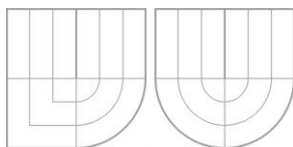


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ



FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

VEGETAČNÍ STŘECHY S HYDROFILNÍ MINERÁLNÍ VLNOU

GREEN ROOFS USING HYDROPHILIC MINERAL WOOL

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
SHORT VERSION OF DISSERTATION

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. PETR VACEK

ŠKOLITEL
SUPERVISOR

doc. Ing. LIBOR MATĚJKA, CSc., Ph.D., MBA

BRNO 2016

Klíčová slova

Vegetační střecha; zelená střecha; hydrofilní minerální vlna; degradace materiálu stárnutím; analýza životního cyklu.

Keywords

Green roof; Hydrophilic mineral wool; Ageing; Life Cycle Assessment.

Rukopis disertační práce je uložen na Ústavu pozemního stavitelství, Fakultě stavební, VUT v Brně.

© Ing. Petr Vacek, 2016

OBSAH

ÚVOD	2
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	3
1.1 Hydrofilní minerální vlna v české a evropské legislativě	3
1.2 Standardy pro navrhování vegetačních střech.....	5
1.3 Výrobky z hydrofilní minerální vlny a další alternativy.....	6
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	6
3 ZVOLENÉ VĚDECKÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	7
3.1 Využití experimentálních modelů vegetačních střech s hydrofilní vlnou	7
3.2 Ověření hypotézy hydroakumulace a určení součinitele odtoku C....	7
3.3 Analýza stálosti vlastností v čase (ageing)	9
3.4 Kvantifikace a komparace dopadů na životní prostředí.....	9
4 VÝSLEDKY PRÁCE A NOVÉ POZNATKY	11
4.1 Výsledky měření počátečních vlastností hydrofilní vlny	11
4.2 Výsledky měření ageingu (stárnutí) hydrofilní vlny v čase	13
4.3 Výsledky experimentálního měření hydroakumulace.....	14
4.4 Vyhodnocení modelů hydrofilní vlny z pohledu adaptace rostlin....	17
4.5 Výpočet vlivu hydrofilní vlny na životní prostředí metodou LCA.....	17
4.6 Dokumentace zvýšení vzduchové neprůzvučnosti	19
4.7 Zásady pro navrhování vegetačních střech s hydrofilní vlnou.....	20
Čl. 1 Aplikace ve zjednodušené extenzivní vegetační střeše	20
Čl. 2 Aplikace v polointenzivní vegetační střeše	20
Čl. 3 Aplikace v intenzivní vegetační střeše	21
Čl. 4 Ověřovací výpočet drenážní kapacity.....	21
Čl. 5 Ochrana proti sání větru	22
5 ZÁVĚR PRO PRAXI A DALŠÍ ROZVOJ VĚDY.....	23
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	27
7 CURRICULUM VITAE	28
8 SEZNAM VLASTNÍ LITERATURY.....	28
9 ABSTRACT	29

ÚVOD

Disertační práce se zabývá využitím hydrofilní minerální vlny v konstrukcích vegetačních střech. V současné době je možné realizovat vegetační souvrství nejen na ploché střeše, ale také ve střeše šikmé či strmé. Čím větší je sklon, tím složitější je zpravidla skladba vegetační střechy. Výrobky z hydrofilní minerální vlny svými unikátními vlastnostmi rozšiřují možnosti ozelenění střech a poskytují mnoho výhod pro ploché i velmi strmé střechy. Při správné aplikaci umožní posunout hranice použitelnosti vegetační střechy i tam, kde by to nebylo se substráty vůbec možné. Jsou lehké, mají výborné hydroakumulační vlastnosti, odvádějí přebytečnou vodu celým svým objemem, fungují jako doplňková tepelná izolace a rostliny v nich prospívají.

Problematika využitelnosti výrobků z hydrofilní minerální vlny byla v minulosti řešena převážně v publikacích pro zemědělství. Odborná literatura pojednávající o využití ve stavebních konstrukcích je velmi omezená. Cílem práce je zasazení tohoto materiálu do rámce současného stavu technického poznání.

Velkou část práce tvoří rozšířená dokumentace technických vlastností nových výrobků a také změn, které jsou spojené se stárnutím materiálu po zabudování do konstrukcí. Laboratorně byly měřeny nejen vlastnosti samotného materiálu, ale např. i akustické schopnosti materiálu zabudovaného ve střeše. Na reálných modelech střech byla ověřována hydroakumulace minerální vlny v porovnání se substráty a adaptace střešní vegetace v různých typech minerální vlny.

Velký důraz je v práci kladen i na zdokumentování dopadů na životní prostředí z pohledu celého životního cyklu konkrétních výrobků z hydrofilní minerální vlny v kontextu ostatních materiálů určených pro vegetační střechy. Prostřednictvím speciálního softwaru byla sestavena environmentální produktová deklarace jednotlivých výrobků a následně byly tyto hodnoty použity k hodnocení subsystémů vegetačních střech pomocí metodiky LCA. Tímto způsobem mohla být provedena komparace minerální vlny s ostatními materiály, jako jsou umělé substráty, fólie apod., vzhledem k jejich dopadu na životní prostředí.

V závěru byly stanoveny zásady použití výrobků z hydrofilní vlny ve vegetačních souvrstvích a sestaveny doporučené skladby celých vegetačních střech.

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Základní surovinou pro výrobu minerální vlny jsou čedič a diabas, jedny z nejhojněji se vyskytujících hornin na celé Zemi, které byly a jsou tvořeny při sopečné činnosti. Tyto horniny jsou ve výrobním procesu roztaveny při vysoké teplotě v peci a vzniklá láva je následně rozvlákněna do struktury jemných vláken, jejichž průměr je menší než průměr lidského vlasu. V přírodě můžeme nalézt analogii tohoto procesu např. v místech s aktivními sopkami (Havaj), kde se přirozeně rozvlákněné horniny dají běžně nalézt v přírodě.

Při průmyslové výrobě je nutné jednotlivá vlákna pojit k sobě, aby držela ve tvaru desek nebo rolí. Důležitou součástí minerální vlny jsou její přísady. Pro stavební izolace se přidávají hydrofobizační oleje, pro aplikaci v zemědělství potom přísady zvyšující nasákavost. Takovéto materiály se nazývají hydrofilní minerální vlny.

Desky z hydrofilní vlny používané v zemědělství místo pěstebního substrátu jsou velmi porézní, což je základní vlastnost produktů, které mají efektivně nasakovat vodu s živinami. Tento materiál je v disertační práci zkoumán z pohledu využití v konstrukcích vegetačních střech jako náhrada substrátu, hydroakumulační vrstva, pomocná drenážní vrstva a dále pak z pohledu tepelnětechnických a akustických vlastností.

Hydrofilní minerální vlna se i přes dlouhou dobu své existence příliš často jako stavební výrobek nepoužívala. Legislativně není jako stavební výrobek dostatečně zakotvena.

1.1 Hydrofilní minerální vlna v české a evropské legislativě

Klasifikace technických vlastností minerální vlny popisuje její výrobová norma ČSN EN 13162+A1.¹ Tento standard je zpracován zejména pro stavební izolace hydrofobizované. Pro účely disertační práce byly vybrány tyto měřitelné vlastnosti, které lze klasifikovat i pro hydrofilní vlny.

Pevnost v tlaku CS

Jednou ze základních vlastností minerální vlny při aplikaci ve vegetačních střechách by měla být její pevnost. Vlivem dlouhodobého vystavení hydrofilní minerální vlny vlhkosti může docházet ke změnám její pevnosti. Dalším degradujícím vlivem je narušení její struktury kořeny rostlin. V práci byly tyto negativní vlivy u vybraných výrobků

¹ ČSN EN 13162+A1. *Tepelněizolační výrobky pro budovy – Průmyslově vyráběné výrobky z minerální vlny (MW) – Specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

dokumentovány, měřeny byly prokořeněné vzorky po více než roční aplikaci.

Součinitel tepelné vodivosti λ

Desky z hydrofilní vlny, zvláště jsou-li vrstvené, budou mít dopad také na tepelnou obálku. Zahraniční práce² uvádějí tepelněizolační přínos skladeb se substráty. V současné době je v ČR praxe taková, že vrstvy nad hydroizolací se do výpočtu součinitele prostupu tepla nezapočítávají nebo se počítá s jejich největší možnou tepelnou vodivostí.

Byla provedena vlastní měření výrobků z hydrofilní vlny využitelných pro aplikaci ve vegetačních střechách za sucha i za vlhka. Na základě měření byl sestaven graf součinitele tepelné vodivosti závislý na míře saturace vodou (výsledková část práce). Pomocí těchto hodnot už lze provést kompletní výpočet součinitele prostupu tepla celé střechy včetně vegetačního souvrství z hydrofilní vlny.

Nasákavost W

Množství vlhkosti, vody, případně ledu bude mít zásadní vliv na fyzikální vlastnosti hydrofilní minerální vlny ve vegetačním souvrství. Výrobková norma stanovuje maximální hodnoty krátkodobé a dlouhodobé nasákavosti výrobků pro stavební účely. Tato nasákavost se měří v jednotkách $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Nejedná se tedy o obvyklou objemovou nasákavost, jak je uváděna u jiných výrobků, ale o nasákavost konkrétního výrobku o konkrétní tloušťce. Tento normový postup pro výrobky z hydrofilní vlny ve vegetačních střechách není vůbec vhodný.

Pro hydrofilní vlny byly tedy nad rámec evropské výrobkové normy přidány další parametry, které více odpovídají tomuto specifickému materiálu. Legislativní základ tvoří německá oborová norma FLL.³

Maximální vodní kapacita WK_{max}

Tato veličina se měří především u střešních substrátů, ale lze jí aplikovat také na minerální vlnu. Udává množství vody, které materiál nasákne v určeném čase. Měří se v nádobách Proctorova hutnicího kladiva po určené době odkapávání a udává se v procentech.

² ZHAO, M. et al. Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer. *Building and Environment*. Philadelphia: Elsevier, 2014, č. 78, s. 199–211. ISSN 0360-1323.

³ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

Vodopropustnost *mod.K_f*

Vodopropustnost určuje rychlost pronikání vody do materiálu. Metodicky je také uvedena v FLL a měření probíhá podobně jako u maximální vodní kapacity. Primárně je tato vlastnost měřena u substrátů, v práci byly testovány i hydrofilní vlny.

