



**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



## 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 ze 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

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>2. SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU</b> .....	<b>- 1 -</b>
2.1 ZELENÁ A MODRÁ INFRASTRUKTURA .....	- 1 -
2.2 HISTORICKÝ VÝVOJ .....	- 3 -
2.3 SOUČASNÉ VNÍMÁNÍ ZÁKLADNÍCH TERMÍNŮ ZELENÉ INFRASTRUKTURY A ZELENÝCH STŘECH .....	- 4 -
<b>3. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ</b> .....	<b>- 7 -</b>
3.1 ISLAND – REYKJAVÍK UNIVERSITY .....	- 7 -
3.2 ŠVÝCARSKO – ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN (ZHAW) .....	- 8 -
3.3 RAKOUSKO –BODENKULTUR UNIVERSITÄT VIENNA (BOKU) .....	- 8 -
<b>4. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>- 9 -</b>
4.1 VLASTNÍ CÍLE PRÁCE – OPTIMALIZACE NÁVRHU ŠIKMÉ VEGETAČNÍ STŘECHY .....	- 9 -
4.2 VĚDECKÝ PŘÍNOS .....	- 9 -
4.3 PŘÍNOS PRO STAVEBNÍ PRAXI .....	- 9 -
<b>5. POPIS HLAVNÍCH TESTOVACÍCH OBJEKTŮ</b> .....	<b>- 10 -</b>
5.1 TESTOVACÍ OBJEKT ENVIHUT A PŘIDRUŽENÁ TESTOVACÍ VÝSTAVBA .....	- 10 -
5.2 TESTOVACÍ MOBILNÍ PLOŠINY .....	- 10 -
5.3 TESTOVACÍ LABORATORNÍ SEGMENTY .....	- 11 -
<b>6. PODROBNÝ TECHNOLOGICKÝ PŘEDPIS PROCESU VÝSTAVBY VEGETAČNÍ STŘECHY VČETNĚ MOŽNÝCH RIZIK OVLIVŇUJÍCÍ DLOUHODOBOU STABILITU KONSTRUKCE</b> .....	<b>- 11 -</b>
<b>7. NÁVRH MATERIÁLU PRO VEGETAČNĚ RETENČNÍ VRSTVU</b> .....	<b>- 11 -</b>
7.1 VÝVOJ VEGETAČNĚ-RETENČNÍ VRSTVY .....	- 11 -
7.1.1 Popis materiálu .....	- 12 -
7.1.3.2 Test efektivní nasákavosti při 25°, zatížení 1,5 kN·m <sup>-2</sup> a transportu vody zeminou.....	- 13 -
7.1.5 Vyhodnocení testů pro další aplikaci v rámci výzkumu .....	- 14 -
7.2.5 Měření materiálu PES na základě sklonu roviny .....	- 16 -
7.3 VEGETAČNÍ TESTY .....	- 17 -
7.3.1 Krátkodobý vegetační test – vstupní parametrizace.....	- 17 -
7.3.2 Základní souvrství bez přidání podpůrné vegetační výživné vrstvy (Varianta I.).....	- 17 -
7.3.6 Vyhodnocení krátkodobého vegetačního testu.....	- 17 -
7.3.7 Dlouhodobý vegetační test .....	- 17 -
7.3.8 Vyhodnocení vegetačních testů .....	- 18 -
<b>8. KONFLIKT APLIKACE MINERÁLNÍ VLNY, POLYESTEROVÝCH ROHOŽÍ A NOPOVÉ FOLIE NA EXTENZIVNÍCH ZELENÝCH STŘECHÁCH V KLIMATICKÝCH KONTINENTÁLNÍCH PODMÍNKÁCH</b> .....	<b>- 19 -</b>
8.1.4 Doporučené aplikace s testovanými materiály s ohledem na jejich charakter odtoku .....	- 20 -
8.2 PRINCIPY SIMULACE CHOVÁNÍ OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ.....	- 21 -
<b>9. HODNOCENÍ KRÁTKODOBÉ A DLOUHODOBÉ STABILITY Z HLEDISKA PŮSOBNÍ POVĚTRNOSTNÍCH PODMÍNEK V PRŮBĚHU VYBRANÉHO ŽIVOTNÍHO CYKLU KONSTRUKCE</b> .....	<b>- 22 -</b>
9.1. NEROVNOMĚRNÉ SEDÁNÍ SUBSTRÁTU ŠIKMÉ EXTENZIVNÍ ZELENÉ STŘECHY PROJEKTU ENVIHUT.....	- 22 -
9.2 Navrhované změny postupu instalace .....	- 23 -
9.3 Vliv sání větru na stabilitu kontaktní vrstvy krátce po její instalaci .....	- 24 -
<b>10. ZÁVĚR</b> .....	<b>- 26 -</b>
<b>11. APLIKACE PRO ODBORNOU PRAXI</b> .....	<b>- 27 -</b>

12.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	- 28 -
13.	PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY .....	- 28 -
14.	PODPORA VÝZKUMU .....	- 30 -
15.	TVŮRČÍ AKTIVITA .....	- 30 -



# 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.

Během svých studijních cest jsem shromáždil řadu podkladů, získal mnoho osobních odborných zkušeností a diskutoval s lidry 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

*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 (zvyšování 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.

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.

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)

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  $PM_{10}$ , 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, redukuje 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.

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.



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

## 2.2 Historický vývoj

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 střeška 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]. Střeška 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 blíže podobají vlastnostem rostlého terénu, což přispívá k růstu vegetace.



