



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE, MECHANIZACE A ŘÍZENÍ STAVEB

INSTITUTE OF TECHNOLOGY, MECHANIZATION AND CONSTRUCTION MANAGEMENT

**NÁVRH A OPTIMALIZACE VYBRANÝCH STAVEBNĚ
TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ TRVALE
UDRŽITELNÉ ŠETRNÉ VÝSTAVBY VEGETAČNÍCH
STŘECH**

THE DESIGN AND OPTIMALIZATION OF SELECTED CONSTRUCTIONAL TECHNOLOGICAL
PROCESSES OF SUSTAINABLE ENVIRONMENT-FRIENDLY CONSTRUCTION OF THE
VEGETATIVE ROOF

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Petr Selník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN MOHAPL, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	P3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Doktorský studijní program s kombinovanou formou studia
Studijní obor	3608V001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Student	Ing. Petr Selník
Název	Návrh a optimalizace vybraných stavebně technologických procesů trvale udržitelné šetrné výstavby vegetačních střech
Vedoucí práce	Ing. Martin Mohapl, Ph.D.
Datum zadání	
Datum odevzdání	V termínech určených časovým harmonogramem akademického roku, nejpozději do jednoho roku od data zadání disertační práce

ABSTRAKT

Tématem této disertační práce je technologie provádění vegetačních střech a jejich udržitelná dlouhodobá stabilita s návazností na stavebně-fyzikální hospodaření s dešťovými srážkami. Stěžejním tématem studia a výzkumu zelených střech bylo použití technických vrstev zelené střechy, a to zejména nově vyvíjeného materiálu retenční desky z recyklovaného polyesterového vlákna a netkané textilie. Důsledně bylo monitorováno chování těchto vrstev v klimatických podmínkách ČR a zvolené technologii instalace.

KLÍČOVÁ SLOVA

zelená střecha, extenzivní zelená střecha, odtokové parametry, retenční vrstvy, stabilita konstrukce, instalace zelené střechy

ABSTRACT

This presented dissertation is focused on the installation technology of green roofs and sustainable long-term stability considering the construction and runoff water management. The main topic of the study and research was the technical layer application, especially the newly developed retention board made of recycled polyester fiber and non woven textiles. Consistent monitoring was performed in the climatic conditions of the Czech Republic and selected installation technology.

KEYWORDS

green roof, extensive green roof, water runoff parameters, retention layers, stabilization design, green roof installation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Petr Selník *Návrh a optimalizace vybraných stavebně technologických procesů trvale udržitelné šetrné výstavby vegetačních střech*. Brno, 2021. 90 s., 18 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb. Vedoucí práce Ing. Martin Mohapl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Návrh a optimalizace vybraných stavebně technologických procesů trvale udržitelné šetrné výstavby vegetačních střech zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2021

Ing. Petr Selník
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří vedoucímu doktorské práce Ing. Martinovi Mohaplovi, Ph.D. za jeho spolupráci během zpracovávání doktorského tématu.

Děkuji své rodině a přátelům za stálou podporu a pochopení během tvorby této práce.

Dále bych také rád poděkoval kolegům z týmu za mimořádně efektivní jednání a výbornou spolupráci jmenovitě Ing. Svatavě Henkové, CSc., Ing. Davidovi Bečkovskému, Ph.D. a jejich pracovním týmům.

Za mezinárodní spolupráci děkuji profesorovi Jónasi Thórovi Snaebjörnssonovi a docentovi Eythórovi Rafn Thórhallssenovi za značnou podporu během studijního pobytu na Reykjavík University. Velké díky patří též docentovi Stephanovi Brenneisenovi z Zürich University of Applied Sciences a jeho týmu spolupracovníků a dále Bernhardu Scharfovi z Universität für Bodenkultur Wien a celé komunitě Ústavu inženýrské biologie a krajinných staveb.

OBSAH

1. ÚVOD	- 1 -
2. SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU	- 2 -
2.1 ZELENÁ A MODRÁ INFRASTRUKTURA	- 2 -
2.1.1 Základní definice zelené a modré infrastruktury.....	- 2 -
2.1.2 Zelené střechy a fasády.....	- 4 -
2.1.3 Výhody zelených střech.....	- 5 -
2.1.4 Nevýhody zelených střech.....	- 6 -
2.2 HISTORICKÝ VÝVOJ	- 8 -
2.3 SOUČASNÉ VNÍMÁNÍ ZÁKLADNÍCH TERMÍNŮ ZELENÉ INFRASTRUKTURY A ZELENÝCH STŘECH	- 11 -
2.3.1 Průzkum	- 11 -
2.3.2 Reálný příklad veřejně přístupné střechy	- 12 -
2.3.3 Metodika sociálního průzkumu	- 13 -
2.3.4 Výsledky sociálního průzkumu	- 14 -
2.3.5. Hodnocení výsledků sociálního průzkumu.....	- 16 -
3. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	- 17 -
3.1. ROZŠÍŘENÍ ŠIKMÉ VEGETAČNÍ STŘECHY V ČR	- 17 -
3.2. POZNATKY Z TERÉNNÍHO VÝZKUMU	- 17 -
3.2.1 Island – Reykjavík University.....	- 18 -
3.2.1.1 Sběr dat prostřednictvím národního muzea Þjóðminjasafn Íslands.....	- 18 -
3.2.1.2 Bustarfell Museum.....	- 19 -
3.2.1.3 Reykholt	- 19 -
3.2.2 Švýcarsko – Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW).....	- 20 -
3.2.3 Rakousko –Bodenkultur Universität Vienna (BOKU).....	- 22 -
4. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	- 23 -
4.1 VLASTNÍ CÍLE PRÁCE – OPTIMALIZACE NÁVRHU ŠIKMÉ VEGETAČNÍ STŘECHY	- 23 -
4.2 VĚDECKÝ PŘÍNOS.....	- 23 -
4.3 PŘÍNOS PRO STAVEBNÍ PRAXI	- 23 -
5. POPIS HLAVNÍCH TESTOVACÍCH OBJEKTŮ.....	- 24 -
5.1 TESTOVACÍ OBJEKT ENVIHUT A PŘIDRUŽENÁ TESTOVACÍ VÝSTAVBA.....	- 24 -
5.2 TESTOVACÍ MOBILNÍ PLOŠINY.....	- 25 -
5.3 TESTOVACÍ LABORATORNÍ SEGMENTY	- 26 -
6. PODROBNÝ TECHNOLOGICKÝ PŘEDPIS PROCESU VÝSTAVBY VEGETAČNÍ STŘECHY VČETNĚ MOŽNÝCH RIZIK OVLIVŇUJÍCÍ DLOUHODOBOU STABILITU KONSTRUKCE.....	- 28 -
7. NÁVRH MATERIÁLU PRO VEGETAČNĚ RETENČNÍ VRSTVU	- 28 -
7.1 VÝVOJ VEGETAČNĚ-RETENČNÍ VRSTVY	- 28 -
7.1.1 Popis materiálu	- 28 -
7.1.2 Stručný popis variant materiálů.....	- 30 -
7.1.3.2 Test efektivní nasákavosti při 25°, zatížení 1,5 kN·m ⁻² a transportu vody zeminou	- 34 -
7.1.4 Závěry provedeného experimentu na základě hodnot Tab. 1 a Tab. 2	- 36 -
7.1.5 Vyhodnocení testů pro další aplikaci v rámci výzkumu	- 38 -
7.2.1 Vlastnosti zkoumané desky.....	- 40 -
7.2.4 Dílčí závěr hodnocení	- 43 -

7.2.5	Měření materiálu PES na základě sklonu roviny	- 44 -
7.3	VEGETAČNÍ TESTY.....	- 46 -
7.3.1	Krátkodobý vegetační test – vstupní parametrizace.....	- 46 -
7.3.2	Základní souvrství bez přidání podpůrné vegetační výživné vrstvy (Varianta I.).....	- 46 -
7.3.3	Souvrství s přidáním lisovaných dřevovláknitých element (Varianta II.).....	- 47 -
7.3.4	Souvrství s přidáním hrubé slámy (Varianta III.)	- 48 -
7.3.5	Lokace instalace a okolní podmínky testu.....	- 49 -
7.3.6	Vyhodnocení krátkodobého vegetačního testu.....	- 49 -
7.3.7	Dlouhodobý vegetační test.....	- 50 -
7.3.8	Vyhodnocení vegetačních testů.....	- 53 -
8.	VOLBA SKLADEB, TECHNICKÝCH MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIE NA VYBRANÉ STAVEBNĚ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	- 57 -
8.1.1	Uvadající vegetace na skladbě s minerální vlnou.....	- 58 -
8.1.2	Vlastní měření charakteru odtoku.....	- 58 -
8.1.3	Diskuze výsledků testu	- 60 -
8.1.4	Doporučené aplikace s testovanými materiály s ohledem na jejich charakter odtoku	- 61 -
8.1.5	Problém použití syntetických materiálů v souvrstvích zelených střech	- 62 -
8.1.6	Závěr testování technických vrstev zelených střech v klimatických kontinentálních podmínkách	- 63 -
8.1.7	Závislost sklonu střešní roviny.....	- 63 -
8.2	PRINCIPY SIMULACE CHOVÁNÍ OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ.....	- 63 -
8.2.1	Základní popis objektu a areálu environmentálního hodnocení staveb a okolí	- 64 -
8.2.2	Cíle projektu	- 65 -
8.2.3	Navrhované technické úpravy.....	- 67 -
8.2.4	Navrhované úpravy zelené infrastruktury.....	- 68 -
8.2.5	Vliv změn na stávající konstrukce.....	- 68 -
9.	HODNOCENÍ KRÁTKODOBÉ A DLOUHODOBÉ STABILITY Z HLEDISKA PŮSOBNÍ POVĚTRNOSTNÍCH PODMÍNEK V PRŮBĚHU VYBRANÉHO ŽIVOTNÍHO CYKLU KONSTRUKCE	- 69 -
9.1.	NEROVNOMĚRNÉ SEDÁNÍ SUBSTRÁTU ŠIKMÉ EXTENSIVNÍ ZELENÉ STŘECHY PROJEKTU ENVIHUT	- 69 -
9.1.1	Popis konstrukce	- 69 -
9.1.2	Vegetačně retenční vrstva.....	- 70 -
9.1.3	Záchytný systém a výsadba vegetace	- 71 -
9.1.4	Podmínky měření	- 71 -
9.1.5	Výsledky	- 73 -
9.1.6	Navrhované změny postupu instalace	- 74 -
9.1.7	Vyhodnocení stabilizačního testu.....	- 75 -
9.2	Vliv sání větru na stabilitu kontaktní vrstvy krátce po její instalaci	- 76 -
9.2.1	Modelování působení větru	- 76 -
9.2.2	Vyhodnocení simulace.....	- 79 -
10.	ZÁVĚR	- 80 -
10.1	VLASTNÍ ZÁVĚR.....	- 80 -
10.2	ZAMYŠLENÍ NAD VÝVOJEM ZELENÝCH STŘECH V BUDOUCNOSTI	- 81 -
10.3	APLIKACE PRO ODBORNOU PRAXI	- 83 -
10.3.1.	Příprava dotačního titulu Zeleně střechám.....	- 83 -
10.4	MOŽNOSTI DALŠÍHO ROZVOJE VÝZKUMU ZELENÝCH STŘECH	- 84 -

11. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 87 -
12. PŘÍLOHY	- 1 -

1. ÚVOD

Tématem mého doktorského studia je technologie provádění vegetačních střech a jejich udržitelná dlouhodobá stabilita s návazností na stavebně-fyzikální chování tohoto typu konstrukce. Předpokládám, že vegetační střecha je budoucností trvale udržitelného rozvoje městského urbanismu a současně také jeden z hlavních elementů šetrné výstavby, který bude klíčový pro návrh moderních budov. Tento můj názor je založen na vývoji situace v řadě pokrokových evropských měst a aglomerací. V těchto lokalitách, které jsem v rámci studijních cest navštívil, byla instalace zelené střechy upravena či striktně vyžadována městskou či oblastní vyhláškou. Odborná veřejnost ve vybraných lokalitách, se kterou jsem navázal spolupráci, je přesvědčena o nesporném pozitivním efektu této konstrukce na budované objekty a jejím přínosu pro stavební průmysl zvláště pak z ekologického hlediska.

Vegetační střecha má bohatý výzkumný potenciál. Nejenže je řada jejích parametrů proměnná během roku, ale také během dne. Patří mezi ně expozice ozáření, orientace ke světovým stranám, podléhání vlivům větrů, srážek, teploty, vývoj vegetace, schopnost retence podloží, chování během vegetačního klidu, evapotranspirace... Navíc je většina těchto parametrů těžko simulovatelná i s výkonnou výpočetní technikou. Na druhou stranu vegetační zastřešení lidé používají již od počátku prvotního rozvoje civilizace. Existuje řada postupů a forem aplikací vycházející ze zvykové výstavby, kterým je třeba vydláždít cestu moderním technickým i normativním světem výstavby. Také můžeme díky současným technologiím řadu aspektů návrhu a instalace vylepšit a upravit, aby mohlo být použití této konstrukce umožněno širokému spektru zákazníků, kteří chtějí prokázat dopad vegetačních konstrukcí nejen na vlastní objekt, ale také na blízké okolí.

Během svých studijních cest jsem shromáždil řadu podkladů, získal mnoho osobních odborných zkušeností a diskutoval s lídry tohoto odvětví stavebního trhu. Přál bych si, abych mohl alespoň část nabytých znalostí sdílet a následně rozvíjet s českou odbornou veřejností, tak abychom nestáli na konci řetězu a jen slepě přijímali to, co se nám naši západní sousedé rozhodnou prodat. Přestože u nás teprve zvolna s vegetačním zastřešením začínáme a například ve Švýcarsku v Basileji už podruhé renovují. Věřím, že společně se svými kolegy z týmu můžeme přinést nové poznatky a závěry, o které bude mít zájem i rozvinutější zahraniční stavební průmysl.

2. SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU

2.1 Zelená a modrá infrastruktura

2.1.1 Základní definice zelené a modré infrastruktury

Zelená a modrá infrastruktura (zeleň a vodní plochy ve městech) zahrnuje prostorově specifické přírodní a přírodě blízké oblasti, které mají další environmentální funkce a přínosy pro kvalitu života obyvatel. Z hlediska adaptačních opatření zahrnuje využití zelené infrastruktury například tyto prvky a opatření: zelené střechy a zelené fasády (zvýšování energetické efektivity staveb, přírodní chlazení a podpora zadržování vody), zeleň ve veřejných prostorech. Možnosti využití modré infrastruktury jsou zlepšení zadržování vody vč. efektu zpomalení odtoku, zvyšování propustnosti terénu a zasakování srážkové vody ve městech, využití stojatých a tekoucích vod ve městě.[31] Tímto způsobem je definován pohled na formu a funkci vegetačních konstrukcí dle Evropské Unie, do které spadá i zelená střecha jako jedna z nejstarších forem těchto konstrukcí. Tato definice je systémově zahrnuta do řady legislativních materiálů i podkladů pro dotační tituly zaměřené na udržitelné stavitelství a adaptaci na změnu klimatu.

Součástí dokumentů Evropské Komise z roku 2013 je též koncepční studie Strategie biodiverzity, která byla zacílena na plnění programu k roku 2020. Hlavním záměrem je „zastavit do roku 2020 úbytek biologické rozmanitosti a ekosystémových služeb, v maximálním proveditelném rozsahu obnovit ekosystémy a zvýšit příspěvek EU k odvrácení úbytku biologické rozmanitosti v celosvětovém měřítku“. Strategie je nedílnou součástí strategie Evropa 2020 a akčních programů pro životní prostředí. [29]

Pro tento účel stanovila Strategie biodiverzity šest základních témat včetně klíčových indikátorů (spravováno organizací BISE – Biodiversity Information System for Europe), podle kterých bude program vyhodnocen po ukončení projektu v roce 2020. Zelená a modrá infrastruktura by měla lépe propojit oblasti chráněné Naturou 2000 a zachovat efektivní migraci druhů právě mezi těmito lokalitami. Tímto propojením lze dosáhnout vyšší ekologické kvality v širším měřítku. Funkční hodnotná krajina pak může poskytovat společnosti cenné služby – primárně čištění našich urbanistických celků a klíčových zdrojů jako je voda či vzduch.[21] Nejdůležitějšími lokalitami, kterých se toto řešení týká, jsou okraje měst s nově budovanou zástavbou či satelitní oblasti, které velmi často zabírají zemědělskou nebo původní krajinu. Právě tyto lokality se stávají nárazníkovým pásem, který bude v budoucnosti zásadním způsobem ovlivňovat klima ve městech a definovat hodnotu ekosystémů v aglomeracích. Tyto cíle samozřejmě nelze v plném rozsahu naplňovat v historických centrech s památkově chráněnými objekty, ale je znám příklad řady brownfieldů, které byly revitalizovány v souladu s indikátory BISE a požadavky města k dosažení udržitelného rozvoje města.

Základními úkoly, kterými EU chce naplnit svou vizi a cíle, jsou:

Úkol 1: Plnohodnotná implementace směrnic o ochraně přírodních stanovišť a ptactva
Zamezení zhoršování stavu všech druhů a stanovišť (rozumněj biotop či habitát), na které se vztahují právní předpisy EU, a dosažení měřitelného zlepšení jejich stavu do roku 2020 ve srovnání se současným hodnocením:

- 100% nárůst hodnocení stanovišť
- 50% nárůst druhových hodnocení podle specifických směrnic o stanovištích
- 50% nárůst druhových hodnocení podle specifických směrnic o zlepšení stavu ptactva

Úkol 2: Udržování a obnova ekosystémů a jejich funkcí

Do roku 2020 zlepšit a udržet zřizování zelené infrastruktury a obnovit nejméně 15% poškozených ekosystémů.

Klíčové indikátory SEBI - Streamlined European Biodiversity Indicators [30]:

[SEBI 03 Conservation status of species of European interest](#)

[SEBI 04 Ecosystem coverage](#)

[SEBI 05 Conservation status of habitats of European interest](#)

[SEBI 07 Nationally designated protected areas](#)

[SEBI 09 Critical load exceedance for nitrogen](#)

[SEBI 13 Fragmentation of natural and semi-natural areas](#)

[SEBI 16 Freshwater quality](#)

[CSI14 Land take](#)

Úkol 5: Podpora boje proti invazivním druhům

Do roku 2020 identifikovat cesty invazivních druhů a zabránit vzniku i usídlení nových invazivních druhů v prostředí. Podpora rozvoje a kontroly výskytu prioritních druhů, které jsou schopny zabránit šíření druhů invazivních. Zdánlivě by se mohlo zdát, že tento problém není součástí procesu výstavby měst a obcí. V tomto případě však platí, že unifikací prostoru ovlivněném výstavbou dochází částečně k úbytku životního prostoru původních druhů rostlin a živočichů, ale zejména k oslabení schopnosti bránit šíření odolným invazivním druhům např. plevelům, které následně významně ovlivňují ekosystémy a potravní řetězce pro původní druhy, které dříve udržovaly nastavenou rovnováhu v přírodních procesech. Nevhodně volené zelené střechy ve větším rozsahu mohou mít za následek zvýšený potenciál šíření invazivních druhů rostlin v lokalitě.

Klíčové indikátory SEBI - Streamlined European Biodiversity Indicators [30]:

[SEBI 10 Invasive alien species in Europe](#)

Úkol 6: Odvrácení ztráty biodiverzity

Do roku 2020 by Evropská Unie jako celek měla odvrátit ztrátu biologické rozmanitosti (i celosvětově).

Klíčové indikátory SEBI - Streamlined European Biodiversity Indicators[30]:

[SEBI 23 Ecological Footprint of European countries](#)

Záměry Evropské komise z pohledu dlouhodobých investic

Investování do zelené infrastruktury dává z hospodářského hlediska smysl: zachování schopnosti přírody například zmírňovat nepříznivé dopady změny klimatu, je z hlediska nákladů mnohem efektivnější, než kdyby bylo nutno tyto ztracené služby nahrazovat mnohem nákladnějšími, člověkem vytvořenými technologickými řešeními. Zelené infrastruktury lze nejlépe dosáhnout prostřednictvím integrovaného přístupu k hospodaření s půdou a důkladného strategického územního plánování. Všichni uživatelé půdy a všechny oblasti politiky by se měli do procesu rozvíjení zelené infrastruktury včas zapojit a podílet se na jeho zajišťování.[31]

Dle OECD je investice do zelené infrastruktury nezbytným krokem k dalšímu rozvoji ekonomie budoucnosti. Ekonomický potenciál zelené infrastruktury je vysoký díky nutnosti člověka udržovat svůj svět v kontinuálním běhu trhu. Investice do infrastruktury, která se může dlouhodobě (ideálně trvale) rozvíjet na základě klíčových potřeb člověka konzumenta, je z hlediska návratnosti výhledově dlouhodobá, ale s vysokou jistotou návratnosti. Díky rozvoji pokročilých materiálů je možné využívat efektivní metody recyklace či výroby, takže se tato část zeleného odvětví propojuje i do jiných odvětví průmyslové výroby.

2.1.2 Zelené střechy a fasády

Zelené střechy i fasády jsou již zavedeným prvkem systému základní zelené infrastruktury. Nejpokročilejším současným řešením je konstrukce označovaná jako *Natur Based Solution* tedy řešení na přírodní bázi (ve zkratce označované jako NBS). Tato koncepce je v současné době předmětem řady článků o zelených konstrukcích. Do roku 2016 bylo toto řešení označováno jako biodiverzní střechy (biodiverse roof). Cílem všech takto pojmenovaných řešení je dosáhnout větší odolnosti vůči klimatickým vlivům i obraně proti intenzivnímu působení škůdců či nemocí vybraného druhu zeleně. Dosažení tohoto cíle je možné díky velké druhové bohatosti rostlin i živočichů a rozmanitosti ekosystémů – jako ukázka slouží ostrovní systémy zelených střech, které se ale významněji uplatňují jen u střech plochých.



Obrázek č. 1: Biodiverzní střecha objektu Klinikum II v Basileji (zdroj: autor, 2015)

Technické řešení biodiverzní vegetační střechy se týká vegetačních střech s druhově bohatou vegetací, která má původ v lokálním ekosystému prostředí realizace konstrukce a respektuje tudíž růstové nároky místního klimatu. Bohatost ekosystému střechy je podporována volbou výšky a typu substrátu s cílem eliminovat erozní vlivy působící na střechu. Vegetační kryt pak následuje svou druhovou formou části s lokacemi adekvátního substrátu. Jako hydroakumulační vrstva je zpravidla použita modulární platforma technických vrstev, které nejlépe odpovídají náročnějším realizačním podmínkám.

2.1.3 Výhody zelených střech

Cílem projektů zelených střech z pohledu měst a městských částí je primárně řešení pasivních retenčních opatření u stávajících i nově budovaných objektů, které mají za cíl eliminovat škody způsobené bleskovými povodněmi, a snížení množství poletavého prachu PM_{10} , $PM_{2,5}$ i $PM_{0,1}$.

Největším přínosem instalace zelené střechy pro stavebníka je zkvalitnění tepelné stability vnitřního prostředí objektu a zvukově-izolační vlastnosti zelené střechy, která velmi dobře díky své vnitřní struktuře izoluje široké spektrum frekvencí. Dobře provedená konstrukce zelené střechy poskytuje dlouhodobou ochranu proti mechanickému poškození hydroizolačních vrstev.

Společným benefitem je snížení přehřívání lokálních sestav objektů, povrchových teplot uličních celků a estetická funkce, která může fungovat jako společný jmenovatel uličního charakteru výstavby. Všechny tyto efekty fungují za předpokladu většího rozšíření konstrukce zelených střech v dané lokalitě. Osamocená zelená střecha má na zmíněná společná pozitiva minimální účinek, který je poměrně složitě měřitelný, protože

se pohybuje v jednotkách procent na úrovni statistické chyby měření. Nejlépe se efekt zelených střech prokazuje ve formě simulovaných environmentálních studií, které nejlépe reflektují výsledky na základě aspektů tvaru, výšky roviny určené střechy, typu zelené střechy a také vnějších vlivů prostředí (jakým je například převažující směr proudění větru).

Zelená střecha spadá do kategorie výstavby s nízkou uhlíkovou stopou. Kvalitní provedení a dlouhodobá stálost pak rozhoduje též o negativní uhlíkové bilanci, tzn. že tato konstrukce může mít pozitivní vliv na redukcí CO₂. Tento efekt je podmíněn budováním zelených střech z lokálních zdrojů s relativně krátkou dopravní vzdáleností.

Výhodou zelené střechy je její pasivní provoz. Po realizaci už dále nedochází ke spotřebě provozních energií, a přitom střecha vykonává všechny základní funkce:

- Retenční vlastnosti pro eliminaci bleskových povodňových srážek a snížení zatížení kanalizační sítě
- Zvuková izolace
- Regulace vlhkosti suchého vzduchu městských bloků
- Estetická funkce – pozitivní chápání okolí a relaxační efekt při správném zacílení
- Zelená střecha redukuje ve svém okolí značné množství polétavých částic – nejvíce PM_{2,5}, významně též PM₁₀, ale také PM jemné částice označované jako velmi jemné (Fine), které nejsou doposud legislativně upravovány
- Zabraňují přehřívání střech, a tím i teplotnímu víření prachu, který současně též filtruje a absorbuje
- Redukují teplotní výkyvy způsobené prudkým střídáním teplot – prodlužují životnost staveb

Právě tyto pasivní funkce jsou klíčovým parametrem pro zdůvodnění rozšiřování instalací zelených střech ve městech. Pro většinu uvedených problémů existuje i řada jiných technologických řešení, která ale pro svůj provoz vyžadují spotřebovávání dalších zdrojů zejména pak elektrické energie.

Evropská Unie dlouhou prosazuje koncepci trvale udržitelné výstavby, která je součástí řady programů zaměřených na environmentální problematiku – zejména Environmental Impact Assessment (EIA) a Strategic Environment Assessment (SEA). Zelená střecha je součástí řešení strategií zaměřených na dlouhodobé směřování urbanistického vývoje – primárně snížení rizika bleskových povodní, z pohledu SEA pak otázky ohledně tropických teplotních výkyvů a obohacení městského habitatu.

2.1.4 Nevýhody zelených střech

Zelená střecha přináší též jisté nevýhody, které jsou primárně spojeny s její instalací. Zvýšené statické požadavky mohou vést k prodražení nosných konstrukcí oproti běžnému zastřešení. V tomto případě je vždy nutné zvolit vhodnou variantu zelené střechy nebo na návrh náročnější ostrovní systém s jasnou definicí tvaru jednotlivých lokalit s ohledem na nosný systém stavby.

Zásadní je také provedení hydroizolačního souvrství. To by mělo být vždy kvalitní, ale u zelených střech lze požadavek zpřesnit na precizní, protože největším neduhem zelené střechy je obtížná rekonstrukce v případě zátoku do střešních konstrukcí. Díky zachycené vodě v substrátu je nejnáročnější identifikovat místo defektu. Proto instalace zelené střechy vyžaduje kvalitní bezchybné provedení zátopových či jiných testovacích zkoušek celistvosti hydroizolačních vrstev.

Vlastní provedení zelené střechy pak nesmí způsobit perforaci správně instalovaného hydroizolačního souvrství. Prověřené systémové skladby a důsledná kontrola však snižuje riziko na požadované minimum.

Zelené střechy vyžadují téměř rovnocennou údržbu ve smyslu kontroly odtokových poměrů, čištění odtokových lokalit atd. jako většina jiných typů střech. Přesto je třeba zmínit, že tato kontrola ani u konvečního zastřešení není zpravidla systematicky prováděna, a proto na ni nejsou stavebníci zvyklí. U zelené střechy je pro její funkčnost tato průběžná kontrola i údržba zcela zásadní. Toto platí primárně pro střechy extenzivní a semiintenzivní. Intenzivní varianty vyžadují náročnější údržbové zahradnické práce podle typu vegetace. Intenzivní šikmé zelené střechy se však zpravidla nerealizují.



Obrázek č. 2: Demonstrace nevhodně provedeného odtoku (zdroj: autor, 2016)

Dle zvolené vegetace je vhodné zelenou střechu jednou za rok či dva hnojit vhodným typem hnojiva. Tento proces je dobré provádět na základě vyhodnocení stavu zeleně. Toto je jediný zásadní dodatek údržby zelené střechy oproti konvenčním variantám zastřešení.

2.2 Historický vývoj

Již v dřívějších dobách se člověk snažil ve svém obydlí vytvořit vhodné prostředí k pohodlnému bydlení. Pro stavbu objektů byly používány takové přírodní materiály, aby jejich izolační účinky jak v létě, tak i v zimě byly co největší. Ve střední a severní Evropě se při návrhu objektů kladl důraz spíše na izolační schopnost v období během zimních měsíců a to tak, aby docházelo k co nejmenším tepelným ztrátám. V extrémních severských podmínkách pak vznikaly na těsně vedle sebe postavené a propojené historické farmy, které se na Islandu díky izolovanosti dochovaly v nezměněné podobě dodnes. Jednoduchá efektivní koncepce byla založena na dvou základních logických kamenech: maximální využití potenciálu přírodního zdroje stavebních materiálů a promyšlená koncepce transferu ohřívajícího či ochlazovaného vzduchu ve stavebních dutinách a jednotlivých místnostech. Historická dispozice takového rozsáhlého stavení není cizí většině starších objektů na severu Evropy. V nejvíce ochlazovaných částech objektu byly situovány sklady potravin a nářadí, blíže ke středu domu byla ustájena hospodářská zvířata a střední tj. nejvíce vyhřátá a odizolovaná část sloužila pro bydlení. Zvířata produkovaly teplo, které stoupalo do obytné části, která byla běžně situována v druhém patře. V prostorách určených k odpočinku bylo také počítáno s produkcí tepla obyvateli domu. Vzhledem k větším rodinám, které tyto usedlosti obývaly, se jednalo o nezanedbatelný tepelný zisk. Svým způsobem lze tuto koncepci považovat za logického předchůdce pasivních či nízkoenergetických objektů [1].

Řada rozsáhlých stavebních dutin v celé konstrukci objektu velice efektivně hospodáří s potenciálem neproudícího vzduchu jako formy historické izolace a proudícího vzduchu jako média pro transport vlhkosti. Otázkou ale zůstává, do jaké míry byla tato koncepce dopředu promyšlená či se jednalo spíše o zvykový způsob výstavby v kombinaci s dlouhodobě zdokonalovacími modifikacemi a do jisté míry i pozitivního pokroku způsobeného náhodnou událostí.