Schopnost pro proudění vody $q_{s,g}$

Tato vlastnost se určuje především u geotextilií a nopových fólií, nicméně výrobky z hydrofilní minerální vlny lze tímto způsobem měřit také. Tento parametr je důležitý pro stanovení drenážních vlastností vegetačního souvrství.

Schopnost pro proudění vody se stanovuje pro různé sklony střechy a pro různá napětí. Zpravidla se počítá s napětím 10 kPa pro extenzivní střechy a 20 kPa pro intenzivní střechy.

1.2 Standardy pro navrhování vegetačních střech

Současná česká technická norma, která pojednává o střechách obecně a která se okrajově zabývá také vegetačními střechami, je ČSN 73 1901.⁴ Norma udává základní terminologii, rozdělení a obecné požadavky na střešní konstrukce.

Pro navrhování vegetačních souvrství není tato norma použitelná a v praxi se proto používají oborové normy spolků pro Zelené střechy – v Německu již citovaná FLL, ve Velké Británii např. norma GRO⁵. Jednotná evropská norma zatím chybí a nejsou k dispozici ani legislativní podklady pro navrhování vegetačních střech v České republice.

V současné době vzniká v rámci sdružení SZÚZ (Svaz zakládání a údržby zeleně) oborová norma pro vegetační střechy. V zahraničí jsou oborové normy často provázány i s firemními skladbami, jako je tomu např. u skladeb firem ZinCo a Optigreen.⁶

V plné verzi disertační práce jsou požadavky na vlastnosti jednotlivých částí vegetačních střech podrobně rozepsány. Rešerše byla provedena s ohledem na použití hydrofilní minerální vlny ve vegetačním souvrství.

⁴ ČSN 73 1901. *Navrhování střech – Základní ustanovení*. Změna 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

⁵ GROUNDWORK SHEFFIELD. *The GRO Green Roof Code: Green Roof Code of Best Practice for the UK 2014*. Sheffield: Groundwork Sheffield, 2014. ISBN 978-9568378-1-3.

⁶ ETA-13/0534. *European Technical Approval: Kits for Green Roofs*. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2013.

1.3 Výrobky z hydrofilní minerální vlny a další alternativy

Hydrofilní minerální vlna nebo její alternativy nejsou příliš často zastoupeny u systémových dodavatelů vegetačních střech. Jejich technické parametry potřebné pro projektování vegetačních střech jsou většinou nedostatečné.

V České republice jsou nabízeny deskové výrobky ze sortimentu firmy Isover, rolované výrobky ze sortimentu firmy Knauf Insulation. V zahraničí to jsou například výrobky firmy Rockwool či Nophadrain.

Jejich technické listy většinou zmiňují pouze tloušťku výrobku, jeho objemovou hmotnost, nebo doporučují použití ve střeše bez konkrétních fyzikálních vlastností, což je pro navrhování střech nedostatečné.

Kromě hydrofilní vlny se pro možnou náhradu substrátu dají použít i speciální verze pěnových polyuretanů. V současné době se tyto pěny používají velmi zřídka. Dostupná je např. bezfreonová polyuretanová pěna z recyklátu od firmy Icopal, která se pění nebo lisuje do tvarovek.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní cíle:

- analýza měřitelných vlastností hydrofilní minerální vlny při použití ve vegetačních střechách z pohledu národní i evropské legislativy;
- laboratorní měření fyzikálních vlastností nových výrobků a dokumentace jejich změn v čase;
- ověření hypotézy hydroakumulace minerální vlny na reálném modelu konstrukce pultové vegetační střechy a stanovení součinitelů odtoku;
- vyhodnocení adaptace rostlin v různých výrobcích z hydrofilní minerální vlny;
- kvantifikace dopadů výroby hydrofilní vlny na životní prostředí metodou LCA a komparace s ostatními materiály pro vegetační střechy;
- stanovení zásad použití výrobků z hydrofilní vlny ve vegetačních souvrstvích a sestavení doporučených skladeb vegetačních střech.

Vedlejší cíle:

- provedení doplňujících testů a zkoušek;
- ověření jednovrstvého vegetačního souvrství z hydrofilní vlny z pohledu odvádění dešťové vody, odolávání sání větru a akustiky;
- začlenění nových poznatků do národních normových standardů pro střechy;
- kalkulace a sestavení environmentální produktové deklarace.

3 ZVOLENÉ VĚDECKÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

3.1 Využití experimentálních modelů vegetačních střech s hydrofilní vlnou

Modely měly víceúčelové využití. Sloužily k pozorování a vyhodnocování adaptace rostlin v hydrofilní vlně, k analýze změn technických parametrů vlny v čase a k ověření reálné hydroakumulace.

Model 1: Extenzivní plochá střecha

První model byl sestaven v červnu 2013 a byl určen zejména pro exploataci materiálu v praxi. Byl založen na 100mm desce hydrofilní minerální vlny o objemové hmotnosti $78 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, do které se sázely rostliny i s kořenovým balem. V této době ještě nebyly známy přesné hodnoty drenážní kapacity vlny, proto byla ve skladbě použita prostorová smyčková rohož jako pojistná drenážní vrstva. Z modelu byly postupně odebírány vzorky pro experimentální měření.

Model 2: Materiálový model pro výzkum ageingu (stárnutí)

Druhý model byl sestaven v květnu 2014, ale na rozdíl od prvního modelu byly použity pevnější výrobky (50mm desky minerální vlny o objemové hmotnosti $120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), které by mohly být využívány pro intenzivní vegetační souvrství. Kromě adaptace vzrostlých rostlin se na něm zkoumala také klíčivost semen trávy. Testována byla varianta desek na nopové fólii i varianta volně ložené zdvojené desky na terénu.

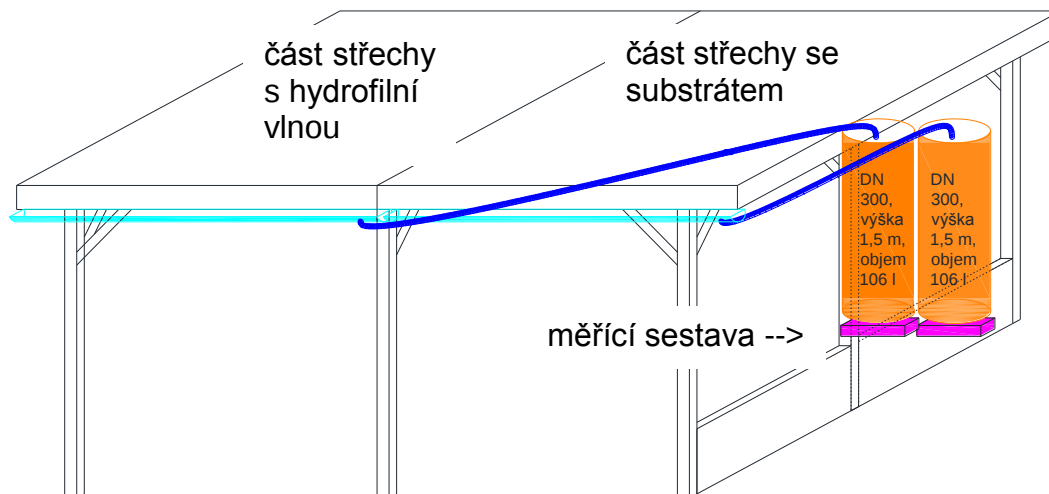
Model 3: Pultová střecha garážového přístřešku

Model byl sestaven v červnu 2014. Jedná se o reálnou pultovou střechu v Brně Tuřanech o rozměrech $5,6 \times 5,6 \text{ m}$ a sklonu 4° . Model byl zhotoven ze dvou částí – první část z desek z hydrofilní vlny (50mm deska + 20mm extenzivní substrát), v druhé části je použit pouze substrát o tloušťce 70 mm. Součástí modelu je i soustava měřicích přístrojů pro měření hydroakumulace a součinitele odtoku.

3.2 Ověření hypotézy hydroakumulace a určení součinitele odtoku C

Podobně jako substrát má i hydrofilní minerální vlna schopnost akumulovat vodu, jak je dokumentováno prostřednictvím laboratorního měření ve výsledkové části práce. Dobré výsledky hydroakumulace minerální vlny byly proto předpokládány i v reálné situaci. Byl sestaven model, na kterém byla tato hypotéza ověřována (model 3). Paralelně byla

měřena hydroakumulace části střechy s minerální vlnou a dále pak kontrolní měření se substrátem ve druhé části modelu. Schéma měření je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1 – Schéma měření hydroakumulace

Pro účely experimentu byla vytvořena měřicí sestava, skládající se ze dvou hmotnostních čidel, datalogeru a profesionální meteostanice pro co nejvěrohodnější dokumentaci atmosférických dat, zejména srážek.

Vlastní měření probíhalo tak, že odtékající dešťová voda byla ze střechy odváděna do sběrných nádob (Obr. 4), pod kterými byla umístěna hmotnostní čidla s datalogerem (Obr. 3), kde se zaznamenávaly přírůstky hmotnosti v intervalu po 10 minutách. Na stejnou frekvenci byl nastaven i sběr dat dešťového čidla. Sběrné nádoby byly vyrobeny z PVC trubek DN 300 o kapacitě 106 l. Hmotnostní čidla byla připevněna ke speciálním stojanům (Obr. 2).



Obr. 2 – Podstavec s hmotnostním čidlem



Obr. 3 – Měřicí sestava s datalogerem



Obr. 4 – Celkový pohled na nádoby

Skutečné hodnoty součinitele odtoku byly následně kalkulovány podle vzorce (1).

$$C = \frac{\text{množství vody, která ze střechy odteče za určenou dobu}}{\text{množství vody, která do střechy naprší za určenou dobu}} \quad [-] \quad (1)$$

3.3 Analýza stálosti vlastností v čase (ageing)

Ke změnám vlastností hydrofilní minerální vlny v čase může docházet z důvodu postupného prokořeňování rostlinami, ucpávání jemnými částicemi substrátu nebo kvůli strukturálním změnám pojiva dlouhodobě vystaveného vodě.