**Obrázek č. 3:** 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, jenž tvoří vegetační vrstvu pro budoucí ozelenění a nakonec část se vzrostlým vegetačním ozeleněním. Toto ozelenění bylo provedeno z dřívě 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**

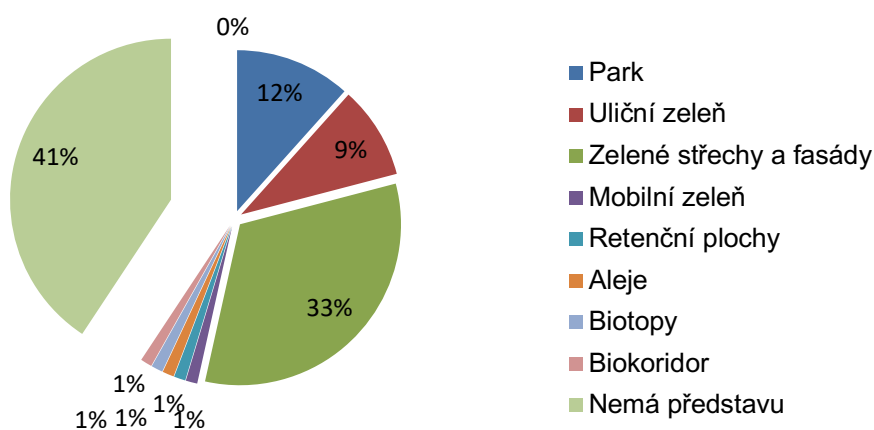
V Brně v roce 2017 byla realizována extensivní veřejně přístupná zelená střecha na zrekonstruovaném objektu nové Tržnice na Zelném trhu (Zelný trh 14 -16, Brno 602 00). Objekt byl pro veřejnost zpřístupněn v červenci roku 2017. Zelená střecha je součástí vyhlídkové úrovně třetího patra [3]. Dle názoru 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. 4. 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 zajisté vůbec zohledněn. Při současném stavu vegetace je však toto riziko minimální.



**Obrázek č. 4:** Zelená střecha na střeše Tržnice v Brně (zdroj: autor, 2017)

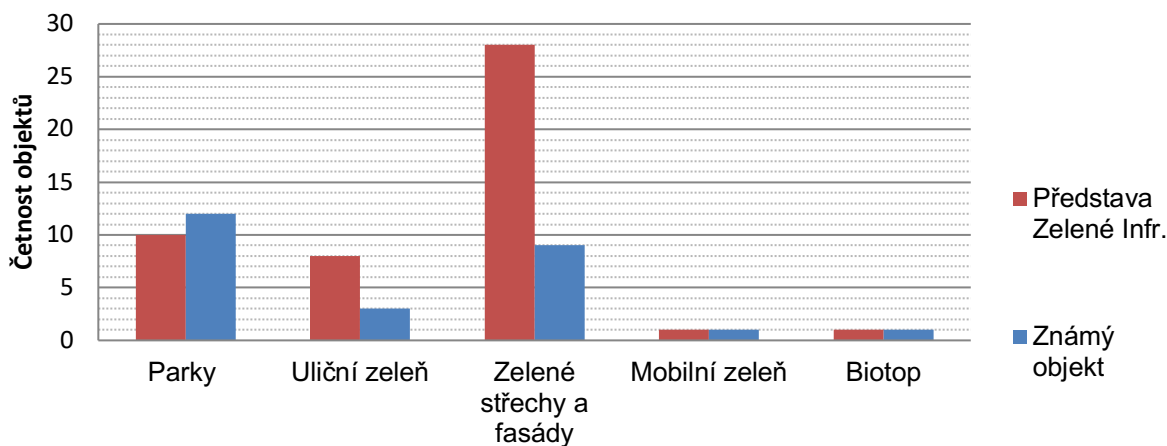
Pro účely pochopení vnímání základních termínů byl proveden průzkum informovanosti odborné veřejnosti z řad studentů a praktikujících projektantů. Pro jednoduchost jsou zde demonstrovány otázky a následně vyhodnocení ve formě ilustračních grafů.

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



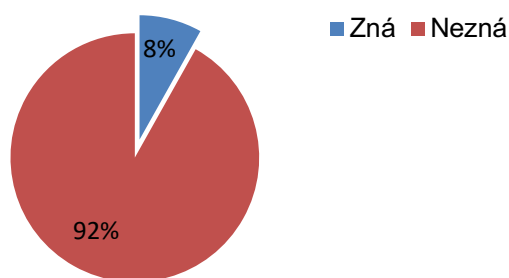
**Obrázek č. 5:** Představa zelené infrastruktury – reakce na otázku 1.

2. *Znáte nějaký objekt ve vašem trvalém bydlišti, který lze označit jako zelenou infrastrukturu?*



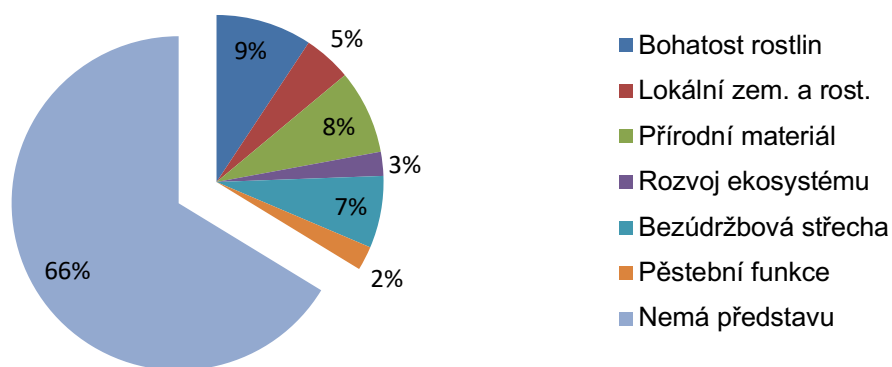
**Obrázek č. 6:** Představa vs reálná znalost objektu zelené i. – reakce na otázku č. 2.

