concrete-how-and-where-to-reuse-old-concrete-844944>.
31. Recycling lines and High-Speed Multilevel Mills. *LAVARIS*. [Online] 2019. [Citace: 5. únor 2021.] <http://www.lavaris.cz/products.html?lang=en>.

32. Kohoutová, SCc., Alena, Prof. Ing. a Procházka, CSs., Prof. Ing. Recyklace betonu. *Trvanlivost betonových konstrukcí*. [Online] 16. prosinec 2015. [Citace: 29. březen 2021.] http://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska_10_2015.pdf.
33. ZÁKLADNÍ DRUHY RECYKLÁTŮ A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ + JAKOSTNÍ NORMY. *BETONserver*. [Online] 28. duben 2011. [Citace: 3. říjen 2020.] <https://www.betonserver.cz/aktuality/zakladni-druhy-recyklatu-a-moznosti-jejich-vyuziti-jakostni-normy>.
34. Prodej - Betonový recyklát. *ProTeren*. [Online] [Citace: 3. říjen 2020.] <https://www.proteren.cz/recyklační-dvůr-a-kompostárna/prodej-betonový-recyklát.html>.
35. Prodej sypaných stavebních hmot. *ENVISANGEM*. [Online] 2020. [Citace: 3. říjen 2020.] <https://www.envisan.cz/prodej-sypaných-stavebních-hmot/a1>.
36. Baslíková, Ludmila. Recyklace stavebního materiálu. Brno : autor neznámý, 2008.
37. Oprava vsypem živičného recyklátu. *Světice oficiální web obce*. [Online] [Citace: 3. říjen 2020.] <https://www.obecsvetice.cz/oprava-vsypem-zivicneho-recyklatu/g-1660>.
38. EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT RECYCLING PLASTICS. *recyclenow*. [Online] [Citace: 6. duben 2021.] <https://www.recyclenow.com/recycling-knowledge/how-is-it-recycled/plastics>.
39. Sedaghat, Lilly. 7 Things You Didn't Know About Plastic (and Recycling). *NATIONAL GEOGRAPHIC*. [Online] 2019. [Citace: 6. duben 2021.] <https://blog.nationalgeographic.org/2018/04/04/7-things-you-didnt-know-about-plastic-and-recycling/>.
40. Kyzling, J. BIOPLASTY. *TŘÍDĚNÍ ODPADU CZ*. [Online] červenec 2019. [Citace: 6. duben 2021.] <https://www.trideniodpadu.cz/bioplasty>.
41. Ducháček, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití, 1st edition*. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. 80-7080-617-6.
42. Recyklace, linky na recyklaci. *TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ*. [Online] 2020. [Citace: 6. únor 2021.] <https://publi.cz/books/183/19.html>.
43. Sulíková, Ing. Veronika. Výrobky z plastů a gumy podle průmyslu - Katalog firem. *PlasticPortal*. [Online] [Citace: 6. duben 2021.] <https://www.plasticportal.cz/cs/podla-cinnosti/ci/830/>.
44. Havel, Milan, Ing. Jak třídíme plasty a jak se dále využijí? *ESTAV.cz*. [Online] 25. únor 2016. [Citace: 3. říjen 2020.] <https://www.estav.cz/cz/2955.jak-tridime-plasty-a-jak-se-dale-vyuziji>.
45. Na co všechno lze použít recyklovaný plast – od krytiny až po podlahy. *chytré bydlení*. [Online] 23. září 2013. [Citace: 3. říjen 2020.] <http://www.chytre-bydleni.cz/na-co-vsechno-lze-pouzit-recyklovany-plast-od-krytiny-az-po-podlahy>.
46. RECYKLACE SKLA. *ASOCIACE SKLÁŘSKÉHO A KERAMICKÉHO PRŮMYSLU ČR*. [Online] [Citace: 6. duben 2021.] <https://askpcr.cz/o-skle/recyklace-skla>.
47. Dan Cooke, Martin Grey. Glass the Superhero of Recycling. *Viridor*. [Online] [Citace: 6. duben 2021.] <https://www.viridor.co.uk/recycling/glass/>.
48. Hojell, Natalie. The Glass Recycling Problem: What's Behind It, and What to do. *GreatForest*. [Online] 2018. [Citace: 6. duben 2021.] <https://greatforest.com/sustainability101/the-glass-recycling-problem/>.
49. Česká asociace odpadového, hospodářství. Jak funguje nejmodernější linka na recyklaci skleněných střepeů? *Tretiruka*. [Online] 23. listopad 2015. [Citace: 6. duben 2021.] <https://www.tretiruka.cz/news/jak-funguje-nejmodernejsich-linka-na-recyklaci-sklenenych-strepu/>.