Pro testy byly použity pouze vzorky z experimentálních modelů popsaných výše. Byly měřeny zejména následující vlastnosti:

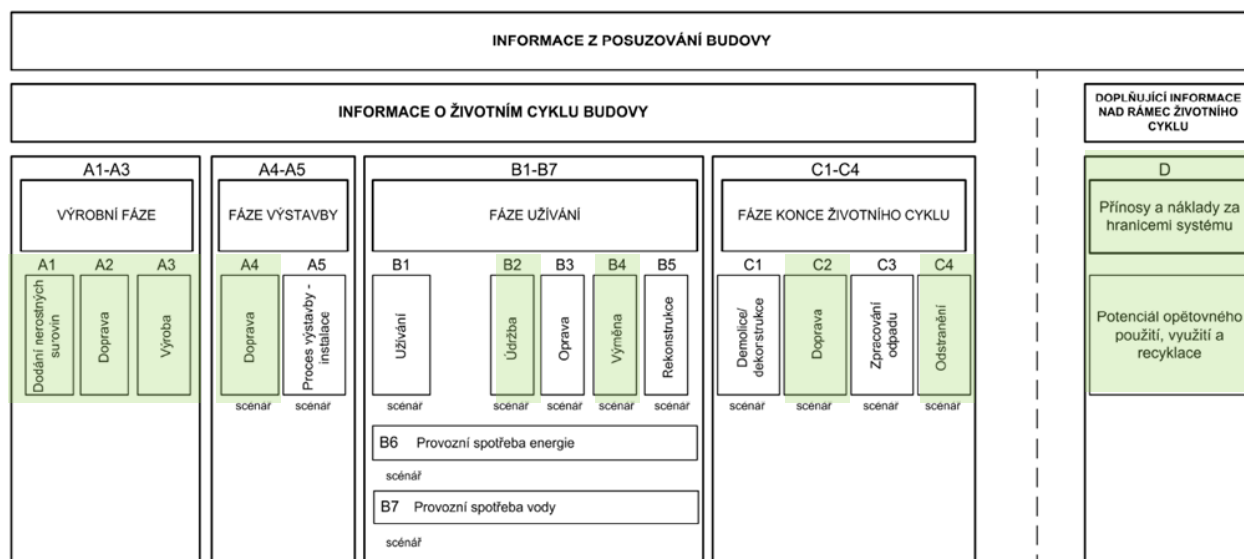
- součinitel tepelné vodivosti λ ;
- pevnost v tlaku CS ;
- maximální vodní kapacita WK_{max} ;
- vodopropustnost $mod.K_f$.

3.4 Kvantifikace a komparace dopadů na životní prostředí

Jednotlivé stavební materiály, konstrukční subsystémy i celé budovy lze hodnotit z pohledu jejich životního cyklu LCA (Life Cycle Assessment) podle harmonizované evropské legislativy ČSN EN ISO 14040 a ČSN EN ISO 14044. Studie LCA je složena ze čtyř základních fází: stanovení cílů a rozsahu, inventarizační analýzy, posuzování dopadů a interpretace.

Stanovení cílů a rozsahu

Cílem studie je dokumentace vlivu vegetační střechy na životní prostředí, zejména jak velkou roli hrají materiály na bázi minerální vlny oproti běžně užívaným výrobkům. Na schématu Obr. 5 jsou vyznačeny uvažované fáze, které byly ve studii kalkulovány.



Obr. 5 – Hranice systému, započítané fáze životního cyklu vegetační střechy

Regionální určení (pro kalkulaci správného energetického mixu a dopravy) představuje Česká republika.

Inventarizační analýza (LCI – Life Cycle Inventory)

Inventarizační analýza slouží ke zjištění a vyčíslení množství všech materiálových a energetických toků vstupujících do výpočtu a vystupujících z něj. Ve studii jsou hodnoceny tato polointenzivní vegetační souvrství:

- souvrství se substrátem a drenážně-akumulační nopovou fólií;
- souvrství se substrátem, drenážně-akumulační nopovou fólií a XPS;
- souvrství se substrátem, hydrofilní minerální vlnou a drenážní nopovou fólií;
- souvrství tvořené pouze hydrofilní minerální vlnou s krycí vrstvou substrátu.

Výstupem inventarizační analýzy je sada hodnot shrnující materiálové a energetické toky produktového systému. Výpočet je prováděn v programu GaBi 4. Jako další vstupy do výpočtu, které nejsou součástí základních ani rozšířených výše popsaných databází, jsou data z environmentální produktové deklarace desek hydrofilní vlny. Toto EPD bylo modelováno v softwaru TEAM 5.1 a je součástí příloh v závěru disertační práce.

Posuzování dopadů (LCIA – Life Cycle Impact Assessment)

Environmentální dopady charakterizují pozorovatelné důsledky environmentálních aspektů na kvalitu životního prostředí, zdraví člověka a na množství zásob abiotických či biotických surovin. Existuje několik metod kvantifikace dopadů na životní prostředí. Jsou nazývány „kategorie dopadu“. Indikátor kategorie dopadu je měřitelná veličina s jasně definovanými jednotkami, pomocí níž se sleduje, jak silně se daná kategorie dopadu prohlubuje, rozvíjí či zhoršuje. Pro analýzu životního cyklu vegetačních střech jsou používány následující kategorie dopadu:

- potenciál globálního oteplování (*GWP*);
- potenciál úbytku stratosférické ozonové vrstvy (*ODP*);
- potenciál acidifikace půdy a vody (*AP*);
- potenciál eutrofizace (*EP*);
- potenciál tvorby přízemního ozonu (*POCP*);
- potenciál úbytku surovin (*ADP, prvky*) pro nefosilní zdroje;
- potenciál úbytku surovin (*ADP, fosilní paliva*) pro fosilní zdroje.

Interpretace životního cyklu slouží k přehlednému prezentování zjištěných poznatků. Cílem LCA je kvantifikace a komparace vybraných materiálů ve vegetačních souvrstvích a dále vyhodnocení jednotlivých subsystémů vegetačních střech.

4 VÝSLEDKY PRÁCE A NOVÉ POZNATKY

4.1 Výsledky měření počátečních vlastností hydrofilní vlny

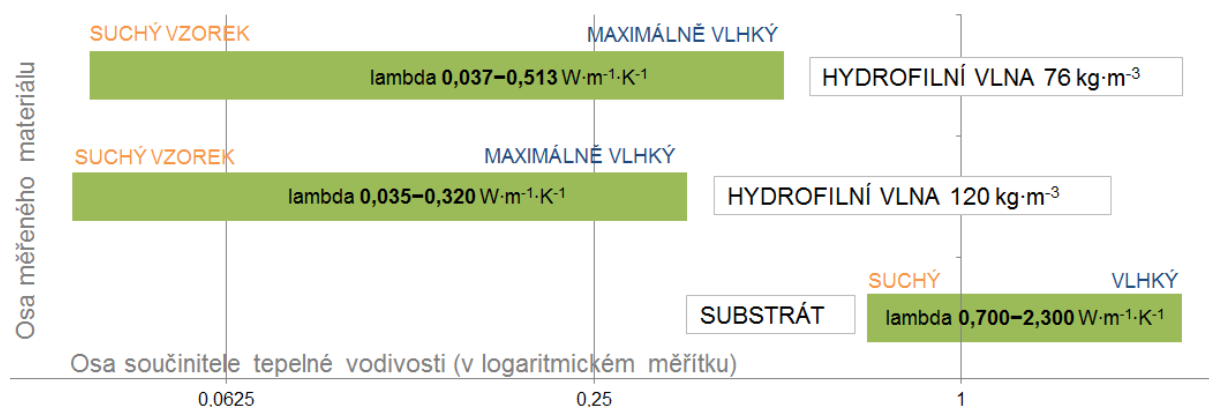
Tab. 1 uvádí naměřené hodnoty vlastností hydrofilní vlny. Volba měřených veličin vychází z rešerše relevantních parametrů souvisejících s využitím hydrofilní vlny v konstrukcích vegetačních střech.

Tab. 1 – Počáteční vlastnosti hydrofilní minerální vlny podle certifikačních protokolů

Zkoumaná vlastnost	Metodika	Jednotka	Hydrofilní vlna 76 kg·m ⁻³	Hydrofilní vlna 120 kg·m ⁻³
Součinitel tepelné vodivosti za sucha λ_d	ČSN EN 12667	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,037	0,035
Součinitel tepelné vodivosti za vlhka λ_d	ČSN EN 12664	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,513	0,320
Maximální vodní kapacita WK_{max}	FLL	[%]	92,7	90,7
Vodopropustnost $mod.K_f$	FLL	[mm·min ⁻¹]	227	140
Schopnost pro proudění vody při sklonu 2° $q_{2/0,1}$	ČSN EN ISO 12958	[l·m ⁻¹ ·s ⁻¹]	1,53	1,19
Schopnost pro proudění vody při sklonu 35° $q_{2/0,1}$	ČSN EN ISO 12958	[l·m ⁻¹ ·s ⁻¹]	1,79	1,38
Pevnost v tlaku CS	ČSN EN 826	[kN]	15	20

Součinitel tepelné vodivosti hydrofilní minerální vlny se při maximální saturaci vodou blíží hodnotám, které platí pro vodu ($\lambda_{vody} = 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). I přes velké množství vlhkosti jsou naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti výrazně lepší než hodnoty substrátů, které jsou dokumentovány v ČSN 73 0540-3 (Obr. 6). Pokud by se nahradil substrát hydrofilní vlnou, měla by tato záměna značný vliv na tepelné vlastnosti celé střechy.⁷

⁷ VACEK, P., MATĚJKA, L. Usage of Hydrophilic Mineral Wool Panels in Green Roof Systems in Passive Houses. *Advanced Materials Research*. Pfaffikon: Trans Tech Publications, 2014, č. 1041, s. 75–78. ISSN 1662-8985.