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



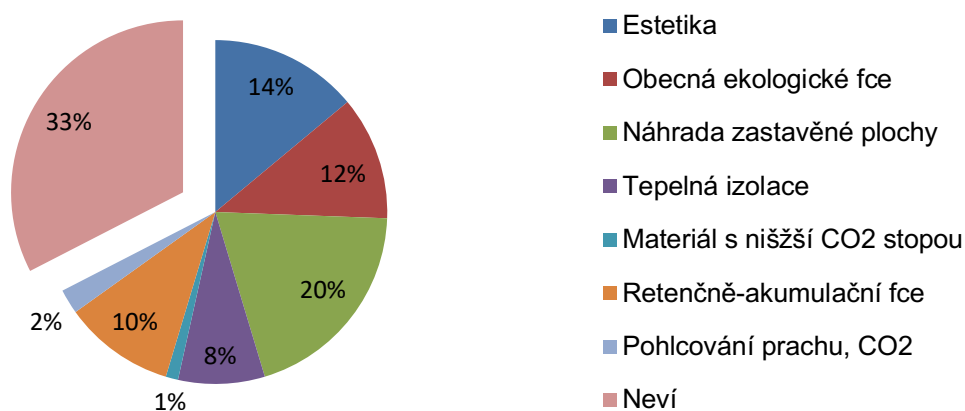
Obrázek č. 7: Znalost dělení zelených střech – reakce na otázku č. 4.

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



Obrázek č. 8: Představa Biodiverzní střechy – reakce na otázku č.5

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



Obrázek č. 9: Hlavní funkce zelené střechy – reakce na otázku č.6



### 3. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

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 střeš.

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 m<sup>2</sup>. 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]

#### 3.1 Island – Reykjavík University

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.



**Obrázek č. 10:** Replika objektu v areálu Reykholt (zdroj: autor, 2013)

Replika na obrázku č. 10 je součástí areálu bývalého biskupství na západní straně ostrova. Jedná se o dřevostavbu s drnovou střešou 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.

### 3.2 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.

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.

### 3.3 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. 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. 11:** Demontrace 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 zdrojedešťových 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 nepanuje 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 projevil 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.



**Obrázek č. 12:** Začátek výstavby objektu EnviHUT (zdroj: autor, 2015)

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 měřícího systému bylo započato s měřením a monitorováním stavu.



**Obrázek č. 13:** 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. 14:** 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.

## 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

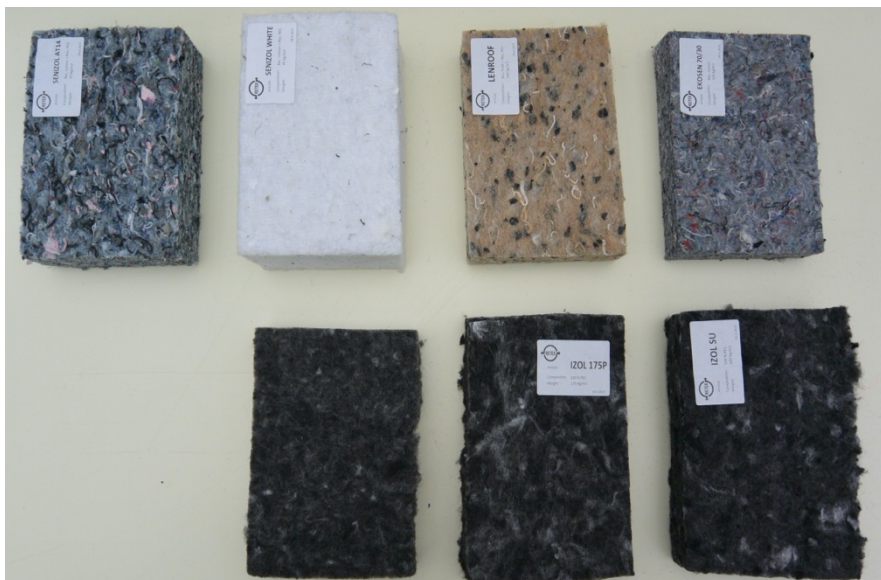
### 7.1 Vývoj vegetačně-retenční vrstvy

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. 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.

### 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.



**Obrázek č. 15:** Testovaná sada materiálu (zdroj: autor, 2015)

### 7.1.3 Testy nasákavosti

Při srovnávání jednotlivých materiálů (obrázek č. 15) vznikla potřeba hodnotit jednotlivé vzorky z pohledu nasákavosti jednak krátkodobé tak i nasákavosti při zatížení a se zohledněním vlivu úhlu aplikované střechy. 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). Stanovení hmotnosti zkušebního tělesa bylo stanoveno s přesností na 1g.

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]	$W_p^A$ [kg·m <sup>-2</sup> ]	$W_p^B$ [kg·m <sup>-2</sup> ]
SENIZOL AT14	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<sup>-2</sup> 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°
- Výška výřezu byla zvolena tak, aby volený travní drn zatěžoval matraci plošným zatížením 1,5 kN·m<sup>-2</sup>.
- Tento výřez byl nejprve před vlastním testováním zavlažen 5l vody.

- Následně došlo k instalaci dodatečného zatížení do volné části plochy (spodní 1/3 kontaktního povrchu matrace), které odpovídá plošnému zatížení drnu.
- 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.