Izolovat objekty proti nadměrnému přehřívání místností v letním období nehrálo pro uživatele objektu žádnou významnou roli, přesto zkoumané objekty vykazují výborný tepelný komfort převážně v letním období, který je plně srovnatelný s dnešními moderně navrhovanými stavbami. Naproti tomu by zimní tepelná stabilita byla považována za podprůměrnou. V současné době je považováno příjemně vytopené obydlí v zimě za základní standard. Na rozdíl od dřívějších dob se v dnešních dnech klade rovněž důraz na vnitřní tepelnou pohodu v letním období již ve stádiu návrhu, kdy přicházejí na řadu zásadní problémy s přehříváním pro bydlení atraktivních podkrovních prostor. Tyto prostory jsou potom bez využití technických opatření pro člověka nepohodlné a nepříjemné. (Toto hodnocení je geograficky vázáno na podmínky střední až severní Evropy a neplatí plošně bez uvážení dalších geografických vlivů).



Obrázek č. 3: Islandský skanzen staveb se zelenými prvky (zdroj: autor, 2016)

Hledá-li investor ochranu proti tomuto negativnímu chování vnitřní tepelné pohody, má díky dnešnímu trhu dvě hlavní možnosti:

- Izolovat konstrukci velkým množstvím izolačního materiálu a přesně navázat všechny detaily, tak aby byly minimalizovány bodové a lineární tepelné mosty.
- Uměle upravovat parametry vzduchu za pomoci vzduchotechnických zařízení.

Oba tyto postupy jsou poměrně finančně nákladné a neřeší jeden z primárních zdrojů problému, kterým je vysoký tepelný zisk ozařované konstrukce jako takové. V poslední době je běžně používanou střešní krytinou, zejména pak u plochých střech, asfaltový střešní pás se vsypem nebo varianta plastových folií. Povrchová teplota takového povrchu pak v poledních letních extrémech může přesáhnout 80°C. Naproti tomu husté biodiverzní ozelenění na vegetační střeše si i v těchto nepříznivých podmínkách bude udržovat teplotu okolního vzduchu s rozdílem v jednotkách stupňů Celsia [2]. Proto má vegetační střeše významný potenciál a prostor pro aplikaci ve stavebním průmyslu, který je v ČR ve srovnání se západními sousedy a zeměmi střední Evropy doposud opomíjen.

Ve Švýcarsku byl ve vybraných kantonech schválen zákon (např. Basilej v roce 2002), který nařizuje použít vegetační ozelenění na každé nově realizované ploché střeše a dále každé ploché střeše, která bude rekonstruována. Toto ozelenění přispívá nejen ke zlepšení tepelného komfortu uvnitř objektu, ale také poskytuje prostor pro živé organismy. Významnou roli hraje také volba a typ střešního ozelenění. Pokud investor zvolí druh tzv. chudé vegetační střechy, jejíž ozelenění je tvořeno rozchodníky, efekt na vnitřní klima v objektu nebude až tak výrazný v porovnání, že by střeše byla ozeleněná

vzrostlou a hustou travní zelení. Husté ozelenění z velké části zabraňuje průniku slunečních paprsků k povrchu substrátu, tím pádem nedochází k jeho přehřívání a rychlému vypařování vázané vody. Pokud by došlo k významné ztrátě vody v zemině, tento stav by vedl k úhynu rostlin, čímž by se snížila listová plocha a došlo by k razantnějšímu přehřívání substrátu. Dne 5.6.2015 v 15:00 bylo provedeno měření teploty na vodním díle Moos v aglomeraci Wollishofen a stavbě bytového domu ve vesnici Wädenswil. V prvním uvedeném případě se jedná o rezervoáry pitné vody, kde se teplota uvnitř objektů v horkých dnech pohybuje kolem 15°C. V tomto konkrétním dni byla naměřená teplota vnitřního vzduchu 14,5°C. Tyto objekty jsou zastřešeny železobetonovým stropem průměrné tloušťky 10 cm, na který je natavena asfaltová hydroizolace a dále navršená rostlá zemina o síle 20 až 30 cm[3]. Střecha je pokryta velmi hustou a rozmanitou vegetací. Teplota povrchu pod ozeleněním byla naměřena 29,5°C při teplotě venkovního vzduchu měřeného ve stínu 28,6°C. Tyto objekty představují ideální avšak v krátkodobém časovém horizontu těžko dosažitelný stav pro střešní vegetaci. Střešní konstrukce je i za extrémních letních teplot ze spodu ochlazována technologickým procesem, který probíhá uvnitř objektu. Podmínky se tak blížíce podobají vlastnostem rostlého terénu, což přispívá k růstu vegetace.



Obrázek č. 4: Nová instalace ploché vegetační střechy ve vesnici Wädenswil(zdroj: autor, 2015)

V případě druhého zmíněného objektu se jednalo o stavbu bytového domu. Na tomto objektu byly zjišťovány teploty na ploché střeše, kde její jednotlivé sekce byly tvořeny z asfaltových pásů se vsypem, dále suchou jílovo-písčitou hlínou s valouny, jež tvoří vegetační vrstvu pro budoucí ozelenění a nakonec část se vzrostlým vegetačním

ozeleněním. Toto ozelenění bylo provedeno z dříve zakořeněných vegetačních bloků tvořených vzrostlou vegetací a substrátem. Díky pozdní instalaci v kombinaci s dlouhodobým suchem došlo k částečnému seschnutí a zvadnutí ozelenění. Naměřená teplota na povrchu zeminy pod seschnutým ozeleněním byla změřena na 34,9°C, což je rozdíl 5,4°C oproti teplotě pod vegetací dobře rostoucí. Teplota na povrchu jílovo-písčité hlíny byla změřena na 40,2°C a teplota asfaltového povrchu překračovala 70,0°C. Vysoká teplota na povrchu izolačního souvrství pak přispívá k šíření tepla do okolních konstrukcí a následně ke zvyšování teploty uvnitř objektu.

2.3 Současné vnímání základních termínů zelené infrastruktury a zelených střech

Základní představa a pochopení termínů zelené infrastruktury a v návaznosti též zelených střech je klíčovou podmínkou pro úspěšnou aplikaci v rámci stavebního trhu. Nejdůležitější je toto pochopení u široké veřejnosti v sektoru veřejných staveb, ve kterých je implemetance zmíněných konstrukcí podmíněna souhlasem mnoha zájmových skupin. Nepochopení klíčových pojmů vede k chybným závěrům a špatné interpretaci v rámci veřejné diskuze, která zpravidla projednávání těchto záměrů provází. Neznalost a následný nezájem o tuto problematiku má za následek neúčast všech dotčených obyvatel lokality v připomínkových řízeních nebo při veřejném projednávání záměrů týkajících se zelené infrastruktury. Z tohoto důvodu byl proveden základní orientační průzkum ohledně informovanosti vybrané skupiny obyvatel ČR s cílem zjistit jejich aktuální přehled o problematice.

2.3.1 Průzkum

Součástí první části průzkumu byla identifikace objektů zelené infrastruktury v okolí bydliště účastníků v obecné rovině. Cílem bylo zjistit základní úroveň znalostí obecných termínů. Řada dotazovaných neumí tyto objekty spojit se svým blízkým známým okolím, i když jsou schopni identifikovat např. park jako zelenou infrastrukturu, neumí odpovědět na ukázkou konkrétního objektu. Přesto lze předpokládat jistou obecnou znalost svého okolí u všech respondentů, tedy i znalost názvu místního parku či sadů v bydlišti. Park je pro ně ale takovou samozřejmostí, že jim v tu chvíli vůbec nepřichází na mysl. Je zde snadno pozorovatelný efekt propojení obtížnějšího propojení teoretických a praktických znalostí z běžného okolního života.

V druhém stupni průzkumu byla dotazována znalost v oboru zelených střech, jejich moderní verze biodiverzní varianty a představa hlavní funkce konstrukce zelených střech. Velmi negativně vyznívá neznalost obecného dělení zelených střech, se kterými pracuje i řada obecných norem, doporučení EU a vědecko-populární literatury [2,9]. Díky tomuto faktu nelze jednoduše prohlubovat své znalosti, povědomí o vývoji a možnostech aplikací. Hovoří-li v současnosti účastníci odborných konferencí o nových biodiverzních řešeních založených na přírodním konceptu, nezohledňují neschopnost efektivně využívat současnou znalostní databázi k dosažení požadovaných výsledků.



Obrázek č. 5: Zelená střecha na střeše Tržnice v Brně (zdroj: autor, 2017)

2.3.2 Reálný příklad veřejně přístupné střechy

V Brně v roce 2017 byla realizována extensivní veřejně přístupná zelená střecha na zrekonstruovaném objektu nové Tržnice na Zelném trhu (Zelný trh 14 -16, Brno 602 00). Objekt byl pro veřejnost zpřístupněn v červenci roku 2017. Zelená střecha je součástí vyhlídkové úrovně třetího patra [3]. Dle názoru dotazovaných návštěvníků v prvním roce existence není instalovaná střecha v dobré kondici. Tento dojem je vyvolán zejména velmi minimalistickou výsadbou a zejména též neukázněnými návštěvníky, kteří na povrch zelené střechy odhazují odpadky a nedopalky z cigaret. Současný stav byl zdokumentován na obrázku č. 5. Větší návštěvnost veřejně přístupných zelených střech klade velký důraz na jejich údržbu a taktéž nezbytný úklid, který vyžaduje každé veřejně přístupné místo. V těchto veřejných pilotních projektech pak nastává konflikt mezi snahou seznámit širokou veřejnost s možnostmi současné výstavby na jedné straně a minimalizací provozních nákladů na straně druhé. Není-li ale pilotní projekt adekvátně prezentován a udržován, působí spíše negativně na mínění návštěvníků. V případě zmíněného projektu je potřeba vyřešit především problém kouření v části orientované směrem k Zelnému trhu a v blízkosti vstupu na terasu zelené střechy s výhledem na věž radnice. Vzhledem k zákazu kouření v interiéru tohoto objektu se nejvíce kuřáků zdržuje právě v těchto místech. V suchých letních dnech navíc vzniká při očekávaném šíření vegetace větší pravděpodobnost vznícení od nedopalků. Tento fakt nebyl při návrhu přístupné zelené střechy zajištěn vůbec zohledněn. Při současném stavu vegetace je však toto riziko minimální.

2.3.3 Metodika sociálního průzkumu

Účastník průzkumu byl nejprve dotázán na okres trvalého bydliště, tak aby byla zachována anonymita účastníků, a současně aby byl průzkum navázán na konkrétní lokalitu ČR, tak aby byla zohledněna rozmanitost dotazovaných. Průzkumu se účastnilo 86 respondentů.

Vlastní průzkum byl prováděn ve dvou úrovních. Dotazovaný byl nejprve seznámen s obecnou částí zaměřenou na pochopení termínu zelené infrastruktury. V druhé části byl průzkum zacílen na znalosti z oboru zelených střech. Dotazovanému nebyl následně umožněn návrat k části první, tak aby nemohl účastník v případě neznalosti logicky zpětně doplnit termín „zelené střechy“ do první otázky [15]. V rámci průzkumu byly položeny následující otázky:

První úroveň – zelená infrastruktura

Vstupní prohlášení: Zelená infrastruktura jako stavební objekt a součást stavebních objektů.

1. Jaký typ konstrukce, stavební objekt nebo součást objektu si představíte pod pojmem zelená infrastruktura? Uveďte výčet možností.

2. Znáte nějaký objekt ve vašem trvalém bydlišti, který lze označit jako zelenou infrastrukturu? Prosím o jednoduchý popis.

3. Víte, zda-li je tento objekt veřejným nebo soukromým majetkem?

Druhá úroveň - zelené střechy

4. Znáte obecné dělení zelených střech v současné inženýrské výstavbě? Prosím uveďte toto dělení.

5. Co si představujete pod pojmem biodiverzní střecha? (V poslední době též označované jako natur-based solution.)

*6. Jaká je podle vás obecně hlavní funkce zelené střechy? Popište jednoduše jen **jeden** důvod nebo modelovou situaci.*

Akceptované korektní odpovědi v případě znalostních otázek:

Otázka č.1:

Zeleň veřejných prostorů – parky, uliční zeleň, mobilní zeleň, ozeleněné pěší zóny, aleje; zelené střechy; zelené fasády; umělé ekologické biotopy určené k čištění vod (alternativně též koupání); technické retenční nebo vsakovací plochy a objekty na principu zapojení aktivní funkce rostlin, biokoridory pro zvěř.

Akceptovány byly různé variace uvedených pojmů, které splňovaly nadřazenost zmíněných termínů. Modelovým příkladem je například odpověď „stromy na ulici“ – v rámci průzkumu zahrnuto do oficiálního termínu uliční zeleň.

Otázka č.4:

Extenzivní, intenzivní, semi-intenzivní.

Akceptovány byly též odpovědi bez přechodné semi-intenzivní varianty, která se stále častěji označuje v odborných kruzích jako biodiverzní střecha.

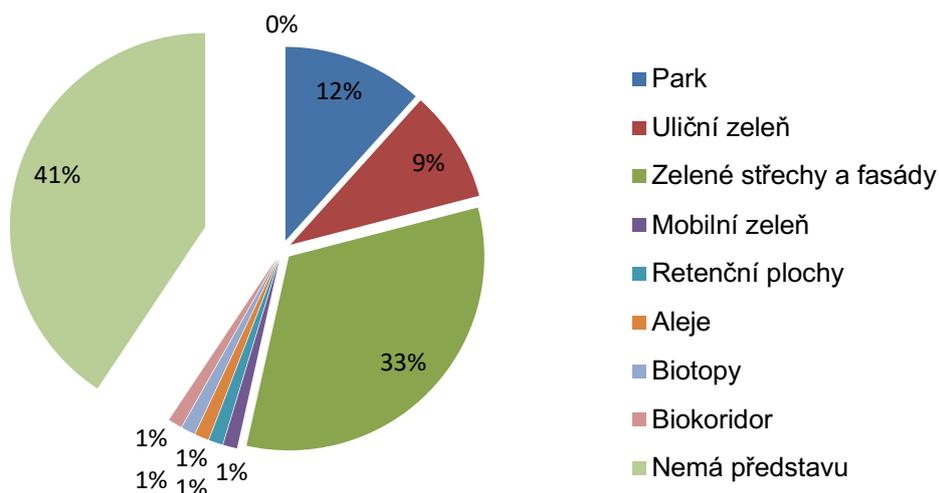
Otázka č.5:

Jedná se o variantu extenzivní nebo semi-intenzivní zelené střechy s proměnnou výškou substrátu, který může být zčásti nebo plně obohacen o lokální nebo typově podobnou půdní složku. Biodiverzní střecha je osázena velkým množstvím druhů rostlin od rozchodníků po původní druhy polních květin dané lokality.

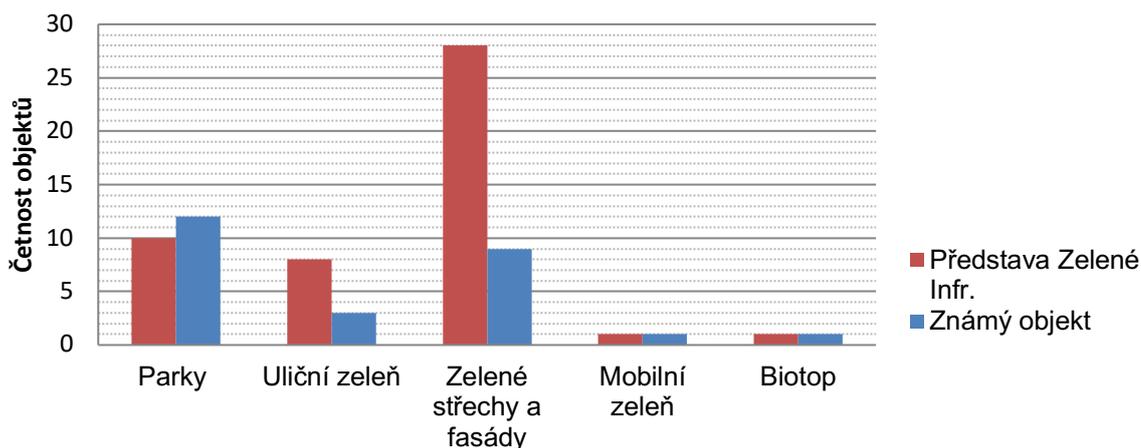
Akceptovány byly všechny odpovědi, které zahrnovaly alespoň jednu logickou myšlenku z výše uvedených atributů.

2.3.4 Výsledky sociálního průzkumu

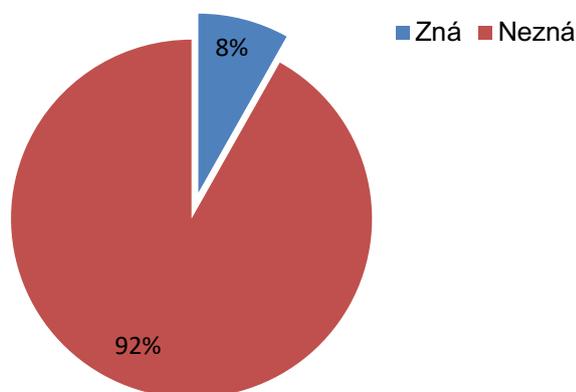
Pro větší přehlednost byly získaná data průzkumu zpracovány do výšečových a sloupcových grafů, které nejlépe dokumentují zjištěné výsledky. Jednotlivé obrázky jsou v rámci popisu přiřazeny položené otázce. Na 3. otázku odpověděli všichni zúčastnění správně, odpověděli-li na otázku předchozí. Schopnost zařadit skutečný objekt dle investora je tedy absolutní.



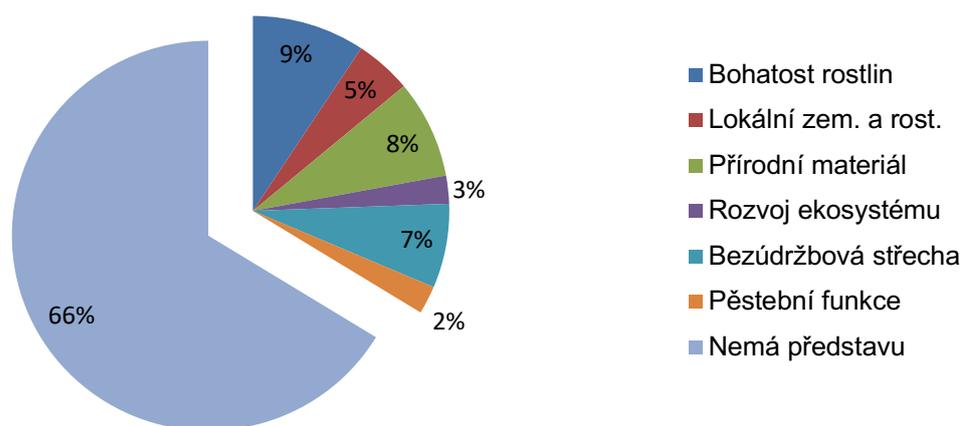
Obrázek č. 6: Představa zelené infrastruktury – reakce na otázku 1.



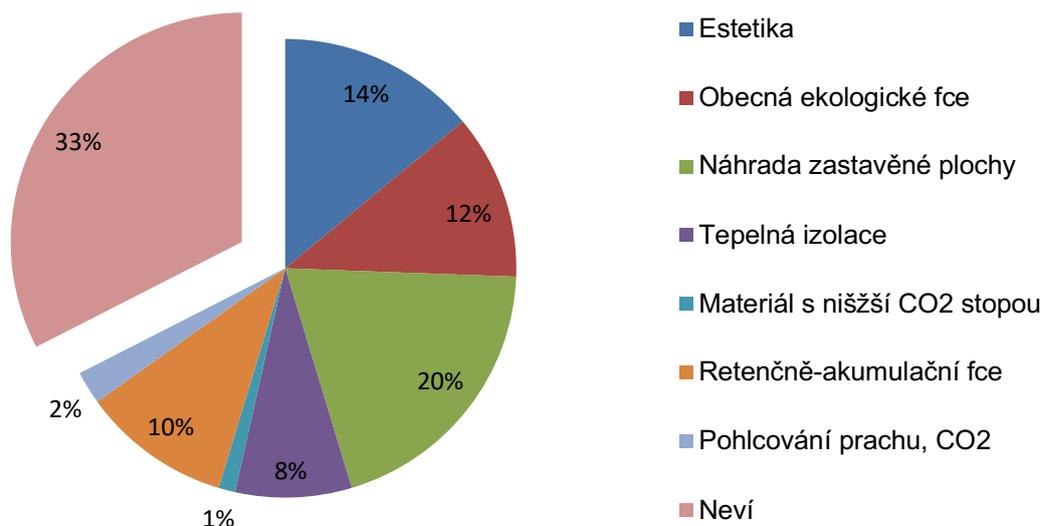
Obrázek č. 7: Představa vs reálná znalost objektu zelené i. – reakce na otázku č. 2.



Obrázek č. 8: Znalost dělení zelených střech – reakce na otázku č. 4.



Obrázek č. 9: Představa Biodiverzní střechy – reakce na otázku č.5



Obrázek č. 10: Hlavní funkce zelené střechy – reakce na otázku č.6

2.3.5. Hodnocení výsledků sociálního průzkumu

Nejčastější konstrukcí, kterou respondenti nejlépe a nejjednodušeji v rámci celku zelené infrastruktury identifikují, je zelená střecha a zelená fasáda. Pravděpodobně je tato situace způsobena částečně jazykově společným označením. Na druhou stranu je zde největší rozdíl mezi představou a reálnou znalostí skutečné konstrukce – z 28 respondentů znalo pouze 9 respondentů skutečnou realizaci. Z pohledu zelené infrastruktury si nejlépe stojí parky, které byly pro účastníky velmi snadno identifikovatelné a dobře známé. Ve všech regionech, ve kterých výzkum probíhal, byla ověřena existence známější konstrukce zelené střechy. 8 z 9 zmíněných známých objektů spadaly v této kategorii do soukromého vlastnictví. Z výsledků průzkumu vyplývá výrazně menší aktivita veřejných institucí v realizaci zelených střech a zelených fasád, což koresponduje se skutečným stavem na stavebním trhu.

Minimální představa panuje o nejnovějším trendu biodiverzních střech, jejichž správnou podobu je schopno rozpoznat jen 5% dotázaných. Za uspokojivou odpověď, která alespoň zčásti odpovídá podstatě termínu, lze považovat 14% odpovědí.

Za kritickou lze označit znalost dělení zelených střech, které zná jen 8% respondentů. Jedná se o nejpřekvapivější výsledek, který je v oboru zelených střech naprosto alarmující. Zejména v kontextu dotačních fondů Nová zelená úsporám, která s těmito pojmy běžně pracuje, dokumentů EU o strategiích rozvoje měst a plánovaných systémech SmartCities je velmi problematické dosáhnout pozitivních výsledků (Uvážíme-li předpokládanou ještě menší znalost mezi širokou veřejností.). Dotační systém Nová zelená úsporám disponuje slovníkem pojmů [16], který ovšem neobsahuje klíčová hesla „zelená střecha, extenzivní zelená střecha, semiintensivní střecha,“ apod., přestože tyto termíny většině potenciálních zájemců vůbec nic neříkají. Nejméně třetina dotazovaných nemá vůbec žádné povědomí o diskutovaném tématu, není schopna identifikovat funkci vybrané konstrukce zelené infrastruktury.

Za uspokojivý výsledek lze považovat výčet hlavních funkcí zelených střech. Respondenti jako celek uvedli všechny zásadní pozitiva, přičemž do tohoto výčtu není zahrnuto 12% odpovědí Obecná ekologické funkce, která je jako definice velmi povrchní a nekonkrétní.

Z výsledků průzkumu vyplývá nutnost seznámit jak laickou, tak i odbornou veřejnost důsledněji se základními pojmy a termíny zelené infrastruktury, protože tento pojem není pro zmíněné skupiny dostatečně srozumitelný.

3. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

3.1. Rozšíření šikmé vegetační střechy v ČR

V současné době je v České republice známo několik systémových řešení, které většinou pochází z Německa a Nizozemí. Toto řešení se snaží postihnout většinu parametrů technickým řešením aplikovaným přímo na eliminaci sledovaného problému. Konstrukce tak nabývá na složitosti a nevyužívá plně potenciálu vegetace, která může plnit řadu dalších funkcí tak jako v přírodních ekosystémech. Na druhou stranu může být toto řešení použito téměř ve všech podmínkách bez zásadního zohlednění termínu výstavby či dlouhodobé stavební přípravy. Obecně je toto řešení velice finančně náročné a brání většímu rozšíření vegetačních střech.

Uvažuje-li se v našich podmínkách o užití vegetačního zastřešení, obvykle stavebník zvažuje jen aplikaci střechy ploché. Šikmá varianta pak obvykle vůbec není diskutována. Sedlová vegetační střecha je bezpochyby technologicky složitější na realizaci, ale její vegetační aktivní použitelná plocha je mnohem větší a při optimálním návrhu může maximalizovat pozitivní efekt chování ozelenění.

Dále na zahraničním trhu existuje řada drobných modifikací a malých vylepšení, které se aplikují v rámci používaných systémů. Jako příklad lze nastínit příklad německého výrobce dřevěných dveří: S nástupem zájmu ozeleňování střech jej napadla myšlenka využívat část odpadu z výroby dveří, a sice dřevoštěpkového plniva jako vegetačně podpůrné vrstvy. Testované dílce ve formě desek poskytl zahraniční univerzitě k pokusné výstavbě. Pozitivní vliv na podporu růstu vegetace na šikmé střeše byl experimentálně potvrzen. Výsledný produkt se následně objevil na trhu, ale pro jeho vysokou ekonomickou náročnost výroby ve větším měřítku nedošlo k jeho zásadnímu rozšíření. Tato situace postihuje většinu podobných realizovaných zlepšení.

Pokročilou variantou v ČR je realizace šikmé zelené střechy ze skládaných plastových panelů s minerální vlnou a zapěstovanou rozchodníkovou vegetací se sklonem 27° o celkové rozloze 21 m². Jedná se o velmi zdařilou realizaci, která z pohledu obecného rozšíření neumožňuje automatickou přenositelnost použité koncepce, protože má jednostrannou orientaci a poměrně malou rozlohu. [28]

3.2. Poznatky z terénního výzkumu

Jako hlavní cíl mých zahraničních studijních pobytů bylo studium vegetačních střech v lokalitách, ve kterých jsou tyto konstrukce plně etablovány ve stavební praxi.

Volba lokalit byla založena na následujícím principu: navštívit zemi, ve které existují tyto stavby stovky let bez zásadních konstrukčních změn, a dále zemi, ve které došlo k největšímu rozvoji tohoto typu konstrukce. Po zvážení všech možností byl vybrán Island jako zástupce historických konstrukcí, Švýcarsko jako evropský lídr v ozeleňování střech a Rakousko jako lokalita s náročnou stavební legislativou.

3.2.1 Island – Reykjavík University

Fakulta stavební mi umožnila vyjet na studijní zahraniční pobyt na Island, který byl podporován Evropským fondem České republiky CEPRI – Středoevropské centrum pro vytváření a realizaci inovovaných technickoekonomických studijních programů (CZ.1.07/2.2.00/28.0301). Tento pobyt probíhal na Reykjavík University – Department of Civil Engineering, kde jsem působil jako hostující student doktorského studia. Výjezd se uskutečnil v období od 19.7.2013 do 27.6.2014.

Nedostatek stavebních materiálů, nerozvinuté technologie ve stavebnictví a výborné tepelně-izolační charakteristiky byly hlavními příčinami rozšíření vegetačního zastřešení na Islandu. Tato unikátní konstrukce byla svým stabilním chováním vhodným druhem zastřešení také v lokalitách s velkým úhrnem srážek a silným zatížením větrem, které jsou pro danou oblast typické. Také díky konstrukční jednoduchosti a způsobu provádění je islandská konstrukce v porovnání s jinými šikmými vegetačními střechami méně náročná z hlediska technologie výstavby s tím, že funkčnost a trvanlivost je samozřejmě prvořadá.

Studium na Islandu přineslo mnoho podkladů do souboru dat doktorské práce. Hlavním pozitivem je popis a varianty nezměněného historického konceptu. Tento podklad vedl k sestavení nové moderní varianty tohoto druhu šikmého vegetačního zastřešení. Tento návrh pak byl konzultován s architekty z oboru a dočasnými vedoucími na Reykjavík University. Důraz byl kladen na zachování původního principu funkčnosti ve specifickém sledovaném období. Výsledný návrh díky systému uzavírání a otevírání vzduchové mezery v horním střešním plášti tvoří kombinaci střešního pláště jednoplášťového a dvouplášťového. Cílem bylo využít pozitivních vlastností a potlačit negativní vlastnosti konstrukce střechy jednoplášťové a dvouplášťové. Díky tomu bude plně využit potenciál této střechy z hlediska tepelně-technického. Nároky na tepelně-technické parametry je v dnešní době jednou z nejdůležitějších podmínek pro úspěch na stavebním trhu. Celkově se jedná o unikátní systém, který se v běžném stavebnictví zatím neobjevil. Sestavení tohoto systému není nikterak složité a funkční technologie existuje řadu let v řízení ventilace skleníků. Základním požadavkem pro optimální funkci je program uzavírání dutiny.

3.2.1.1 Sběr dat prostřednictvím národního muzea Þjóðminjasafn Íslands

V rámci provádění vstupní rešerše zabývající se šikmými zelenými střechami jsem s doktorandkou Ing. Klárou Nečadovou navštívil 95% všech chráněných historických objektů či replik se střechou z travních drnů. Nejlépe zachované objekty byly součástí komplexu zmíněných muzeí. Na objektech jsme měli možnost

zdokumentovat detaily zastřešení, porovnat jednotlivé způsoby provádění střešního pláště, a také zkontrolovat naše závěry s průvodci a bývalými obyvateli těchto objektů.

3.2.1.2 Bustarfell Museum

Farma se nachází na severovýchodě Islandu ve vesnici Hofsárdalur a patří mezi nejlépe ošetřované dobové obydlí s travním zastřešením. Farma byla vybudována v roce 1770 a až do roku 1966 zde žili lidé. Od roku 1943 je objekt ve vlastnictví The Iceland Nation a všechny rekonstrukce a údržby spadají pod společnost The Icelandic National Museum. Cení si zejména informací, které nám byly poskytnuty ze strany lidí, kteří v objektu musea Bustarfell přebývali ještě na konci roku 1982 a způsob vedení jejich života byl stejný jako během předchozích staletí. Bylo nám podrobně řečeno, jaké byly nevýhody a výhody zastřešení vegetační střechou a jak obyvatelé museli upravovat vnitřní prostředí v těchto objektech tak, aby maximalizovali vnitřní komfort prostředí.