Obr. 6 – Vývoj součinitele tepelné vodivosti na základě míry saturace vodou

Další měření vlastností nových výrobků z hydrofilní minerální vlny a změny těchto vlastností v čase pak probíhala v laboratořích výrobního závodu Isover v Častolovicích a na pracovišti Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví v Průhonicích (Tab. 2).⁸

Tab. 2 – Podrobná měření počátečních vlastností hydrofilní vlny

	Základní měření		Podrobnosti				
Nominální objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Maximální vodní kapacita WK_{max} [%]	Vodopropustnost $mod.K_f$ [mm·min ⁻¹]	Objemová hmotnost za sucha (Proctor) ρ_f [kg·m ⁻³]	Objemová hmotnost po vlhčení (Proctor) ρ_{wk} [kg·m ⁻³]	Pevná fáze MV [%]	Celková pórovitost GPV [%]	Obsah vzduchu po maximálním nasycení PV_{maxW} [%]
76	89,3	213,5	81,9	974,8	3,0	97,0	7,7
120	93,8	81,3	142	980,0	5,2	94,8	11,0

Nadprůměrné hodnoty vodopropustnosti mohou být výhodou při využití hydrofilní vlny v jednovrstvých skladbách, protože odpadne použití plošných odvodňovacích prvků a tím dojde ke zlevnění celého vegetačního souvrství. Velmi vysoká nasákavost by však mohla xerofilním střešním rostlinám uškodit, stejně jako nedostatečný obsah vzduchu při plném nasycení minerální vlny. Úplná náhrada substrátů hydrofilní minerální vlnou není tabulkově možná. Experimentální zkoušky adaptace rostlin v minerální vlně ale dokazují opak.

⁸ VACEK, P., MATĚJKA, L. Nová měření tepelných vodivostí a vodních propustností panelů z hydrofilních minerálních vln pro konstrukce vegetačních střech. *Sborník konference PROGRESS 2014*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014, s. 33–34. ISBN: 978-80-248-3623-2.

4.2 Výsledky měření ageingu (stárnutí) hydrofilní vlny v čase

Ze zkušebních modelů byly odebrány vzorky na laboratorní testy. Počáteční vlastnosti hydrofilní minerální vlny byly měřeny na vzorcích o objemových hmotnostech 76 a 120 kg·m⁻³, proto i testování po 16 a 17 měsících od počáteční aplikace probíhalo na těchto materiálových skupinách. Desky nižší gramáže byly vegetací značně poškozeny (Obr. 7). Byly měřeny různě prokořeněné vzorky. Naopak hydrofilní vlna vyšší objemové hmotnosti odebraná z modelu 2 byla kompaktnější, jemné kořeny trávý desky příliš nepoškodily (Obr. 8).



Obr. 7 – Detail vzorku OH76 po 16 měsících, bez vegetace, vysušený



Obr. 8 – Jemné prokořenění trávou desek OH120 při odběru vzorků

Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 3. Největší rozdíly mezi výrobky novými a stařenými byly v pevnosti v tlaku, téměř 70 %. Toto by mohl být velký problém do budoucna, zvláště pak při použití hydrofilní vlny jako hydroakumulační vrstvy intenzivních vegetačních střech, kde hmotnost jednoho metru čvetečního celého souvrství včetně rostlin může být až 1 000 kg. Navzdory nižším pevnostem stařených vzorků vyšla jejich sléhavost (změna parametru tloušťky desky) poměrně nízká.

Další velké rozdíly vykazuje vodopropustnost, která je ale velmi ovlivněna zvoleným měřicím postupem (FLL, nádoby Proctorova hutnicího kladiva).⁹

⁹ VACEK, P., MATĚJKA, L. Ageing Documentation of Hydrophilic Mineral Wool used in Green Roof Assemblies. Applied Mechanics and Materials. Pfaffikon: *Trans Tech Publications*, 2016, č. 835, s. 397–401. ISSN 1662-7482. IF=0,15.

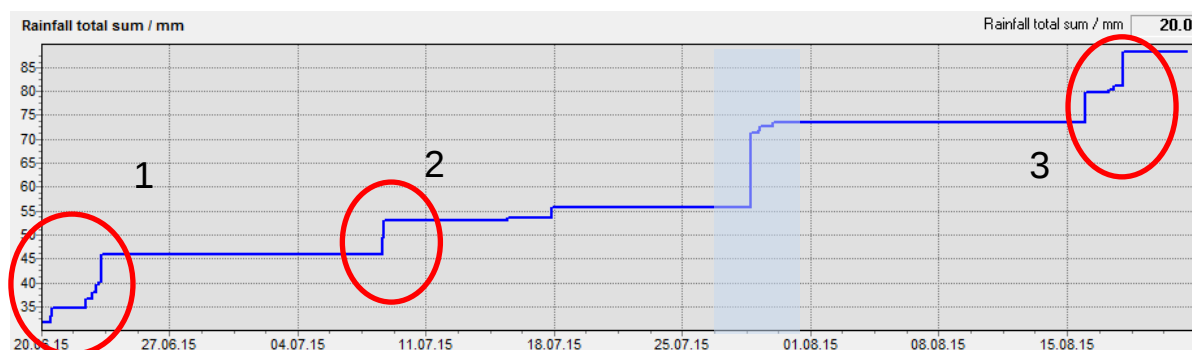
Tab. 3 – Výsledky měření stařených vzorků

Parametr	Objemová hmotnost vzorku [kg·m ⁻³]	Původní hodnota	Průměrná naměřená hodnota (ageing)	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]
Tloušťka desek <i>t</i> [mm]	76	100	87	-13 %
	120	50	47	-6 %
Součinitel tepelné vodivosti za sucha λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	76	0,037	0,0391	+6 %
	120	0,035	0,0355	+1 %
Pevnost v tlaku CS [kN]	76	15,0	6,0	-60 %
	120	20	6,23	-69 %
Maximální vodní kapacita WK_{max} [%]	76	89,3	88,2	-1 %
	120	93,8	92,1	-2 %
Vodopropustnost $mod.K_f$ [mm·min ⁻¹]	76	213,5	103,8	-51 %
	120	81,3	109,0	+34 %

4.3 Výsledky experimentálního měření hydroakumulace

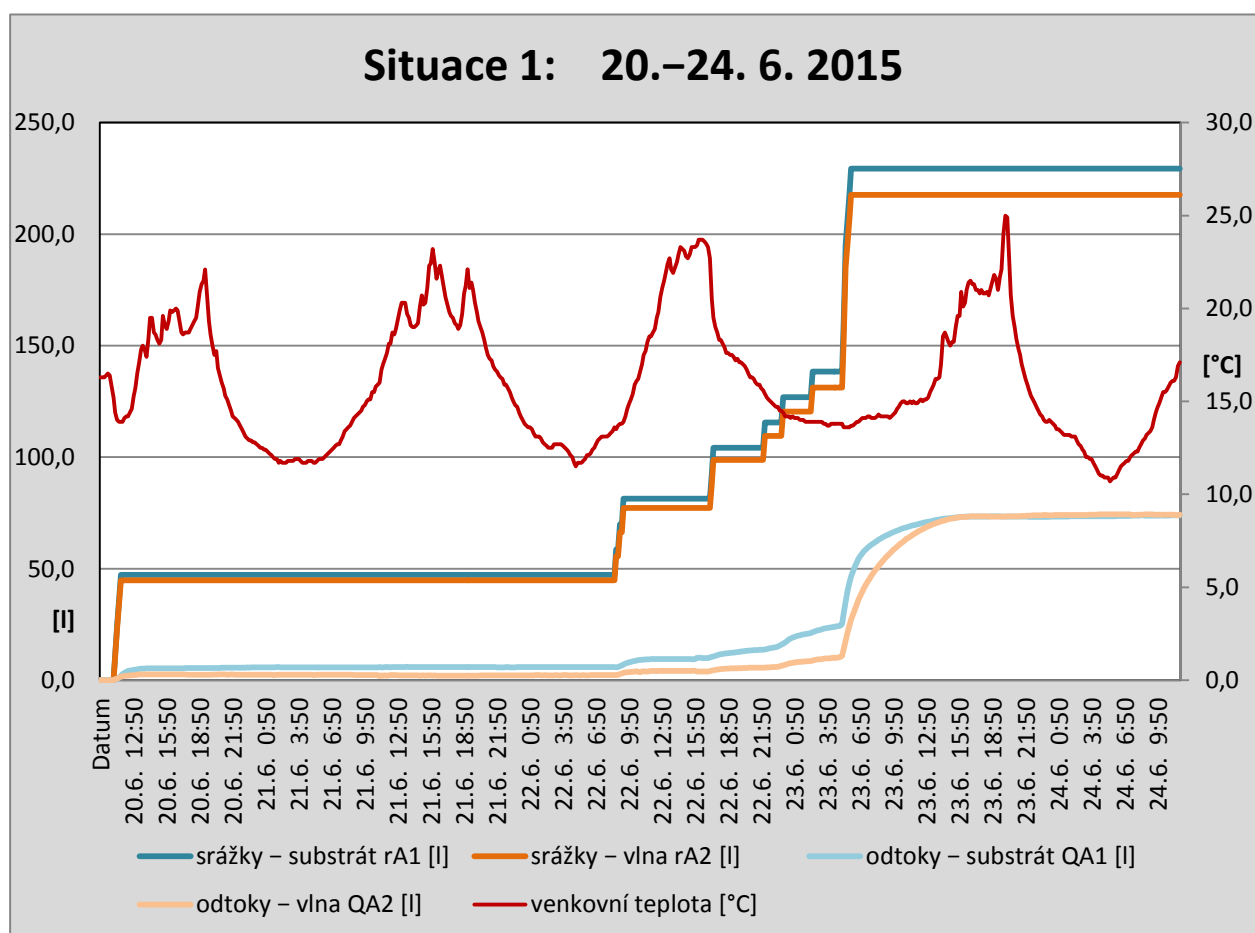
Měření probíhala na experimentálním modelu 3 v Brně v průběhu léta a podzimu 2015. Střecha byla teď rozdělena na dvě části, přičemž polovinu střechy tvořilo souvrství z hydrofilní minerální vlny, druhou polovinu střešní substrát (Obr. 1).

Pro kalkulaci byly vybrány tři situace, kdy byl zaznamenán déšť a následné odtoky ze střechy. Vybrané situace jsou na grafu celkových srážek v období od 20. 6. do 20. 8. 2015 (Obr. 9) vyznačeny červeně.



