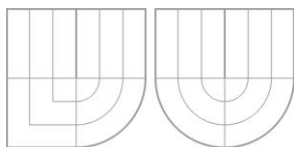




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. PETR VACEK

ŠKOLITEL
SUPERVISOR

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

BRNO 2016

Abstrakt

Disertační práce se zabývá využitím hydrofilní minerální vlny v konstrukcích vegetačních střech.

V první části práce jsou na základě současné legislativy charakterizovány relevantní technické vlastnosti hydrofilní vlny související s využitím ve vegetačních střeších, jsou zde klasifikovány specifické požadavky na jednotlivé části vegetačních souvrství s hydrofilní vlnou a následně je uvedena rešerše současně dostupných výrobků z tohoto materiálu.

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.

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 dopadů minerální vlny na životní prostředí s ostatními materiály, jako jsou umělé substráty, fólie apod.

Na závěr jsou shrnuty výsledky výzkumu a stanoveny zásady použití výrobků z hydrofilní vlny ve vegetačních souvrstvích.

Klíčová slova

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

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.

Keywords

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

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Petr Vacek *Vegetační střechy s hydrofilní minerální vlnou*. Brno, 2016. 133 s., 8 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Libor Matějka, CSc., Ph.D., MBA.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. 3. 2016

.....

podpis autora

Ing. Petr Vacek

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 20. 3. 2016

.....

podpis autora
Ing. Petr Vacek

Motto

„Nic není objeveno a zároveň hned dokonalé.“

- Marcus Tullius Cicero -

Poděkování

Poděkování patří především mému školiteli panu doc. Ing. Liboru Matějkovi, Ph.D., CSc., MBA, za cenné rady a odborné připomínky.

Obsah

Úvod	3
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	4
1.1 Historie výroby a aplikace hydrofilní minerální vlny.....	4
1.2 Hydrofilní minerální vlna v české a evropské legislativě	7
1.3 Standardy a rozdělení vegetačních střech	14
1.4 Požadavky na vrstvy vegetační střechy při využití hydrofilních vln	17
1.5 Výrobky z hydrofilní minerální vlny a další alternativy.....	25
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	27
3 ZVOLENÉ VĚDECKÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	28
3.1 Experimentální modely vegetačních střech s hydrofilní vlnou.....	28
3.2 Ověření hypotézy hydroakumulace a určení součinitele odtoku C	29
3.3 Analýza stálosti vlastností v čase (ageing)	35
3.4 Kvantifikace a komparace dopadů na životní prostředí.....	36
4 VÝSLEDKY PRÁCE A NOVÉ POZNATKY	42
4.1 Výsledky měření počátečních vlastností desek z hydrofilní vlny.....	42
4.2 Výsledky měření ageingu (stárnutí) hydrofilní vlny v čase	47
4.3 Výsledky experimentálního měření hydroakumulace na modelu	57
4.4 Vyhodnocení modelů hydrofilní vlny z pohledu adaptace rostlin.....	66
4.5 Výpočet vlivu hydrofilní vlny na životní prostředí a interpretace jeho výsledků	81
4.6 Dokumentace zvýšení vzduchové neprůzvučnosti	93
4.7 Zásady pro navrhování vegetačních střech s hydrofilní vlnou	98
Čl. 1 Aplikace ve zjednodušené extenzivní vegetační střeše.....	98
Čl. 2 Aplikace v polointenzivní vegetační střeše	101
Čl. 3 Aplikace v intenzivní vegetační střeše	102
Čl. 4 Ověřovací výpočet drenážní kapacity	106
Čl. 5 Ochrana proti sání větru	108
5 ZÁVĚR PRO PRAXI A DALŠÍ ROZVOJ VĚDY	112

6	Seznam použité literatury a zdrojů	116
7	Seznam vlastní literatury	123
8	Vymezení pojmů, zkratk	124
9	Přehled použitých veličin	127
10	Příloha: EPD výrobků z hydrofilní minerální vlny	130
11	Resumé	138

Úvod

Vegetační střechy (zelené střechy) vrací zeleň do měst, produkují kyslík, snižují prašnost, mají pozitivní psychologické účinky, a pokud jsou vhodně architektonicky začleněny do provozu budovy, poskytují prostor pro relaxaci obyvatel. Mají rovněž ekonomické opodstatnění, např. snižují zatížení městské kanalizace dešťovou vodou, což je často doprovázeno nižším poplatkem za stočné. Mezi další ekonomické výhody patří i zvýšení tepelné ochrany střechy, které je při použití hydrofilní minerální vlny o to výraznější.