Od doby, kdy je objekt využíván jako muzeum, bylo zde nutné instalovat jednoduchou vzduchotechnickou jednotku pro udržení přijatelného vnitřního prostředí.

3.2.1.3 Reykholt

Tato replika je součástí areálu bývalého biskupství na západní straně ostrova. Jedná se o dřevostavbu s drnovou střechou přecházející do drnové izolační stěny. Vnitřní klima bylo při všech návštěvách velmi stabilní a nedocházelo k žádným prudkým změnám teplot. Velká masa materiálu po obvodu stavby vždy vybalancovala exteriérové dramatické poklesy teplot a vnitřní prostředí reagovalo na tyto změny jen poklesem v řádu jednotek Kelvinů v následujících 10 hodinách během celého roku. Tato replika byla postavena přesně dle historických pramenů z archivů biskupství.



Obrázek č. 11: Replika objektu v areálu Reykholt (zdroj: autor, 2013)

3.2.2 Švýcarsko – Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)

V rámci druhého zahraničního výjezdu jsem navštívil curyšskou vysokou školu ZHAW, na které vede Institut vegetačních střech švýcarský guru tohoto oboru. Touto osobou je doc. Stephan Brenneisen, Ph.D. Docent Brenneisen byl v době mé stáže také hlavním konzultantem stavebního odboru v Basileji v otázce zelených střech. Díky tomu mohl fundovaně poskytnout přístup včetně seznámení se skladbou na řadu vegetačních střech v tomto městě. Rozsah znalostí, které jsem jeho prostřednictvím získal, výrazně převyšuje počet stran, kterým je limitována tato práce.

S celým týmem tohoto institutu jsme se společně s kolegyní Ing. Nečadovou podíleli na řadě švýcarských projektů ve výzkumném i komerčním sektoru. Obory a témata, kterými se tento tým zabývá, vyžadují spolupráci řady odborníků od architekta a klimatologa po botanika či entomologa. Komplexnost takovéto spolupráce pak produkuje řadu zajímavých instalací, které jsme během pobytu ve Wädenswilu realizovali. Tyto realizace především cílily na rozmanitost budoucí vegetace. Právě ze Švýcarska v současné době expanduje názor preferenci bio-diverzní vegetační střechy. Začíná se zde rozlišovat mezi střechou vegetačně chudou, která chce jen vyhovět požadavkům zákona, a mezi bio-diverzní hustou vegetací, která má nejen větší tepelně technický přínos, ale také podporuje rozvoj nových městských ekosystémů.



Obrázek č. 12: Ukázka hmyzí pasti na jedné ze sledovaných střech v Basileji (zdroj: autor, 2015)

Každá země či národ má svůj specifický přístup k tomuto problému. S tím i přichází úpravy pojmenování jednotlivých typů střech. Tato pojmenování pak

v jednotlivých zemích reprezentují i různé verze vegetačních střech. Ve Švýcarsku právě nastává u odborné veřejnosti jistý přerod od původně německých systémů pojmenování zmíněné konstrukce na jednodušší vlastní dělení na anglické „poor or biodiverse green roof“. Výrazy jako extenzivní či intenzivní vegetační vrstva ustupuje do pozadí, protože necharakterizují přesně danou vrstvu. Extenzivní ozelenění může být buď „chudé“ nebo „bio-diverzní“. V obou uvedených případech se bude tzv. extenzivní vegetace chovat úplně odlišně. Tím dochází i ke změně retenčních schopností vegetační vrstvy, změní se obsah vody a následně i tepelný odpor konstrukce. Může nastat úbytek listové plochy nebo naopak její nárůst, který ovlivňuje pozitivní efektivitu evapotranspirace.

Orientace v problematice díky výše uvedenému není jednoduchá a vždy je třeba posuzovat skladbu konstrukce jako celek včetně jednotlivých vrstev i vrstvy samostatně. Na druhou stranu jednodušší švýcarské označování vede k lepšímu popisu prvotního záměru návrhu. Jako stavebník definuji prvotní směřování a vlastní autor návrhu už blíže rozpracuje potřebnou skladbu a detaily s ohledem na celý objekt. Tento postup je zajisté nezbytný pro větší rozšíření a přiblížení těchto střech laické veřejnosti.

Na půdě ZHAW jsme společně s Ing. Nečadovou a doc. Brenneisenem diskutovali a provedli několik experimentů, které se snaží odhalit rozdíly mezi šikmou a plochou variantou. V popředí našeho zájmu stála zejména vegetačně-retenční vrstva.

Z technologického hlediska měly realizace ve Švýcarsku některé nedostatky, které by bylo jednoduché odstranit důsledným technologickým předpisem. Nejčastějším problémem byla manipulace s velkým množstvím materiálu, který nebyl správně distribuován po staveništi, a nedůsledná instalace ochranné vrstvy při instalaci. Tato nekázeň vedla k občasným drobným poškozením hydroizolační vrstvy nebo jiných ochranných vrstev střechy. Další kritický bod je ošetřování konstrukce krátce po instalaci, které by mělo být specifikováno dle povětrnostních podmínek v technologickém předpisu. V opačném případě je nemožné zaručit návrhové hodnoty skladby.



Obrázek č. 13: Pohled na zelené střechy v Luzernu (zdroj: autor, 2015)

3.2.3 Rakousko –Bodenkultur Universität Vienna (BOKU)

Fakulta stavební mi umožnila uskutečnit studijní zahraniční výjezd na vídeňskou univerzitu BOKU - University of Natural Resources and Life Sciences - Institut of Soil Bioengineering and Landscape Construction v rámci studijního programu Erasmus+ pracovní stáž. Stáž probíhala pod odborným vedením vedoucí ústavu Dr. Ulrike Pitha, jejíž práce je zaměřena na vývoj zelených střech, možnosti aplikace solárních systémů na konstrukce zelené infrastruktury a navrhování zelených fasád. Intenzivně probíhala také spolupráce s Ing. Bernhardem Scharfem, jehož vědecká činnost je zaměřena na zelené konstrukce včetně optimálního návrhu zavlažovacích systémů pro tyto konstrukce a dále vývoj zazeleněných parkovacích ploch z recyklátů. Dále jsme se zabývali koncepčními návrhy a možnostmi využití zavlažovacích systémů pro konstrukce zelených střech a zelených fasád. Během výjezdu mi bylo umožněno podílet se na realizacích a rekonstrukcích několika zelených střech v centru Vídně. Byl jsem zapojen do projektů, které probíhaly v rámci dlouhodobých výzkumů univerzity. Jednalo se o testování hydroizolačních vrstev a vrstev proti prorůstání kořenů, konstrukční využití propustných solárních systémů na konstrukcích zelené infrastruktury. Společně jsme zkoumali možnosti využití desek z recyklovaného polyesteru jako vegetačně-retenční vrstva – testování růstových vlastností kořenů.



Obrázek č. 14: Demonstrace průběhu testování odolnosti proti prorůstání kořenů na BOKU (zdroj: autor, 2016)

4. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

4.1 Vlastní cíle práce – Optimalizace návrhu šikmé vegetační střechy

K dosažení optimalizace návrhů zelených střech poslouží následující hlavní kapitoly této disertační práce:

→ **Podrobný technologický předpis procesu výstavby vegetační střechy včetně možných rizik při realizaci**

Technologický předpis je zařazen jako samostatná příloha.

→ **Návrh materiálu pro vegetačně retenční vrstvu**

Bližší obsah této části a pohnutky pro realizaci tohoto bodu jsou popsány v kapitole 7.

→ **Vliv technologie a volených materiálů na stavebně fyzikální vlastnosti zelených střech**

Základní popis je shrnut v kapitole 7. a 8.

→ **Hodnocení krátkodobé a dlouhodobé stability z hlediska působení povětrnostních podmínek v průběhu vybraného životního cyklu konstrukce**

Obsah tohoto bodu je popsán v kapitole 9.

4.2 Vědecký přínos

Práce si klade za vědecký cíl blíže popsat fyzikální chování v kontaktních exteriérových vrstvách střechy a zmapovat transport vody od zdrojových srážek po odvedení přebytečné vody z vegetačně retenční vrstvy. Tento cíl lze naplnit stanovením odtokových charakteristik používaných materiálů vegetačních konstrukcí. Na vhodnou formu testování odtokových charakteristik nepadá v legislativě ani mezi odborníky shoda. Z tohoto důvodu bylo potřeba řešit i volbu vhodných testovacích metod. Při vývoji materiálů bylo cílem porovnávat současné a vyvíjené vlastnosti technických vrstev. Nastavení této studie je unikátní v celosvětovém měřítku a o její výsledky projeví zájem i zahraniční spolupracující organizace.

Testovací objekty, které vznikly pro účely testování vegetačních konstrukcí, byly zrealizovány jako full-scale i semi-scale experimenty – měření mohlo probíhat velmi efektivně díky kombinování výsledků a hodnocení výsledků obou forem měření.

4.3 Přínos pro stavební praxi

Výsledkem zpracovávaného tématu pro stavební praxi bude optimalizovaný návrh skladby vegetační střechy včetně doporučených hodnotících a návrhových parametrů jednotlivých vrstev a návrhových podmínek včetně podrobného technologického předpisu realizace. Materiálovým výstupem bude matrace či rohož, která bude plnit

funkci vegetačně-retenční vrstvy vegetační střechy určené do kontinentálních návrhových podmínek.

Na základě měřených parametrů zelených střech bylo možné připravit podklady pro dotační titul zelených střech ve Statutárním městě Brně.

5. POPIS HLAVNÍCH TESTOVACÍCH OBJEKTŮ

5.1 Testovací objekt EnviHUT a přidružená testovací výstavba

Za podpory řady juniorských a seniorských specifických projektů byl v roce 2017 dokončen testovací objekt v areálu ADMAS. Na tomto objektu spolupracoval tým hlavních řešitelů reprezentovaný doktorandy FAST – autorem Petrem Selníkem (TST), Klárou Nečadovou (PST), Radimem Kučerou (PST), Františkem Vlachem (PST) a řadou seniorských vědeckých pracovníků v čele s Davidem Bečkovským za PST a Martinem Mohaplem za TST. Každý člen týmu je nejen zaměřen na svou specifickou oblast poznání, ale současně také spolupracuje na většině dílčích aktivit spojených s hodnocením sledované konstrukce. Tímto postupem dochází ke zkvalitnění výsledných výstupů a větší efektivitě celého týmu.

V areálu ADMASu byla umístěna stavební buňka, která byla odstrojena a opatřena novými obalovými konstrukcemi včetně plánovaného segmentového dělení střešní vegetační konstrukce. Toto dělení umožnilo instalaci jak bio-diverzního porostu, tak i části s rozchodníky. Další testovací segment byl zrealizován jako tradiční vegetační řešení z drnových koberců. Plánované rozdělení plochy je stanoveno na poměr 1:1:1 ve prospěch každé varianty se severní a jižní expozicí.

V rámci tohoto modelu byl během instalací otestován pracovní postup, který byl sestaven na základě poznatků z vlastních instalací během zahraničních výjezdů. Po instalaci datové sběrnice, příslušných teplotních a vlhkostních čidel do skladby konstrukce a děleného retenčního měřicího systému bylo započato s měřením a monitorováním stavu.

Zařazeno do tvůrčích aktivit VUT v Brně:

- BEČKOVSKÝ, D.; KUČERA, R.; POSPÍŠIL, J.; VLACH, F.; NEČADOVÁ, K.; SELNÍK, P.: EnviHut; *EnviHut – Relocatable Test Hut*. Centrum AdMaS Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně Purkyňova 139 612 00 Brno. URL: <http://www.envihut.com>.

Současně s tímto hlavním testovacím objektem tým pokračoval v hodnocení vegetačních testů, které byly průběžně rozšířeny na další testované materiály. Vegetační testy byly od konce června 2015 instalovány na střeše hlavní budovy ZHAW – Campus Grüental ve Wädenswilu a jeho průběžné výsledky budou prostřednictvím doc. Brenneisena a jeho týmu předávány autorům testu.



Obrázek č. 15: Začátek výstavby objektu EnviHUT (zdroj: autor, 2015)



Obrázek č. 16: Areál ADMASu a objekt EnviHUT (zdroj: autor, 2017)

5.2 Testovací mobilní plošiny

Mobilní testovací plošiny vznikly pro účely rychlého testování různých světových orientací, proměnné sklonů měření a rychlou možnost úpravy instalované skladby. Rozměr instalovatelné střechy je 1,2 x 2 m a rozsah nastavení sklonu do 45°. Zařazeno do tvůrčích aktivit VUT v Brně:

- BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P.: GRM Test Platforms; *Mobilní testovací zařízení šikmých střech*. Centrum AdMaS Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně Purkyňova 139 612 00 Brno.



Obrázek č. 17: Testovací mobilní plošina (zdroj: autor, 2019)

5.3 Testovací laboratorní segmenty

Laboratorní aplikace zelené střechy s možností regulovaných umělých srážek slouží jako základní měřicí konstrukce pro měření odtokových charakteristik. Od roku 2016 prošla testováním a vlastním vývojem do výsledné podoby dle obrázku č. 18 s testovatelným rozměrem 1,2 x 1,2 m s maximální výškou skladby do 25 cm. Limitní sklon nastavení testovací stolice je 30°. Rozsah tohoto testování zcela postačuje potřebám

pro hodnocení odtokových parametrů semiintenzivních a extenzivních zelených střech. Toto laboratorní semi-scale měření bylo nejefektivnějším nástrojem hodnocení při vývoji nových verzí technických materiálů z polyesteru podporovaných v rámci programu TRIO I. Zařazeno do tvůrčích aktivit VUT v Brně:

- BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.: Green Roof Test Platforms; *Green Roof Steep-sloped platforms*. Centrum AdMaS Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně Purkyňova 139 612 00 Brno.



Obrázek č. 18: Testovací laboratorní segmenty (zdroj: autor, 2019)

6. Podrobný technologický předpis procesu výstavby vegetační střechy včetně možných rizik ovlivňující dlouhodobou stabilitu konstrukce

Technologický předpis zelené střechy je z důvodu vlastního logického dělení součástí přílohy č. 4. Obecný plán rizik pro realizaci zelené střechy je z důvodu charakteru rozsáhlé tabulky samostatnou přílohou č. 5.

7. Návrh materiálu pro vegetačně retenční vrstvu

7.1 Vývoj vegetačně-retenční vrstvy

V rámci návrhu dlouhodobé stability svrchního pláště plánované testované konstrukce bylo rozhodnuto o vlastní úpravě vegetačně-retenční vrstvy. Díky spolupráci s českou firmou zabývající se recyklací byla získána možnost vyvinout optimální materiál dle požadavků autora tak, aby byl plně využit potenciál materiálu s ohledem na technické, ekologické i ekonomické možnosti. Na základě vzájemného dialogu s firmou byla vybrána řada materiálů s potenciálně vhodnými parametry. Cílené hodnoty byly stanoveny na základě terénního výzkumu na Islandu a ve Švýcarsku studiem existujících podobných materiálů. Toto studium ukázalo, že neexistují žádné závazné či doporučené parametry pro tento typ vrstvy. Řada současných výrobců se též rozchází v přesném definování názvu této vrstvy. Podle názoru autora by se pojmenování této vrstvy mělo odvíjet od hlavní sledované funkce materiálu, která v konkrétním návrhu hraje nejzásadnější roli. Někteří výrobci stanovují jako hodnotící kritéria propustnost nebo transmisivitu rohoží či matrací. Způsob, kterým by tyto hodnoty byly měřeny dle platných norem například pro geotextilie, necharakterizuje princip chování vody na šikmé střešní konstrukci. Zvláště pak kritickým konfliktem je základní podmínka hodnocení těchto norem tak, že průtok posuzují vždy striktně kolmo na plochu. Z měření vyplývá, že tento parametr významně ovlivňuje výsledné chování souvrství. Proto autor upustil od tohoto posuzování materiálu jako hlavní hodnotící kritérium a byl navržen postup měření, který se více blíží skutečnému fyzikálnímu chování prostupu vody horním vegetačním pláštěm. Za dostatečnou pevnost proti protlačení dle EN 12236 byla stanovena hranice 0,6 kN, která v současné době odpovídá hodnotám většiny geotextílií od plošné hmotnosti 150 g·m⁻².

Tento dílčí projekt je součástí širšího projektu, který si klade za cíl rozvoj šikmé vegetační střechy. V rámci tohoto dlouhodobého plánu byla postavena experimentální stavba v areálu ADMAS v Brně.

7.1.1 Popis materiálu

Za vstupní testovací podmínku byl zvolen průměrně příznivý stav pro potenciální vegetaci. Autor si je vědom rozsáhlých variací instalačních podmínek, a proto jsou testy

orientovány spíše na nepříznivé stavy pro vegetaci. V opačném případě je řada potenciálních defektů vyřešena principem bio-diverzního prostředí.

Základem byl recyklovaný polyesterový materiál s možnou příměsí přírodní složky ve formě matrací o plánovaném rozměru 1,2x0,6 m s tloušťkou od 1 do 4 cm, která se odvíjí od specifické objemové hmotnosti testovaných prvků. Testované desky vyráběné technologií Airlay v širokém spektru plošných gramáží ($600 - 1200 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) byly složeny z bikomponentních vláken bez chemických pojiv. Díky způsobu výroby tento materiál dlouhodobě odolává degradaci způsobenou vlhkostí, vibracemi i stárnutím. Polyesterové matrace zvolna dlouhodobě degradují za působení UV záření, jehož působení je omezeno vrstvami, které kryjí tuto matraci. Vegetace do 10% tohoto záření odrazí, minimum pohltí a zbytek nechá projít do půdy. Jako ochranný efekt navíc funguje fakt, že působení UV stimuluje růst listové plochy vegetace. Částečná degradace této vrstvy je však vítána, protože potenciálně umožňuje dlouhodobě větší spojení kořenového systému a právě sledovaného prvku. Minimální předpokládaná trvanlivost dle dat výrobce je 15 let. Pokud by potenciální stavebník neměl důvěru v minimální trvanlivost, lze přidat vrstvu netkané geotextílie z recyklovaného polyetylen tetraftalátu, jejíž životnost dlouhodobě převyšuje zamýšlenou trvanlivost instalace. Tyto obavy jsou ale bezpředmětné a dle terénního výzkumu ve Švýcarsku slouží tato dodatečná vrstva spíše jako marketingový tah či přesvědčení zákazníka o stoprocentní odolnosti vegetační střechy. Je ale třeba zvážit množství odvedené vody touto folií od matrace zvláště na velmi sklonitých střešních konstrukcích, protože by filtrační fólie měla negativní efekt na akumulační vlastnosti matrace a neumožnila by transfer vody do ní[2].

Zásadní otázkou je také ekonomický aspekt návrhu. V současné době masovějšímu rozšíření zelených střech také brání finanční náročnost a obava z možné opakované obnovy svrchního pláště. V zemích, kde je aplikace vegetační střechy stanovena zákonem, tato otázka volby odpadá a hledá se ekonomické funkční řešení. Námí vyvíjený materiál má velký potenciál neb se jedná o recyklát složený z cenově dostupných materiálů s velkým ročním úhrnem produkce z řady průmyslových odvětví. Autor si je vědom provázanosti vyvíjeného materiálu s ekologickým přístupem k prezentovanému vývoji, a právě proto byl zvolen jako vstup recyklovaný materiál bez chemických pojiv. Spolupůsobení vegetace, substrátu a matrace nemá za následek vývin negativních látek, které by nepříznivě ovlivňovaly životní prostředí. Testované materiály s příměsí bavlny byly napuštěny ochrannou látkou, která zpomaluje hoření materiálu. Tato napouštěná látka je chráněna výrobním tajemstvím, a proto zde nebude konkrétně zmíněna. Uvedená látka zpomalující hoření není dle testů toxická, karcinogenní a nezpůsobuje akutní ani chronické zdravotní obtíže. V případě požití může způsobit zažívací obtíže. Ekotoxická data poskytují následující výsledky: Vláknitá matrace bez příměsí nepoškozuje vodní ekosystém, ryby, rostliny ani zvířata. Napouštěná látka byla testována v kombinaci s matrací s následujícím závěrem: $\text{LC}_{50} > 100 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (48h) dle DIN 38412 T 15 *Leuciscus idus*. Plánované aplikované použití této matrace v současné fázi vývoje nepředpokládá využití této látky ve vyvíjené skladbě vegetační střechy.

Z technologického hlediska při instalaci je důležitá odolnost při manipulaci, možnosti instalace a dělitelnost materiálu. Testované matrace aplikované při vegetačním testu nelze dle normy EN 13433 prorazit a vykazují hodnotu 0. To je vhodné při manipulaci, ale obtížnější při kotvení tohoto prvku na střešní konstrukci. Tento problém úspěšně ve svém projektu vyřešil Ing. Ivo Rotrekl. Materiál dle jeho předepsaných postupů lze vrtat i řezat. Současně se na trhu objevili akumulátorové řezací pily na vláknité a izolační materiály, které velmi rychle a efektivně řežou testované materiály. Komerčně jsou tyto nástroje dostupné na trhu od roku 2018.

V rámci testovaných materiálů byly zahrnuty i směsi polyesterového vlákna s přírodními materiály jako je len či bavlna. Předpokládané provázání matrace s vegetací je mnohem rychlejší a dříve získá na pevnosti proti sesuvu vrstev, protože dochází k rychlejší pozitivní očekávané degradaci. V této fázi do tohoto procesu vstupuje ekonomická otázka. Současná produkce recyklovaného lnu je minimální, a proto se do výroby musí přidávat nový poměrně drahý len. Materiál by pak neodpovídal zvoleným vstupním parametrům vývoje. Jako vhodná alternativa je pak možné využít bavlnu, která má v tomto případě větší současný potenciál v materiálových zdrojích.

Princip výroby těchto matrací umožňuje volbu hrubosti mletí recyklovaných shluků, které zpočátku absorbují vodu ve znatelně menším množství než výplňová směs jednotlivých vláken. Naproti tomu po 24 hodinovém namáčení je voda plně nasáklá v shlucích a tyto shluky při sušení jen pomalu uvolňují vodu. Voda prvotně podle pozorování při sušení odtéká nejprve z vláknité masy. Díky tomu je možné navrhovat různou velikost shluků danou prvotním mletím a modelovat tak nasákavost a také rychlost transportu vody v navrženém systému. Větší obsah těchto shluků také v závěru vede k větší úspoře zdrojů a lepší efektivitě výroby.

7.1.2 Stručný popis variant materiálů

IZOL VARIANTY – polyesterový bikomponentní materiál s variabilní objemovou hmotností, tloušťkou i obsahem shluků. Podrobnější rozdíly jsou popsány v následujících bodech.

MAT	Tloušťka (mm)	Objem. Hm. (kg·m ⁻³)	Charakter shluků
LIGHT PES	35	30	homogenní, bez shluků
IZOL 175P	30	140	střední shluky 5-15 mm
IZOL SU	45	100	střední shluky 5-15 mm

LENROOF – směs lnu s 20 až 30 % recyklovaného polyesteru. Dnes se pěstuje převážně olejářský len a na vlákno jen velmi omezeně v Rusku, proto oproti ostatním materiálům výrazně narůstá výrobní cena.

SENIZOL AT14 – směs recyklované bavlny z 50% a recyklovaného polyesteru z automobilového průmyslu ve stejném procentuálním zastoupení. Tato směs byla primárně vyvinuta jako akustická izolace a používána s objemovou hmotností $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

SENIZOL WHITE – směs recyklované bavlny z 50% a recyklovaného polyesteru ve stejném procentuálním zastoupení. Materiál má téměř totožné vlastnosti jako SENIZOL AT14. Testováno se záměrem ověřit podobnost obou těchto materiálů pocházejících z rozdílného původního prostředí.

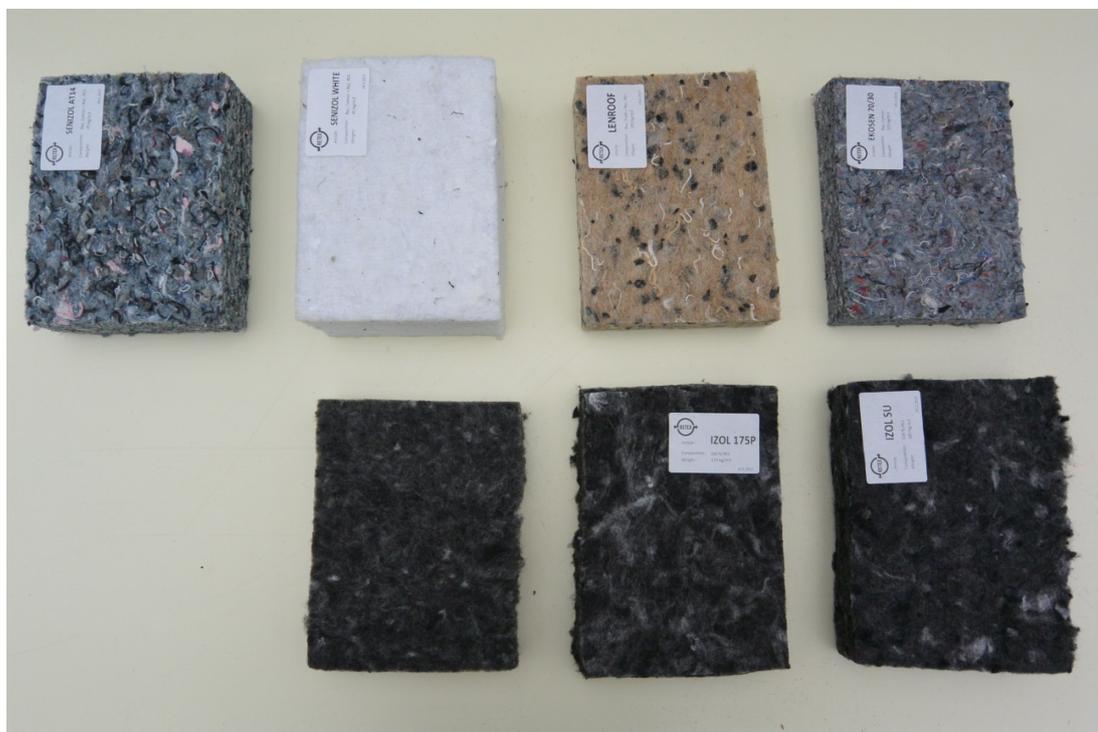
EKOSEN – deska z recyklované bavlny se stejným procentuálním složením jako LENROOF tedy 20 až 30 % recyklovaného polyesteru. Cílem je porovnat chování s materiálem LENROOF. Tento bavlněný ekvivalent má oproti lněné verzi nižší životnost. Výhodou při aplikaci je nejrychlejší předpokládané prorůstání kořenů do matrace. Matrace není opatřena žádným fungicidním přípravkem, a proto může docházet ke vzniku plísní či hub. Některé typy hub jsou na druhé stranu nezbytné pro růst některých rostlinných druhů např. orchidejí, které podporují biodiverzitu celého porostu a tím i větší dlouhodobou stabilitu.



Obrázek č. 19: Historicky nejceněnější vegetační střecha ve střední Evropě ve Wollishofenu (zdroj: autor, 2015)

Idea postupné degradace v tomto případě spočívá v plném propojení vegetace, půdy a matrace. Dlouhodobě sledované objekty jako je např. 100-letá plochá vegetační střecha na vodním díle Moos [3] ve Wollishofenu (obrázekč. 19) si zachovávají díky provázanosti vrstev a bohaté biodiverzitě vysokou stabilitu vegetačního souvrství v proměnlivých poměrně náročných podmínkách v předhůří Alp. Zmíněná střecha se skládá z betonové nosné konstrukce proměnné tloušťky, hydroizolační vrstva z tekutého litého asfaltu a přírodní zeminy v kombinaci s lokálním zdrojem vegetace. Postupné propojení těchto vrstev zaručuje efektivnější spolupůsobení, které je dotvářeno tvorbou nové jednotné vrstvy, která postupně dotváří potřebné vlastnosti pro rozvoj vegetace. Vzhledem k expozici střechy v krajině, pak je střecha přímo ovlivněna blízkým okolím a může dojít k celkové výměně většiny rostlinných druhů, které se na ní původně vyskytovaly.

Tento efekt nemůže být ale plošně aplikován na všechny typy vegetačních střech. V případě střechy s chudou vegetací, kterou stavebník dlouhodobě požaduje udržovat v nezměněné podobě, by volba degradující vrstvy nepřinášela žádný užitek a z dlouhodobého hlediska by ohrožovala stabilitu celého souvrství. Tento typ střechy není předmětem zájmu autora, a proto byl při vývoji sledované funkční vrstvy hodnocen jen okrajově.



Obrázek č. 20: Testovaná sada materiálů (zdroj: autor, 2015)

7.1.3 Testy nasákavosti

Při srovnávání jednotlivých materiálů (obrázek č. 20) vznikla potřeba hodnotit jednotlivé vzorky z pohledu nasákavosti jednak krátkodobé tak i nasákavosti při zatížení a se zohledněním vlivu úhlu aplikované střechy. Zásadním faktorem tohoto pokusu bylo omezení testovacích možností způsobené dostupnými materiály. Některé vybrané testované materiály byly vyráběny omezeně pro specifickou zakázku a v současné době není možné otestovat větší dílce, protože výroba materiálu je limitována použitím značného množství vstupních recyklovaných surovin. Autor si je vědom tohoto omezení a při testování zohlednil minimální rozměry testovaných výrobků. V projektu bylo zacíleno na obecné hodnocení materiálu podle jeho vlastností v laboratoři pro základní definici chování zkoumaných materiálů. Vzhledem k mnoha proměnným vlastnostem v průběhu hodnoceného období je obtížné stanovit jedinou požadovanou hodnotu, která by definovala efektivní využití potenciálu přírodního materiálu. Z tohoto důvodu byly vybrány následující dva testy nasákavosti, které poskytnou vstupní data pro vývoj konečné modifikace vyvíjené polyesterové matrace s možnými optimalizovanými příměsmi.