Obr. 9 – Označení tří situací pro dokumentaci hydroakumulace střech

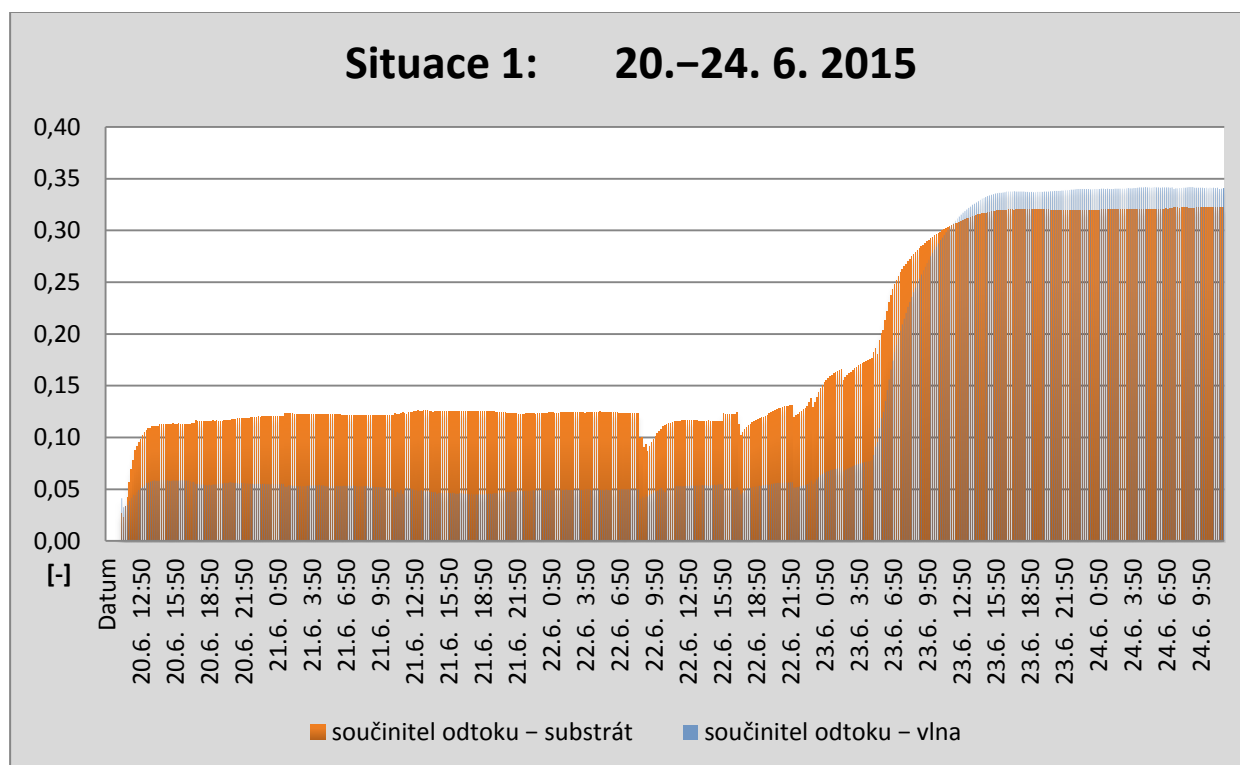
První situace dokumentuje období 20.–24. 6. 2015. V tomto období bylo naměřeno 14 mm srážek, v přepočtu tedy $14 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2}$ za dobu 66 hodin. Je to přibližně čtvrtinové množství intenzivního deště, které uvádí norma ČSN 75 9010¹⁰ pro oblast Brna. Přesto i při těchto srážkách lze pozorovat rozdílné chování části střechy čistě se substrátem oproti části střechy, kde je hydroakumulační vrstva z minerální vlny. Podrobnosti jsou graficky znázorněny na Obr. 10. Srážky jsou tedy uváděny v litrech, stejně jako odtoky, které byly měřeny v akumulačních nádobách pod experimentálním modelem. Doplnkem grafu je pak venkovní teplota, která může mít vliv na vysychání střechy a hydroakumulaci.



Obr. 10 – Znázornění srážek a odtoků v situaci 1

Následující graf (Obr. 11) uvádí poměr mezi vodou, která otekla ze střechy, a vodou, která do střechy natekla (součinitel odtoku C). Z obou grafů situace 1 je možné pozorovat, že část střechy, kde byla minerální vlna, držela vodu déle než část střechy, kde byl pouze substrát.

¹⁰ ČSN 75 9010. *Vsakovací zařízení srážkových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.



Obr. 11 – Součinitel odtoku C v situaci 1

Celková bilance součinitelů odtoku všech tří situací, včetně porovnání s uváděnými normovými hodnotami, je shrnuta v Tab. 4.

Tab. 4 – Celková bilance experimentální hydroakumulace

Situace/ materiál	Experimentálně určený součinitel odtoku C [-]	Součinitel odtoku C podle ČSN 75 6760 [-]	Součinitel odtoku C podle FLL [-]
1 – substrát	0,32	0,7	0,5
1 – vlna	0,34		
2 – substrát	0,06		
2 – vlna	0,08		
3 – substrát	0,38		
3 – vlna	0,42		

Velký vliv na hydroakumulační kapacitu měl sklon střechy, který činil 4°. Vysoké hodnoty vodopropustnosti $mod \cdot K_f$ a schopnosti podélného proudění vody minerální vlny $q_{s,g}$ způsobovaly prakticky okamžitý transport dešťové vody k podokapním žlabům. Zpoždění odtoku díky vysoké maximální vodní kapacitě WK_{max} se projevilo prakticky pouze v první měřené situaci. Pro využití hydrofilní minerální vlny jako hydroakumulační

vrstvy by bylo vhodnější i při takto malých sklonech použít systém drenážních zpomalovačů.¹¹ Jejich princip je takový, že hydrofilní vlna je po určitých úsecích separována polopropustným materiálem (např. recyklát z plastu), který udržuje rovnoměrné rozmístění vody v hydrofilních deskách a tím maximalizuje hydroakumulaci. Takto by šlo upravit proudění vody i v pultových a šikmých střechách. Po provedeném experimentu je zřejmé, že je to nezbytné i pro střechy se sklonem 4°.

4.4 Vyhodnocení modelů hydrofilní vlny z pohledu adaptace rostlin

Bylo ověřováno zakořeňování dospělých rostlin, řízků (částí rostlin), klíčivost semen a dále pak vhodnost konkrétních typů hnojiva při využití různých druhů výrobků z hydrofilní vlny. V disertační práci je na fotodokumentaci zaznamenán vývoj rostlin v jednotlivých materiálech a skladbách. Kromě základních experimentálních modelů popsanych v kapitole 3.1 je fotodokumentace doplněna i o další vegetační střechu, kde byla testována skladba kombinovaných panelů. Tato skladba byla kromě adaptace rostlin hodnocena i z pohledu environmentálních dopadů metodou LCA.

4.5 Výpočet vlivu hydrofilní vlny na životní prostředí metodou LCA

Výpočet byl proveden na čtyřech modelových souvrstvích polointenzivních plochých vegetačních střech s různým zastoupením výrobků z hydrofilní minerální vlny, ale vždy se stejnou silnou vegetační vrstvou (200 mm):

- souvrství se substrátem a drenážně-akumulační nopovou fólií;
- souvrství se substrátem, drenážně-akumulační nopovou fólií a XPS;
- souvrství se substrátem, hydrofilní minerální vlnou a drenážní nopovou fólií;
- souvrství tvořené pouze hydrofilní minerální vlnou s krycí vrstvou substrátu.

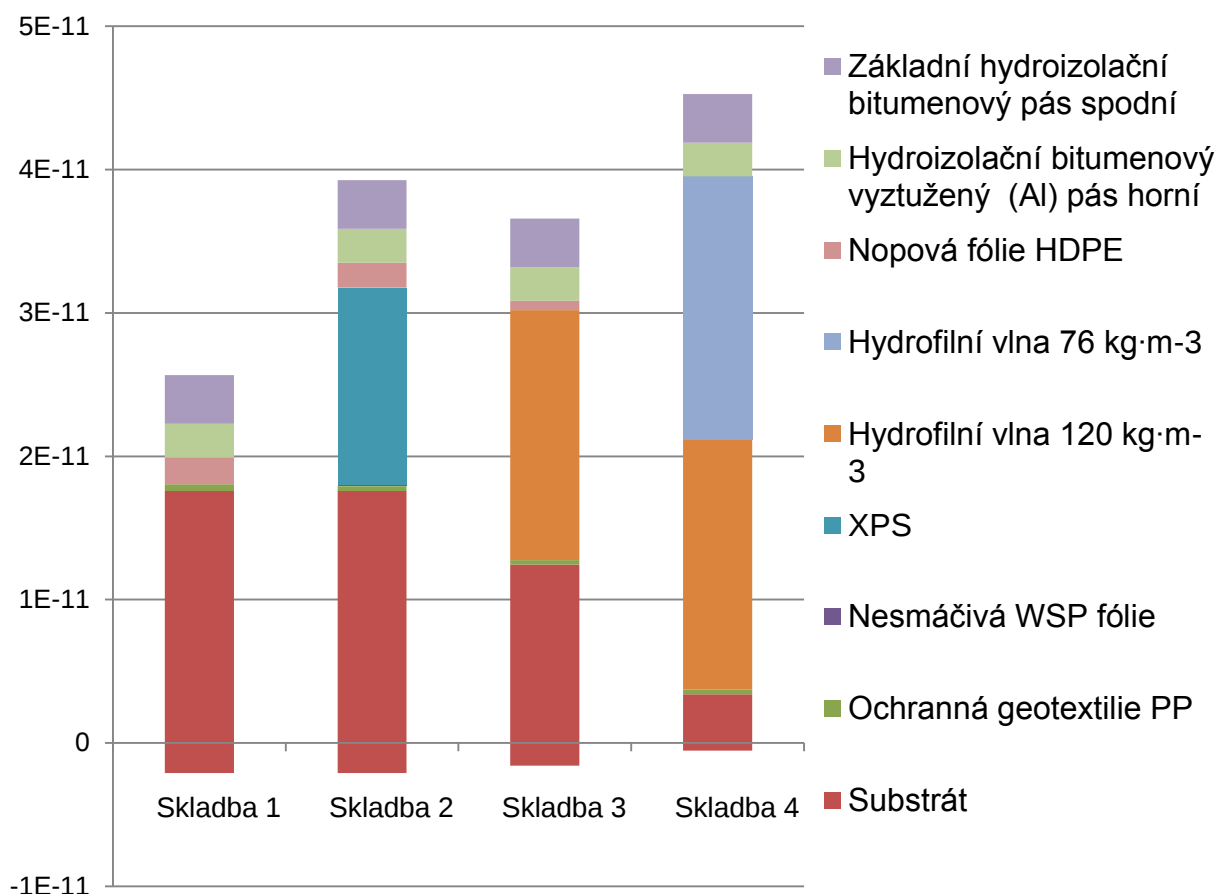
Byl kalkulován celý životní cyklus vegetačního souvrství, který byl stanoven na 30 let. V modelu je uvažována výroba všech komponentů vegetačního souvrství (včetně těžby a transportu surovin do továren), doprava výrobků na stavbu a zabudování do střechy. Během 30letého funkčního cyklu je počítáno s přihnojováním dvakrát ročně, pletím,

¹¹ LAUTENBACH, K. *Bewachsene Fassadenplatte und zugehörige bewachsene Wand [patent]*. Patent, EP2564689 A1. Uděleno 6. března 2013. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/EP2564689A1>.

doplňováním substrátu a na konci životního cyklu je vzhledem k omezeným možnostem recyklace modelově kalkulováno skládkování celého souvrství.