V současné době je možné realizovat vegetační souvrství nejen na ploché střeše (se sklonem do 5°), ale také ve střeše šikmé (se sklonem do 45°) či strmé (45–90°). Čím větší je sklon, tím složitější je zpravidla skladba vegetační střechy. Musí odolávat vlastní tíze, sání větru, poskytovat rostlinám vhodné podmínky k životu a trvalému růstu a zároveň chránit střešní konstrukci před negativními vlivy vegetace, zejména před prorůstáním kořenů do podkladu. Vývoj v oblasti stavebních materiálů přináší nové poznatky každý rok.

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, zvláště jejich využití ve skleníkových kulturách, byla v minulosti řešena převážně v publikacích pro zemědělství. Odborná literatura pojednávající o využití hydrofilní minerální vlny ve stavebních konstrukcích je velmi omezená. Cílem práce je zasazení tohoto materiálu do rámce současného stavu technického poznání, důkladné zmapování jeho technických vlastností a pomocí experimentálních měření potvrdit nebo vyvrátit jeho využitelnost v konstrukcích vegetačních střech vzhledem k jeho vlastnostem. 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.

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Prvotní využití hydrofilní minerální vlny bylo v zemědělství, kde sloužila jako náhrada zeminy. Historický přehled vývoje minerální vlny, od patentu výroby až po využití pro stavební účely, dokumentuje první kapitola. V části legislativa je přiblížen stav současné české a evropské legislativy, která se zabývá, nebo by se měla zabývat těmito výrobky. Kromě výrobních a zkušebních norem produktů je popsána i problematika navrhování vegetačních střech jak v obecné rovině, tak se zaměřením na hydrofilní vlnu. Na závěr kapitoly je uvedena rešerše současně dostupných výrobků z hydrofilních vln, nebo výrobků jim podobných, které se vyznačují velkou hydroakumulační a drenážní schopností.

1.1 Historie výroby a aplikace hydrofilní minerální vlny

Průmyslově vyráběné výrobky z rozvlákněných hornin se začaly objevovat sice až ve 20. století, nicméně volně v přírodě lze rozvlákněné horniny pozorovat již miliony let. Aktivní sopky produkují kromě lávy, prachu a velkého množství tepla také jemná vlákna připomínající vlasy. Přírodní minerální vlákna můžeme najít především v oblastech Havaje a dále také kolem sopek jižní Evropy. Pro tyto přirozeně rozvlákněné horniny se vžilo geologické označení „Pele’s hair“ (Obr. 1, 2).¹