7.1.3.1 Krátkodobý test nasákavosti

Pro účely hodnocení byl za vstupní testovací princip stanoven dříve používaný test krátkodobé nasákavosti tepelně-izolačních materiálů dle EN 1609 (72 7053). Oproti původnímu předpisu normy došlo ke změně testovaného rozměru, protože původní rozměr hranolu čtvercového průřezu o hraně (200 ± 1) mm nemá v testování vegetační matrace s maximální myslitelnou užitnou výškou 4 cm význam. Nově testovaný rozměr byl stanoven na hranol o délce (200 ± 2) obdélníkovém průřezu $(145\pm 2)\times(\text{min } 30\pm 2)$. Proměnlivý parametr jedné hrany je stanoven z důvodu zásadní odlišnosti jednotlivých testovaných materiálů a předpokládaného chování jednotlivých verzí podle objemové hmotnosti. Stanovení hmotnosti zkušební tělesa bylo stanoveno s přesností na 1g.

Ze zmíněné normy bylo aplikováno kondicionování zkušebních těles, příprava zkušebních těles a zkušební podmínky mimo ověření počátečního zvlhčení metody B tj. odečtení počátečního zvlhčení. Byla provedena metoda A – odkapávání i metoda B – odečtení počátečního zvlhčení se stejnými podmínkami testování mimo dříve zmíněné. Opakovatelnost pokusu s ohledem na přesnost měření není normou stanovena. Srovnávací referenční vzorek pro tento typ ověřování neexistuje. Tento fakt nikterak nebrání vzájemnému porovnání materiálů, které je cílem tohoto testu. Z testovaných materiálů není žádný materiál hlavním srovnávacím typem. Výsledné naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 1. Kontaktní povrchy materiálů nebyly uměle upravovány.

Test krátkodobé nasákavosti byl primárně prováděn z důvodu obecného hodnocení typu vlákna příměsí, hrubost mletí shluků a porovnání výrobních parametrů. Testování by si vyžádalo úpravu vstupních podmínek, pokud by vyvíjený typ vrstev byl navržen jako plně degradační. Chování testovaných materiálů bylo shrnuto komentářem ve výsledné charakteristice testu.

Test of short term water absorption by partial immersion											
Sample	Size [mm]			Weight of dry sample m_0 [g]	I. soaking 10s m_1 [g]	Weight of the water after 10s soaking [g]	24h soaking m_B [g]	10min drained m_A [g]	Weight of water loss after 10 minutes drying 24h soaking [g]	W_p^A [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]	W_p^B [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]
SENIZOLAT14	145	198	50	71	311	240	693	315	378	8.50	13.31
SENIZOL WHITE	145	200	65	71	142	71	505	178	327	3.69	12.52
LENROOF	147	198	40	69	144	75	549	187	362	4.05	13.91
EKOSEN 70/30	145	200	35	90	149	59	945	603	342	17.69	27.45
IZOL 175P	143	202	35	129	298	169	420	244	176	3.98	4.22
IZOL SU	146	202	45	114	505	391	582	250	332	4.61	2.61
LIGHT PES	147	198	35	31	212	181	329	75	254	1.51	4.02

Tabulka č. 1: Výsledné hodnoty testu krátkodobé nasákavosti

Název vzorku	Výsledná charakteristika krátkodobé nasákavosti materiálu
SENIZOL AT14	Zpočátku rychle savý materiál, který dlouhodobě dobře váže vodu.
SENIZOL WHITE	Počátečně podprůměrně savý materiál, který je schopen pojmout velké množství vody, ale není schopný ji dlouhodobě vázat.
LENROOF	Počátečně podprůměrně savý materiál, který je schopen pojmout velké množství vody, ale není schopný ji dlouhodobě vázat.
EKOSEN 70/30	Zpočátku nejméně savý materiál, který ale dlouhodobě výborně váže vodu. Objemová změna po výšce - 5 mm.
IZOL 175P	Na čisté PES vlákna nasaje v absolutní hodnotě nejméně vody, v celkovém poměru patří k průměrně savým materiálům a převážnou většinu vody si je schopen udržet i po odkapání.
IZOL SU	Maximální počáteční nasákavost ze všech hodnocených materiálů a poměrně rychlá ztráta vázané vody.
LIGHT PES	Zpočátku průměrně savý materiál, který si nasátou vodu není schopen déle udržet.

7.1.3.2 Test efektivní nasákavosti při 25°, zatížení 1,5 kN·m⁻² a transportu vody zeminou

Tento specifický test byl sestaven pro praktické ověření chování matrace při zatížení a instalovaném sklonu, tak aby simuloval extrémní situaci zatížení 40 milimetrovým vodním sloupcem v krátkém časovém horizontu. Tento experiment byl navržen jako referenční srovnávací test výše popisovaných matrací bez preference vybraného vzorku. Výsledné hodnoty slouží ke vzájemnému srovnání sledovaného chování. Princip testování je shrnut v následujících bodech:

- Sklon testované roviny je konstantních 25°
- Výřez travního drnu byl z rostlé zeminy včetně vegetace – tráva s hustým travním porostem do min. průměrné výšky 5 cm. Pro každý vzorek byl použit nový travní drn ze stejné lokality se stejným složením půdních vrstev.
- Výška výřezu byla zvolena tak, aby volený travní drn zatěžoval matraci plošným zatížením 1,5 kN·m⁻².
- Tento výřez byl nejprve před vlastním testováním zavlažen 5l vody.
- Zatížení výřezem travního trnu bylo lokalizováno do výše položených 2/3 matrace ve čtverci 11x11 cm.
- Následně došlo k instalaci dodatečného zatížení do volné části plochy (spodní 1/3 kontaktního povrchu matrace), které odpovídá plošnému zatížení drnu.
- V průběhu prosakování vody bylo zamezeno primárnímu stékání vody po horním povrchu matrace. Testovací drn byl pevně a těsně přikotven k povrchu matrace. V tomto případě byla použita izolační páska po celém obvodu drnu. Těsnost systému byla klíčová k dosažení porovnatelných výsledků. V případě netěsnosti byl

test ukončen s negativním výsledkem, vzorek opětovně vysušen za teploty $(23\pm 1)^{\circ}\text{C}$ a vlhkosti $(50\pm 5)\%$.

Doba sušení:

- V případě prvku s nasákavým nebo částečně nasákavým pojivovým vláknem byla doba sušení stanovena na 48 hodin.
- V případě prvku s nenasákavým pojivovým vláknem byla doba sušení stanovena na 24 hodin.
- Bylo zavlažováno způsobem simulace hustého deště s nominálním objemem 0,5l za 30 s.
- Měření času průtoku:
 - TI – čas od počátku zavlažování do prvního prostupu vody skrz matraci
 - TS – čas od počátku zavlažování do výtoku prvního protečeného 0,5l.
 - T1 až T5 – čas každého protečeného 0,5l až do celkového objemu 3l v lapací nádržce.
 - TF – čas protečení posledního 0,5l skrz matraci a částečné zachycení vody v matraci. Měření je ukončeno po ukončení protékání vody skrz matraci a odkapání. Odkapání je stanoveno na maximální interval kapek 2s. Pokud tak nenastane, pak je test ukončen po 15 minutách.
- Po ukončení experimentu byl testovaný vzorek očištěn a zvážen s přesností na 1g. bylo také kontrolně odměřeno množství vody v lapací nádržce.
- Vyhodnocení experimentu na základě naměřených hodnot a výpočet průměrného výtoku z časů T1 až T4 bylo vypočteno aritmetickým průměrem - v tabulce označeno T_{AV} [s]. Hodnota, která se od těchto sledovaných měření lišila o více než 15% od následující naměřené hodnoty, musela být z výpočtu průměru vyřazena. Hodnoty uvedeny v tabulce č. 2.
- Autorem testovací metodiky je autor této práce a Ing. Klára Nečadová. Nastavení testu bylo konzultováno s doc. Brenneisenem z ZHAW, který doporučil systematické limity pro měření a ukončení testů.



Obrázek č. 21: Demonstrace měření testu efektivní nasákavosti (zdroj: autor, 2015)

Test of short-term water absorption by partial immersion															
Sample	Size [mm]			Weight of dry sample m_0 [g]	T_i [s]	T_s [s]	T_1 [s]	T_2 [s]	T_3 [s]	T_4 [s]	T_5 [s]	T_A [s]	T_F [s]	Weight of wet sample m_w [g]	Weight of wet sample V_{water} [l]
SENIZOL AT14	145	198	50	71	13	47	24	30	27	31	296	29	900	460	3.08
SENIZOL WHITE	145	200	65	71	16	53	35	39	39	36	37	38	357	317	3.30
LENROOF	147	198	40	69	19	45	36	30	32	28	47	30	570	278	3.28
EKOSEN 70/30	145	200	35	90	17	85	44	43	46	49	-	46	487	671	2.85
IZOL 175P	143	202	35	129	37	87	45	44	46	50	86	46	495	454	3.10
IZOL SU	146	202	45	114	31	95	50	51	63	46	98	49	685	395	3.19
LIGHT PES	147	198	35	31	14	34	29	32	32	34	50	32	392	118	3.42

Tabulka č. 2: Výsledné naměřené hodnoty efektivního testu nasákavosti

7.1.4 Závěry provedeného experimentu na základě hodnot Tab. 1 a Tab. 2

(pozn. autora: Toto hodnocení posloužilo jako vstupní hodnocení při hledání vhodného materiálu pro rozsáhlejší testy a zahájení zkušební výroby vybrané skupiny výrobků pro další vývoj vláknitých retenčních materiálů. Jeho znění vzniklo v roce 2015. Ponechal jsem jej v původní podobě, tak abych ilustroval vývoj hledání výsledné podoby materiálu. Vyvinutý materiál byl mnohem přesněji prozkoumán z hlediska odtokových charakteristik při rozdílných sklonech přesnějším testováním – nejlépe lze jeho chování prokázat grafy ilustrující progresi odtoku se sklonem v grafech č. 2 a 3.)

Zásadním kritériem pro výběr tohoto typu matrace je schopnost materiálu vázat vodu. Neexistuje obecný typ matrace, který by byl aplikovatelný na všechny vegetační střechy bez rozdílu parametrů. Parametrem, který nejvíce ovlivňuje vlastnosti průtoku vody materiálem, je sklon střechy, který byl v tomto případě eliminován měřením jen

jednoho sklonu. V rámci průtoku lze pozorovat vzájemné výrazné přiblížení hodnot T_A , přestože se ostatní sledované hodnoty odlišují (některé i řádově).

Přepočtená průtočnost materiálu obecně bez standardizovaných podmínek a zatížení není vhodným hodnotitelným parametrem, pokud není upřesněna ostatními daty z testu. Navržené testování efektivnosti nasákávání částečně idealizuje obecné chování, protože na začátku je zcela suchý vzorek. Rozmanitost požadavků na tuto vrstvu však opravňuje tento postup. Vhodným příkladem je šikmá vegetační střecha s rozchodníky. Tato střecha pro svou funkci vyžaduje minimální zásobu vody ve vegetačním podloží. Díky na živiny chudému substrátu v kombinaci s testovaným materiálem označeným jako LIGHT PES je sestava schopna velice rychle odvést vodu. Tento závěr je i potvrzen krátkodobým testem nasákavosti. Výhodou je pak při instalaci její vysoká odolnost proti proražení a jiným mechanickým poškozením, takže klesá pravděpodobnost defektu vzniklého technologickou nekázní při instalaci. Použité testované zatížení pak odpovídá instalovanému zatížení šikmé střechy se substrátem pro rozchodníky.

U testovaného materiálu IZOL SU byla vyvrácena schopnost rychle odvádět vodu, kterou naznačuje předcházející test krátkodobé nasákavosti. Tento fakt je zásadně ovlivněn způsobem provádění obou testů. Při krátkodobém testu nasákavosti v tomto případě dochází k sušení materiálu pod úhlem 45° . Po dokončení efektivního testu nasákavosti byl následně materiál sušen na stejné stoličce bez zatížení a okamžitě došlo k výrazné ztrátě vázané vody. Vlastnosti tohoto materiálu budou proto s úhlem proměnné a v případě komerčního užití tohoto materiálu bude třeba definovat jeho vlastnosti při instalaci na rozdílném sklonu nosné konstrukce. Testovaný prvek nejlépe ze všech zpomaloval průtok vody a značné množství vody byl i schopen zadržet. Tento testovaný materiál má spolu s podobným materiálem IZOL 175P z uvedených zkoušených materiálů nejvyšší mechanickou odolnost. Jeho využití pro střešní instalace se záměrem intenzivního ozelenění je tedy na místě.

Podobné vlastnosti lze nalézt též u již zmíněného prvku IZOL 175P. Ten je díky své větší objemové hmotnosti a tužší vnitřní stavbě matrice vhodnější k využití při vysoké vrstvě použité zeminy. Materiál je vysoce odolný a snese velmi hrubé zacházení bez ztráty hydrostatických parametrů. Tento materiál bude proto i dlouho odolávat prorůstání kořenů, což může být důležitý argument pro jeho instalaci na intenzivně využívanou střechu zejména pak plochou. Tato houževnatost může negativně ovlivnit stabilitu šikmé střechy. Výsledek bude znám po dokončení vegetačního testu, který není možné uměle urychlit se zachováním objektivitu výsledku, a odborná veřejnost s ním bude neprodleně seznámena.

Příměsové materiály v testovaných vzorcích způsobily v efektivním testu nasákavosti větší rozdíly v porovnání s krátkodobým testem. Zásadní rozdíly vykazoval materiál SENIZOL WHITE, který nebyl schopen v efektivním testu pojmout poměrově podobné množství vody jako v krátkodobém testu. Tento stav je způsoben jeho podprůměrnými schopnostmi rychle nasávat vodu do vláken a umocněn sklonem 25° . Jedná se o potenciálně použitelný materiál na střechy s malým sklonem do 5° s rozchodníkovou vegetací a požadavkem na pochozí střechu. Měřené vlastnosti jsou

ovlivněny požární úpravou, kterou je materiál ošetřen. Tato úprava je ale nezbytná při právě popisovaném aktivním využití.

Pro extrémní instalace s jižní orientací a celkovým malým úhrnem srážek je vhodné z testovaných materiálů použít materiál EKOSSEN 70/30. Zejména pak EKOSSEN převyšuje ostatní testované dílce markantním rozdílem ve schopnosti navázat a zadržet vodu v materiálu. Tento prvek také nejdéle ze všech testovaných vysychá. Během sušení ale dochází k výrazným objemovým změnám, na které bude tento materiál citlivý. Tuto skutečnost je třeba zohlednit při návrhu v rámci celého roku. V pozdním podzimním období, zejména ve vyšších nadmořských výškách, může docházet k intenzivním srážkám, po kterých následuje výrazné ochlazení a mrazy. Tato konstelace podmínek může mít za následek dříve zmíněné objemové změny materiálu a urychlení postupné degradace. Za těchto podmínek by nemělo být počítáno s podpůrnou a záchytnou funkcí této matrace a současně by měla být matrace považována za přísně vodo-akumulační vrstvu.

Potenciál matrace LENROOF omezuje jeho limitní dostupnost a vyšší cena. Při testování nebyla zjištěna žádná vlastnost, která by nemohla být zastoupena jinou skupinou testovaných výrobků. Proto je produkční potenciál tohoto výrobku minimální. Během testu materiál neumožnil vodě prostoupit na spodní kontaktní plochu s podpůrnou nosnou konstrukcí a celý transport vody se odehrával jen v horní části dílce, tak jak je naznačeno na obrázku č. 22, který byl pořízen okamžitě po vyjmutí dílce z testovací roviny. Naproti tomu všechny ostatní materiály protékaly po celé výšce.



Obrázek č. 22: Testovaná matrace LENROOF, odtok vody proběhl pouze v horní třetině materiálu (zdroj: autor, 2015)

7.1.5 Vyhodnocení testů pro další aplikaci v rámci výzkumu

Na základě testování byl pro výstavbu většiny zastřešení experimentálního objektu vybrán materiál IZOL SU v uvedené specifikaci. Tento materiál byl také podroben dlouhodobému vegetačnímu testu. Materiál byl vybrán pro jeho schopnost modelovat transport vody podle potřeb vegetační drnové střechy. Tedy zadržet vodu tak, aby ji traviny mohly pojmout do svých kořenových systémů a přebytečné množství

průběžně odvádět. Jako alternativa na jižní expozici střechy přichází v úvahu i materiál EKOSSEN s maximální schopností zadržení vody pro travní koberec. V případě instalace tohoto materiálu bude nezbytné sledovat objemové změny v průběhu celého sledovaného období.

Po finálním ověření na testovacím objektu byla vybrána varianta materiálu IZOL SU s drobnými modifikacemi ve složení. Výsledný materiál dostal pracovní název EnviRET v programu TRIO I a jeho výsledná podoba jako výsledek projektu vznikla výrobní sérií s gramáží $1000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ na 1 cm výšky, která byla mleta a filována přes síto s oky $15 \times 15 \text{ mm}$ pro tloušťku desky 15 i 20 mm a síto $20 \times 20 \text{ mm}$ pro vyšší tloušťky. Vyrobeny byly desky tloušťky 15, 20, 30, 40, 60 mm.

7.2 Využití vybraného textilního recyklátu v konstrukci zelených střech a jeho porovnání oproti současným materiálům

Český výrobní průmysl poskytuje ke druhotnému zpracování řadu pokročilých materiálů, které lze zpracovávat díky moderním recyklačním technologiím. S nutností snižování výrobní energetické náročnosti v oblasti stavebního průmyslu nachází stále více materiálů své ekologické substituenty. Zejména v oblasti vegetačních konstrukcí je tento trend velmi patrný, protože jsou tyto konstrukce hlavními reklamními ambasadory šetrné výstavby pro trvale udržitelný rozvoj stavebního průmyslu. Řada výrobců používaných materiálů ve skladbách zelených střech a fasád hledá v posledních letech alternativní recyklované výrobky zejména na bázi plastových hmot. Cílem této substituce je dosáhnout ještě lepších výsledků v hodnocení použité skladby a též celého objektu v certifikacích LEED a BREEAM.

Tento proces byl nejprve aplikován na separačních, filtračních a ochranných vrstvách skladby zelené střechy. Řada výrobců nahradila používané geotextílie a filtrační fólie z prvovýroby za recyklovanou variantu materiálů. Hlavní klíčové prvky skladby zelené střechy jako retenční, drenážní či akumulární [2] prvky nacházejí své substituenty již poměrně nesnadno (výjimkou jsou někteří výrobci nopových fólií zaměřeni na západoevropský trh). Alternativním výrobkem pro retenční vrstvy zelené střechy je recyklovaný polyesterový deskový materiál vzájemně spojený tavitelnými vlákny. Zdrojem recyklovaného materiálu jsou vysoce kvalitní textilní vrstvy zejména z automobilového průmyslu.

Cílený recyklovaný materiál má na současném trhu doplnit sortiment výrobků pro zelenou střechu a přinést alternativní aplikační technologie. Recyklovaná polyesterová deska slouží ve skladbě jako retenční materiál s vegetační funkcí a současně též jako primární mechanická ochrana při aplikaci substrátu. Cílovou aplikací je zelená střecha s menším počtem aplikačních vrstev, tak aby bylo možné jednoduše řešit oblasti prostupů, okrajů a rohů. Hlavní oblastí použití je extenzivní střecha s cílovou výškou substrátu do 10 cm, minoritně pak semiintenzivní varianta s výškou substrátu do 30 cm.

Pro účely popisu chování zabudované desky v zelené střeše a demonstraci účelu použití je součástí článku diskuze měření odtoku z experimentální sestavy zelené střechy.

7.2.1 Vlastnosti zkoumané desky

Výsledná podoba zkoumané desky je tvořena třemi různými variantami polyesteru – recyklovaná drť, recyklovaná a pojivová vlákna. Poměr zastoupení a přesný popis vlastností jednotlivých segmentů jsou předmětem výrobního tajemství. Byly vyrobeny testovací sady tloušťky 20 a 30 mm, které předpokládají nejlepší možnou kombinaci pro účely stavebního trhu [3]. Bližší informace o testované desce jsou přehledně zapsány v tabulce č. 3.

Technické parametry zk. Materiálu EnviRET	Jednotka	20 mm	30 mm
Šířka	mm	600	600
Délka		1200	1200
Tloušťka 0,5 kPa / EN ISO 9073-2		20	30
Plošná hmotnost / EN ISO 9864	$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	2000	3000
Hmotnost plně nasycené desky	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	13	22
Stlačitelnost / ČSN EN12431	%	20	20
Pevnost v tahu / EN ISO 10319 - vertikální rovina	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	0,7	1,3
Pevnost v tahu / EN ISO 10319 - horizontální rovina		0,6	0,7
Dynamická tuhost / ČSN ISO 9052-1	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$	11,5	8,2
Dyn. Protržení kuželem dle EN ISO 13433	mm	47	37
Tepelná vodivost - laboratorní vlhkost dle ČSN EN 12667	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0,038	0,038
Tepelná vodivost - nasycený stav dle ČSN EN 12664		0,142	0,142
Max. vodní kapacita - sklon 0°	$\text{l}\cdot\text{m}^{-2}$	12	20
Propustnost kolmo k rovině dle EN ISO 11058	$\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$4,42\cdot 10^{-2}$	$3,71\cdot 10^{-2}$

Tabulka č. 3: Tabulka vlastností polyesterového testovaného materiálu

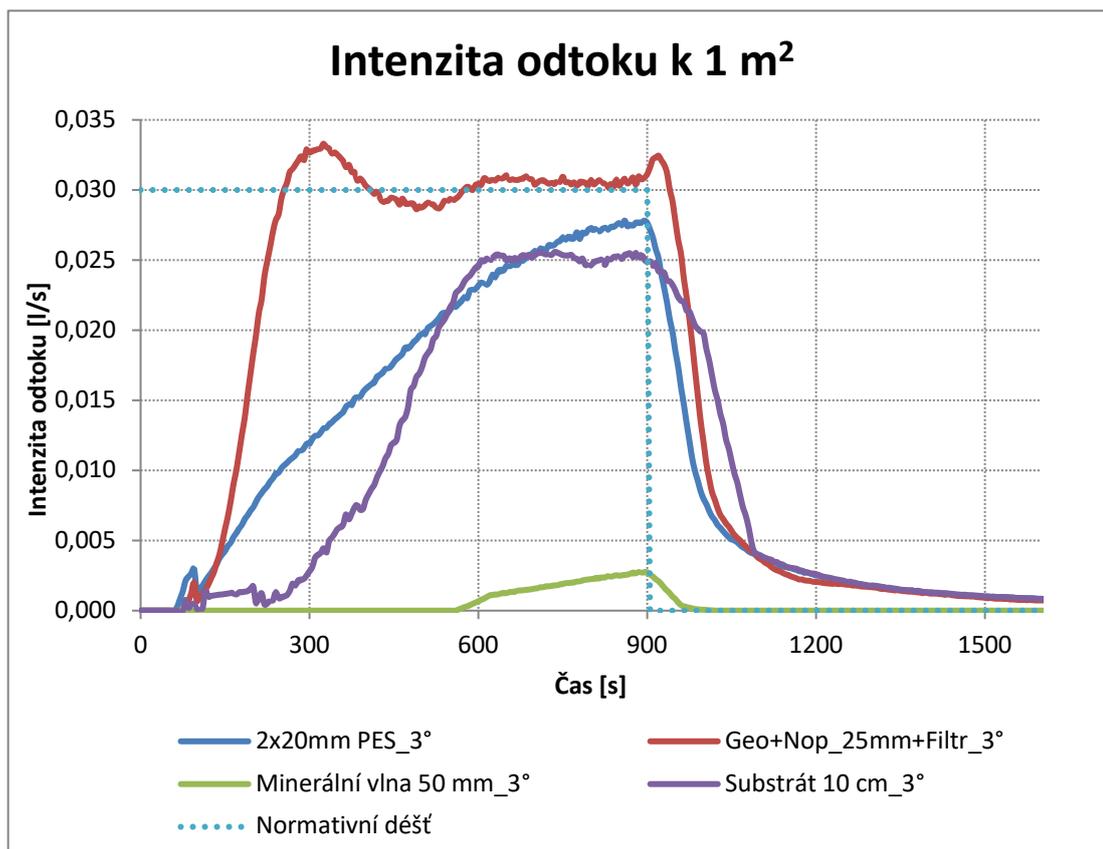
7.2.2 Měření intenzity odtoku z experimentální sestavy

Testovaná sestava experimentální zelené střechy se skládá z podpůrné stolice s nastavitelným sklonem testované roviny s vanou pro měřenou skladbu. Rozsah stolice umožňuje testovat střechy až do sklonu 30°. Testovací vana je čtvercového rozměru o celkové ploše 1,44 m² s volnou odtokovou hranou na spodní straně v úrovni dna, tak

aby byl zajištěn volný odtok bez bariéry. Díky navrženému čtvercovému tvaru 1,2 x 1,2 m je možný přímý přepočít ve vztahu k ploše, neboť volná odtoková hrana se zmenšuje přímo úměrně ve stejné funkční charakteristice jako přepočítávaná plocha. Celá sestava je řízeně zavlažována rovnoměrně v celé ploše umělým regulovatelným deštěm, který je po dobu měření konstantní.

Jako srovnávací měření je ilustrováno měření dle německých standardů organizace Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (zkráceně FLL) [27] pro testování skladeb zelených střech dle 15 minutového deště, který je nejběžnější formou současné podoby srovnávání materiálů zelených střech. Během zavlažovaných 15 minut je cílovým množstvím 27 mm srážek na 1 m² plochy. Přítok do zavlažovacího systému tedy odpovídá 0,03 l·s⁻¹. Odtokové vody jsou z volné odtokové hrany svedeny do záchytné nádrže, která je kontinuálně vážena každých 5 sekund po dobu nejméně 2 hodin pro správné zachycení chování retenční charakteristiky. Celé měření je umístěno v laboratořích VUT, tak aby bylo zabráněno vlivu působení větru, změny teplot a zejména snížení rozdílu výparu mezi jednotlivými měřeními.

Měřeními materiály pro účely porovnání materiálové charakteristiky intenzity odtoku zkoumaného materiálu byl substrát českého producenta objemové hmotnosti 1020 kg·m⁻³ o instalované výšce 100 mm; technické vrstvy pro extenzivní souvrství z profilované fólie (tvořené z geotextilie 300 g·m⁻², nopové fólie o výšce nopu 25 mm a filtrační fólie 105 g·m⁻²); desky z hydrofilní minerální vlny 50 mm s objemovou hmotností 80 kg·m⁻³. Charakteristiky intenzity odtoku byly přehledně zobrazeny v demonstrovaném grafu č. 1. Všechny materiály a sestavy kromě měření substrátu byly měřeny při zatížení 80 kg·m⁻². Toto zatížení bylo realizováno ze dvou hlavních důvodů, a sice z důvodu přiblížení skutečného chování celé sestavy zejména pak drenážních a retenčních vrstev. Druhým důvodem je forma unifikace měření postupného smáčení povrchu vrstev pod úrovní substrátu. Použití praného kameniva s uzavřeným povrchem frakce 4 až 8 mm bylo vyhodnoceno jako nejvhodnější médium při transportu umělých dešťových srážek k měřené vrstvě.



Graf č. 1: Výsledky měření intenzity odtoku

7.2.3 Výsledky měření

Na základě hodnocení intenzity odtoku lze nový materiál nejvíce připodobnit chování substrátu. S tímto cílem byl také uvedený materiál vyvíjen. Na grafu je srovnáváno běžně aplikované množství jednotlivých vrstev tj. 100 mm substrátu a 40 mm retenční vrstvy ve formě dvou desek, jejichž spoje se při aplikaci překrývají nejméně o 100 mm. Během celého cyklu měření nedošlo v substrátu, minerální vlně ani v textilním materiálu k překročení nebo vyrovnání hodnoty přítoku $0,03 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Tyto materiály dle testu prokazatelně snižují maximální intenzitu odtoku během celého trvání testu. U systémové skladby s nopovou fólií lze naopak vysledovat zvýšení maximálního odtoku ze sestavy, které je spojeno s procesem smočení suchých textilních vrstev a vyplnění zásobních nopů. Ze zmíněné sestavy nejprve neodtéká srážková voda, protože je systémem filtrována do kalíšků nopové fólie. Po naplnění kalíšků se nárazově zvýší odtoková intenzita celé skladby z důvodu náhlého rychlého odtoku přebytečné vody po nesmočené separační vrstvě geotextilie ve zkoumaném sklonu. Efektivita filtrace je současně snížena tlakem vodní hladiny pod filtrační fólií, takže část srážkových vod odteče po povrchu filtrační fólie do nejnižšího místa odtoku, a tak nárazově zvýší intenzitu odtoku. Ve skutečné skladbě má toto chování eliminovat aplikovaná vrstva substrátu. Tento jev bude pravděpodobně možné sledovat u násobně vyšších přívalových srážkách i na sestavě se substrátem po vyčerpání jeho retenčních kapacit. Krátkodobé skokové navýšení odtoku u skladeb s nopovou fólií souvisí s jejich principem návrhu absolutní zádržné funkce v prvních jednotkách minut deště dle velikosti kalíšků – nopů.

Naproti tomu zbývající testované materiály fungují na principu filtrace srážek v celém svém objemu, a tím se více přibližují nativnímu chování růstového média ve formě substrátů s malým podílem organických hmot řádově do 20 % svého objemu. Zejména anorganický materiál substrátu průběžně filtruje srážkové vody skrze své vrstvy, část zachycuje a přebytek po filtraci skrze celou výšku substrátu vytéká s maximální intenzitou 85% původní srážkové intenzity. Retenční schopnost hydrofilní minerální vlny je téměř absolutní – první odtoková aktivita nastává téměř po 2/3 celkového trvání standardizovaného deště a je řádově minimální oproti dalším materiálům testu. Z hlediska zádržné funkce se jedná o ideální materiál, který ale díky své vysoké kapilární schopnosti udržovat srážkové vody v celém svém výškovém profilu způsobuje úhyn kořenového systému suchomilných rostlin, které se na extensivní střechy obvykle vysazují. Právě vysoká zádržná schopnost limituje použití tohoto materiálu v extensivních skladbách. Spolu s popsanou charakteristikou a doporučením o instalaci nízké vrstvy substrátu na minerální vatu cca do 3 až 4 cm v našich klimatických podmínkách nastává výrazný úbytek vegetačního krytu zejména ve vlhkých měsících. Tento jev není chybou nebo vadou používaného materiálu, ale nepochopení základních funkčních charakteristik extensivní zelené střechy v klimatických podmínkách České republiky. Přenesená skladba s retenční vrstvou z minerální vlny nemůže fungovat se stejným druhovým složením rostlin jako v Itálii nebo opačný extrém jako v Nizozemí. Následné chápání minerální vaty jako růstového média vedlo ke snižování výšky propustného substrátu, které vedlo jen k prohloubení problému přemokření kořenového systému.