Výsledky kalkulace LCA

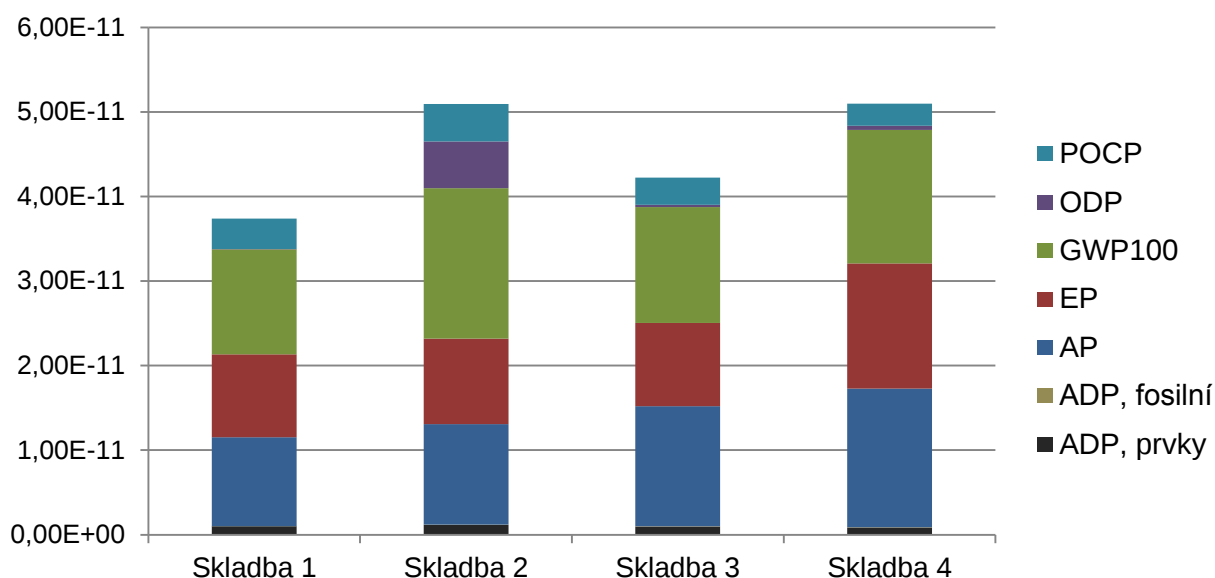
Pro porovnání vlivu jednotlivých materiálů vegetačních souvrství bylo provedeno vyčíslení jejich environmentálních dopadů ve výrobní fázi A1–A3. Výsledky jsou znázorněny na Obr. 12



Obr. 12 – Podíly elementů vegetačních souvrství ve výrobní fázi LCA

Důvodem záporných dopadů substrátových směsí je přítomnost cihelné drtě a strusky, které jsou kalkulovány jako suroviny z recyklátu. Do jejich procesu zpracování je započítáváno ještě drcení na menší kousky (podobně jako u procesu expandovaných jílu, tvořících základ substrátových směsí).

Normalizované výsledky všech dopadových kategorií, všech čtyř skladeb ve všech čtyřech fázích LCA jsou graficky znázorněny na Obr. 13.



Obr. 13 – Grafické zobrazení normalizovaných výsledků celého životního cyklu

Z grafu (Obr. 13) je patrné, že největší vliv na životní prostředí mají vegetační souvrství, ve kterých byly použity umělé materiály (skladba 2 – XPS, skladba 4 – hydrofilní vlna). Nejdominantnějšími kategoriemi dopadu normalizovaného zobrazení jsou potenciál globálního oteplování (*GWP100*), potenciál eutrofizace (*EP*) a potenciál acidifikace půdy a vody (*AP*). Ve dvou ze třech hlavních ukazatelů (*AP*, *EP*) má tedy minerální vlna největší dopad na životní prostředí. Skladba 2 s extrudovaným polystyrenem nejvíce ovlivňuje kategorii *GWP100*, která vyjadřuje ekvivalentní emise CO_2 způsobující skleníkový efekt.

Jak bylo dokázáno měřením nových i použitých desek hydrofilní minerální vlny, jejich součinitel tepelné vodivosti je stabilní i po několika letech používání a vykazuje nezanedbatelné hodnoty i při plné saturaci vodou. Proto byl proveden doplňkový výpočet všech čtyř skladeb, kde referenčním tokem naplnění funkce funkční jednotky není množství substrátu pro růst rostlin (v přechodí kalkulaci 200 mm vegetační vrstvy), ale jednotný referenční tok tvoří skladby s požadovanými hodnotami součinitele prostupu tepla konstrukcí.¹²

4.6 Dokumentace zvýšení vzduchové neprůzvučnosti

Vegetační střechy mají potenciál přispívat ke zvyšování vzduchové neprůzvučnosti střešních konstrukcí. Provedené experimentální měření kvantifikuje změnu vzduchové neprůzvučnosti *R_w* skladby lehké ploché

¹² VACEK, P., STRUHALA, K., MATĚJKA, L. Life-Cycle study on semi intensive green roofs. *Journal of Cleaner Production*. Amsterdam: Elsevier, 2016, č. x, s. x (v recenzním řízení). ISSN 0959-6526. IF=3,8.

střechy na trapézovém plechu ve variantě s vegetačním souvrstvím z hydrofilní vlny a bez ní. Naměřené hodnoty vážených vzduchových neprůzvučností R_w vyšly u skladby bez vegetačního souvrství 38 dB, s vegetačním souvrstvím 44 dB. Bylo tedy prokázáno, že i extenzivní vegetační střecha s hydrofilní minerální vlnou má značný akustický význam. Podrobnosti měření jsou uvedeny v plné verzi disertační práce.

4.7 Zásady pro navrhování vegetačních střech s hydrofilní vlnou

Na základě podrobné analýzy dostupných informací o hydrofilní vlně, standardech pro navrhování vegetačních střech a vyhodnocení experimentálních měření je možné stanovit následující zásady pro navrhování vegetačních střech s hydrofilní minerální vlnou.

Čl. 1 Aplikace ve zjednodušené extenzivní vegetační střeše

Velmi vhodnou aplikací hydrofilní vlny jsou zjednodušené konstrukce extenzivních střech. Pro obvyklou tloušťku vegetační vrstvy extenzivní střechy 100 mm lze kombinovat hydrofilní vlnu OH76 se substrátem v poměru 50/50 mm nebo 70/30 mm. Při dodržení této relace je možné použití standardních rostlin pro extenzivní střechy (Sedum, Sempervivum apod.). Aplikace větších tloušťek minerální vlny (100 mm a více) vyžadují pečlivější výběr rostlin nebo použití materiálů se sníženou nasákavostí – do 65 %, které ale zatím nejsou v ČR dostupné.

Vzhledem k anorganickému složení hydrofilní vlny je nutné doplňovat živiny uměle. Doporučené dávkování 5 g čistého dusíku na m^2 se osvědčilo i pro souvrství s hydrofilní vlnou. Prvotní dávku hnojiva je možné uskutečnit pomocí velkých tablet s postupným uvolňováním, např. Silvamix Forte 60 v počtu 5 $ks \cdot m^{-2}$ mezi desku hydrofilní vlny a substrát. Tyto tablety mají poměr živin NPK 17,5-17,5-10,5, které se uvolňují po dobu 2–3 let, není tedy potřeba dalšího hnojení v prvních dvou letech od založení vegetační střechy. Pro hnojení v dalších letech už je možné využít osmokotická hnojiva s uvolňováním živin na 3–6 měsíců. Toto následné hnojení bude probíhat v jarních, případně podzimních měsících spolu s další údržbou střechy, jako je čištění vpustí, odstraňování plevelů, náletů apod.

Čl. 2 Aplikace v polointenzivní vegetační střeše

Podobně jako u extenzivních střech lze řešit polointenzivní vegetační souvrství jako zjednodušené, resp. bez použití plošné drenáže. Tato varianta vegetační střechy má největší potenciál pro využití hydrofilní vlny jako přímé náhrady substrátu. Vzhledem k vyšší nasákavosti celého souvrství je ale nutné použít takové rostliny, pro které tento stav nebude poškozující. Mezi rostliny vhodné do této skladby lze počítat vybrané

traviny a vyšší trvalky, byliny nebo nízké dřeviny. Podrobný popis skladby je uveden v Tab. 5.

Tab. 5 – Doporučená skladba polointenzivní střechy s hydrofilní vlnou

	Vrstva	Upřesnění vrstvy	Tloušťka [mm]
A	vegetace	polointenzivní – byliny, trávy, malé keře	100–300
B	krycí vrstva	substrát	30
C	zpevňující vegetační vrstva	hydrofilní vlna OH120	50
D	vegetační vrstva	hydrofilní vlna OH76	100–200
E	hydroizolace	odolná proti prorůstání kořenů, např. vyztužená mPVC nebo FPO fólie	1–2
F	vrchní část tepelné izolace	EPS nebo minerální vlna minimální pevnosti CS60	50–100
G	spodní část tepelné izolace	EPS nebo minerální vlna minimální pevnosti CS60	100–300
H	parozábrana	nespecifikováno	–
I	separační vrstva	netkaná geotextilie s plošnou hmotností cca 350 g·m ⁻²	2
J	nosná konstrukce	podle statického výpočtu	–

Čl. 3 Aplikace v intenzivní vegetační střeše

Vybrané typy hydrofilní minerální vlny se zvýšenou pevností a hustotou 120–170 kg·m⁻³ je možné použít jako doplňující vrstvu intenzivních vegetačních souvrství. Například jako spodní hydroakumulační vrstvu, položenou na souvislou plochu odkapové drenáže (kryté filtrační textilií), nebo jako materiál, který vylehčí skladby s velkými tloušťkami. Snížení hmotnosti střechy může být při použití hydrofilní vlny velmi významné. Při maximálním nasycení vodou vykazuje souvrství s hydrofilní vlnou téměř poloviční hmotnost než souvrství s intenzivním substrátem.