Test of short-term water absorption by partial immersion															
Sample	Size [mm]			Weight of dry sample $m_0$ [g]	T <sub>i</sub> [s]	T <sub>s</sub> [s]	T <sub>1</sub> [s]	T <sub>2</sub> [s]	T <sub>3</sub> [s]	T <sub>4</sub> [s]	T <sub>5</sub> [s]	T <sub>A</sub> [s]	T <sub>F</sub> [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

### 7.1.5 Vyhodnocení testů pro další aplikaci v rámci výzkumu

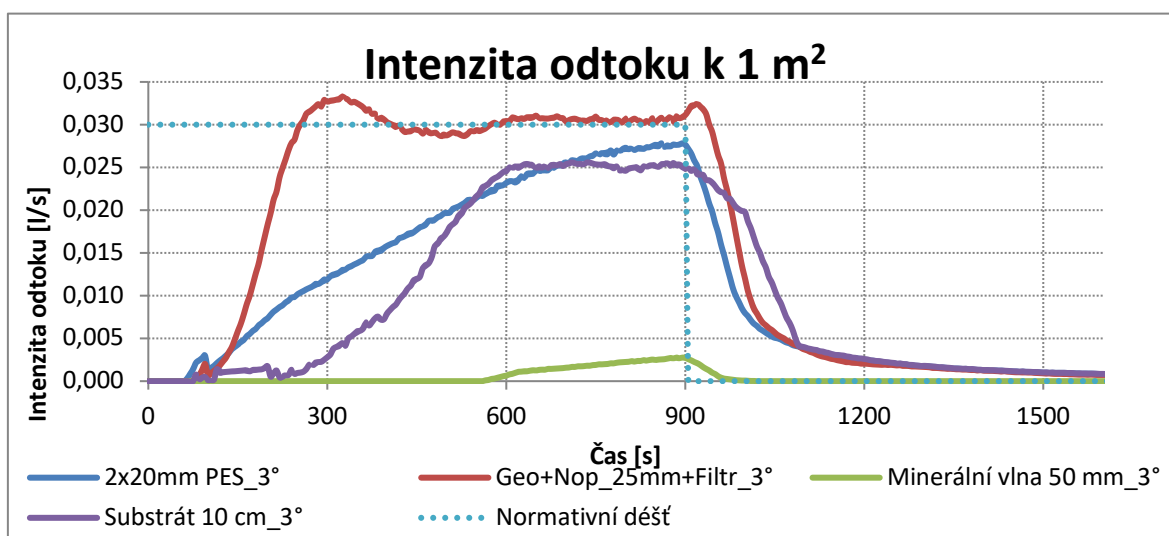
Na základě testování byl pro výstavbu většiny zastřešení experimentálního objektu vybrán materiál IZOL SU v uvedené specifikaci. Tento materiál byl také podroben dlouhodobému vegetačnímu testu. Materiál byl vybrán pro jeho schopnost modelovat transport vody podle potřeb vegetační drnové střechy. Tedy 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 EKOSEN s maximální schopností zadržet vodu 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 série 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

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  $30^\circ$ . Testovací vana je čtvercového rozměru o celkové ploše  $1,44 \text{ m}^2$  s volnou odtokovou hranou na spodní straně v úrovni dna, tak aby byl zajištěn volný odtok bez bariéry. Díky navrženému čtvercovému tvaru  $1,2 \times 1,2 \text{ m}$  je možný přímý přepočítání 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  $1 \text{ m}^2$  plochy. Přítok do zavlažovacího systému tedy odpovídá  $0,03 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . 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.



Graf č. 1: Výsledky měření intenzity odtoku

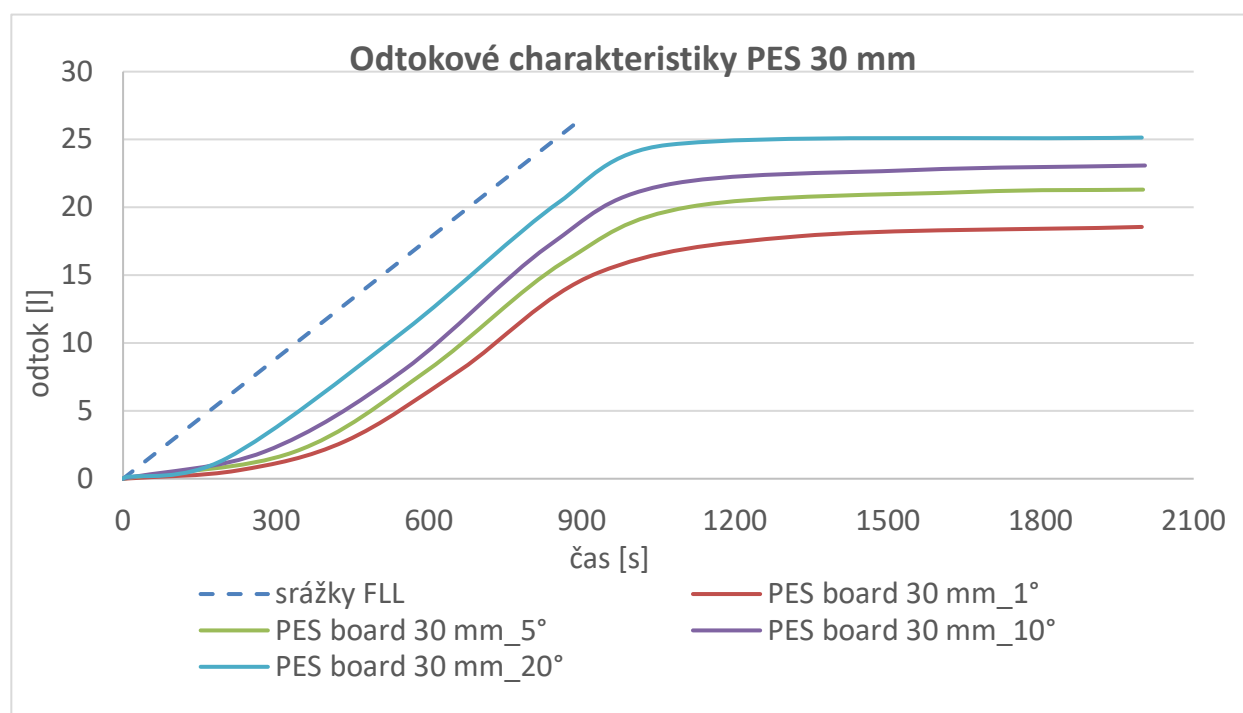
Měřenými materiály pro účely porovnání materiálové charakteristiky intenzity odtoku zkoumaného materiálu byl substrát českého producenta objemové hmotnosti  $1020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$



o instalované výšce 100 mm; technické vrstvy pro extenzivní souvrství z profilované fólie (tvořené z geotextílie  $300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , nopové fólie o výšce nopu 25 mm a filtrační fólie  $105 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ); desky z hydrofilní minerální vlny 50 mm s objemovou hmotností  $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Charakteristiky intenzity odtoku byly přehledně zobrazeny v demonstrovaném grafu č. 1. Všechny materiály a sestavy kromě měření substrátu byly měřeny při zatížení  $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . 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.