Polyesterová deska se z testovaných materiálů nejvíce blíží chování testovaného substrátu. Srážková voda není ve zkoumané vrstvě zachycena v celém výškovém profilu desky. Po rozebrání sestavy byla retenční textilní vrstva rozebrána a jednotlivé vrstvy 20 mm desek byly samostatně zváženy. Na základě měření bylo zjištěno následné rozložení zachycení srážek: horní deska zachytila 30 % z celkových 9 litrů v celé sestavě, spodní zbývajících 70% tj. 6,3 l. Současně je ale toto celkové množství zachycených srážek trojnásobně vyšší než u sestavy s nopovou fólií. Z těchto výsledků vyplývá, že nově vyvíjený textilní polyesterový recyklát má odlišné vlastnosti chování z pohledu dynamiky intenzity průtoku i z hlediska retenční zádržné funkce. Z testovaných materiálů má charakter intenzity odtoku srovnatelný s běžně užívanou mocností substrátu, ve kterém cílová skladba vegetace nejlépe prospívá. Materiál svou vláknitou strukturou umožňuje prorůstání kořenů, proto v kombinaci s retenčními vlastnostmi je možné uvažovat o snížení aplikované vrstvy substrátu na nižší úroveň 3 cm. Cílem takovéto skladby je přísně extensivní střecha pro sušší oblasti s celkovou nízkou hmotností. Uvedený materiál je doplněním současného stavebního trhu v oblasti zelených střech a má za cíl zohlednit aplikaci extensivní zelené střechy v podmínkách středoevropského kontinentálního klimatu.

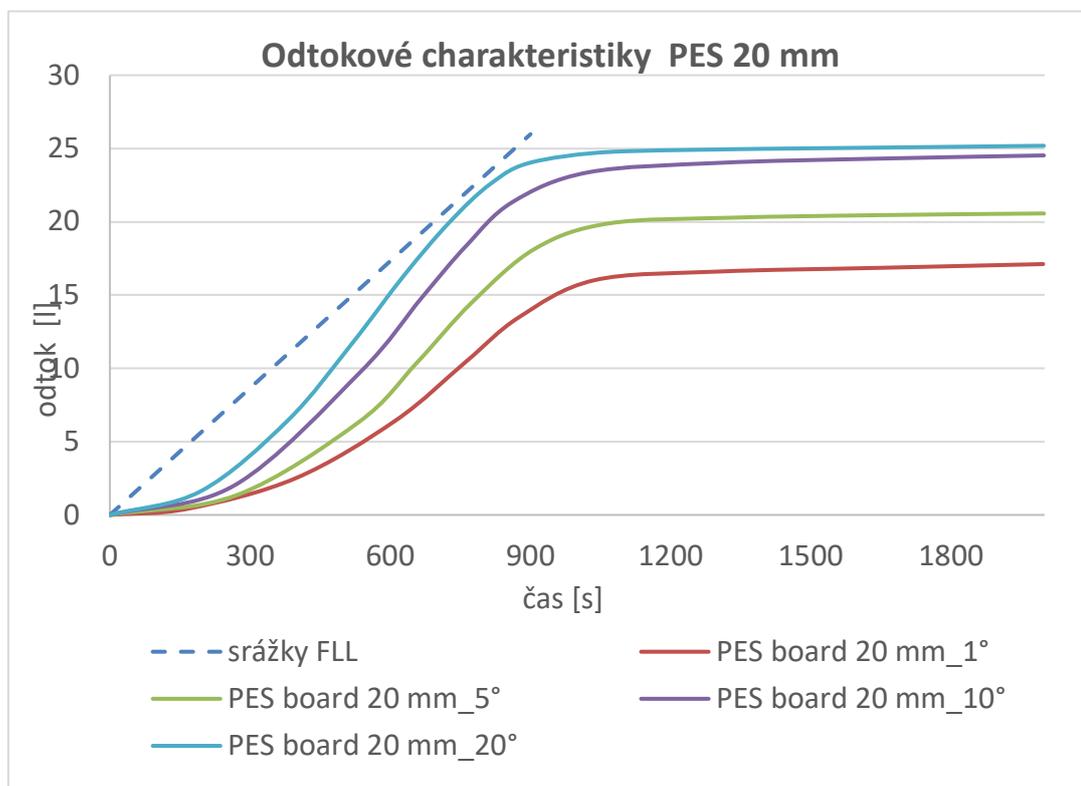
7.2.4 Dílčí závěr hodnocení

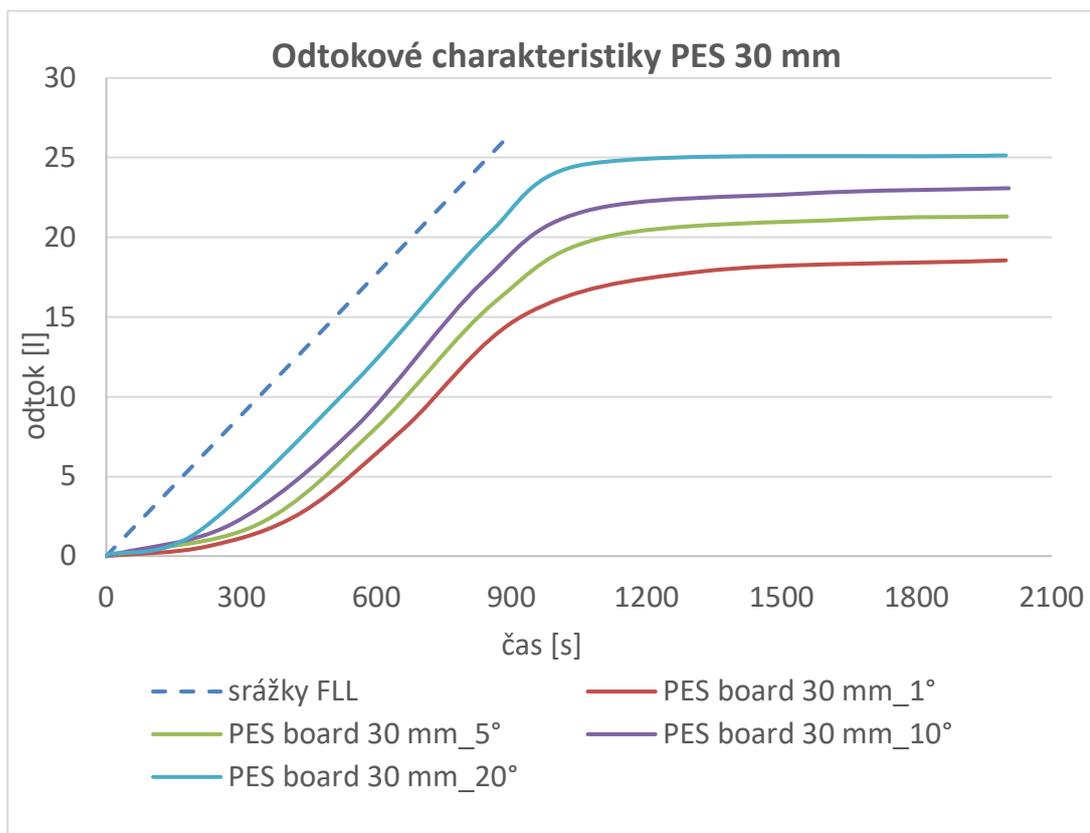
Nové pokročilé polyesterové materiály přinášejí na trh zelených střech nejen novou alternativu současných výrobků, ale také umožňují vývoj nových skladeb a nových aplikací zelených střech. Zejména nové systémové skladby pro kontinentální charakter

klimatu jsou na současném stavebním trhu minoritní, přestože použití materiálů pro podpůrné konstrukce zelených střech v České republice z tohoto hlediska většina aplikací vyžaduje. Nekritické přejímání stávajících řešení způsobuje negativní vnímání některých materiálů na českém trhu. Ukázkovým příkladem je chybné použití minerální vlny na extenzivních střechách s malou vrstvou substrátu, která vlivem vysoké zádržnosti srážek způsobuje degradaci vegetačního pokryvu. Řada odborníků pak srovnává deskové materiály podobného vzhledu a predikuje jim na základě zkušenosti srovnatelné negativní vlastnosti. Tento přístup však není podložen znalostí skutečného chování. Z uvedeného měření v tomto článku vyplývá odlišné chování textilních materiálů oproti skladbám s minerální vatou ale i s nopovou folií. Testovaná deska stojí v pomyslné řadě mezi těmito skladbami a lze ji svým chováním nejvíce připodobnit chování lehkého anorganického substrátu s malým podílem rašeliny do 15 %. Oproti substrátu lze však díky standardizované průmyslové výrobě garantovat retenčně akumulaci vlastnosti s potřebnou přesností.

7.2.5 Měření materiálu PES na základě sklonu roviny

Pro účely definice chování materiálu pro jednotlivé sklony střešních rovin bylo uvedené měření z této kapitoly provedeno i pro samostatné polyesterové rohože o tloušťce 20 a 30 mm s plošnou hmotností $1000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ na 10 mm. Obě variantní tloušťky byly vyrobeny s použitím síta z mlýnu recyklátu s oky $15 \times 15 \text{ mm}$. Princip a forma měření je identická a je popsána v kapitole 7.2.2. Měření bylo provedeno pro sklony rovin 1° , 5° , 10° a 20° . Navržené sklony byly zvoleny tak, aby bylo možné mezi jednotlivými měřeními sklony interpolovat.



Graf č. 2: Odtokové charakteristiky polyesterového materiálu 20 mm**Graf č. 3:** Odtokové charakteristiky polyesterového materiálu 30 mm

Měřená charakteristika odtoku demonstruje přechod primárně retenčního chování u menších sklonů do 5° na drenážní charakter u střeš šikmých od 10° výše. Hranice těchto vlastností není v žádné technické literatuře nebo normě přesně definována. Proto je nezbytné navrhovat navazující technické vrstvy i výšku substrátu s ohledem právě na toto chování. Podobným chováním se vyznačují i materiály na bázi minerální vlny, samozřejmě s odlišnou mírou zádržné schopnosti. Zatímco nopové fólie plní funkci drenážní bez ohledu na sklon, ale funkci zádržnou – retenční jen do konkrétního hraničního sklonu, od kterého již žádnou možnost zadržet srážky nemá. Tato hranice je závislá na tvaru jednotlivých nopů a lokalit perforací. U většiny základních tvarů se tato hranice pohybuje mezi 6 - 10° podle výrobce. U šikmých střeš se v případě retenčních funkcí využívá různých variant meandrujících vsakované dešťové srážky v diagonálním směru střešní roviny. Řada výrobců však neuvádí přesnější výpočtové a návrhové hodnoty těchto tvarově složitých fólií pro navazující začlenění šikmých zelených střeš do náročnější komplexních výpočtů odtoků celé stavby. Z tohoto pohledu jsou strukturální deskové materiály (jako je uvedený hodnocený polyesterový výrobek) při návrhu a hodnocení parametrů zelených střeš snažší a přesnější. Z pohledu výpočtu je pak vhodné využívat nopové fólie u šimých variant jen ve výrobcem deklarovaných sklonech, protože hrozí překročení hraničního sklonu efektivního použití. Navržená vrstva pak bude plnit jen funkci drenážní, která u velkých sklonů od 20° postrádá smysl.

7.3 Vegetační testy

Stále častější instalace zelených střech sebou přináší nová a méně známá konstrukční řešení, která se snaží prosadit na čekém stavebním trhu. Tyto konstrukce mají své specifické využití na základě důsledného hodnocení okolních klimatických podmínek a okrajových podmínek návrhu celého zamýšleného projektu. Tři varianty experimentálních řešení vegetačních souvrství byly hodnoceny na testovacím objektu EnviHUT v areálu brněnského výzkumného centra Vysokého učení technického v Brně – AdMaS a též na testovacích plochách ZHAW v obci Wädenswil. Tyto testované konstrukce slouží i jako názorná ukázka několika zajímavých řešení, které vycházejí ze základních historických a moderních zelených střech aplikovaných ve Švýcarsku, Rakousku a Islandu.

Tato konkrétní kapitola se pak v rámci výše zmíněného tématu podrobněji zabývá hodnocením primárního vývoje vegetace od instalace do prvních 10 měsíců existence testovacích ploch. Hlavní testovací rovinou byl střešní plášť se sklonem 30° a též přidružené polohovatelné testovací boxy se stejným souvrstvím. V kapitole je podrobně popsán vývoj vegetace během krátkodobého přípravného testování v obci Wädenswil, tak i dlouhodobý proces testování samotné EnviHUT. Současné dosažené výsledky potvrzují geometrickou i funkční stabilitu instalovaných vrstev.

Úspěšný vegetační test je nezbytnou součástí celkového funkčního hodnocení stabilní zelené střechy. Na světě existuje řada různých vegetačních testů, které ověřují růst vegetace na plánovaných skladbách. Uvedené testy v tomto článku jsou založené na dlouhodobé výzkumné činnosti výzkumného institutu Dachbegrünnung Institut ZHAW. [20] Na základě doporučení byly zrealizovány dva zásadní vegetační testy: jednoduché ověření možnosti růstu vegetace na vegetačně-retenční polyesterové vrstvě a dlouhodobé testování na reálném full-size objektu. Full-size ověřování na vybrané rovině je nezbytným potvrzením funkčnosti celé skladby.

7.3.1 Krátkodobý vegetační test – vstupní parametrizace

Pro test byly použity 3 sklolaminátové nádoby o rozměru 1,2x1,2m a výšce 8 cm. Do každého dna nádoby bylo zhotoveno 5 otvorů pro odtok přebytečné závlahové vody. Na základě osobní konzultace s docentem Stephanem Brenneisenem, který je považován za hlavního lídra a průkopníka v návrhu a rozmachu vegetačního zastřešení ve Švýcarsku, byly zvoleny tyto níže popisované skladby souvrství svrchního pláště vegetační střechy:

7.3.2 Základní souvrství bez přidání podpůrné vegetační výživné vrstvy (Varianta I.)

Na dno testovací nádoby byla položena drenážně-akumulační vrstva z polyesterového vláknitého materiálu [18] označovaném výrobcem jako IZOL SU. Matrace byly nařezány na jednotlivé segmenty tak, aby po položení do nádob zcela zaplňovaly jejich plochu. Při kladení byl kladen důraz na zamezení vzniku mezer ve spojích z důvodu, aby nedošlo k proniknutí substrátu do spojů, což by mohlo ovlivnit výsledky testu. Polovina plochy položené matrace byla zdrsňena pomocí kartáče, druhá

polovina matrace byla ponechána s původní povrchovou úpravou z výroby. Narušení povrchu matrace poskytne lepší přístup pro kořen rostliny, který bude rostlinu lépe vyživovat ze zásob vody, které poskytuje drenážně-akumulační vrstva. Na tuto vrstvu byl dále navršen substrát tloušťky 5cm. Do substrátu byly lokálně osazeny vzrostlé trsy travin podle principů testování ZHAW (3 x 3 kusy na jeden box), které byly doplněny o setou travní směs pocházející z historicky významné vegetační střechy Moos z příměstské části Wollishofen. Osivo bylo namixováno ze směsi sklizené během období srpna a září 2013. Setí bylo provedeno s využitím 20g směsi na 1m² plochy na všech testovaných nádobách stejně.

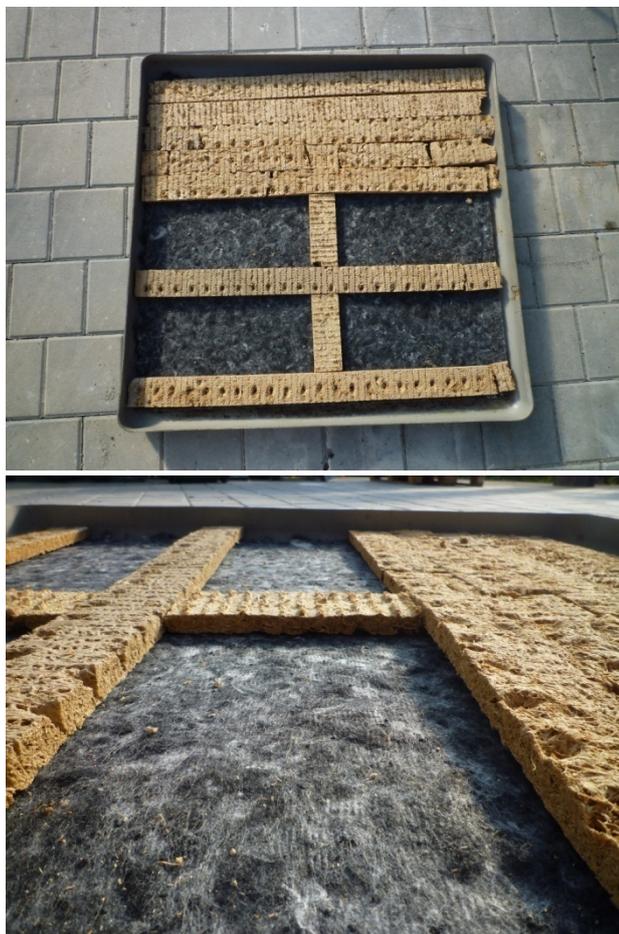


Obrázek č. 23: Varianta I. krátkodobého testu (zdroj: autor, 2017)

7.3.3 Souvrství s přidáním lisovaných dřevovláknitých element (Varianta II.)

Na dno nádoby byla položena drenážně-akumulační vrstva metodou popsanou výše. Povrch matrace nebyl nijak upraven. Na polovinu plochy nádoby byly těsně položeny hrubé lisované dřevovláknité desky, které se na dříve zrealizovaných střechách provedených pod záštitou instituce zabývající se vegetačním zastřešením ZHAW Dachbegrünung Institut. Tento materiál se osvědčil jako výborná výživová vrstva pro vegetaci. V deskách je vázaná dešťová voda a také slouží jako zdroj živin, které poskytují rostlinám dostatek látek pro jejich růst. Na druhou polovinu nádoby byly

položeny dřevovláknité desky pouze lokálně. Do nádoby byla dále navržena 5-ti cm vrstva substrátu. Ozelenění proběhlo stejně jako ve variant I.. Tato přídatná vrstva tvořená dřevovláknitými elementy byla použita za účelem porovnání rychlosti a kvality růstu rostlin na základě použití odlišných skladeb a materiálů vegetačního zastřešení. I když se jednalo o dřevitý nelepený recyklovaný materiál, pořizovací náklady jsou poměrně vysoké.



Obrázek č. 24: Varianta II. krátkodobého testu (zdroj: autor, 2017)

7.3.4 Souvrství s přidáním hrubé slámy (Varianta III.)

V případě poslední testovací nádoby byla na její polovinu položena neupravená drenážně-akumulační vrstva. Na tuto vrstvu byla nasypána hrubá sláma do výšky 3cm. Na druhou polovinu nádoby byla navržena pouze sláma a to tak, aby došlo k zarovnání horních povrchů. Na slámu byl dále navršen substrát o síle 5cm. Výsadba zeleně byla provedena výše popisovaným způsobem u variant I.. Sláma postupem času zetlí a poskytne rostlinám dostatek živin, které přispívají k jejich růstu. Jedná se rovněž o finančně nenáročný materiál, který může přispět ke kvalitnějšímu a stálejšímu ozelenění.



Obrázek č. 25: Varianta III. krátkodobého testu (zdroj: autor, 2017)

7.3.5 Lokace instalace a okolní podmínky testu

Testovací nádoby byly umístěny na volném prostranství. Cílem bylo také nasimulovat extrémní klimatické podmínky v letním období a to tak, že nádoby byly položeny na černou propustnou fólii. Během prvního vegetačního období byly rostliny v období sucha uměle zavlažovány. Toto umělé zavlažování probíhalo v případě, pokud bezdeštné období trvalo déle než 3 dny. Každá testovací nádoba byla pak zavlažena 10l vody.

7.3.6 Vyhodnocení krátkodobého vegetačního testu

Po prvním měsíci pozorování nedošlo ani v jednom testovaném případě k úhynu vzrostlých trsů travin, které byly dříve předpěstovány ve skleníku. Lokálně došlo k růstu mladých výhonků rostlin v I. i II. variantě, jenž vzrostly ze zasetého osiva. Pomalejší růst byl způsoben dlouhým suchým obdobím, proto bylo nezbytně nutné zahájit umělé zavlažování. Slámová varianta vykazovala minimální klíčení semen. Na základě odborného názoru a zkušeností doc. Brenneisena by měla sláma vliv na dlouhodobé chování, ale celý tým nepředpokládal tak pomalý rozvoj vegetace. Chování a rychlost vývoje vegetace má zásadní vliv na stabilitu a konsolidaci zejména šikmého souvrství. Zkoumaný polyesterový materiál je předmětem dlouhodobého testování na EnviHut.

Na základě sledování lze určit, že z výše uvedených variant přináší rychlejší růst rostlin a vytváření hustšího travního porostu souvrství s přidáním lisovanými dřevovláknitými elementy. PES deska podpořená slámou nevykázala ve sledovaném období průkazný růst osiva (Ve sledovaném období téměř vůbec nedošlo ke klíčení semen.) a došlo též k 22% uhýnu již vzrostlých travin.



Obrázek č. 26: První vyhodnocení krátkodobého vegetačního testu; Switzerland - 17. 6. 2015 (zdroj: autor, 2017)

7.3.7 Dlouhodobý vegetační test

Hlavní testovací rovinou je sedlová zelená střecha se sklonem 30° s orientací JJZ - SSV a velikostí testovacího segmentu 2,4 x 2,5 m. Na obrázku č. 22 jsou v popředí umístěny doplňkové polohovatelné testovací boxy se stejnou skladbou příslušného segmentu srovnávací střechy.

Instalace střechy proběhla na konci září a v průběhu října 2015 s upravenou vegetačně-retenční deskou z polyesterových vláken a shluků s plněním 4000 g·m⁻² při 4cm výšky a 6000g·m⁻² při 6 cm [18]. Následné zimní období bylo velmi mírné s malým množstvím srážek bez extrémního mrazivého období. Teplota ve sledovaném období klesla jen jeden den pod návrhových – 12°C. Jediným měsícem se zápornou průměrnou teplotou byl leden -1,94°C.



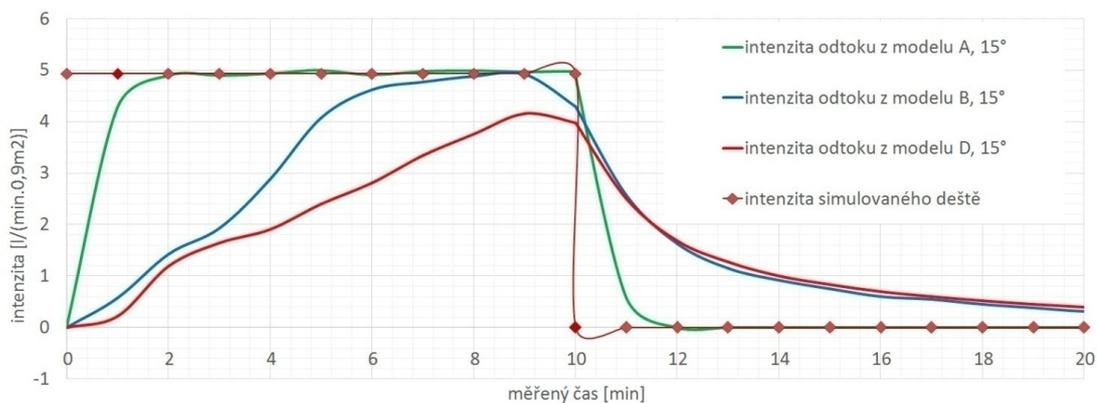
Obrázek č. 27: Testovací objekt AdMaS z JJZ strany a přidružené boxy; AdMaS (zdroj: autor, 2016)

Konsolidace na severské i na semiintenzivní biodiverzní variantě byla úspěšná. Nedošlo k významným sesuvům sledované plochy, sedání probíhalo rovnoměrně v celé ploše i orientaci. Naopak extenzivní rozchodníková střecha byla pod vlivem velkých objemových změn. Vzájemné spojení geobuněk spolu s nevhodně zvoleným instalčním postupem způsobovalo nerovnoměrnou deformaci během 6-měsíčního sedání. Změnám instalovaného substrátu nepomohl ani pomalý rozvoj rozchodníkové vegetace, která byla instalována krátce před obdobím vegetačního klidu 19. října 2015. Realizace probíhala specializovanou firmou na instalaci vegetačního zastřešení. Instalace množství substrátu nebyla z pohledu autorů článku dostatečná. Konsolidovaná výška substrátu ve středu pole byla po šestiměsících (20.3.2016) 7,7 cm. Do plánované instalované výšky chybí 2,3 cm, což vzhledem k celkovému objemu aplikovaného substrátu je chybějících 30 % z instalovaného objemu (vypočtově přesně 29,8 %). Takovéto množství chybějícího substrátu je zásadní komplikací. Pro plnohodnotnou funkci i estetický vzhled rozchodníkové varianty byla střecha doplněna substrátem do původní cílové výšky. Část rozchodníků byla přesazena, ale nebylo zvýšeno použité množství jednotlivých rostlin.



Obrázek č. 28: Nerovnoměrná konsolidace rozvodníkové střechy - 5. 4. 2016
(zdroj: autor, 2016)

Vegetace na travních částech střechy byla během prvního roku testu v dobré kondici. Byla srovnatelná s postupným rozvojem vegetace na svazích a rovinách v okolí. Nejrychlejší růst vegetace byl pozorován na přidruženém testovacím boxu s modifikovanou islandskou skladbou se sklonem 15°. Tato skladba vykazoval již od svého vzniku největší zádržnou schopnost působících srážek. Množství vody, se kterou mohly instalované travní kooberce disponovat okamžitě po instalaci se kromě inicializačního měření nejlépe projevilo na rychlosti růstu travin. [10,11]



Graf č. 4: Retenční chování testovacích boxů; Brno (zdroj: Martin Pavela, Petr Selník, David Bečkovský; 2016)



Obrázek č. 29: Testovací box se severskou skladbou, vlevo 25. 2. 2016, vpravo 4. 4. 2016 (zdroj: autor, 2016)

Vývoj travní vegetace na hlavním objektu byl rovnoměrný po celé ploše kromě linií v blízkosti zachytného system – dřevěné deskové elementy se proklesují ve formě bohatší vegetace. Testovací stavba byla koncipována jako dočasný testovací objekt, proto byly části zádržného system vyrobeny z lehce tvarovatelného materialu. Instalované polyesterové vegetačně-retenční materiály s rozdílným plněním a výškou plní funkci dle zamýšleného designu.



Obrázek č. 30: Pohled z ptačí perspektivy na EnviHUT červenci 2017 (zdroj: autor; 2017)

7.3.8 Vyhodnocení vegetačních testů

Průběh uvedených vegetačních testů naznačuje kladný vývoj sledovaných testovacích konstrukcí jak krátkodobého tak i dlouhodobého testu. Růst vegetace dokládá správnost návrhu konstrukce s ohledem na lokální působení povětrnostních vlivů. Na zkoumaných konstrukcích nedocházelo k selektivnímu úhynu vegetace. Progresivní vývoj retenčního chování ukazuje na nutnost konstantního měření podle vývoje

kořenového system a míry konsolidace celé vrstvy. Tento závěr lze zobecnit pro jakoukoliv sledovanou zelenou střechu. Na rozdíl od klasických stavebních materiálů zelená střecha potřebuje pro svou plnohodnotnou funkci dlouhou stabilizaci a časově náročný vývoj, který lze částečně urychlit instalací vegetačních koberců. Nadále ale i tato varianta vyžaduje dlouhodobé období konsolidace (odhadovaný čas podle současného vývoje testu bylo období ukončení konsolidace stanoveno na 3 roky). Plnohodnotné fungování biodiverzní seté zelené střechy nastane po násobně delší době s ohledem na lokální podmínky umístění střechy. Zejména pak u střechy šikmé, která bude zásadně ovlivněna sklonem. Nutnost opakování uvedených testů ve větším měřítku v různých lokalitách je vhodná pro pochopení základního principu chování a správném nastavení legislativního návrhu. Zapracování návrhu šikmé zelené biodiverzní střechy do současných evropských legislativních systemů je buď velmi komplikované nebo v některých případech dokonce nemožné. Uvedené testované biodiverzní řešení vyžaduje unikátní přístup u každého zamýšleného projektu. Důkazem tohoto tvrzení je krátkodobý vegetační test kombinace polyesterové vegetačně-retenční desky a slámy. Sláma je podle zkušeností ZHAW Dach-beg. Institutu považována za velmi dobrý mediátor hospodaření s vodou ve vegetačním souvrství a je pravidelně aplikována v řadě realizací s pozitivním výsledkem. V uvedeném testu je ale sláma vyhodnocena jako nevhodný materiál pro instalaci šikmé vegetační střechy, protože brání rychlému ozelenění povrchu. V inicializační fázi brání vrstva slámy kontaktu kořenů s vegetačně-retenční deskou a tím i efektivnějšímu hospodaření s uloženou zásobou vody. Širokému rozšíření použití dřevovláknitých elementů pak brání značná materiálová ekonomická náročnost. Použité elementy totiž nemohou být z důvodu následné toxicity spojovány levnějším syntetickým lepením.

Testované pole rozchodníků na full-size měření vykazovalo značnou citlivost růstu vegetace na způsobu provádění záchytného systemu. Proměnlivá nerovnoměrná konsolidace negativně ovlivňovala růst rostlin. Testovanou extenzivní střechu ovlivňoval zejména pomalý vývoj kořenového systemu v kombinaci s obdobím vegetačního klidu. S tímto progresivním vývojem je třeba počítat i v rámci korektního legislativního a výpočtového návrhu tohoto typu střechy. Značná část komerčních realizací bude probíhat ve stejném ročním období jako testovací instalace EnviHUT, proto je výsledné měření 6-měsíční sedání vrstvy substrátu o 2,3 cm při zvolené technologii zásadním poznatkem funkčního návrhu. Uvedený technologický postup plnění geobuněk od hřebenu směrem k okapu bez ohledu na jejich dotvarování není korektním technologickým přístupem. Aplikovaný postup vyžadoval následnou úpravu doplněním téměř 30% substrátu z původně instalovaného objemu. Ekonomicky i časově nejnáročnější je přesazení již vysazených rostlin.