Čl. 4 Ověřovací výpočet drenážní kapacity

Všechny skladby vegetačních střech, zvláště pak souvrství s hydrofilní vlnou bez plošné drenáže, je nutné ověřit výpočtem a zjistit, zdali jejich drenážní kapacita vyhoví i přívalovému dešti. Výpočet požadované drenážní kapacity bude proveden podle rovnice (1).

$$q' = \frac{A \cdot C \cdot q}{b} \quad [\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1)$$

Kde: q' je celkový odtok dešťové vody ze střechy $[\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$;
 A odvodňovaná plocha $[\text{m}^2]$;
 C součinitel odtoku $[-]$;
 b výpočtová odtoková šířka (volná šířka u vpusti nebo žlabu) $[\text{m}]$;
 q návrhový déšť $[\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$.

Hodnoty součinitele odtoku C budou použity z normy ČSN 75 6760, návrhový déšť q z normy ČSN 75 9010, kde jsou uvedena srážková maxima za desetileté a dvacetileté období ve 22 hydrometeorologických stanicích ČR.

Po výpočtu předpokládaného maximálního odtoku dešťové vody ze střechy q' je nutné tuto hodnotu porovnat s drenážní kapacitou plošného odvodňovacího prvku vyjádřenou parametrem schopnosti pro proudění vody $q_{s,g}$. Tento údaj se uvádí u nopových fólií a díky provedeným měřením je zdokumentován i pro hydrofilní minerální vlny.

Vzhledem k možnému zhoršení vodopropustnosti a schopnosti proudění vody v minerální vlně po určité době po jejím zabudování do skladby, které byly naměřeny na vzorcích z experimentálního modelu 1 a 2, je doporučeno drenážní schopnosti hydrofilní vlny pro výpočet snížit na 50 %.

Čl. 5 Ochrana proti sání větru

Vegetační střechy založené na hydrofilní minerální vlně, zejména jednovrstvé extenzivní souvrství, jsou v suchém stavu velmi lehké. Je tedy nutné přepočítat jejich odolnost proti sání větru podle evropských norem ČSN EN 1991-1-1 a ČSN EN 1991-1-4.

Ploché vegetační střechy se v praxi kvůli účinkům sání větru většinou nekotví (ani když je vegetační vrstva tvořena hydrofilní vlnou). Pokud by ale kotvení bylo výslovně vyžadováno, je možné využít následující způsob.

Střecha bude plošně zasíťována mezi deskou z hydrofilní vlny a krycí vrstvou substrátu pomocí polyesterové geomříže nebo pomocí výztužné sítě ze skelných vláken. K dispozici je celá řada výrobků, např. geomříže Fortrac nebo skelné tkaniny Adfors (Tab. 6).

Tab. 6 – Příklad výztužných mříží

Název výrobku	Materiál mříže	Velikost ok mříže	Pevnost v tahu	Plošná hmotnost
		[mm]	[kN·m ⁻¹]	[g·m ⁻²]
Fortrac 80/30-20	PES/PVC	20 × 20	80/30	neuvedeno
Fortrac 35/35-35	PES/PVC	35 × 35	35/35	neuvedeno
Vertex G96	skelné vlákno	25 × 25	25/20	130
Vertex G120	skelné vlákno	40 × 40	30/30	145

Mříže budou kotveny do nosné části střechy nebo do betonových obrubníků, rozmístěných v určených vzdálenostech v ploše střechy s ohledem na statický výpočet.

5 ZÁVĚR PRO PRAXI A DALŠÍ ROZVOJ VĚDY

Hydrofilní minerální vlna je již dlouhou dobu nedílnou součástí skleníkových kultur při moderním pěstování zeleniny. Její použití jako stavebního výrobku zejména v konstrukcích vegetačních střech však tolik obvyklé není a nevhodná aplikace by mohla způsobit značné komplikace.

V disertační práci bylo podrobně zdokumentováno začlenění výrobků z hydrofilní minerální vlny dle národní a evropské stavební legislativy a jejich možná aplikace v systémech vegetačních střech. Hydrofilní vlnu lze využít víceúčelově, plnit může zejména funkce hydroakumulační, drenážní, filtrační nebo vegetační. Současné portfolio výrobků z hydrofilní vlny zcela postrádá technické informace o vlastnostech potřebných pro použití v konstrukcích vegetačních střech. Je to způsobeno i skutečností, že **výrobková ani aplikační norma pro minerální vlnu nejsou připraveny na klasifikaci těchto produktů v hydrofilní variantě. Je proto doporučena jejich podrobnější revize.**

Na základě specifických požadavků pro jednotlivé funkční vrstvy vegetačního souvrství bylo provedeno detailní měření relevantních vlastností minerální vlny. Provedená měření byla realizována částečně podle požadavků výrobní normy pro minerální vlnu a částečně podle postupů určených pro substráty, geotextilie a nopové fólie.

Naměřené hodnoty se následně porovnály s požadavky německé oborové normy FLL, která představuje nejkomplexnější soubor technických informací ohledně problematiky vegetačních střech. Bylo zjištěno, že výrobky z hydrofilní minerální vlny mají výbornou vodopropustnost, a díky

tomu je možné je zařadit do zjednodušených skladeb extenzivních vegetačních střech, kde není přítomna samostatná drenáž. Negativním aspektem je jejich maximální vodní kapacita přesahující normové požadavky. Zvýšená nasákavost by mohla škodit xerofilním rostlinám, které se na extenzivní střechy obvykle vysazují. Procentuální vyčíslení obsahu vzduchu hydrofilní vlny při plném nasycení vyšlo na hranici přípustných hodnot. Na základě analýzy normových požadavků a vlastních experimentů adaptace rostlin je možné konstatovat, že úplná náhrada střešních substrátů minerální vlnou je možná pouze za předpokladu výběru rostlin, které budou tolerantní k nárazovému přemokření. Při využití standardní extenzivní flóry je vzhledem k vyšší míře vlhkosti minerálních desek doporučena jejich kombinace se vzdušnějšími substráty, které i při dlouhotrvajícím dešti zajistí kořenům rostlin dostatečné množství vzduchu.

Kromě technických vlastností hydrofilní vlny měřených bezprostředně po jejím vyrobení byly stejným způsobem podrobeny měření i vlastnosti výrobků, které byly již určitou dobu zabudovány v konstrukcích. Jediným parametrem, který se podle FLL u substrátů a vegetačních panelů vyhodnocuje v čase, je jejich sléhavost. Požadavky procentuální sléhavosti byly u výrobků aplikovaných v konstrukcích po dobu jednoho roku splněny, absolutní sléhavosti však nikoliv. Nad rámec požadavků FLL i výrokové normy pro minerální vlny byly vyhodnoceny i další parametry, které se mohou u hydrofilní vlny v čase měnit. Na základě doplňujících měření byl zjištěn výrazný rozdíl mezi vlastnostmi nových výrobků a výrobků již aplikovaných. Tuto skutečnost doposud neuvádí výroková ani aplikační norma pro minerální vlny. Největší rozdíly mezi výrobky novými a stařenými byly zjištěny v pevnosti v tlaku, u některých vzorků činil rozdíl téměř 70 %. Snížení pevnosti může být způsobeno porušením struktury desek kořeny rostlin a dále také změnou vlastností pojiva minerální izolace v dlouhodobě vlhkém prostředí. Při aplikaci ve skleníkových kulturách, kde se životnost hydrofilní vlny předpokládá od jednoho roku do tří let, není tento fakt relevantní. V případě použití minerální vlny ve střešních konstrukcích s předpokládanou životností 50 let bude ovšem pokles pevnosti zásadní. Hydrofilní vlna jako spodní hydroakumulační vrstva intenzivních vegetačních střech bude zatížena celým vegetačním souvrstvím, které včetně rostlin může převyšovat 1 000 kg na metr čtvereční. Takto velký tlak může deformovat hydrofilní vlnu a znemožnit tak využití všech jejích vlastností. Je proto žádoucí další testování dlouhodobých pevností výrobků z hydrofilní vlny za vlhka a případná úprava pojiva.

Velmi vysoké hodnoty maximální vodní kapacity jsou obecně spojovány s následnou schopností reálné hydroakumulace vegetačního souvrství. Byl proto sestaven model pultové střechy pro synchronní měření hydroakumulace střechy s hydrofilní vlnou a střechy pouze se substrátem (střecha byla rozdělena na dvě části). Na základě experimentálních měření

byly stanoveny reálné součinitele odtoku modelové pultové střechy, které byly následně komparovány. Naměřené hodnoty jsou nižší, než se uvádí v národní a evropské legislativě.

Již při sklonu střechy 4° se negativně projevila zvýšená vodopropustnost hydrofilní vlny oproti substrátu, která zastínila teoretickou výhodu její hydroakumulační schopnosti zjištěné při laboratorním měření. **Z provedeného experimentálního měření jednoznačně vyplývá, že samotná přítomnost hydrofilní vlny ve střeše automaticky nezvyšuje její hydroakumulační kapacitu a v konstrukcích pultových a šikmých střech bude nezbytné navrhnout i systém drenážních zpomalovačů, které udrží vodu v hydroakumulační vrstvě rovnoměrně.** Pouze tímto způsobem bude možné využít potenciál dvojnásobné vodní kapacity hydrofilní vlny v porovnání se střešními substráty. V práci je uvedena základní rešerše těchto zpomalovačů, které byly mezinárodně patentovány a které jsou v současnosti již dostupné na evropském trhu.

Praktické testy adaptace rostlin byly realizovány na různých výrobcích z hydrofilní vlny. Testováno bylo zakořeňování semen, řízků i celých rostlin. Nejúspěšnější byly typy hydrofilní vlny s nižší objemovou hmotností, které však mají nižší pevnost v tlaku, takže jejich použití ve vegetačních střechách je velmi omezené.