Obr. 1 – Přirozeně rozvlákněná hornina



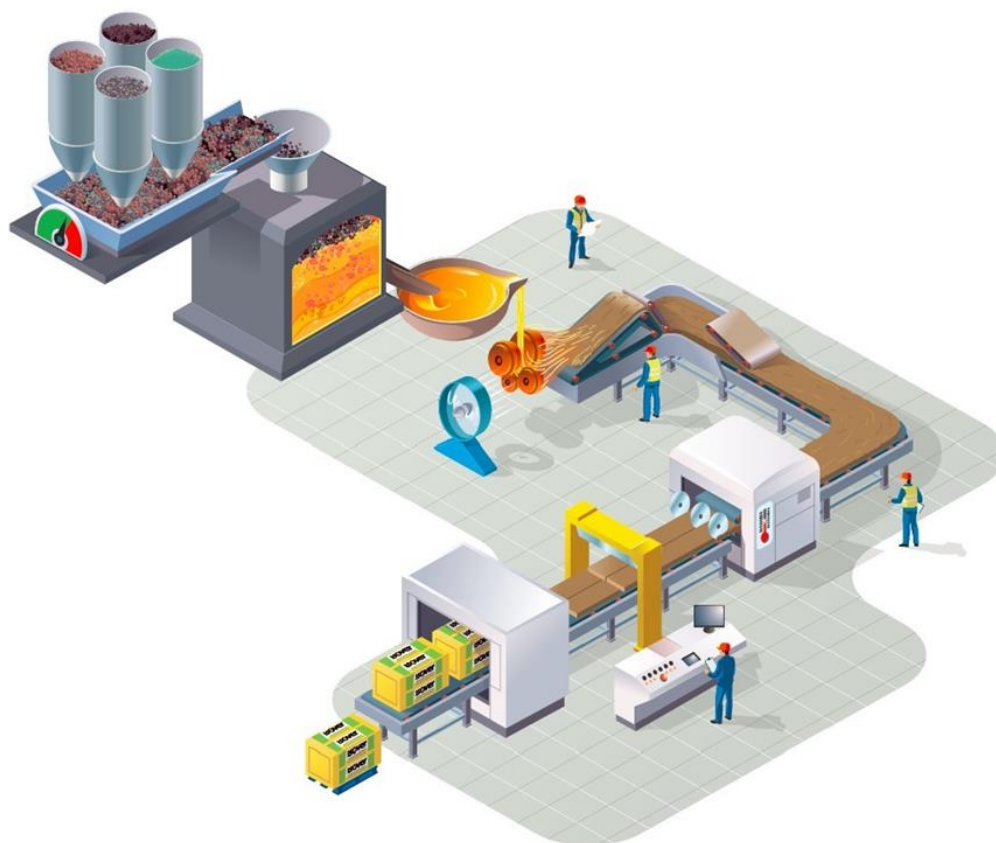
Obr. 2 – Přirozeně rozvlákněná hornina, detail

Počáteční pokusy o průmyslové zpracování vulkanické horniny a strusky na vlákna začaly v polovině 19. století.² Proces výroby je velmi náročný, horniny se taví při

¹ VOLCANO HAZARDS PROGRAM. *Pele’s hair* [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: <http://volcanoes.usgs.gov/images/pglossary/PeleHair.php>.

² TODAY IN SCIENCE HISTORY. *Mineral wool or mineral cotton* [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: <http://todayinsci.com/Events/Technology/MineralWool.htm>.

1600 °C, přičemž umělou lávu je třeba rozvláknit a přidat pojivo, které drží vlákna pohromadě. Dále se přidávají přísady způsobující např. vodoodpudivost. Materiálové složení a proces výroby minerální vlny v podobě, která se používá dnes (čedič, diabas, struska, případně písek, sklo, přísady), pochází z konce 30. let 20.³ Od té doby se postup výroby mnohokrát upravoval, nicméně základní principy zůstávají stejné (Obr. 3). Využití pro pěstování rostlin bylo poprvé popsáno v roce 1940.⁴



Obr. 3 – Schéma výroby minerální vlny – tavení horniny, rozvlákňování, tvrzení, formátování⁵

Na rozdíl od stavebních izolací z minerální vlny, které jsou dostupné na trhu v ČR,⁶ se u hydrofilních vln nepoužívá hydrofobizační činidlo (olej), které zabraňuje absorpci vody do izolace. Ve stavebních izolacích je voda nežádoucí, snižuje totiž tepelněizolační schopnosti – např. u fasádních desek do zateplovacích systémů (Obr. 4,

³ HAROLD, T. C., MANVILLE, J. *Mineral wool composition* [patent]. Patent, US2116303 A. Uděleno 3. května 1938. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US2116303>.

⁴ GAMES, S., THOMAS, J.H. OWENS CORNING FIBERGLASS CORP. *Agricultural application of glass wool* [patent]. Patent, US2192939 A. Uděleno 12. března 1940. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US2192939>.

⁵ VACEK, P., MEDARD, M. *General report on Isover LCA Castolovice*. Paris: Isover, 2015.

⁶ ASOCIACE VÝROBCŮ MINERÁLNÍCH IZOLACÍ. *Minerální izolace / Typy izolací* [online]. [cit. 2015-06-22]. Dostupné z: <http://www.mineralniizolace.cz>.