### 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  $1^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  a  $20^\circ$ . Navržené sklony byly zvoleny tak, aby bylo možné mezi jednotlivými měřeními sklony interpolovat.



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

Měřená charakteristika odtoku demonstruje přechod primárně retenčního chování u menších sklonů do  $5^\circ$  na drenážní charakter u střech šikmých od  $10^\circ$  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.

## 7.3 Vegetační testy

### 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 vlákna



Obrázek č. 16: Varianta I. krátkodobého testu (zdroj: autor, 2017)

### 7.3.3 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 šikmého souvrství.

Na základě sledování lze určit, že z výše uvedených variant přináší rychlejší růst rostlin a vytváření hustšího travního porostu souvrství s přidávanými 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% úhynu již vzrostlých travin.

### 7.3.4 Dlouhodobý vegetační test

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.

### 7.3.5 Vyhodnocení vegetačních testů

Testované pole rozchodníků na full-size měření vykazovalo značnou citlivost růstu vegetace na způsobu provádění záchytného systému. Proměnlivá nerovnoměrná konsolidace negativně ovlivňovala růst rostlin. Testovanou extenzivní střechu ovlivňoval zejména pomalý vývoj kořenového systému 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.



**Obrázek č. 17:** 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. 18:** Severní strana biodiverzní střechy EnviHUT v 7. 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.

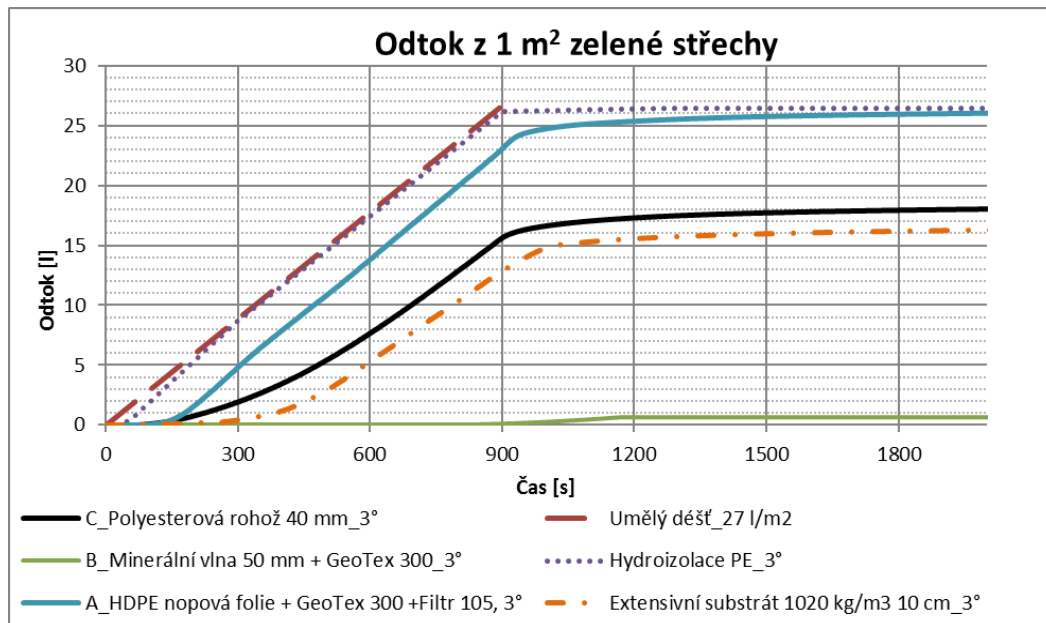
## **8. Konflikt aplikace minerální vlny, polyesterových rohoží a nopové folie na extenzivních zelených střechách v klimatických kontinentálních podmínkách**

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 m<sup>2</sup>, tak aby na 1m<sup>2</sup> 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. Přetížení těchto vrstev při měření je realizováno za pomoci vrstvy promytého neporézního kameniva frakce 4-8 mm o zatížení 80 kg·m<sup>-2</sup>. 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 ±0,85 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 demonstrováné 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: standardní set s nopovou a filtrační folií
- Skladba B: s deskou z hydrofilní minerální vlny výšky 50 mm, určená pro extenzivní střechy
- Skladba C: šachovnicově překládaná bikomponentní recyklovaná polyesterová rohož 20 mm, plnění  $2000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , v celkové výšce 40 mm



**Graf č. 3:** Odtokové charakteristiky měřených skladeb

## 8.1 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 stálějších 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.

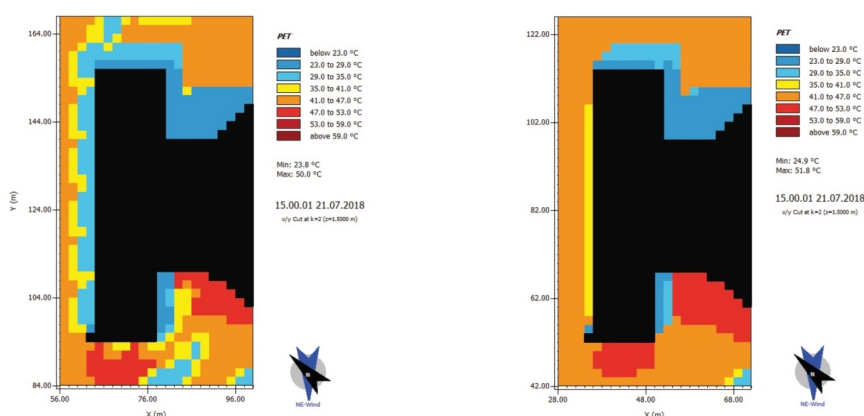
Po měření odtoku během rozebrání bylo zjištěno, že zachycená voda je rovnoměrně zadržena v celé výšce 50 mm desky. Je-li minerální vlna využita jako vegetační vrstva, není vhodné ji kombinovat s přísně suchomilnými rostlinami. Charakter odtoku v čase se projevuje minimálním odtokem z celé technické skladby 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.