50. Pražské, služby. Recyklace skla aneb přeměna odpadu na luxusní designový produkt. *NepřEKOnatelný blog*. [Online] 8. říjen 2019. [Citace: 6. duben 2021.] <https://www.neprekonatelnny.blog/2019/10/08/recyklace-skla-aneb-premena-odpadu-na-luxusni-designovy-produkt/>.
51. Davis, Mason. 7 Things Made from Recycled Glass. *H.WEST EQUIPMENT*. [Online] 17. prosinec 2020. [Citace: 6. duben 2021.] <http://hwestequipment.com/things-made-from-recycled-glass/>.
52. Melichr, Tomáš, Jiří, Bydžovský a Keprdová, Šárka. Dlažební desky z recyklovaného skla. *EnviWeb*. [Online] 23. únor 2012. [Citace: 6. duben 2021.] <http://www.enviweb.cz/90204>.
53. Rincón, Lidia, a další. Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment. *ScienceDirect*. [Online] 22. říjen 2013. [Citace: 8. květen 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132314000043>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PVC	polyvinylchlorid
ECB	etylen-copolymer-bitumen
mm	milimetr
cm	centimetr
m	metr
m ²	metr čtvereční
dB	decibel
cal•g ⁻¹	kalorie na gram
kg•m ⁻²	kilogram na metr čtvereční
g•m ⁻²	gram na metr čtvereční
GPa	gigapascal
W•m ⁻¹ •K ⁻¹	watt na metr a kelvin
Mg•m ⁻³	megagram na metr krychlový
kg	kilogram
l	litr
g	gram
ml	mililitr
MPa	megapascal
N	newton
mm ²	milimetr čtvereční

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Visuté zahrady královny Semiramis [2]	3
Obrázek 2: Sempervivum hybridum 'Bottle of Griotte' (netřesk) [3]	4
Obrázek 3: Unikátní střešní zahrada na zámku v Lipníku nad Bečvou [8].....	5
Obrázek 4: Terasy hotelu Praha [9].....	5
Obrázek 5: Množství srážek a odtoku vody u šikmé zelené střechy po osmnáctihodinovém vytrvalém dešti [5]	6
Obrázek 6: Průběh teploty u ozeleněné střechy v hloubce substrátu 10 cm ve srovnání s nezatravněnou střešní plochou a teplotou vzduchu za horkého letního dne [5]	8
Obrázek 7: Průběh teploty v hloubce 5 cm u ozeleněné střechy a štěrkopískové střechy ve srovnání s teplotou vzduchu za chladného zimního dne [5].....	8
Obrázek 8: Main Point Pankrác v Praze - pobytový prostor [11].....	9
Obrázek 9: Extenzivní ozelenění [14].....	10
Obrázek 10: Intenzivní ozelenění [16]	11
Obrázek 11: Schéma skladby vrstev ozelenění střechy pro ploché střechy i střechy s mírným sklonem [5].....	13
Obrázek 12: Schéma skladby vrstev ozelenění střechy s velkým sklonem [5]	14
Obrázek 13: Pěstební sáčky naplněné substrátem a uchycené na strmé střeše [5]	15
Obrázek 14: Zelená vlna na přístavbě šumavského domku v Hartmanicích [12].	16
Obrázek 15: Typická konstrukce studené střechy s ozeleněním [5]	17
Obrázek 16: Typická konstrukce teplé střechy s ozeleněním [5].....	18
Obrázek 17: Typická konstrukce obrácené střechy s ozeleněním [5].....	19
Obrázek 18: Prorůstání kořene bodláku 15 cm silnou vrstvou živичného pásu po 15 měsících trvání pokusu [5]	21
Obrázek 19: Kořen prorůstá navařeným a zapečetěným svarem ochranné PVC fólie proti prorůstání kořínků [5].....	21
Obrázek 20: Schéma cirkulace ekonomiky [23].....	26
Obrázek 21: Ukázka Rebetongu, vlevo na obrázku s cihelným recyklátem a vpravo na obrázku s betonovým recyklátem [25].....	27
Obrázek 22: Neroztřízený cihlový recyklát [28]	29
Obrázek 23: Model recyklační linky na betonové odprašky. Zleva: zkrápěcí komora, odsávací zařízení, vysokorychlostní mlýn, vibrační dopravník, třídič materiálu a plnič Big-Bagu [31].	30
Obrázek 24: Schéma kompletní recyklační linky na beton [32].	31
Obrázek 25: Betonový recyklát [34]	32
Obrázek 26: Asfaltový recyklát [35].....	32
Obrázek 27: Oprava komunikace vsypem živичného recyklátu [37].....	33

Obrázek 28: Schéma recyklační linky na PET lahve. 1 – dopravníkový pás, 2 – nožový mlýn, 3 – sedimentační vana se šnekovým vyprazdňováním PET, 4 – čistička (s chemikáliemi), 5 – nízkootáčková bubnová odstředivka, 7a – silo, 7b – regranulační linka [42].	35
Obrázek 29: Střešní tašky z recyklovaného plastu [45]	35
Obrázek 30: Proces recyklace skla [47].	37
Obrázek 31: Sklosilikátové dlaždice z recyklovaného skla [52].	38
Obrázek 32: Vážení vzorku volně sypaného betonového recyklátu.	41
Obrázek 33: Vážení pyknometru naplněného vzorkem cihelného recyklátu a vodou.	42
Obrázek 34: Vážení vzorku nasáklého cihelného recyklátu.	43
Obrázek 35: Grafické zobrazení procentuálního propadu materiálu jednotlivými síty.	44
Obrázek 36: Pomleté vzorky pro stanovení pH. Zleva - cihelný recyklát, skelný recyklát, betonový recyklát.	46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výsledky stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva.	41
Tabulka 2: Výsledky stanovení objemové hmotnosti zrn.	42
Tabulka 3: Výsledky stanovení nasákavosti.	44
Tabulka 4: Výsledky stanovení pevnosti v tlaku.	45
Tabulka 5: Výsledky stanovení pH.	46