Po rekonstrukci byla konsolidace rozchodníkového povrchu na jaře 2018 dokončena. Rostliny plně pokryly povrch sledovaného segmentu. Od této doby již nedocházelo k odnosu substrátu větrem. Další doplnění substrátu nebylo již potřeba. Interval základní údržby byl z jednoho roku zvýšen na dvouletý cyklus. Monitoring stavu nadále pokračuje a je průběžně vyhodnocován členy pracovní skupiny EnviHUT.



Obrázek č. 31: Konsolidovaná rozchodníková varianta po třech letech existence EnviHUT (zdroj: autor; 2018)

Instalace s využitím travních kobereců konsolidovaly rovnoměrně a po 6-měsících nevyžadovaly žádnou průběžnou opravu ani údržbu. Během sledovaného zimního období nedocházelo k vysychání hlavní testovací plochy. Kritickým obdobím pro tento typ zelených střech ale jsou tropická suchá období, která v našich podmínkách vyžadují intenzivnější údržbu. Bez pravidelné údržby se zelená střecha s travním povrchem promění ve variantu označovanou v zahraniční technické praxi jako „brown roof“ tedy hnědé střechy. Autor této práce dává přednost označení „střecha určená ke spontánnímu náletovému ozelenění“, které nejlépe charakterizuje podstatu fungování.



Obrázek č. 32: Severní strana biodiverzní střechy EnviHUT v červenci 2017 (zdroj: autor; 2017)

Z hlediska dlouhodobého sledování se nejlépe projevuje severní instalace biodiverzní střechy. Tato varianta nevykazuje žádné objemové změny substrátu či pozorovatelný úhyn vegetace. Testování travních zelených střech na jižní straně bylo ukončeno v roce 2018 z důvodu potřeby měřit další varianty extenzivní střechy. Progrese zeleně střechy v době ukončení testu vedla na řešení dříve zmíněné náletové varianty zelené střechy, a to zejména z toho důvodu, že nebyla nadále pravidelně zavlažována. Vytvořilo se zde suché stepní společenství rostlinných druhů, které charakterem biomu odpovídá suchým loukám na svazích Pálavy. Z hlediska technického označení se nadále jednalo o semiintenzivní zelenou střechu, která však vlivem působení povětrnosti trpěla na velké objemové změny spojené s vysycháním vrstvy substrátu. Z hlediska stability tedy nutno konstatovat, že toto řešení není vhodné pro JV, J a JZ expozice, pokud není semiintenzivní varianta pod důslednou údržbou a řízeným závlahovým systémem. V opačném případě je investora vhodné upozornit na pravděpodobnou transformaci zelené střechy na střechu náletovou ve verzi „brown roof“. Volba spočívá čistě v osobních preferencích investora, protože ani na jedné expozici nebyly zjištěny technické defekty střechy z pohledu nosných vrstev, hydroizolačního souvrství, tepelné izolace či vlastních vrstev souvrství zelené střechy. Nedocházelo ani k vymývání substrátu do akumulčních nádrží. Estetickou stránku vzhledu povrchu nelze objektivně hodnotit a je závislá na pohledu a znalostech pozorovatele. Z pohledu autora po vizuální stránce odpovídají svým vzhledem biodiverzním suchým střechám realizovaných ve Švýcarsku.



Obrázek č. 33: Biodiverzní náletová střecha – vlevo Wädenswil CH, vpravo Brno CZ (zdroj: Rafael Schneider a Petr Selník, 2018)

8. Volba skladeb, technických materiálů a technologie na vybrané stavebně fyzikální vlastnosti

V rámci projektu zaměřeného na hodnocení šikmých vegetačních střech se nelze zaměřit jen na technologii provádění, ale též na spolupůsobení jednotlivých vrstev. Tyto dva aspekty od sebe nelze oddělit bez ztráty funkčnosti a stability. Proto se následující kapitola zaměřuje na vybrané otázky, se kterými se pracovní skupina EnviHUT setkala.

8.1 Konflikt aplikace minerální vlny, polyesterových rohoží a nopové folie na extenzivních zelených střechách v klimatických kontinentálních podmínkách

Řada současných zelených střech s vegetačně akumulací vrstvou z minerální vlny s hydrofilní povrchovou úpravou je v současné době rekonstruována z důvodu úhynu vegetace. Zejména v České republice vzniká negativní vnímání minerální vlny jako akumulací vrstvy a řada odborníků ji považuje za nefunkční vadnou vrstvu skladby zelené střechy. Kromě toho výroba minerální vlny vyžaduje velké množství energie, což je třeba zohlednit ve finálním hodnocení skladby z pohledu uhlíkové stopy. Na VUT v Brně byla provedena měření a srovnání chování materiálů používaných ve skladbách extenzivních zelených střech. Měření odhalilo zásadní odlišnosti v chování srovnávaných vrstev, které je nutné zvážit při volbě vhodného materiálu akumulací, retenční či vegetační funkce s ohledem na okrajové podmínky návrhu.

Minerální vlna a nopová folie jsou široce používanými materiály u zelených střech pro zajištění drenáže nebo retence. Minerální vlna je také používána jako náhrada substrátu v hydroponii. Studie posledních let ukázaly, že velké množství syntetických materiálů ve skladbách zelených střech je ekologicky závadné. [9]. Emise při výrobě těchto materiálů, zvláště u kterých se používají primární suroviny, zmenšuje pozitivní efekt vícevrstevných zelených střech a klade otázku vhodnosti jejich instalace z důvodu jejich negativního vlivu na životní prostředí.

Aplikace extenzivních systémových zelených střech v českých podmínkách byla dlouhodobě realizována na základě zkušeností ze západoevropských zemí a většinou byla prováděna bez modifikací. Na trhu byly do roku 2014 realizovány zejména dvě hlavní varianty, a sice varianta A (pořadí dle logiky pokládky na hydroizolaci):

- separační a ochranná geotextilie variantních gramáží,
- nopová folie jako drenážní a částečně též akumulací vrstva – v závislosti na výšce kalíšku
- filtrační textilie variantní gramáže nejméně 100 g·m⁻²
- substrát rozdílných výšek od 3 do 10 cm
- rozchodníková vegetace

a druhá varianta B sestávající z:

- separační a ochranná geotextilie variantních gramáží nejméně 200 g·m⁻²,
- minerální vlna rozdílných výšek od 50 mm bez hydrofobní úpravy
- substrát rozdílných výšek od 3 do 12 cm
- rozchodníková vegetace

Obě prováděné varianty byly aplikovány s drobnými odchylkami dle systémových skladeb jednotlivých výrobců a dodavatelů. Je důležité zmínit, že obě varianty byly používány rovnocenně jako vzájemné substituenty. Je třeba vzít v úvahu historický vývoj projekce a návrhu, která zpočátku i v rámci projektování řešila tuto konstrukci výhradně poptávkovým způsobem bez výrazné oponentury. Prohlubování znalostí a zisk nových dat řady měření zelených střech posouvá chápání chování této relativně nové konstrukce z pohledu informovaných odborníků. Je stále vhodné uvažovat o původní myšlence funkční podstaty aplikačních vrstev v konkrétních realizacích [1,2], protože zelená střecha jako stavební konstrukce má výrazně rozsáhlejší intervaly volených parametrů než zvykově známější konstrukce.

8.1.1 Uvadající vegetace na skladbě s minerální vlnou

V posledních třech letech byla řada realizací zelených střech s minerální vlnou postižena úhynem vegetace z důvodu přemokření kořenového systému. Z tohoto důvodu byly často tyto střechy rekonstruovány substitučním systémem s nopovou fólií. Negativní vnímání je umocněno právě touto přímou náhradou a následným srovnáním krátkodobého chování rekonstruované střechy. Všeobecná pozitivní zkušenost a znalost realizací s nopovou fólií a výrazně nižší riziko chybného návrhu [2] pak negativně ovlivňuje vnímání vláknitých materiálů pro zelené střechy jako celek. Hlavním reprezentantem této skupiny vláknitých nasákových materiálů jsou bezesporu právě výrobky na bázi minerální vlny. Chybné chování je však zapříčiněno chybným návrhem, při kterém je vždy nezbytně nutné znát principy chování jednotlivých materiálů nejen v absolutních návrhových hodnotách, ale současně též dle průběhu chování v čase. Právě na toto chování se zaměřilo zde předkládané měření.

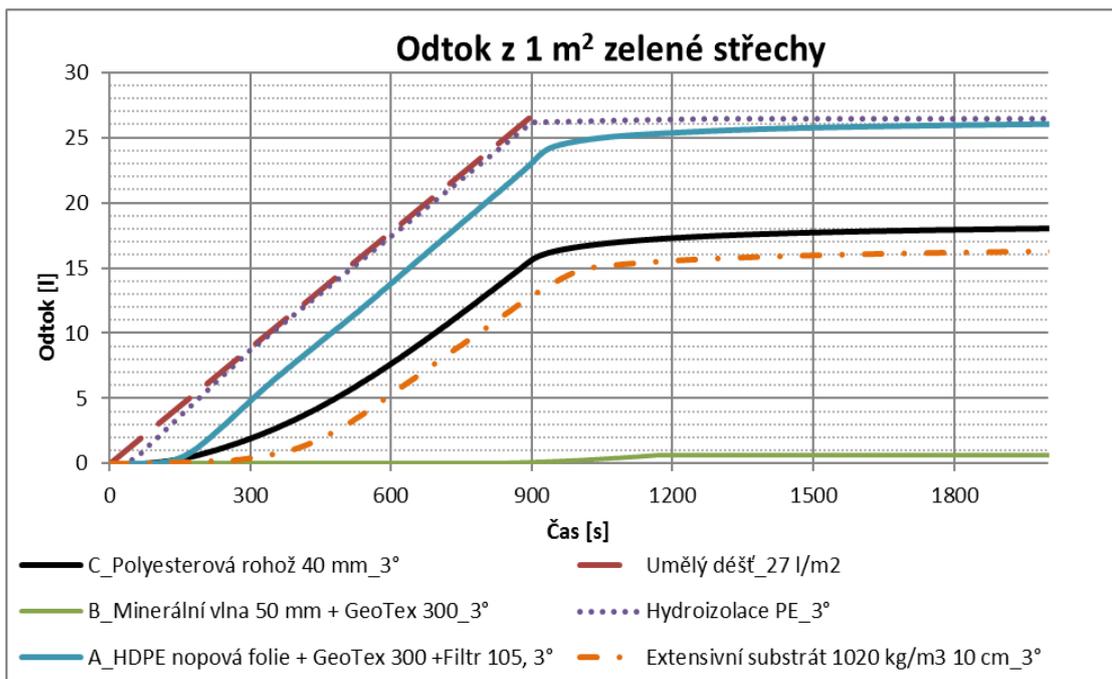
8.1.2 Vlastní měření charakteru odtoku

Účelem měření je demonstrovat srovnání chování užívaných skladeb v obvyklé instalační sestavě. Jako referenční situace byla ve všech modelových situacích použita plochá střecha o sklonu 3°. Pro měření byly použity referenční měřicí sestavy zelených střech Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Měření bylo provedeno v kondiciované laboratoři na referenční ploše 1,44 m², tak aby na 1m² dopadlo během referenčních 15 minut 27 mm dešťových srážek o konstantní intenzitě. Odtok z odtokové hrany v délce 1,2 m je konstantně monitorován po dobu 2 hodin a následně nárazově po 24 hodinách. Laboratoře byly uzavřené bez vlivu proudícího vzduchu za stálé teploty 18 °C a stálé vlhkosti 55%. Vlastní porovnání spočívá ve vyhodnocení chování technické podpůrné vrstvy pod substrátem, která svými parametry definuje odtokové chování celé skladby. Přitížení těchto vrstev při měření je realizováno za pomoci vrstvy promytého

neporézního kameniva frakce 4-8 mm o zatížení $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Velikost frakce byla stanovena dlouhodobým testováním optimální volby. Principiálně vychází z kompromisního poměru mezi plochou smáčení povrchu kameniva a transportem umělých dešťových srážek z kontaktního povrchu na horní vrstvu hodnocené skladby. [2,12] Dle provedených měření dochází ke vzniku odchylky $\pm 0,85 \text{ l}$ při definovaném dešti o celkovém objemu 27 l. Tato odchylka byla zjištěna převážením smočeného kameniva 5 min po ukončení 15 minutového deště. Tato odchylka se tedy promítá do celého časového průběhu a je dostatečná pro potřeby popisu průběhu chování odtoku z měřených sestav. Měření probíhala opakovaně a demonstrované hodnoty jsou výsledkem čtyř opakovaných testů jedné testované skladby.

Hodnocení bylo provedeno pro tři typy zelených střech, pro vlastní povrch hydroizolace a referenční vrstvu 10 cm extenzivního substrátu o objemové hmotnosti $1020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ s objemovými 15% organické složky. Testované zelené skladby:

- Skladba A:
 - Geotextílie $300 \text{ g}\cdot\text{m}^2$
 - Nopová folie pro zelené střechy – kalíšky hloubky 25 mm
 - Fitrační textilie $105 \text{ g}\cdot\text{m}^2$
 - Zatěžující kamenivo
- Skladba B:
 - Geotextílie $300 \text{ g}\cdot\text{m}^2$
 - Deska z hydrofilní minerální vlny výšky 50 mm, určená pro extenzivní střechy
 - Zatěžující kamenivo
- Skladba C:
 - Bikomponentní recyklovaná polyesterová rohož 20 mm, plnění $2000 \text{ g}\cdot\text{m}^2$
 - Šachovnicově překládaná bikomponentní recyklovaná polyesterová rohož 20 mm, plnění $2000 \text{ g}\cdot\text{m}^2$
 - Zatěžující kamenivo



Graf č. 5: Odtokové charakteristiky měřených skladeb

8.1.3 Diskuze výsledků testu

Výsledky měření naznačují zcela odlišný průběh chování odtoku u srovnávaných variant. Technické podpurné vrstvy variant A, B i C vykazují dle měření zásadně odlišné chování. Skladba s minerální vlnou vykazuje po 15 minutách minimální odtok. První odtečená voda se na odtokové hraně varianty s minerální vlnou objevila až v 830-té sekundě, naproti tomu verze s nopovou folií propustí první dešťové srážky v 80-té sekundě. Uvažujeme-li substrát jako nepřirozenější růstové médium, mají obě zmíněné varianty na okraji odlišný průběh od retenční vlastnosti substrátu. Substrát začne odtékat také v 80-té sekundě, ale v 300-sté sekundě je ve prospěch varianty A rozdíl 4,4 l zadržovaných dešťových srážek. Tento rozdíl činí 49% celkového napršeného množství dešťových srážek. V celkové skladbě samozřejmě oba klíčové elementy skladby, tj. substrát i technické souvrství spolupůsobí. Jejich fungování není prostým součtem, přesto je toto spolupůsobení klíčem k dlouhodobé stabilitě zelené střechy. Snížíme-li v návrhu potenciální růstovou výšku substrátu na minimum, je nezbytné více zvažovat retenční chování technických podpurných vrstev na volenou vegetaci. Snížení výšky substrátu na instalované konsolidované 3 cm bude mít na vegetaci zcela opačný efekt v případě varianty A i B. Za to v případě polyesterové rohože nastává výraznější shoda funkční charakteristiky obou základních funkčních elementů. Zmíněné testované podmínky lze považovat za hodnocení ustáleného stavu se stejným zatížením skladby od působení lineárních dešťových srážek.

Uvážíme-li přirozený neustálený stav, který na zelené střechy vlivem počasí a klimatu působí, nelze aplikovat na zelenou střechu v dané lokalitě se stejnou výškou substrátu s rozdílnými podpurnými vrstvami stejný typ vegetace se stejným výsledkem. Řada výrobců i realizátorů však tuto skutečnost popírá a nabízí jedno identické řešení

extenzivní střechy na stejné úrovni pro rozsáhlou lokalitu jakou je třeba celá Evropská unie. Rozdílné klimatické podmínky, které panují například v zemích Beneluxu a střední Evropy, často při vymýšlení konceptu skladby nebyly zvažovány, protože byly navrženy přesně pro cílové klima. Vlivem tržní ekonomiky a chybějící legislativy pak byly některé méně vhodné skladby pro kontinentální středoevropské klima v České republice realizovány. Za takovouto kritickou skladbu právě platí extenzivní zelená střecha s minerální vlnou a malou vrstvou substrátu (do 3 cm). Tento systém velice dobře funguje v lokalitách s vyšší vzdušnou vlhkostí, která se během roku výrazně nemění, a současně aplikovanou vegetací schopnou snášet zvýšenou vlhkost vegetačního média. Tomuto nastavení fungování ostatně zcela odpovídá původní koncept využití minerální vlny v zemědělství, ze kterého částečně idea využití tohoto materiálu pochází. Hydrofilní minerální vlna se dlouhodobě úspěšně využívá jako pěstební médium ve sklenících, kde je díky ní dosahováno velkých výnosů z pěstovaných plodin. Základní vlastnost pro toto využití, tedy nasákavost a schopnost zadržet vodu v celém svém profilu, potvrdilo i provedené měření. Z těchto uvedených principů musí vycházet i cílová aplikace skladby zelené střechy, a proto se takováto skladba lépe hodí pro semiintenzivní střechu, která je ideálně vybavena řízenou závlahou pro kritické letní období. Tento zmíněný idealizovaný případ je obecným aplikačním doporučením. Osazovaná zelená střecha je samozřejmě vždy výrazně ovlivňována lokálními podmínkami, které musí být v návrhu zohledněny. Tento návrh zpravidla není schopen provést architekt či stavební inženýr pozemních staveb samostatně a vyžaduje teoretické a empirické zkušenosti odborníka na zelené střechy. Výsledky vadných či nefunkčních zelených střech nejčastěji vznikají právě kombinací obecného návrhu výrobce a ignorováním odlišných lokálních návrhových podmínek od původního modelového záměru.

8.1.4 Doporučené aplikace s testovanými materiály s ohledem na jejich charakter odtoku

Varianta A

Testovaná skladba extenzivní střechy s nopovou folií je vhodná pro aplikaci maximálně suchomilných druhů rozchodníků, které výrazně negativně neovlivní ani snížení aplikované výšky substrátu do 3 cm. Retenční funkce takovéto skladby je však ve srovnání s ostatními variantami minimální. Zvýšení výšky kalíšku musí být provázeno i zvýšením aplikované výšky substrátu, protože se zvyšující zádržnou funkcí i v tomto případě hrozí zahnívání kořenů přísně suchomilných rostlin. Obecně lze v případě tohoto druhu vegetace doporučit minimalizaci prorůstání kořenů do dlouhodobě vlhkých vrstev – výška substrátu musí reflektovat potenciální hloubku kořenění volené rostliny. Od 10 cm instalovaného substrátu je pro stabilitu suchomilné rozchodníkové vegetace chování podpůrných vrstev naprosto irelevantní.

Charakter odtoku v čase se projevuje následovně: všechna voda je zpočátku zachycena do naplnění kapacity nopů (absolutní odtoková brzda). Ve chvíli naplnění nastane po krátkém ustálení lineární odtok intenzitou identický s vydatností působícího deště. Ve skutečné skladbě je průběh retence posunut o spolupůsobení substrátu. Po naplnění jímavosti substrátu je však průběh charakterově identický.

Varianta B

Testovaná skladba s minerální vlnou je typově určena do klimaticky stálejších podmínek, kde nedochází k velkým výkyvům vlhkostních charakteristik skladby. Se snižující se výškou substrátu je efekt působení zachycené vlhkosti výrazným prvkem návrhu, který nelze ignorovat. Z tohoto důvodu lze tento typ skladby doporučit jen do dlouhodobě stabilních podmínek. Z pohledu retenční funkce je tento typ skladby nejjímavější. Ve spolupůsobení s minimální výškou substrátu 3 cm je skladba schopna zachytit celý objem měřených srážek (hodnoceno na základě poměrného výpočtu). Pro plnohodnotné fungování se suchomilnými rostlinami je nezbytné najít minimální funkční výšku substrátu, která se v závislosti na složení substrátu zpravidla pohybuje od 8 cm výše. Toto doplňkové měření bylo provedeno v exteriéru na testovacích polích výzkumného centra v Brně.

Po měření odtoku během rozebrání bylo zjištěno, že zachycená voda je rovnoměrně zadržena v celé výšce 50 mm desky. Je-li minerální vlna využita jako vegetační vrstva, není vhodné ji kombinovat s přísně suchomilnými rostlinami. Charakter odtoku v čase se projevuje minimálním odtokem z celé technické skladby v rámci celého měření. 87% dešťových srážek bylo zachyceno po dobu 72 hodin (V laboratorních podmínkách je minimální výpar.).

Varianta C

Testovanou skladbu s polyesterovou rohoží lze nejlépe využít z testovaných jako vegetační vrstvu pro rozchodníkovou vegetaci, protože se nejvíce blíží nativnímu prostředí. Po rozebrání testované sestavy bylo 70% zachycené vody ve spodní třetině výšky rohože. Kořeny prorostlé do horního povrchu rohože tedy nebudou přemokřovány dlouhodobě zadržnými srážkami.

Z pohledu charakteru odtoku je průběh v čase 40 mm desky srovnatelný s odtokovou křivkou 8,2 cm (přepočteno) substrátu. Dle souběžně probíhajících dlouhodobých vegetačních testů byl potvrzen funkční růst vegetace již na 2,5 cm substrátu ve skutečných podmínkách na zelené střeše.

8.1.5 Problém použití syntetických materiálů v souvrstvích zelených střech

Výroba syntetických materiálů používaných v souvrstvích zelených střech, jako minerální vlna, souvisí s velkou spotřebou energie a vyššími emisemi, než například rohože z recyklovaných vláken [18], a proto možný pozitivní vliv zelené střechy by mohl být snížen použitím tohoto materiálu ve skladbě. Také minerální vlna, která na první pohled velmi dobře plní účel retence, při použití za nevhodných klimatických podmínek může vést k úhynu rostlin z důvodu přemokření kořenového systému. U extenzivních střech jsou více vhodné jiné retenční materiály, které by kombinovaly v sobě schopnost zadržet a udržet potřebné množství srážkové vody, například recyklované polyesterové rohože.

8.1.6 Závěr testování technických vrstev zelených střech v klimatických kontinentálních podmínkách

Výsledky měření prokazují odlišné funkční retenční vlastnosti zkoumaných materiálů, které se používají pro stejný typ instalace extenzivní zelené střechy. Znalost průběhu tohoto chování je klíčová pro správné využití voleného materiálu mezi nopovou folií, hydrofilní minerální vlnou a polyesterovou rohoží. Použité technické vrstvy skladby zelené střechy nelze přímo nahradit bez úpravy výšky aplikovaného substrátu. Rozhodující parametry, které jsou nadřazeny obecnému principu použitím dle výrobce, jsou vždy lokální podmínky, které by měly být zohledněny pro správnou funkci a stabilitu vegetační konstrukce. Návrhové doporučení pro jednotlivé skladby jsou součástí diskuze výsledků a doporučení této kapitoly.

8.1.7 Závislost sklonu střešní roviny

Tato problematika je podrobně popsána a demonstrována v bodě 7.2.5. Měření materiálu PES na základě sklonu roviny. Je zde popsáno i chování ostatních materiálů technických vrstev – minerální vlny a především tvarových folií.

8.2 Principy simulace chování okolního prostředí

Zelená infrastruktura je nedílnou součástí stavitelství. Jen v různých obdobích dějin rezonovala míra jejího využití. Se současnou potřebou adaptace staveb na koncept trvale udržitelné výstavby se nutnost přesnějšího plánování stala základní prioritou. Historický princip výstavby založený na pozorování okolí a aplikace zkušeností stavitelů předchozích generací, které novými myšlenkami rozvíjejí současní architekti, zůstává důležitou složkou nových návrhů. Přesto komplikovanost výstavby zejména ve městech začíná vyžadovat stále sofistikovanější nástroje a výpočty, tak aby adaptační opatření staveb na budoucí změnu klimatu bylo efektivní a současně též ekonomicky adekvátní. Zejména hospodaření s vodou nelze snadno od stolu přesněji kvantifikovat. Toto řešení lze uplatňovat i v areálech historicky chráněných objektů s citlivými zásahy do zelené či modré infrastruktury. Každé z těchto adaptačně-technických řešení pak bývá konzultováno s provozovatelem a příslušným dozorovým orgánem.

Řada špičkových světových univerzit v oboru se proto rozhodla přesunout těžiště své práce z výzkumu obecných principů vývoje klimatu na lokální praktické studie a výzkumy, které mají přímý dopad na zlepšení fungování konkrétních oblastí. Řada institucí v České republice pracuje na začlenění návrhových principů do pokročilých programů pro adaptaci města a krajiny, které byly definovány v plánech EU k dosažení snížení uhlíkové stopy naší civilizace aktuálně k cílovému roku 2050. Příkladem je modelovací program prostředí ENVI-met, pomocí kterého bylo provedeno přes 4000 simulačních studií po celém světě a který je též základním kamenem certifikačního procesu vnějšího okolí staveb.

S ohledem na stále přesnější požadavky na adaptační a mitigační opatření je vhodné se v náročných či kontroverzních realizacích opírat o simulační modelování

dopadu vegetačních konstrukcí či výsadby, protože potřebujeme mít jasně kvantifikované benefity plánovaného záměru.

Bez výpočtů či simulací není možné odhadnout odtokový koeficient celé oblasti s propustnými vsakovacími i nepropustnými povrchy, které se navzájem ovlivňují. Požadavek na složitost provádění těchto výpočtů se postupně šíří legislativou celé Evropy. Demonstrace výstupů těchto studií je podrobněji rozpracována v následující zkrácené verzi ukázkové studie Enviromentální hodnocení staveb a jejich okolí:

8.2.1 Základní popis objektu a areálu environmentálního hodnocení staveb a okolí

Předmětem hodnocení této studie je objekt rekreačního ubytovacího zařízení na ulici Žižkova 2904/8 v Opavě a bezprostředně navazující části sportovní haly a nejbližší okolí zmíněných budov. Cílový objekt byl vyhodnocen z pohledu statického posouzení a posouzení současného technického stavu hydroizolace střechy. Jedná se o železobetonový monolitický skelet s navrhovanou únosností pro zelenou střechu na úrovni 200 místy jen 150 kg·m⁻². Tato hodnota byla stanovena za výchozí maximální zatížení nasyceného stavu souvrství pro vybrané lokality polí.

Principem navrhovaných změn bylo dopracování původní koncepce a instalace původně zamýšlených zelených střech místo současné varianty s kačirkem. Současný stav je demonstrován na obrázku č. 34.



Obrázek č. 34: Současný stav areálu sportovní haly v Opavě (zdroj: autor, 2019)

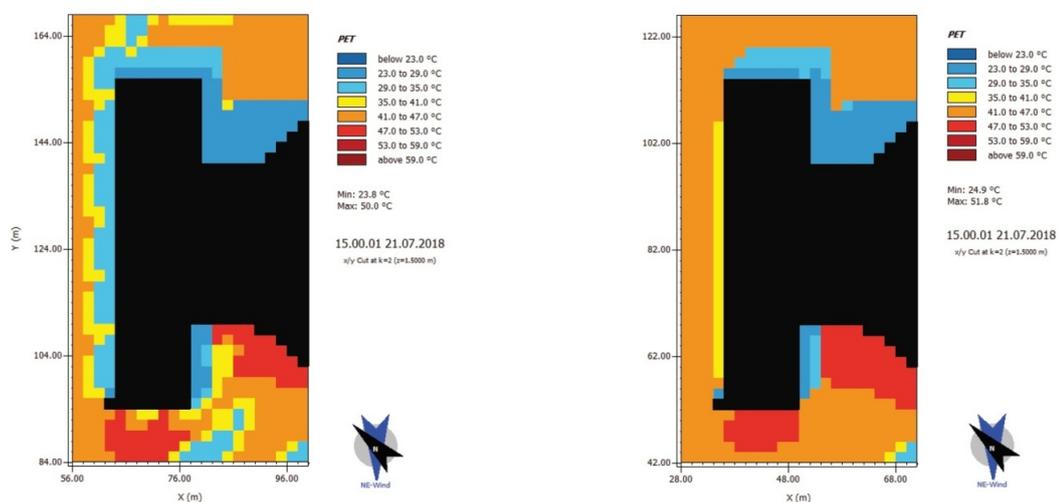
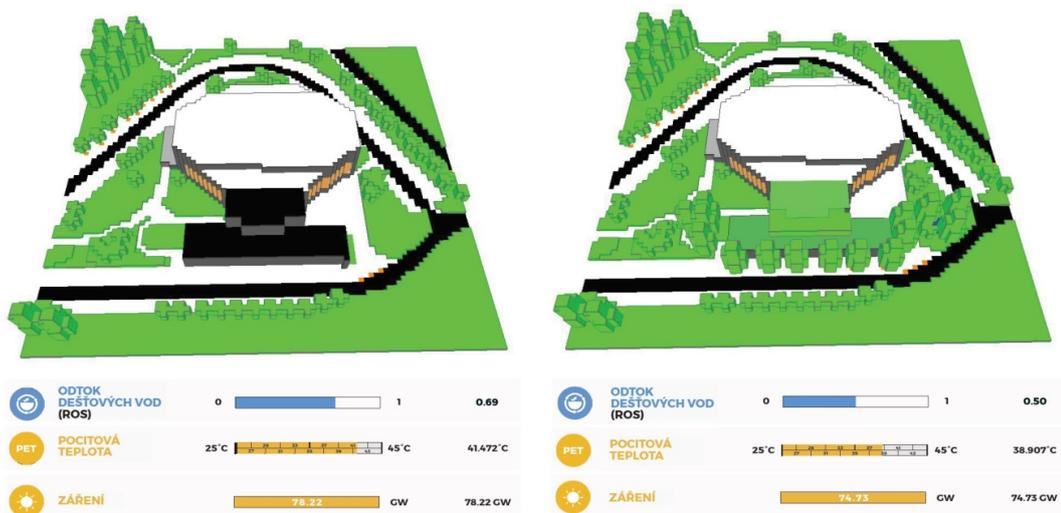
Současný stav hydroizolace na nižší střeše nad dvoupatrovou částí neumožňuje v současnosti aplikaci zelené střechy v celé ploše. Hydroizolace v atikové části na jihovýchodní straně je vzdušná a případná aplikace dalších vrstev by mohla vést k poškození či protržení hydroizolace, proto je koncepční řešení upraveno tak, aby nedošlo k potenciální perforaci hydroizolace. Navrhovaný přístup umožňuje také snadnou rekonstrukci střechy, protože je navrhovaný systém mobilní a současně nezasahuje do prostoru, který bude v budoucnu vyžadovat rekonstrukční práce.