## 8.2 Principy simulace chování okolního prostředí

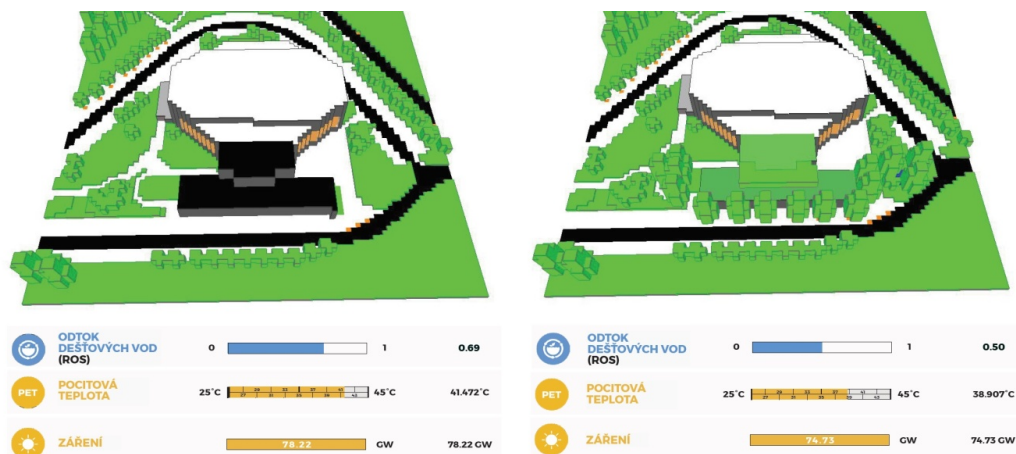


**Obrázek č. 19:** Dílčí výsledky environmentální studie (zdroj: autor, 2019)

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. Jedná se o železobetonový monolitický skelet s navrhovanou únosností pro zelenou střešu

na úrovni 200 místy jen 150 kg·m<sup>-2</sup>. 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 kačírkiem. Současný (vlevo) a nový návrhový (vpravo) stav je demonstrován na obrázku č. 20.



**Obrázek č. 20:** Dílčí výsledky environmentální studie (zdroj: autor, 2019)

Cílová efektivně dotčená oblast má rozlohu 3 500 m<sup>2</sup> a zahrnuje oblast rekreačního zařízení s ubytováním, parkovací plochy, část halového rekreačního objektu, požární a manipulační plochu a autobusovou zastávku městské hromadné dopravy.

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. Větrání 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.

## 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.

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 tabulkách: zde demonstrace pro severní stranu a v tabulce č. 3. Tabulka není standardní formou zápisu, ale spíše diagramem, ze kterého lze vyčíst dotvarování celého záchytného systému geobuněk. 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.

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. 3:** Dotvarování geobuněk na severní expozici

## 9.2 Navrhované změny postupu instalace

Použitý substrát je klíčový aspekt, který nejvíce ovlivňuje stabilitu výsledné instalace. Zejména pak u substrátů se složkou z expandovaných jíílů 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. 36.

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 nejefektivnější nápravou z pohledu autora i spolupracujících institucí.



**Obrázek č. 21:** Sesuv u okapu na jižní straně (zdroj: autor, 2016)

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. Ve vzájemném spojení následně dochází k vázaným změnám celého rastru záchytného systému. Defekt tak může být způsoben i lokálním zvýšeným 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 dešť. 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.

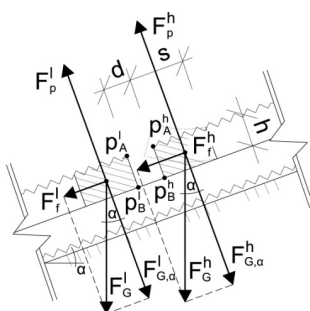
Náprava takovéto střechy je zejména časově velmi nákladná a bylo by možné ji předejít důslednou kontrolou používaného substrátu před vlastní instalací. Deklarovaný dodaný materiál v tomto případě z 20% objemu neodpovídal požadovaným vlastnostem. Zejména drcení expandovaných zrn bylo kritickým parametrem.

### **9.3 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.

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. Autor tohoto

objektu považuje za mimořádně kritické první dva roky, dokud nedojde k plnohodnotnému propojení jednotlivých vrstev drnů po celé jejich tloušťce.



**Obrázek č. 22:** Základní fyzikální popis výchozí situace simulace

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  $s = 4 \text{ cm}$  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 <sup>l</sup> lower, <sup>h</sup> 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]
- $\rho$  ... objemová hmotnost travního drnu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
- $g$  ... tíhové zrychlení [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
- $\alpha$  ... úhel sklonu střechy

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. 4:** Výsledné simulované hodnoty větrného zatížení

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. 4 prokazují, že velikost poškozené oblasti vzniklé sesunutím jednoho pásu nemá na další poškození žádný významný vliv. Inicializace dlouhodobého poškozujícího procesu začíná okamžitě se vznikem trhliny a v intervalu od 2,5 do 10 cm je téměř totožná.

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.

## 10. 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. 23:** První 3D tištěný dům – Prvok, extenzivní zelená střecha (autor: BUILDIGO s.r.o.; 2020)

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.

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.

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.

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.

## **11. Aplikace pro odbornou praxi**

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.