Zcela nové poznatky přináší práce v oblasti environmentálního hodnocení materiálů vegetačních střech a jejich dopadů na životní prostředí v různých kategoriích metodou LCA. Byla sestavena environmentální produktová deklarace dvou vybraných výrobků z hydrofilní minerální vlny, kde je dokládán vliv její výroby na životní prostředí. Na základě těchto dat byly následně vytvořeny čtyři modelové situace vegetačních střech s různým podílem výrobků z hydrofilní vlny. Prostřednictvím těchto modelů byl zkoumán 30letý životní cyklus vybraných vegetačních subsystémů, jednotlivé materiály byly detailně popsány a na závěr také podrobeny komparaci. Z podrobného hodnocení vyplývá, že hydrofilní vlna má ve zvolených skladbách dominantní vliv. Je to způsobeno především její energeticky velmi náročnou výrobou. Zejména procesy tavení kameniva a tvzení vlny se na energetické náročnosti podílejí nejvíce. Srovnatelné dopady na životní prostředí mají i další umělé materiály, jako např. XPS nebo expandované jíly, které tvoří základ většiny současně používaných substrátů pro vegetační střechy (60–70% podíl keramzitu v substrátových směsích). **Hydrofilní minerální vlna je na základě provedené kalkulace v celkovém kontextu dopadů na životní prostředí porovnatelná s ostatními umělými materiály.** Energetická náročnost výroby je částečně kompenzována její schopností zvyšovat tepelněizolační vlastnosti střechy i ve vlhkém stavu, což bylo prokázáno měřeními i výpočty.

Z doplňujících testů plyne, že hydrofilní vlna má ve skladbě lehké ploché vegetační střechy významný vliv také na akustiku. **Měření tohoto**

typu nebylo u halových objektů dosud publikováno. Využití zjednodušené skladby vegetační střechy s hydrofilní vlnou může pomoci lehkým halovým objektům splnit hygienické požadavky na šíření hluku v případě, že se jedná o výrobní objekt s hlučným provozem, který je v těsné blízkosti obytné zóny. Navíc tyto ozeleněné plochy zlepšují kromě akustiky i kvalitu prostředí dalšími benefity vegetačních střech, jako jsou redukce prachu, CO₂, úniků tepla, zvyšují vlhkost prostředí, produkci kyslíku a mají také nezanedbatelnou estetickou funkci.

V závěru práce byly stanoveny zásady pro navrhování vegetačních střech s hydrofilní vlnou. Byly sestaveny vzorové skladby, stavební detaily a stanovena základní pravidla údržby. Tyto nové informace byly zahrnuty i v návrhu nové české normy pro vegetační střechy, která je v současnosti zpracovávána oborovým sdružením Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně.

Za oceněný přínos pro rozvoj vědy je možné zahrnout i ocenění Best Paper Award z konference ICAET 2015, kde byly prezentovány výsledky ageing procesu u hydrofilní vlny. Mezinárodní konference se konala na podzim roku 2015 v Koreji na Incheonské univerzitě, bylo na ni přihlášeno 250 příspěvků z 25 zemí světa. Příspěvek z konference byl následně ve formě článku publikován v impaktivním časopise.

Pro další rozvoj vědy je možné k navazujícímu výzkumu doporučit následující dílčí témata:

- návrh drenážních zpomalovačů hydrofilní vlny v šikmých střechách a také systémové řešení stabilizace díky použití skelných gridů;
- dokumentace vlivu hydrofilní minerální vlny na požární odolnost vegetační střechy;
- vývoj výrobku s nižší nasákavostí pro čistě extenzivní vegetační střechy;
- výzkum pevnosti hydrofilní vlny v podmínkách dlouhodobé vlhkosti a dokumentace stability poжива.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] ACERO A., P., RODRIGUEZ, C., CIROTH, A. *LCIA methods – Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*. Berlín: GreenDelta GmbH, 2014. Dostupné z: <http://www.openlca.org/documents/14826/2c5b8391-68d9-49a1-b460-a94f18e7d2df>.
- [2] ADFORS. *Vertex® Grid* [online]. [cit. 2016-2-6]. Dostupné z: http://vertexgrid.co.uk/technicke_parametry#2.
- [3] AHLBORN. *Multifunction measuring instrument ALMEMO® 2390-5 with data logger option* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.com/download/ba/eng/23905e.pdf>.
- [4] AHLBORN. *Zug und Druckkraft Sensor K 25* [online]. [cit. 2015-2-5]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.com/getfile.php?1441.pdf>.
- [5] ASOCIACE VÝROBCŮ MINERÁLNÍCH IZOLACÍ. *Minerální izolace/ Typy izolací* [online]. [cit. 2015-06-22]. Dostupné z: <http://www.mineralniizolace.cz>.
- [6] BIANCHINI, F., HEWAGE, K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*. Philadelphia: Elsevier, 2012, č. 48, s. 57–65. ISSN 0360-1323.
- [7] CONNELLY, M., HODGSON, M. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Applied Acoustics*. 2013, roč. 17, č. 10, s. 1136-1143. ISSN 0003-682X.
- [8] CSI. *Protokol o zkoušce č. 2253: Stanovení součinitele tepelné vodivosti a vodopropustnosti hydrofilního výrobku Cultilene z minerálních vláken s objemovou hmotností 76 kg/m³ a 120 kg/m³*. Praha: Centrum stavebního inženýrství a.s., 2014.
- [9] CSI. *Protokol o zkoušce č. P 492-12/14: Stanovení schopnosti pro proudění vody v rovině desky pro materiály OH76 a OH120*. Praha: Centrum stavebního inženýrství a.s., 2014.
- [10] CULTIWALL, SAINT-GOBAIN CULTILENE. *Vertical gardens* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://cultiwall.nl/en-gb/vertical-gardens.aspx>.
- [11] ČERMÁKOVÁ, B., MUŽÍKOVÁ, R. *Ozeleněné střechy*. Praha: Grada, 2009. edice stavitel. ISBN 978-80-247-1802-6.
- [12] ČSN 72 7221-1. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Část 1: Typy konstrukcí a kategorie použití*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

Pozn.: další zdroje jsou uvedeny v disertační práci.

7 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno a příjmení	Petr Vacek
Narozen	4. 3. 1981
Státní příslušnost	Česká republika
Adresa	Vlčnovská 14, 628 00, Brno
e-mail	petr.vacek@centrum.cz

Vzdělání:

2005	ČVUT, Fakulta stavební, Pozemní stavby a konstrukce, Ing.
1999	Gymnázium K. V. Raise, Hlinsko

Zaměstnání:

2008–2016	Saint-Gobain Cunstruction Products CZ, divize Isover, Manažer technické podpory
2006–2008	Saint-Gobain Isover CZ, Produktový manažer
2005–2006	Tunzini, Projektant SHZ
2003–2005	PSK Tuzar, Projektant

8 SEZNAM VLASTNÍ LITERATURY

- [1] ISOVER. Isover pro systémy vegetačních střech. Praha: Isover, 2013.
- [2] VACEK, P., MATĚJKA, L. Usage of Hydrophilic Mineral Wool Panels in Green Roof Systems in Passive Houses. *Advanced Materials Research*. Pfaffikon: Trans Tech Publications, 2014, č. 1041, s. 75–78. ISSN 1662-8985.
- [3] VACEK, P., MATĚJKA, L. Nová měření tepelných vodivostí a vodních propustností panelů z hydrofilních minerálních vln pro konstrukce vegetačních střech. *Sborník konference Progress 2014*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014, s. 33–34. ISBN 978-80-248-3623-2.
- [4] VACEK, P. Vegetační střechy a jejich budoucnost. *Sborník konference Regenerace bytového fondu a staveb občanské vybavenosti*. Hradec Králové: Centrum stavebního inženýrství a.s., 2014, s. 107–111. ISBN 978-80-7086-006- 9.
- [5] VACEK, P., MEDARD, M. *General report on Isover LCA Castolovice*. Paris: Isover, 2015.
- [6] VACEK, P., MATĚJKA, L. Decreasing Negative Influence of Under-flow Rainwater Inverted Green Roofs on Passive Houses, using Accumulating Hydrophilic Mineral Wool Panels. *Applied Mechanics and Materials*. Pfaffikon: Trans Tech Publications, 2016, č. 824, s. 786–794. ISSN 1662-7482. IF=0,15.

- [7] VACEK, P., MATĚJKA, L. Ageing Documentation of Hydrophilic Mineral Wool used in Green Roof Assemblies. *Applied Mechanics and Materials*. Pfaffikon: Trans Tech Publications, 2016, č. 835, s. 397–401. ISSN 1662-7482. IF=0,15.
- [8] BURIAN, S., DOSTÁLOVÁ, J., DUBSKÝ, M., CHALOUPKA, K., VACEK, P., STRAKOVÁ, M., ŠRÁMEK, F. *Vegetační souvrství zelených střech – standardy pro navrhování, provádění a údržbu*. Brno: Odborná sekce Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně, 2016.

V recenzním řízení:

- [9] VACEK, P., STRUHALA, K., MATĚJKA, L. Life-Cycle study on semi intensive green roofs. *Journal of Cleaner Production*. Amsterdam: Elsevier, 2016. ISSN 0959-6526. IF=3,8.

9 ABSTRACT

The thesis deals with the use of hydrophilic mineral wool in green roof structures. In the first part of the thesis, based on current legislation, there are summarized relevant technical properties of the hydrophilic wool. Specific demands on the green roof parts were classified and the work was consequently updated by the research of available products from the national market.

A large part of the thesis consists of the extended documentation of technical properties of new products and also the changes that are associated with ageing after the material incorporation into the structure. Not only the laboratory properties of the material itself, but also properties of the material embedded in green roof structure were measured, for example an acoustic capabilities. Water accumulation properties of the mineral wool were documented on the real roof models too. Various impacts were observed by using mineral wool in comparison with substrate assemblies. Additional experiments were applied on using different types of mineral wool for an assessment of specific green roof vegetation adaptation.

The environmental product declarations for each mineral wool product were calculated with the specific software using LCA methodology. In this way, the environmental impacts of mineral wool could be compared with other materials, such as artificial substrates, foils, etc.

As a conclusion of the research results were summarized and reported demands for the hydrophilic mineral wool use in the green roof structures.