Obrázek č. 35: Realizace první etapy extenzivní střechy v Opavě (zdroj: autor, 2019)

8.2.2 Cíle projektu

Cílem projektu je doplnění zelené infrastruktury do areálu objektu na ulici Žižkova 2904/8 v Opavě – tj. instalace extenzivní a semiintenzivní zelené střechy, instalace pergoly a instalace zelené fasády ve formě popínavých rostlin podporovaných vynášecí konstrukcí. Přesnější popis jednotlivých konstrukcí je součástí následujících kapitol 8.2.3. a 8.2.4. Funkčním cílem projektu je zvýšení retenční schopnosti areálu, zlepšení vnitřních i vnějších provozních podmínek z pohledu tepelného komfortu, snížení energetické náročnosti objektu a též zvýšení estetické hodnoty celku. Základní vyhodnocení je ukázáno na sérii obrázků č. 36.



Obrázek č. 36: Dílčí výsledky environmentální studie (zdroj: autor, 2019)

Výsledné navrhované řešení je demonstrováno na obrázku vizualizace č. 37. Cílová efektivně dotčená oblast má rozlohu 3 500 m² a zahrnuje oblast rekreačního zařízení s ubytováním, parkovací plochy, část halového rekreačního objektu, požární a manipulační plochu a autobusovou zastávku městské hromadné dopravy.



Obrázek č. 37: Vizualizace navrhovaného stavu sportovní haly v Opavě (zdroj: BUILDIGO s.r.o., 2019)

8.2.3 Navrhované technické úpravy

- Extenzivní zelená střecha

Vyšší ze dvou dotčených střech byla v prosinci 2019 osazena extenzivní zelenou střechou s rozchodníky. Navrhovaná výška substrátu byla v rozmezí 6 až 8 cm v závislosti na voleném typu osázení. Ideálním řešením by bylo osázení s pomocí vegetačních koberců pro okamžitý nástup funkčního efektu. Realizace však proběhla ve formě výsadby jednotlivých rostlin v celkovém množství 25 ks na 1 m². Technické vrstvy byly navrženy v souladu s moderními standardy zelených extenzivních střech.

- Semiintenzivní zelená střecha – zelené čtverce

Mobilní nádoby budou zhotoveny v šedé barvě z HDPE nebo PP v rozměru 2 x 2 x 0,4 m s cílovou součtovou výškou substrátu a technických drenážních a retenčních vrstev 0,35 m. Doporučená tloušťka stěny by měla být nejméně 1 cm, dno od 0,8 cm. Ve stěnách musí být perforace, které umožní přebytečný odtok srážkových vod. Volba substrátu proběhne jako mix intenzivního substrátu a vhodného doplňkového druhu substrátu.

- Pergola

Základním prvkem tohoto řešení je ocelová konstrukce dle výkresové dokumentace a výpočtových principů dle příloh. Kotvení hlavních nosných prvků je na jedné straně realizováno do betonových kvádrů s možností výsadby popínavých rostlin. Druhá část je pomocí kotevních elementů přichycena na stávající konstrukci třípatrové části objektu. Doplňkové žebrování bude řešeno lanky v kotevních ocích na základních žebrech.

- Zelená fasáda – výsadba popínavých rostlin s podporou vynášecí konstrukce

V přechodu rohu dvou a třípatrové části rekreačního objektu bude umístěna lanková konstrukce na kotevních ocích dle možnosti umístění do nosné konstrukce. Podloží musí být uzpůsobeno dle volby popínavé rostliny a bude vyžadovat minimální zásah do stávajících ploch.

8.2.4 Navrhované úpravy zelené infrastruktury

Navrhovaná koncepce je inspirovaná architekturou městského koupaliště v Opavě, které je součástí sportovního areálu v blízkosti Městských sadů. Nosnou myšlenkou propojení interiéru a exteriéru je pergola respektující osově souměrnou architektonickou koncepci. Pergola s popínavými rostlinami bude viditelná jak z vlastního objektu, tak i z příjezdových ploch. Na pergolu navazuje kvadraticky řešená semiintenzivní zelená střecha sestavená ze čtvercových záhonů v půdorysném rozměru 2 x 2 m. Budoucí výsadby budou řešeny tak, aby čtvercové záhony byly dominantní a byly obklopeny kačírkem (modrá střecha) nebo extenzivní zelení (zelená střecha).

Extenzivní zahrada vytvářející střechu 3.NP je řešena suchomilnou vegetací zvládající extrémní klimatické podmínky. Jedná se o základní návrh jednoduché extenzivní zelené střechy.

Cílový objekt je pro maximalizaci efektu zelené infrastruktury doplněn zelenou fasádou ve formě popínavých rostlin z úrovně chodníku ve vnitřních rozích. Přesná lokace této výsadby je naznačena na výkresové dokumentaci studie.

Doplňkově je vhodné doplnit zelenou infrastrukturu o vzrostlé stromy po obou nárožích střešní zahrady v úrovni uliční sítě. Tato výsadba by výrazně přispěla k ochlazovacímu efektu vegetace na celý objekt. Jedná se o osově souměrné dvojice vzrostlých stromů.

Klíčovým záměrem je včlenit areál víceúčelové haly dle moderních standardů do základního kamene zelené infrastruktury Opavy do lokace Městských sadů.

Shrnutí prvků zelené infrastruktury:

- Extenzivní zelená střecha
- Semiintenzivní zelená střecha ve formě čtverců
- Pergola
- Zelená fasáda
- Výsadba stromů pod nárožím střešní zahrady

8.2.5 Vliv změn na stávající konstrukce

V areálu dojde ke snížení průměrné teploty areálu o 2,5°C. Odtokový koeficient klesne z 0,69 na 0,5. Jedná se o signifikantní zlepšení obou významných základních ukazatelů. Vlastní oblast rekreačního zařízení sníží v tropických dnech výpočtovou potřebu chlazení o 4 GW z dopadnutého záření za 24 hodin. Na základě výpočtu 1 kWh

za 1 Kč lze předpokládat efektivní úsporu při nákladu na větrání a klimatizaci až o 60 000 Kč v případě tropického léta s nejméně 15-ti tropickými dny. Vyvětrání oblasti nebude doplňkovými vegetačními instalacemi ovlivněno a budou zachovány kvalitativní parametry z původního stavu.

Rekonstrukční zásahy byly plánovány tak, aby minimálně ovlivňovaly statické vlastnosti konstrukce a respektovaly skutečné rezervy zatížení, které lze v daném místě využít, a aktuální stav hydroizolačního souvrství. Největší zásah z tohoto pohledu vyžaduje konstrukce pergoly, kterou je nutné kotvit do stávající svislé stěny 3.NP.

9. Hodnocení krátkodobé a dlouhodobé stability z hlediska působení povětrnostních podmínek v průběhu vybraného životního cyklu konstrukce

9.1. Nerovnoměrné sedání substrátu šikmé extenzivní zelené střechy projektu EnviHUT

Během testování stavebně fyzikálního chování extenzivních a semi-intenzivních střech se sklonem 30° na projektu EnviHUT došlo v primární fázi k mimořádně velkému sedání substrátu. Extenzivní testovací pole se záchytným systémem z geobuněk vykazovalo po šesti měsících existence nerovnoměrné sedání jednotlivých výseků. Nadměřený pokles instalovaného substrátu dosahoval míry sednutí až o 40 % z původní instalované výšky (zamýšlené mocnosti vrstvy). Následné deformace systému geobuněk dodatečně způsobily částečný sesun substrátu do oblasti okapové hrany. Tyto sesuny též ovlivnily inicializační vývoj rozchodníkové vegetace na jejím povrchu. Kromě funkčních nedostatků ovlivňuje zmíněný problém i estetickou funkci celé konstrukce. Uvedená kapitola diskutuje problematiku z hlediska optimalizace instalačních postupů, výběru a úpravy použitého střešního substrátu a z hlediska úpravy geometrického a stavebního rozložení instalovaných elementů záchytného systému. Důsledná úprava geometrie střešního systému a obohacení původní frakce substrátu může umožnit plnohodnotnou funkčnost již od počátku existence extenzivní zelené střechy. Schéma úprav a jejich odůvodnění je součástí výstupů této technické studie.

9.1.1 Popis konstrukce

Protože je EnviHUT úmyslně vystaven agresivnímu působení klimatických vlivů, zejména pak silnému větru, bylo na konstrukci použito mnoho severoevropských prvků a konstrukčních řešení. Současně bylo toto negativní působení proměněno v benefit ve formě kvalitního odvětrávání větraných mezer pomocí komínového efektu.

Výběr použitých přírodních a recyklovaných stavebních materiálů odpovídá potřebám výzkumu jednotlivých členů týmu. Na střeše je instalován umělý částečně recyklovaný střešní substrát i přírodní lokální zemina. Na střeše je nainstalována vyvíjená vegetačně retenční vrstva z recyklovaného bikomponentního polyesteru.

Při návrhu byl též zohledněn návrh konstrukce z pohledu teplotního kmitu v horkém letním období. Dle množství použité zeminy, bohaté vegetace, přidružené vegetačně-retenční desky a návrhu konstrukce střechy s dostatečnými přesahy byla finální návrhová frekvence teplotního kmitu stanovena na 12 hodin. Díky tomuto návrhu v kombinaci s regulovaným větráním na severní stranu by měla být zajištěna optimální vnitřní teplota prostředí i povrchů bez nutnosti provozu energeticky náročných klimatizačních jednotek.

První sekce má skladbu tvořenou z desek z recyklovaného PES o tloušťce 60mm, jež tvoří vegetačně-retenční vrstvu, dále buňkovým záchytným systémem, který je vyplněn drceným substrátem s plánovanou výškou 120 mm, a nakonec vegetací tvořenou rostlinami rozchodníků. Tento systém reprezentuje střechu vegetačně chudou.

Prostřední segment je založen na švýcarském konceptu a zastupuje střechu biodiverzní neboli vegetačně bohatou. Tato skladba je podporována vegetačně-retenční vrstvou z desek z recyklovaného PES o tl. 40 nebo 60mm, na které je umístěn záchytný systém z deskového materiálu a výztužné sítě. Na tuto vrstvu je navržena přírodní zemina z výkopku o síle 180mm. Pro urychlení růstu vegetace byly použity travní koberce doplněné o osivo z okolně rostoucích rostlin (vlčí mák, různé druhy travin, heřmánek atd.).

Poslední část reprezentuje islandský koncept provádění šikmých zelených střech. Na vegetačně-retenční vrstvu různých mocností jsou pokládány travní koberce, mezi které je doplněná výztužná síť a rostlá zemina, přičemž první dva koberce jsou kladeny kořeny nahoru a poslední koberec, který tvoří povrch konstrukce, je kladen kořeny dolů. Takto navržená a provedená vrstva tvoří velmi odolný a stálý systém, který je schopen odolávat extrémním klimatickým vlivům. Každý segment je doplněn o vlhkostní čidla do zeminy a dále čidla teplotní, které jsou umístěny nad povrchem.

Konsolidace na severské i na semiintenzivní biodiverzní variantě byla úspěšná díky použitým skobám. Nedošlo k sesuvům sledované plochy, sedání probíhalo rovnoměrně v celé ploše i orientaci. Konsolidace na extenzivní variantě vykazovala nerovnoměrné sedání, které je popsáno v kapitole 9.1.5. Výsledky.

9.1.2 Vegetačně retenční vrstva

Instalace vegetačně-retenční desky o celkovém rozměru 1,2 x 0,8 m proběhla nalepením této vrstvy na pojistnou hydroizolační vrstvu v podélném směru. (Podélný směr byl zvolen za účelem zmenšení vzájemných spar celé vrstvy.) Povrch pojistné hydroizolační vrstvy musel být zbaven polyethylenové vrstvy – opálením. Jako lepidlo byla použita nízkoexpanzní polyurethanová pěna se specifikací pro práci na studnách, která byla aplikována po 20 až 25 cm ve svislém směru po celé šířce desky. Důvod použití nízkoexpanzní varianty polyurethanové pěny je její zvýšená odolnost proti plísním, omezením růstu hub ve spojení a vysoká přilnavost ke spojovaným povrchům. Lepené matrace byly krátkodobě po dobu 2 min přitíženy tak, aby nastalo jejich vyrovnání v celé délce a byl omezen vznik spar mezi nimi. Spára mezi matracemi lepena nebyla z důvodu zachování jednotných průtokových charakteristik průřezu celé vrstvy v celé konstrukci.

Detaily, rohové a okrajové části byly důsledně vytvarovány, tak aby byla zajištěna homogenita a celistvost vrstvy.

Díky rozdílné tloušťce použitých matrací lze ve sledovaných polích modelovat množství zachycené vody. Na EnviHut byly použity dva typy matrací a sice:

- matrace o tloušťce 4 cm při plnění $4000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$
- matrace o tloušťce 6 cm při plnění $6000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

Tlustší varianta byla použita plnoplošně na jižní straně střechy a u hřebene severní expozice v šířce pásu 80cm. Na zbylou plochu byla nalepena matrace s menší retenční schopností. Po nalepení byla tato vrstva ponechána po dobu 12 hodin bez dalšího zásahu. Na tuto vrstvu následovala instalace záchytného systému, substrátu a vrstvy vegetace.

9.1.3 Záchytný systém a výsadba vegetace

Instalace sítě z geobuňek byla kotvena do dodatečného rámového elementu u hřebene a po stranách střechy. Částečně (z 20% délky hřebene) je síť též přeložena přes hřeben. Následně byla plocha zasypávána originálním střešním substrátem českého výrobce směrem od hřebene po okap.

Tato instalace nebyla přímo vlastnoručně realizována autory projektu a byla svěřena firmě, která se realizacemi vegetačních střech dlouhodobě zabývá.

Zvolená forma instalace neumožnila provedení efektivnějšího zhutnění. Po instalaci vykazovala tato část velké objemové změny způsobené nerovnoměrnou konsolidací závislou na proměnném tvaru jednotlivých propojených segmentů. Protože byla instalace prováděna před obdobím vegetačního klidu vysázené vegetace, nedošlo k jejímu rychlému růstu. Kontaktní povrch byl v následujících měsících vystaven mírným zimním podmínkám. Na konci zimního období byly pozorovány malé povrchové sesuvy. Vzniklé sesuvy byly pozorovány na obou instalovaných expozicích (SSV) - (JJZ). Minimálně 5 z 25 použitých balení (40 kg) obsahovalo celistvé nedrcené expandované jíly a břidlice.

9.1.4 Podmínky měření

Hlavní testovací rovinou je sedlová zelená střecha se sklonem 30° s orientací JJZ - SSV a velikostí testovacího segmentu $2,4 \times 2,5 \text{ m}$. Sedlová střešní konstrukce má sklon 30° a je rozdělena do tří sekcí.

Instalace střechy proběhla na konci září a v průběhu října 2015 s upravenou vegetačně-retenční deskou z polyesterových vláken a shluků s plněním $4000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ při 4cm výšky a $6000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ při 6 cm. Následné zimní období bylo velmi mírné s malým množstvím srážek bez extrémního mrazivého období. Teplota ve sledovaném období klesla jen jeden den pod návrhových -12°C . Jediným měsícem se zápornou průměrnou teplotou byl leden $-1,94^\circ\text{C}$.

Nedělené instalované geobuňky byly měřeny ve vertikálním v a horizontálním směru h . Následně byly vzájemně vyhodnoceny měřené rozměry jednotlivě vůči celku. Dělené buňky nebyly zařazeny do tohoto hodnocení. Přesnost měření byla stanovena

na ± 5 mm, která odpovídá dvojnásobné šířce instalované sítě geobuněk. Instalační průměrný rozměr $v_i \times h_i$ byl změřen jako $(40 \pm 0,5) \times (40 \pm 0,5)$ cm.

Cílem hodnocení je stanovit míru dotvarování po konsolidaci celé konstrukce a též vyhodnotit otázku rovnoměrnosti sedání zkoumaného elementu.

Výsledky měření z 30.5.2016 byly systematicky zaznamenány v tabulce 4 pro jižní stranu a v tabulce 5 pro stranu severní. Tabulka není standardní formou zápisu, ale spíše diagramem, ze kterého lze vyčíst dotvarování celého zachytného systému geobuněk demonstrovaném na obrázku č. 38. U některých buněk nedošlo k prolisování tvaru na povrch. Tyto buňky nebylo možné změřit bez narušení stávajícího povrchu střechy. V tabulce je tento stav označen zkratkou *cov* jako covered. Některé buňky byly natolik deformovány, že nebylo možné změřit sledovaný rozměr. Tyto buňky jsou pak v tabulce označeny zkratkou *dam* jako damaged.



Obrázek č. 38: Sesuv u okapu na jižní straně (zdroj: autor, 2016)

9.1.5 Výsledky

Geometrické uspořádání geobuněk extenzivní varianty - JIH pohled										
[cm]		Vertikální řada								
		I	II	III	IV	V				
Horizontální řada	J		v							
	I	41	h							
	H	46	51		52		54			
	G	45	53	zasyp	48	54	44,5	53		cov
	F	54	cov	zasyp	51	44,5	49	38,5	44	cov
	E	41,5	cov	48,5	45,5	51,5	50	50	53,5	40
	D	54	47	50,5	48,5	48,5	48	48,5	46,5	46,5
	C	42	52	47	50	43,5	50	47,5	52,5	dam
	B	51	42	51,5	42,5	55	44,5	50	51,5	dam
	A	46,5	55,5	38,5	54	41	53,5	46	43,5	52,5
	48,5		58,5		55,5		46		35,6	

Tabulka č. 4: Dotvarování geobuněk na jižní expozici

Geometrické uspořádání geobuněk extenzivní varianty - SEVER pohled										
[mm]		Vertikální řada								
			II	III	IV	V				
Horizontální řada	J									
	I	v		52		52		47		43
	H	h	43,5	46,5	52,5	46,5	46,5	52	46	55
	G		52	45,5	46	46,5	52	46,5	52,5	49
	F		/	51	40	53	47	52	50	49
	E		/	43,5	57	42	51	49	50	41
	D		50	54,5	43,5	57	45	48,5	41	40
	C		44	50	53,5	45,5	53	37,5	56	42
	B		35,5	46	51,5	53,5	38	59	40	52
	A		47	36	46	50	59	38	55	52
			60		52,5		53		47	

Tabulka č. 5: Dotvarování geobuněk na severní expozici

Komentář měření:

- Jižní strana
 - Průměr celku v = 46,95 cm; h = 48,10 cm,
 - Řada G - vyosení v sedání 1 až 4 v horizontálním směru,
 - Řada E - vyosení vertikálního směru E1 vůči E2 a též E4 a E5,
 - Řada D - rovnovážné sedání,

- Řada B - B4 výrazná vertikální deformace vůči řadě a též nerovnoměrné sednutí vůči horizontálnímu směru,
- Řada A - výrazný pokles sloupce A2 následovaný výraznou horizontální deformací A2 a A3,
- Součet sloupců 2,3,4 (194; 190; 196,5 cm) je o 18,5 cm rozdílný oproti sloupci 1 (175 cm),
- Součet řad E, D, A (248, 252, 244 cm) - rovnoměrné sedání v horizontálním směru vůči celku.
- Severní strana
 - Průměr celku $v = 45,09$ cm; $h = 51,49$ cm,
 - I2, I3 je vertikálně vzájemně rovnocenná; I5 je vůči předcházejícím jednotkám posunuta,
 - Poslední sloupec řady G - částečně kompenzuje změny způsobené řadou I,
 - Řada D a sloupec 1 je výrazně deformován vůči celé řadě,
 - Nejvýraznější je deformována jednotka C4 a její okolí,
 - A2 a C4 je vůbec nejvíce zdeformována,
 - B3 a B2, F2 a F3 - je vyoseno vzájemnou kompenzací řady B a F,
 - Součet sloupců 3, 4 (236, 218 cm) je odlišný od krajních sloupců 2, 5 (227 cm),
 - Horizontální součet řad A, B, C, D, E, G, H, I (212,5; 207; 210,5; 206,5; 200; 205; 202,5; 200) – část E až I je v horizontální rovině rovnoměrná, následována nárustem v řadách D a následujících podobných řadách A až C.

9.1.6 Navrhované změny postupu instalace

Použitý substrát je klíčový aspekt, který nejvíce ovlivňuje stabilitu výsledné instalace. Zejména pak u substrátů se složkou z expandovaných jílu a břidlic. U dodávky těchto materiálů je třeba důsledně zkontrolovat skutečně dodaný substrát a ověřit hlavní požadované instalační parametry – těmito parametry je zejména složení zrnitosti a úroveň drcení jednotlivých celistvých částic. Zde vzniká kritický bod nákupu a aplikace substrátu. Některé substráty jsou limitovány technologickými možnostmi míchání a následným balením dle formy distribuce. S nevhodnými balenými substráty s méně drcenou složkou, která se do prodáváných substrátů dostává mícháním lehkých částic a nedostatečnou výstupní kontrolou, je při realizaci třeba počítat a důsledně provádět vlastní mezioperační kontrolu aplikovaného materiálu. Nepříznivá kombinace uvedených postupů může vyústit v sesuny stejně jako na testovací realizaci demonstrované na obrázku č. 39.

Tento problém by bylo možné kompenzovat vlastní úpravou složení substrátu, zejména pak obohacením dodaného substrátu o další větší frakce. Tento postup byl konzultován s odborníky z BOKU, kteří doporučují obohatit stavající instalaci o stabilizační vaznou frakci (16 - 32 mm). Uvedená frakce by dle FLL Guidelines [27] již neměla být součástí střešních substrátů, zde se ale jedná o opravu stávající vrstvy.

Důvodem je vytvoření skokové křivky zrnitosti, tak aby mohlo docházet k tvorbě vazeb, které zamezují sesuvům na šikmých střechách. Tato opravná aplikace je neefektivnější nápravou z pohledu autora i spolupracujících institucí.



Obrázek č. 39: Sesuv u okapu na jižní straně (zdroj: autor, 2016)

9.1.7 Vyhodnocení stabilizačního testu

Rozšíření aplikací šikmých zelených střech je vázáno na kvalitní ukázkové realizace, které mohou oslovit potenciální zákazníky. Estetickým a funkčním vadám, které se na sledovaném testovacím objektu objevily, je třeba předcházet důsledným prováděním technologického postupu. Uvedená studie poukazuje na kritické body použité formy realizace.

Vzhledem k velkým deformacím jednotlivých geobuněk i celku záchytného systému autor doporučuje změnit velikost použitých geobuněk z rastru 40 x 40 (v x h) nejlépe na polovinu v obou uvedených směrech. Jednotlivé stěny současné geobuněk jsou příliš zatěžovány substrátem. Ve vzájemném spojení následně dochází k vázaným změnám celého rastru záchytného systému. Defekt tak může být způsoben i lokálním zvýšením působením povětrnostních vlivů na malé kontaktní ploše. Dochází tak v kombinaci s diskutovaným problémem dodávky substrátu ke vzniku sesuvů. Tyto sesuvy sekundárně poškozují geometrii celého systému a neumožňují souvislý plošný vývoj vegetace. Obnažená místa nadále degradují působením větrné eroze a částečně také napomáhá ke splavování substrátu déšť. Na zkoumaném objektu je tato eroze umocněna velkým množstvím instalovaných kulovitých expandovaných zrn, která se postupně dostávají na kontaktní povrch. Zde jsou pak díky své nízké hmotnosti ovlivněna působením větru a hromadí se u okapové hrany střechy.

Náprava takovéto střechy je zejména časově velmi nákladná a bylo by možné ji předejít důslednou kontrolou používaného substrátu před vlastní instalací. Deklarovaný

dodaný materiál v tomto případě z 20% objemu neodpovídal požadovaným vlastnostem. Zejména drcení expandovaných zrn bylo kritickým parametrem.

9.2 Vliv sání větru na stabilitu kontaktní vrstvy krátce po její instalaci

Z provedeného terénního šetření vyplývá, že orientace v prostoru, a tedy i působení klimatických vlivů daleko přesahuje všechny ostatní aspekty návrhu z hlediska dlouhodobé stability vrstev. Na Islandu byl nalezen vhodný zkoumaný objekt v oblasti technického přístavu v Reykjavíku. Sledovaný objekt byl nejprve na počátku listopadu sestaven bez podpůrných prostředků. Následně bylo zjištěno nedostatečné provázání se záchytnou sítí. Proto byly na základě efektu zvaného v angličtině „flapping“ [1] instalovány záchytné hřeby či skoby. Pravděpodobně z důvodu vegetačního klidu nedošlo do prvních 14 dnů k provázání. Na Islandu v té době panoval čas polárních nocí, což je jev, který ve středoevropských podmínkách nenastává. Současně také tato stavba nebyla určena k obývání a nebyla nijak vytápěna.

Dalším sledovaným objektem bylo turistické centrum v obci Varmahlíd v oblasti Skagafjörður s šikmou zelenou střechou soudobé islandské konstrukce. Tato střecha vděčí za bezproblémovou funkčnost správnému designu již přes 20 let. Autor návrhu Hjörleifur Stefánsson umístil objekt tak, aby severní štít objektu s ochranným rámem střechy chránil povrchovou vrstvu střechy před přímým působením agresivních větrů ze severu, které podle zdrojů islandského meteorologického institutu Veðurstofa Íslands [7] převažují nad jakýmkoliv jiným směrem. Autor tohoto objektu považuje za mimořádně kritické první dva roky, dokud nedojde k plnohodnotnému propojení jednotlivých vrstev drnů po celé jejich tloušťce.

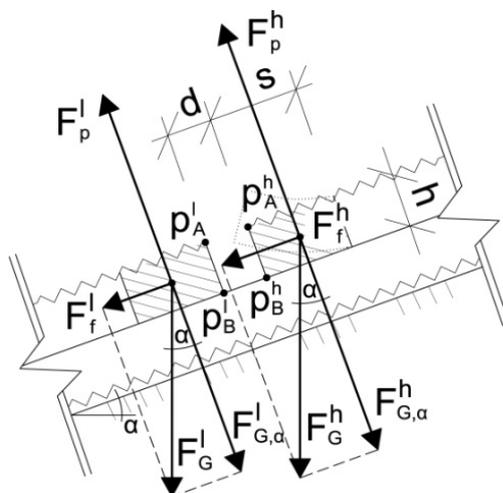
Finální vrstva této střešní konstrukce je tvořena dvěma pásy drnů se spodní vrstvou otočenou kořeny nahoru bez dodatečných spojovacích prvků. Podle provedené studie je toto řešení optimální pouze v případě důsledného zvážení orientace střechy k působení všech možných směrů větru. Objekt je chráněn z jihozápadu přilehlým svahem, z jihu nízkým valem a ze severu sousedním objektem vzdáleným asi 15 m. Severovýchodní strana není přímo chráněna a také proto vykazuje drobná poškození celistvosti povrchu, která ale neomezují funkčnost.

Na proti tomu objekt z poloostrova Seltjarnarnes v Reykjavíku vykazuje silné poškození větrem v rovině východ-západ, ve které není chráněn okolními objekty. K sesuvu také přispěla vlastní váha povrchové vrstvy způsobená delším deštivým obdobím a nedostatečné zapažení vrstvy travních drnů.

9.2.1 Modelování působení větru

Většina moderních islandských staveb zastřešených šikmou vegetační střechou se snaží původní historický koncept zjednodušit v maximální možné míře. Tento fakt je způsoben velkou pracností provádění vegetační vrstvy. Přílišné zjednodušení ale vede k nedostatečnému provázání jednotlivých vrstev koberců a následnému postupnému kolapsu střechy. Je zde tedy potřeba zhodnotit působení sil na možná obnažená zakončení

jednotlivých pásu turfu a správně navrhnout jejich minimální tloušťku s ohledem na použitý typ koberců s důrazem na jejich objemovou hmotnost.



Obrázek č. 40: Základní fyzikální popis výchozí situace simulace

Z tohoto důvodu byla provedena přesná simulace zkoumaného prostředí v oblasti poškozeného finálního povrchu turfu v turbulentním prostředí RANS k- ϵ v programu COMSOL Multiphysics version 4.3b se standardním defaultním nastavením za působení tlaku 1 atm v závislosti na teplotě prostředí 0°C a teplotě proudícího vzduchu - 10°C. (Doplňující data vycházejí z příslušné ČSN EN 1991-1-4).[8] Výstupem z této simulace je pole rychlostí, chování proudění ve vybrané poškozené oblasti a hodnoty tlaku ve zkoumaných hranách dle obrázku č. 41.