## 12. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Sigrídur Sigurdardóttir, 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
- [7] Icelandic Met Office. *Vedurstofa Íslands*. [online]. [2004] [cit. 2014-05-26]. Available database:[http://www.vedur.is/Medaltalstoflur-txt/Stod\\_366\\_Nautabu.ArsMedal.txt](http://www.vedur.is/Medaltalstoflur-txt/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
- [12] J. Mendes, 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/>
- [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
- [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.
- [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/>
- [31] Zelená infrastruktura, Evropská unie, 2010 [cit. 2020-06-01] Dostupné z: [http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/green\\_infra/cs.pdf](http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/green_infra/cs.pdf)

## 13. Publikované články

- **2020**
  - SELNÍK, P.; BEČKOVSKÝ, D.; REBROVA, T. Odtokové parametry technických vrstev zelené střechy s využitím textilního recyklátu. *TZB-info*, 2020, roč. 2020, č. 1, s. 1-4. ISSN: 1801-4399.
- **2018**
  - SELNÍK, P.; BEČKOVSKÝ, D.; REBROVA, T. VYUŽITÍ TEXTILNÍHO RECYKLÁTU V KONSTRUKCI ZELENÝCH STŘECH. In *Konference Hydroizolace 2018*. Mikulov: NOVOPRESS s.r.o., nám. Republiky 15, 614 00 Brno, 2018. s. 51-54. ISBN: 978-80-87342-20-6.
  - KARAFIÁTOVÁ, H.; NEČADOVÁ, K.; SELNÍK, P. LCA hodnocení stavby na bázi přírodních materiálů a recyklátů PES. In *Architectural and Physical Aspects of Building Design 2018*. mikulov: 2018. s. 1-6. ISBN: 978-80-7204-999-8.
  - REBROVA, T.; SELNÍK, P.; BEČKOVSKÝ, D. Vyhodnocení vlivu zelených střech na snížení množství odtoku srážkových vod v centru města. In *Architectural and Physical Aspects of Building Design 2018*. Mikulov: 2018. s. 1-7. ISBN: 978-80-7204-999-8.
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; REBROVA, T.; BEČKOVSKÝ, D. Vliv působení větru na montážní a krátkodobou stabilitu šikmé vegetační střechy. In *Architectural and Physical Aspects of Building Design 2018*. Mikulov: 2018. s. 1-4. ISBN: 978-80-7204-999-8.
  - REBROVA, T.; SELNÍK, P.; BEČKOVSKÝ, D. MOŽNOSTI ZADRŽOVÁNÍ DEŠŤOVÉ VODY V MĚSTSKÉ ZÁSTAVBĚ. In *Konference Hydroizolace 2018*. Mikulov: NOVOPRESS s.r.o., nám. Republiky 15, 614 00 Brno, 2018. s. 51-54. ISBN: 978-80-87342-20-6.
  - SELNÍK, P. Představa zelené infrastruktury a zelených střech v České republice. In *JUNIORSTAV 2018, 20. odborná konference doktorského studia, sborník příspěvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2018. s. 221-226. ISBN: 978-80-86433-69-1.
- **2017**
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K. SROVNÁNÍ VLIVU ORIENTACE NA VÝVOJ VEGETACE ZELENÉ STŘECHY OBJEKTU. In *Sborník abstraktů Juniorstav 2017*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017. s. 1-5. ISBN: 978-80-214-5462- 0.