Cílem bylo stanovit minimální výšku h travního drnového pásu v době pokládky a prvního funkčního období, která bude schopná odolávat působení saní způsobeného větrem o rychlostí 10, 20 a 30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato minimální výška (Eq. 1) a její proměnná vzhledem k objemové hmotnosti drnu byla stanovena na základě rovnováhy sil $F_{G\alpha}$ a F_p , která vychází z rozdílu tlaků působících na volenou plochu segmentu celého pásu. Předpokládané rozměry segmentu byly omezeny na hodnotu $s = 4$ cm tak, aby platila rovnice č. 1. Do tohoto rozměru ve vrstvě nevzniká žádný významný odpor, který by kladly kořeny rostlin vzniklé deformaci pásu. Řešení problému hodnotí oba konce – indexace ^l lower, ^h higher.

$$h = \frac{p_B - p_A}{\rho \cdot g \cdot \cos(\alpha)} \quad (1)$$

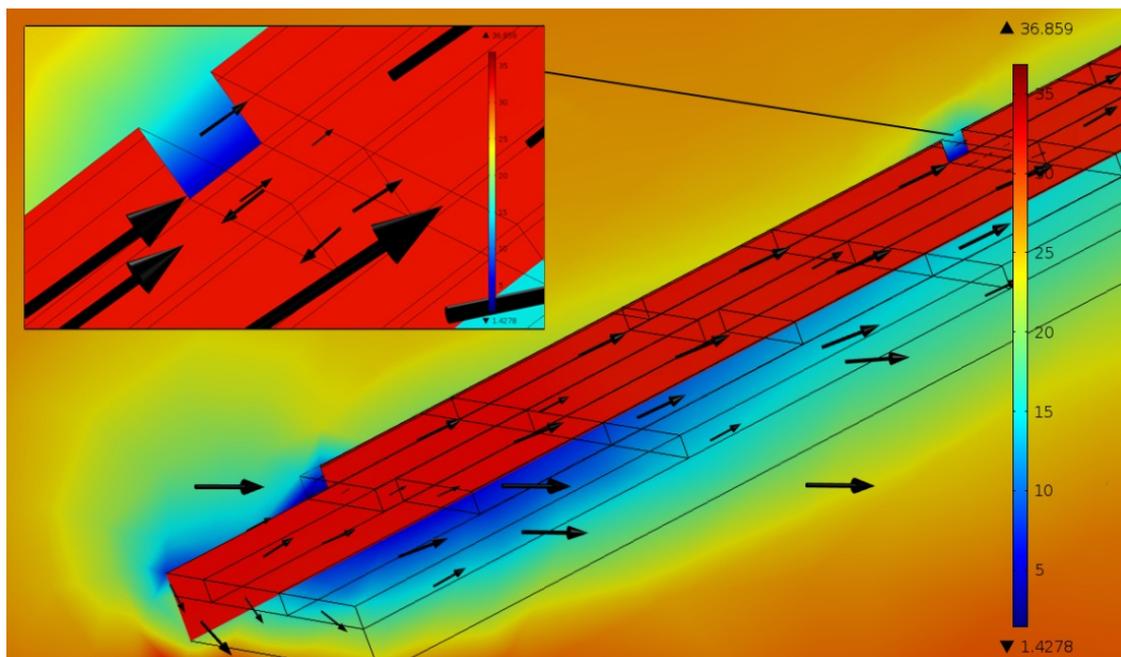
p_A	...	skutečný tlak na spodní vrstvu horní hrany travního drnového pásu [Pa]
p_B	...	skutečný tlak na horní povrch travního drnového pásu [Pa]
ρ	...	objemová hmotnost travního drnu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
g	...	tíhové zrychlení [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]
α	...	úhel sklonu střechy

Působením větru samozřejmě dochází ke zvýšenému odvodu vlhkosti z drnového pásu, čímž klesá jeho objemová hmotnost a požadovaná minimální výška h tak roste. Výsledky z Tabulky č. 6 prokazují, že velikost poškozené oblasti vzniklé sesunutím jednoho pásu nemá na další poškozování žádný významný vliv. Inicializace dlouhodobého poškozujícího procesu začíná okamžitě se vznikem trhliny a v intervalu od 2,5 do 10 cm je téměř totožná.

Required height of the turf strip									
	Density	Width of damaged gap	Wind velocity	Pressure p_B^l	Pressure p_A^l	Height of effected turf stripes h	Pressure p_B^h	Pressure p_A^h	Height of effected turf stripes h
	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	cm	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Pa	Pa	cm	Pa	Pa	cm
Suction	2000	2,5	10	101372,2	101293,3	0,44	101372,4	101295,5	0,43
			20	101513,8	101198,1	1,78	101514,1	101206,4	1,73
			30	101745,2	101035,7	3,99	101746,0	101057,8	3,87
		5	10	101371,5	101293,6	0,44	101371,7	101295,7	0,43
			20	101510,9	101198,7	1,76	101511,4	101207,4	1,71
			30	101746,3	101039,1	3,98	101746,9	101057,2	3,88
		7,5	10	101371,7	101293,9	0,44	101371,8	101294,8	0,43
			20	101511,2	101200,8	1,75	101511,4	101204,0	1,73
			30	101743,1	101043,6	3,93	101745,0	101051,3	3,90
		10	10	101371,2	101293,0	0,44	101371,5	101294,5	0,43
			20	101509,6	101196,7	1,76	101511,4	101202,3	1,74
			30	101740,1	101035,5	3,96	101744,3	101048,3	3,91
	1800	2,5	10	101372,2	101293,3	0,49	101372,4	101295,5	0,48
			20	101513,8	101198,1	1,97	101514,1	101206,4	1,92
			30	101745,2	101035,7	4,43	101746,0	101057,8	4,30
		5	10	101371,5	101293,6	0,49	101371,7	101295,7	0,47
			20	101510,9	101198,7	1,95	101511,4	101207,4	1,90
			30	101746,3	101039,1	4,42	101746,9	101057,2	4,31
		7,5	10	101371,7	101293,9	0,49	101371,8	101294,8	0,48
			20	101511,2	101200,8	1,94	101511,4	101204,0	1,92
			30	101743,1	101043,6	4,37	101745,0	101051,3	4,33
		10	10	101371,2	101293,0	0,49	101371,5	101294,5	0,48
			20	101509,6	101196,7	1,95	101511,4	101202,3	1,93
			30	101740,1	101035,5	4,40	101744,3	101048,3	4,35

Tabulka č. 6: Výsledné simulované hodnoty větrného zatížení

Na návětrné straně pak vlivem působení větru dochází ke zvětšování vzniklé trhliny, jak je naznačeno na obrázku č.41. Tomuto jevu brání záchytná síť již v brzkém stádiu instalace. Vzniklé síly, které obnažené stěny pásů odtlačují od sebe, jsou vzhledem k třecí síle v kombinaci s hrubou sítí minimální. Je tedy třeba zabránit inicializačnímu vzniku mezery, aby stav nadále nebyl poškozován sáním při změně směru větru, jak bylo výše zmíněno.



Obrázek č. 41: Pole rychlostí se stupnicí, výstup ze simulace v COMSOLU 4.3b (zdroj: autor, 2013)

Jednoduchým řešením, jak tomuto jevu čelit, je umístění skob, které se svým tvarem blíží tesařské skobě. Toto řešení je naprosto nezbytné, pokud má zákazník dostat dlouhodobou garanci na stabilitu horního střešního pláště. Při aplikaci těchto skob je třeba dbát na ochranu hydroizolačního souvrství. Jejich funkčnost byla otestována při realizaci střechy stejné koncepce na testovacím objektu EnviHUT.

9.2.2 Vyhodnocení simulace

Tato část práce poukazuje na provázanost stability vegetačního opláštění a vhodnou volbu návrhu konstrukce především z hlediska působení převažujícího zatížení větrem. Provedenou simulací a výpočty byla stanovena kritická oblast možného vzniku poškození. Touto kritickou oblastí je možná mezera v horním travním koberci v dolní třetině střešní roviny za působení sání, přičemž nebyla hodnocena oblast hřebene jen převažující pole konstrukce. Výpočtem bylo zjištěno, že po inicializaci vzniku mezery již nezávisí na její šířce. Hlavním parametrem je volená výška travního koberce, jeho objemová hmotnost a fixace koncových hran jednotlivých travních koberců svrchní vrstvy. Celkový výsledek je také ovlivněn sklonem střechy, který ale vykazuje jen minimální rozdíly v doporučeném sklonu střechy mezi 20° a 30°. Jednoduché položení koberců v součinnosti se záchytnou sítí není dostatečné řešení fixace, zejména pak během prvních dvou let během prorůstání kořenů a vytvoření pevnějších vazeb ve vegetační vrstvě. Nejdůležitějším aspektem k umístění objektu je zvážení vlivu působení sání od převažujícího větru s ohledem na jeho směr a rychlost. Přesnější chování působení větru v okolí lze řešit pomocí simulačních programů, které jsou schopny zohlednit i chování vegetačních povrchů. Takovýmto programem je i Envi-MET vyvíjený

specialisty na univerzitě v Mainzu. Tento program byl využit i v případě dříve uvedené environmentální studie v Opavě.

Jako opatřením proti vzniku efektu flappingu bylo použito kotevních skob tvaru U. Hroty těchto skob nebyly ostřené, aby nedocházelo k perforacím technických vrstev po instalaci. Skoby měly délku ramínek 5 cm a přeponu délky 8 cm. Pro účely testování na EnviHUT byly vyrobeny z pozinkovaného drátu tloušťky 4 mm. Instalace po celou dobu testování od roku 2015 do 2019 nikdy nedošlo k defektu ve formě flappingu ani na jedné sledované expozici. Během testování byla odzkoušena i varianta skoby se zpětnými háčky vyrobená metodou 3D tisku v obdobném rozměru jako její kovový předchůdce. Obě varianty prokázaly dostatečnou odolnost a snadnost aplikace pro realizaci šikmých střech od 20° z vegetačních koberců.

10. ZÁVĚR

10.1 Vlastní závěr

Díky aktivní zahraniční spolupráci jsem byl seznámen s variantami možných funkčních řešení, které mají potenciál využití i v našich podmínkách. V současné době se já a kolegové z týmu nacházíme na pomyslné křižovatce. Na jedné straně již ve světě existuje řada forem aplikací zelené střechy. Obvykle jsou tyto aplikace stále podloženy aktivním testováním ze strany výrobců a řada z nich již též slaví významná jubilea. Na druhé straně existuje řada nerozvinutých alternativ, které je možné rozvíjet zcela od počátku. Staré historické koncepty v kombinaci s moderními materiály, novými znalostmi a novými technologiemi jsou klíčové v objevování nových skladeb a jejich technických modifikací.

Mou osobní volbou v rámci doktorského tématu padla na druhou jmenovanou možnost. Jednak v ní vidím větší přínos pro stavební trh a současně větší vědecký potenciál ve vývoji nových materiálů, skladeb a způsobu aplikací. Velkým benefitem pro celý výzkum je také to, že je možnost poučit se z existujících řešení, které byly a dosud jsou experimentálně v zahraničí (zejména ve Švýcarsku) testovány. Jejich permanentní sledovaný vývoj poskytuje řadu poučení, které by jinak bylo velmi obtížné domyslet či získat bez dlouhodobého intenzivního pozorování. Ze svých studijních cest jsem si přivezl velké množství těchto zkušeností, které již aplikuji ve svém výzkumu, a věřím, že výsledky najdou uplatnění nejen na českém stavebním trhu jako zajímavá alternativa pro nezelené střešní konstrukce.



Obrázek č. 42: První 3D tištěný dům – Prvok, extenzivní zelená střecha (autor: BUILDIGO s.r.o.; 2020)

10.2 Zamyšlení nad vývojem zelených střech v budoucnosti

V současné stavební praxi existuje pro stavební konstrukce definované názvosloví, které stavebníkovi i realizátorovi evokuje představu diskutované konstrukce nebo stavebního prvku. Představa pojmu srubové konstrukce i naprostému laikovi naznačuje, jaký bude mít výsledná stavba charakter. Jinými slovy jeho představa bude velmi konkrétní. Zdánlivě snadno pochopitelný obecný pojem zelená střecha však u všech zainteresovaných může vyvolávat odlišné představy o finální podobě celé konstrukce. Jedno jednoduché označení v sobě kombinuje představy nízkého sukulentního porostu přes vidinu husté louky či značně extrémní představu malého lesoparku.

Zkuste se zamyslet nad první představou své fantazie při myšlence na zelenou střechu, kterou by alternativně zrealizovali na svém vlastním projektu bez jakéhokoliv omezení zdroji.

Kdyby bylo možné všechny tyto představy kreativního myšlení složit do mozaiky, pravděpodobně by vznikla mapa plná malých unikátních ekosystémů, které by dohromady vytvořili krajinu celé Evropy. Zbývá tedy jen otázka, zda-li je vaše představa životaschopná po celou dobu existence vašeho projektu. Díky množství různých instalačních systémů a pokročilých konstrukčních skladeb, díky zavlažovacím a stínícím technologiím lze na vegetační zelenou střechu vysadit téměř cokoli. Jen náklady na udržení životaschopnosti vysazené vegetace mohou každoročně násobně převyšovat náklady na vlastní instalaci celé zelené střechy. Tento fakt není vždy na první pohled zřejmý a řada stavebníků nemá o životním cyklu takovéto střechy konkrétní představy. Pochopení fungování a představa vzhledu střechy ve všech jejích fázích ze strany investora je vůbec nejobtížnější částí jednání o instalaci této konstrukce, kterou sebelepší počítačová vizualizace nemůže zobrazit.

Tento problém je zejména zřetelný u instalace tzv. biodiverzní zelené střechy, která je preferována odbornou veřejností ve Švýcarsku. Doc. Stephan Brenneisen spatřuje v takovéto střeše estetickou funkční konstrukci s mnohonásobně větším ekologickým

přínosem než extenzivní rozhodníkovou variantu, kterou označuje za vegetačně chudou zelenou střechu. Do významného ekologického přínosu je zahrnuta zvýšená schopnost dlouhodobě zachytit velké množství srážkové vody, dále dobrá schopnost snášet extrémní výkyvy počasí (jak teplotní, tak i srážkové), poskytuje zdroj výživy opylovačům v okolí a díky správnému výpočtu teplotního kmitu optimalizovat systém návrhu den/noc.

Švýcarská basilejská legislativa vyžaduje instalaci zelené střechy na každý objekt s plochou střechou bez ohledu na účel užívání (s minimem výjimek). Tento požadavek vyústil v existenci velkého množství chudých extenzivních střech, které byly navrženy jen jako pro forma řešení a neplnily původně zamýšlený účel. Mezi hlavní kritiky patřil doc. Stephan Brenneisen a řada odborníků v jeho okolí. Pod jeho vedením byly přepracovány některé významné objekty např. dnes referenční biodiverzní střecha Klinikum II. Tyto nové realizace byly důsledně monitorovány a popsány v řadách světových vědeckých periodik a staly se v svém okolí ideálem, kterého se ostatní autoři zelených střech ve švýcarských kantonech snaží docílit. Základní inspiraci bere tento koncept z historického návrhu slavné zelené střechy na projektu Wasserwerk Moos ve Wollishofenu, která svou stabilitou a vývojem vegetace udivuje odborníky již více než sto let.

Námi přesvědčovaný investor ale nebude čekat desítky let, aby dosáhla tohoto ideálu, přesto musí akceptovat delší vývoj vegetace. Z tohoto důvodu je vzájemná komunikace mezi autorem návrhu a stavebníkem i realizátorem klíčová. Každý člen tohoto řetězce musí zohlednit působení povětrnosti, okolních klimatických podmínek, a hlavně časovou náročnost jak návrhu, tak i instalace a růstu vegetace. Na druhou stranu řada realizačních příkladů ve Švýcarsku dokládá ekonomickou výhodnost této zelené střechy. Obvykle byly biodiverzní varianty střechy nejlevnější, pokud byla vhodná zemina dopravována z blízké vzdálenosti (cca do 15 až 20 km) a použita lokální vegetace. Pokud bude investor vyžadovat okamžitou pohledovou funkci je možné základní biodiverzní střechu kombinovat s předpěstovanými vegetačními koberci, aby došlo k urychlení vývoje vegetace nebo na šikmé variantě zelené střechy.

Na konferencích European Urban Green Infrastructure Conference 2015, 2017 i 2019 [13] byla diskutována potřeba většího množství realizací různých systémových i originálních řešení v odlišných klimatických podmínkách bez ohledu na rozsah projektu. Dle názoru zúčastněných odborníků z vědeckého hodnotícího pohledu není rozdíl mezi malou realizací např. rodinného domu nebo velkými halovými objekty. Výbor konference doporučoval zvýšit počet sledovaných objektů, tak aby mohla být potenciální evropská legislativa podložena řadou hodnotných vědeckých výsledků.



Obrázek č. 43: Instalace zelené střechy s pomocí vegetačního koberce – první den instalace (zdroj: Tereza Sigmundová; 2020)

10.3 Aplikace pro odbornou praxi

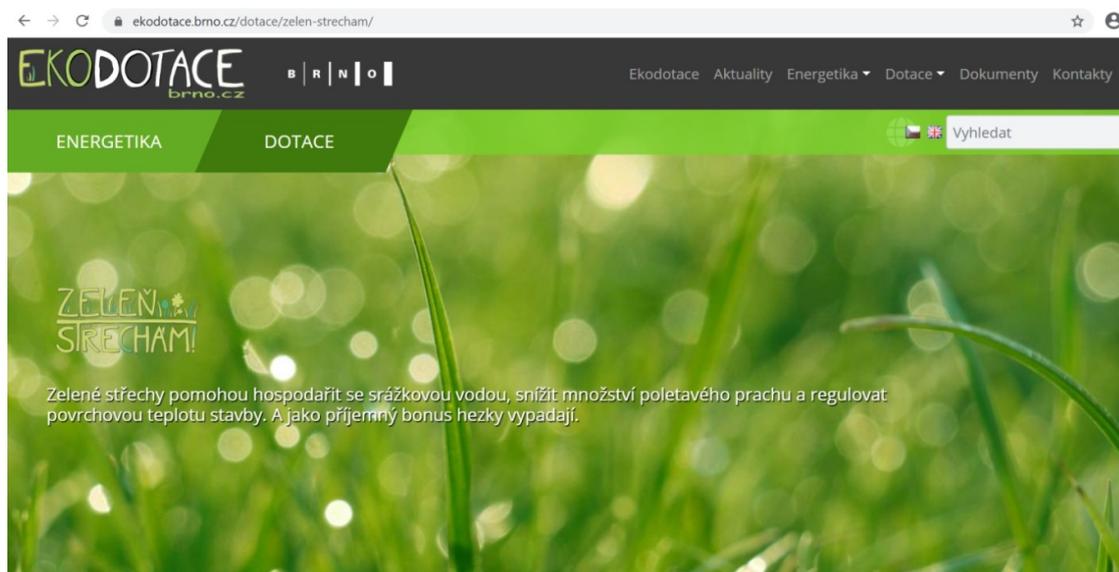
10.3.1. Příprava dotačního titulu Zeleň střechám

V roce 2019 byla ve Statutárním městě Brně zřízena dotační podpora zelených střech na území města. Hlavními autory metodiky a nastavení koncepce byl hlavní návrhový tým složený z Davida Bečkovského (VUT v Brně), Petra Selníka (VUT v Brně), Martina Košťála (vedoucí odboru Ekodotací) a 1. náměstka Petra Hladíka (zastupitel – Brno). První dva jmenovaní zodpovídali za stavebně-technické parametry a základní nastavení cenotvorby, zástupci města Brna řešili primárně právní a dotační mechanismy dle možností obecní legislativy.

Autorství částí metodiky:

- Účely programu
- Důvody programu
- Ukázkový technologický předpis
- Pokyny k údržbě
- Diskuze hodnotících kritérií

Celá agenda dotační podpory je realizovatelná elektronickou formou a dostupná na webu: <https://ekodotace.brno.cz/dotace/zelen-strecham/>. Metodika byla připravována s cílem definice základního rámce. Má za úkol poskytnout funkci informační tak i kontrolní.



Obrázek č. 44: Ukázka z webu Ekodotací – leden 2020 [22]



Obrázek č. 45: Ukázka z hlavního určujícího dokumentu dotačního programu Zeleně střechám [22]

10.4 Možnosti dalšího rozvoje výzkumu zelených střech

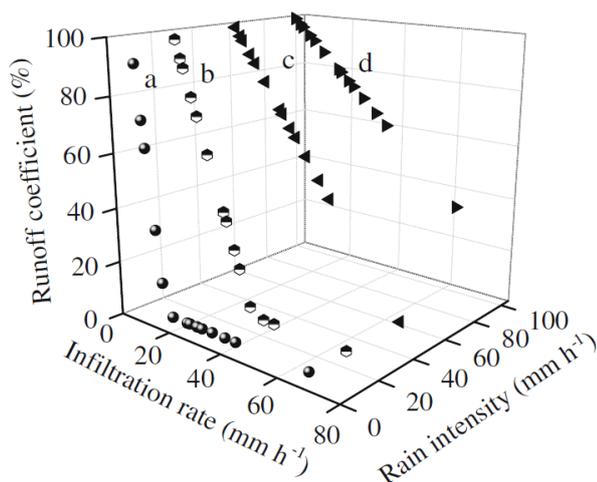
Zajímavou možností výzkumu zelených střech a dalších vegetační konstrukcí je jejich schopnost infiltrace srážek, protože stav současných i navrhovaných konstrukcí lze charakterizovat podle jeho schopnosti vypořádat se s distribucí přívalových dešťů. Tento parametr je pak důležitou součástí adaptační strategie projektu. Jako demonstraci přístupu k této otázce zde uvedu výňatek z jedné specifické studie, na které jsem se podílel. Jedná

se o proces hodnocení povrchů areálu významného vládního úřadu, která byla řešena kolektivem autorů pomocí stanovení odtokového koeficientu na základě schopnosti povrchové infiltrace a intenzity deště zkoumaného povrchu. Stejný koncept by bylo vhodné prověřit v kontextu k vegetačním konstrukcím.

Výňatek ze zmíněné studie:

Podle opakovaného zjištění správce objektu dochází ke vzniku lokálních kaluží na současném povrchu trávního porostu. Tento stav je způsoben dlouhodobým působením lokálních vlivů, stářím vegetačního porostu a specifickými geologickými podmínkami dle volby substrátů. Existuje základní výzkum, který se zaměřil na vazbu hodnocení intenzity srážek, schopnosti infiltrace skladby a odtokového koeficientu, který byl uplatněn při provádění environmentální studie zaměřené na hodnocení odtokových koeficientů trávníků historického areálu zahrad. Pro logické pochopení postupu jsou v následujících bodech uvedeny výsledky a informace, které jsou kritické pro stanovení progresivního koeficientu odtoku:

- Současná skladba půdy je výsledkem dlouhodobého působení člověka v této lokalitě. Zcela zásadním aspektem je provádění výkopů do úrovně jílovitých náplav a mísení jejich částí s navázkou.
- Vlivem intenzivní údržby dochází u této formy vegetace k dílčímu pomalému zhutnění povrchové infiltrační vrstvy zejména s podílem jílovité složky, která se zásadní měrou podílí na schopnosti transportu vody do podloží. Lokálně pak klesá velikost pórů a tím i schopnost transportu srážkových vod na $K = 8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ zatímco díky hlinitopísčitém šterkům má podloží potenciál hodnoty $K = 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Kritickou vrstvou z pohledu odtokového koeficientu a infiltrace srážek je v tomto případě hloubka prvních 30 cm od povrchu. Tato hloubka byla stanovena při ověřování funkčnosti infiltračních půdních modelů podle Philipa (1957), Kostiakova (1932), Mezenceva (1948), Hortna (1940) a amerického výpočetního modelu (the United States Soil Conservation Service, průběžně aktualizováno od 1988). [25]
- Současný povrch trávníků na jižní straně je rovněž poškozen strukturálně – povrchové praskliny v období sucha. Tato situace je výsledkem kombinace dlouhodobého používání údržbové techniky a stále častěji se opakujícího delšího období sucha. Tento stav je umocněn také složením navázky a prohlubován výraznou ztrátou infiltrační schopnosti. [24,26]



Obrázek č. 46: Stanovení odtokového koeficientu na základě průběhu infiltračních parametrů a intenzity deště – 10 (a), 30 (b), 62 (c), 98 (d) $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ [24]

- Na základě provedeného výzkumu vztahu infiltrační schopnosti, intenzity deště a odtokového koeficientu lze stanovit hodnotu odtokového součinitele dotčeného kompaktního trávníku při běžném dešti $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ na hodnotu 0,7-0,8. Při přívalovém dešti $98 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ a identické infiltrační schopnosti se hodnota odtokového součinitele dotčeného kompaktního trávníku limitně blíží 1,0, protože dojde k rychlému zvodnění povrchu omezenou schopností infiltrace. [24]

Tento přístup by mohl významně pomoci urbanistům zkvalitnit urbanistické koncepce a návrhové principy pro moderní města dodržující pravidla Smart Cities. Návrhy v současné době vycházejí jen ze základních poznatků, které by bylo dobré zpřesnit a upravit, protože řada zelených konstrukcí nebyla doposud spolehlivě popsána podle stavebně-technických pravidel. Řada návrhových principů vychází ze zvykového stavitelství, které nemůže postřehnout dynamický rozvoj technologií i materiálů. Budoucí stavební praxe bude stále častěji vyžadovat také LCA a LCC hodnocení skladeb zelených konstrukcí. Kombinace těchto návrhových faktorů a principů bude v následujících letech určovat vývoj a frekvenci použití zelených střech a fasád v běžné stavební praxi.

11. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A SEZNAM ZKRATEK

- [1] Sigrídur Sigurdardótti, Building with Turf, Byggdasafn Skagfirðinga, 2008. 28s. ISBN 978-9979-9757-4-8.
- [2] G. Minke, Zelené střechy, first ed, HEL, Brno, 2001. ISBN 80-86167-17-8
- [3] J. D. Blanc, Trinkwasser für Zürich/100 Jahren Seewasserwerk Moos, Orell Füssli Verlag AG, Zürich, 2014. ISBN 978-3-280-05544-1
- [4] M. Kehrer, S. Pallin, A. Harmon and L. F. Goldberg, Hydrothermal Simulation of Foundations: Part 1, Soil Material Properties, National Technical Information Service, 2012, pp. 1, 3, 10, 11, 13.
- [5] H. Takebayashi and M. Moriyama, Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island, Building and Environment, 42(8), 2007, pp. 2971-2979. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.017
- [6] J. Pokorný, Hospodaření s vodou v krajině – funkce ekosystémů, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 2014, pp. 19-31. Electronical ISBN 978-80-7414-886-6
- [7] Icelandic Met Office. *Vedurstofa Íslands*. [online]. [2004] [cit. 2014-05-26]. Available database: http://www.vedur.is/Medaltalstoflurtxt/Stod_366_Nautabu.ArsMedal.txt
- [8] ČSN EN1991-1-4 ed.2 Action on structures-Part 1-4: General actions – Wind load. ÚNMZ Praha, 2013. PŘÍLOHY
- [9] Catalano, CH.; Marcenó, C.; Laudicina, V.A.; Guarino, R., L. *Thirty years unmanaged green roofs: Ecological research and design implications*. In: Landscape and Urban Planning, Volume 149, Elsevier, Amsterdam, 2016. s. 11-19. ISSN: 0169-2046.
- [10] Gebetemariam, T. K. Post Construction Green Infrastructure Performance Monitoring Parameters and Their Functional Components, MDPI AG, Switzerland, vol.4(1), DOI 10.3390/environments4010002, 2017. ISSN 2076-3298.
- [11] N. Dunnet, N. Kingsbury, Planting Green Roofs and Living Walls, Timber Press, Portland, 2010. pp. 23, 35, 43. ISBN 978-0-88192-911-9
- [12] J. Mentès, D. Raes, M. Hermy, Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, Landscape and Urban Planning, Vol. 77, 2006, p. 217-226. ISSN 0169-2046.
- [13] European Urban Green Infrastructure Conference 2017. *EUGIC* [online]. Budapest: EUGIC, 2017 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <https://eugic.events/conference-programme/>

- [14] Tržnice Brno: Idea Tržnice. [Http://www.trznicebrno.cz/](http://www.trznicebrno.cz/) [online]. Brno: Brno město, 2017 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.trznicebrno.cz/>
- [15] Hague, Paul N. *Průzkum trhu: příprava, výběr vhodných metod, provedení, interpretace získaných údajů*. Praha: Computer Press, 2003. Business books (Computer Press). ISBN 80-7226-917-8.
- [16] Nová zelená úsporám: Slovník Pojmů. *Nová zelená úsporám* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2016 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: <http://www.novazelenausporam.cz/slovník-pojmu/>
- [17] B. Rowe, Long-term Rooftop Plant Communities, Green Roof Ecosystems, Ecological Studies 223, Springer International Publishing Switzerland, Basel, 2015, pp. 322. ISSN 0070-8356
- [18] Testing material is produced by recycling company RETEX a.s. by AirLaid technology from PES – development of material in progress – <http://www.retex.cz/stavebnictvi/> from 15.9.2015
- [19] J. Mentès, D. Raes, M. Hermy, Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 77, 2006, p. 217-226. ISSN 0169-2046
- [20] N. S. G. Williams, J. Lundholm, J. Scott Macivor, Do green roofs help urban biodiversity conservation?, *Journal of Applied Ecology*, Vol. 51(6), 2014, p. 1643-1649.
- [21] Pokorný J. Hospodaření s vodou v krajině – funkce ekosystémů, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 2014, pp. 19-31. Electronical ISBN 978-80-7414-886-6
- [22] Ekodotace – Zeleň úsporám, stránky provozované statutárním městem Brnem, [cit. 2019-12-15] Dostupné z: <https://ekodotace.brno.cz/wp-content/uploads/2019/05/Odborn%C3%A1-metodika-zelen%C3%A9-st%C5%99echy.pdf>
- [23] World Green Roof – komentář exkurze doc. Brenneisena, [cit. 2019-12-15] Dostupné z: <http://www.worldgreenroof.org/files/pdf/BrenneisenExkursionen2009.pdf>
- [24] Yang, J., Zhang, G. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *J Soils Sediments* 11, 751–761 (2011).
- [25] Duan, R., Fedler, C.B. & Borrelli, J. Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrig Sci* 29, 379–389 (2011).
- [26] Franzluebbers, A. J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil & tillage research* [0167-1987], 66-2(2002).
- [27] FLL Dachbegrünungsrichtlinie, kolektiv autorů Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Bonn, 2018
- [28] Popis šikmé zelené střechy na RD, vítěz Zelené střechy roku [cit. 2020-06-01] Dostupné z: <http://www.zelenastrecharoku.cz/cs/menu/soutezni-dila/sikma-zelena-strecha-na-rodinnem-dome/>

- [29] Strategie biodiversity Evropské unie 2010 - 2020 [cit. 2020-06-01] Dostupné z: http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/index_en.htm
- [30] EU biodiversity indicators and related EU targets, Biodiversity Information System for Europe (BISE) [cit. 2020-06-01] Dostupné z: <https://biodiversity.europa.eu/policy/eu-biodiversity-indicators-and-related-eu-targets-simplified-overview>
- [31] Zelená infrastruktura, Evropská unie, 2010 [cit. 2020-06-01] Dostupné z: http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/green_infra/cs.pdf

SEZNAM ZKRATEK

FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau

BISE – Biodiversity Information System for Europe

SEBI – Streamlined European Biodiversity Indicators

PM – Particulate Matter – pevné částice

BOKU – Universität für Bodenkultur Wien

ZHAW – Zürcher Hochschule für Angewandete Wissenschaften

RU – Reykjavík University

BiCo – bikomponentní textilní pojivové vlákno

LCC – Life Cycle Cost

LCA – Life Cycle Assessment

p_A - skutečný tlak na spodní vrstvu horní hrany travního drnového pásu [Pa]

p_B - skutečný tlak na horní povrch travního drnového pásu [Pa]

ρ - objemová hmotnost travního drnu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

g - tíhové zrychlení [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]

α - úhel sklonu střechy

12. PŘÍLOHY

Příloha č. 1 – Publikované články

Příloha č. 2 – Podpora výzkumu

Příloha č. 3 – Tvůrčí aktivita

Příloha č. 4 – Technologický předpis pro realizaci zelených střech

Příloha č. 5 – Plán rizik realizace zelených střech