- REBROVA, T.; BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P. Monitoring of the Green Roofs Installation in Brno-City District, Czech Republic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, roč. 95, č. 042040, s. 1-7. ISSN: 1755-1315.
- SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; MOHAPL, M.; MOHELNÍKOVÁ, J. Evaluation of the Primary Vegetative Test for the Testing Building EnviHut. In *Proceedings of the 3rd International Conference: Structural and Physical Aspects of Construction Engineering (SPACE 2016)*. *Procedia Engineering*. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2017. s. 78-85. ISBN: 978-80-553-2643-6. ISSN: 1877-7058.
- SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K. ALTERNATIVNÍ MOŽNOSTI APLIKACE TESTOVANÉ VEGETAČNĚ-RETENČNÍ VRSTVY. In *Sborník abstraktů Juniorstav 2017*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017. s. 1-4. ISBN: 978-80-214-5462-0.
- NEČASOVÁ, B.; LIŠKA, P.; SELNÍK, P.; VENKRBEC, V. Návrh a montáž fasády se skrytým kotvením – krok za krokem. In *Sborník abstraktů Juniorstav 2017*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-5473- 6.
- **2016**
  - KUČERA, R.; BEČKOVSKÝ, D.; NEČADOVÁ, K.; SELNÍK, P. EnviHut Enviromentální experimentální přemístitelný objekt. In *Mezinárodní konference Centra pasivního domu 2016*. Brno: Centrum pasivního domu, 2016. s. 271-275. ISBN: 978-80-904739-7- 3.
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; MOHAPL, M.; MOHELNÍKOVÁ, J. Evaluation of the Primary Vegetative Test for the Testing Building EnviHut. In *SPACE*. Košice: TUKE, 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-553-2643- 6.
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K. The Study of the Experimental Facility „EnviHut” focused on the Roofing. In *Young Scientist*. YS 2016. Košice: Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2016. s. 52-56. ISBN: 978-80-553-2537- 8
  - NEČADOVÁ, K.; SELNÍK, P.; PAVELA, M. Analýza retenčních schopností šikmé zelené střechy. In *Dřevostavby 2016*. Volyně: VOŠ a SPŠ Volyně, 2016. s. 67-74. ISBN: 978-80-86837-84- 0.
  - NEČADOVÁ, K.; SELNÍK, P.; KARAFIÁTOVÁ, H. Differential substrate subsidence of the EnviHUT project pitched extensive green roof. *MATEC Web of Conferences*, 2016, roč. 93, č. 2017, s. 1-7. ISSN: 2261-236X.
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; MOHAPL, M.; BEDLIVÁ, H. Designing and Testing of the Recycled Vegetative- Retention Layer of the Vegetative Upper Skin of the Pitched Roof. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, roč. 824, č. 824. 67, s. 67-76. ISSN: 1660-9336.
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; MOHAPL, M. Technology of Implementation of the Pitched Green Roof on the Testing Building EnviHut. *Procedia Engineering*, 2016, roč. 2016, č. volume 161, s. 1904-1909. ISSN: 1877-7058.
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; MOHAPL, M.; BEČKOVSKÝ, D. Vstupní hodnocení vývoje střešní vegetace na testovacím objektu EnviHut. In *Sborník z 12. ročníku Mezinárodní konference Centra pasivního domu 2016*. Brno: Centrum pasivního domu, 2016. s. 280-284. ISBN: 978-80-904739-7-3.
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; BEČKOVSKÝ, D.; PĚNČÍK, J. Retenční schopnosti testovacích segmentů zelených střech. *TZB- info*, 2016, roč. 2016, č. 5.12. 2016, s. 1-6. ISSN: 1801-4399.
- **2015**
  - SELNÍK, P. HODNOCENÍ MONTÁŽNÍ A KRÁTKODOBÉ STABILITY PO INSTALACI ŠIKMÉ ISLANDSKÉ VEGETAČNÍ STŘECHY S DŮRAZEM NA PŮSOBENÍ VĚTRU. In *Sborník abstraktů Juniorstav 2015*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015. s. 104-104. ISBN: 978-80-214-5091- 2.
- **2014**
  - SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; MOHAPL, M. Technological Analysis of the Orientation of the Pitched Icelandic Turf Roof to the Cardinal Points and their Effect on the Stability of the Vegetative Layers. In *enviBUILD 2014. Advanced Materials Research*. 1. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014. s. 19-22. ISBN: 978-3-03795-976-3. ISSN: 1022-6680.
  - NEČADOVÁ, K.; SELNÍK, P. Analysis of the Icelandic Modified Pitched Green Roof. In *EnviBUILD 2014. Advanced Materials Research*. 1. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014. s. 253-256. ISBN: 978-3-03795-976-3. ISSN: 1022-6680.
  - BEDLIVÁ, H.; NEČADOVÁ, K.; SELNÍK, P. HODNOCENÍ ŽIVOTNÍHO CYKLU MODELOVÉ STAVBY NA BÁZI PŘÍRODNÍCH MATERIÁLŮ. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2014*. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2014. s. 3909-3914. ISBN: 978-80-87952-07- 8.

## 14. Podpora výzkumu

- **Výzkumný program MPO TRIO I** - Rozvoj retenčních materiálů na bázi recyklátu technologicky kombinované stavební vegetační konstrukce pomocí naměřených dat s verifikací na výseku prototypu – FV10078
- **Výzkumný program MPO TRIO IV – do roku 31. 12. 2022** - Výzkum a vývoj nového stavebního materiálu spočívajícího v kompozitní sendvičové desce pro vegetační vertikální konstrukce – FV40357
- **Vlastní juniorský výzkum** - Optimalizace funkčního prototypu a rozvoj skladby vegetační šikmé střechy za účelem technologického a konstrukčního hodnocení ve vybrané lokalitě České Republiky – FAST –J-16-3388
- **Specifický výzkum školitele** - Metodika posuzování dlouhodobého chování základní a finální vrstvy vnějšího kontaktního zateplovacího systému - FAST-S-13-1971
- **Vlastní juniorský výzkum** - Optimalizace technologie provádění a ověření skladby konstrukce na modelu šikmé zatravněné střechy za účelem hodnocení stability a použitelnosti ve vybrané lokalitě České Republiky - FAST-J-15-2733
- **Juniorský specifický výzkum spolupracujícího kolegy** - Návrh skladby a optimalizace šikmé vegetační střechy a její testování v klimatických podmínkách České republiky - FAST-J-15-2814
- **Seniorský specifický výzkum spolupracujícího kolegy** - Experimentální ověření vlivu technologické nekázně na mechanickou odolnost lepených fasád – FAST –S-17-4255
- **Seniorský specifický výzkum spolupracujícího kolegy** - Experimentální ověření technologického řešení konstrukce trvale udržitelné mobilní stavby s důrazem na její stavebně-fyzikální chování – FAST-S-16-3434

## 15. Tvůrčí aktivita

- VENKRBEC, V.; HENKOVÁ, S.; SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ: *Souvrství vegetační střechy s využitím vegetační vrstvy z polyesterových vláken*. 29556, 2016. (užitný vzor)
- VENKRBEC, V.; HENKOVÁ, S.; SELNÍK, P.; NEČADOVÁ, K.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ: *Souvrství vegetační střechy retenční s využitím vegetační vrstvy z polyesterových vláken*. 29525, 2016. (užitný vzor)
- 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>. (funkční vzorek)
- 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. URL: <http://www.envihut.com>. (funkční vzorek)
- BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P.: *Souvrství ploché vegetační střechy RETEX; Souvrství ploché vegetační střechy z recyklovaných materiálů*. Centrum AdMaS Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně Purkyňova 139 612 00 Brno. URL: <http://www.envihut.com>. (funkční vzorek)
- 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. URL: <http://www.envihut.com>. (funkční vzorek)
- BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P.: *Souvrství šikmé vegetační střechy RETEX; Souvrství šikmé vegetační střechy z recyklovaných materiálů*. Centrum AdMaS Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně Purkyňova 139 612 00 Brno. URL: <http://www.envihut.com>. (funkční vzorek)
- VAJKAY, F.; BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P.; SWARD; *SWARD – Software pro návrh vegetačního souvrství pro ploché a šikmé střechy*. Web ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební. URL: <https://pst.fce.vutbr.cz/en/software-en/software4u-en/>. (software)