Obr. 5). Pokud se hydrofobizační činidlo vymění za činidlo hydrofilní, vznikne materiál, který naopak drží vodu a je připraven na stav permanentního vlhka – to je potřeba pro pěstování rostlin.



Obr. 4 – Desky z čedičové minerální vlny pro stavební účely



Obr. 5 – Smáčivost hydrofobizované minerální izolace

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. U skleníkových kultur je toto velmi pečlivě kontrolováno a regulováno. Pěstované plodiny musí mít ideální podmínky pro rychlý a zdravý růst, aby poskytovaly co největší výnosy v co nejkratší možné době (Obr. 6, 7, 8).⁷



Obr. 6 – Hydrofilní vlna ve skleníkových kulturách – pěstování rajčat



Obr. 7 – Hydrofilní vlna ve skleníkových kulturách – pěstování paprik

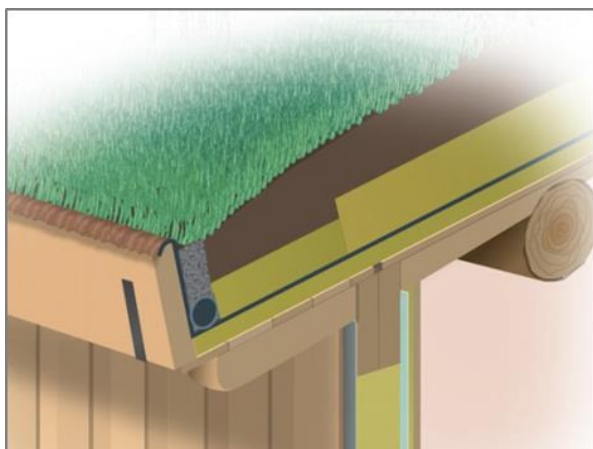


Obr. 8 – Hydrofilní vlna ve skleníkových kulturách – pěstování okurek

Hydrofilní minerální vlna se i přes dlouhou dobu své existence příliš často jako stavební výrobek nepoužívala. V zahraničí jsou tyto výrobky zastoupeny např. jako

⁷ PRACTICAL HYDROPONICS & GREENHOUSES. *Free articles* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.hydroponics.com.au/category/free-articles>.

pomocné výrobky ve vegetačních střeších u výrobců hydrofobizovaných vln (Obr. 9)⁸ nebo je lze použít do vertikálních zahrad jako náhrada substrátu (Obr. 10).⁹ V České republice jsou výrobky z hydrofilní vlny pro účely vegetačních střešů také dostupné.^{10,11}



Obr. 9 – Hydrofilní vlna jako pomocná hydroakumulační vrstva v konstrukci vegetační střešy (schéma)⁸



Obr. 10 – Hydrofilní vlna jako hlavní vegetační médium v konstrukci ozeleněné stěny⁹

1.2 Hydrofilní minerální vlna v české a evropské legislativě

Existuje skupina harmonizovaných norem (národní normy v českém jazyce ČSN, shodné s evropskou normou EN), které uvádějí požadavky na tepelněizolační výrobky různých materiálů (pěnové polystyreny, minerální vlny, fenolické pěny, polyuretany apod.). Je to skupina norem třídy ČSN EN 13 162–172. Výrobky z minerální vlny jsou uvedeny v části 13 162.¹² Stejně jako ostatní normy z této skupiny i tato výrobová norma popisuje měřitelné vlastnosti výrobků, určuje zkušební postupy a odkazuje na navazující normy pro testování a certifikaci. Bere v úvahu pouze deskové a rolované hydrofobizované výrobky, pro hydrofilizované je použitelná jen v základních bodech.

Hydrofilní vlny nejsou dostupné pouze ve formě desek a rolí, existují i drcené vlny, případně vlny bez pojiva, které je možné aplikovat „foukáním“ (Obr. 11). Výrobové

⁸ ROCKWOOL. *Åstak og torvtak* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.rockwool.no/produkter/u/2011.construction/1325>.

⁹ CULTIWALL, SAINT-GOBAIN CULTILENE. *Vertical gardens* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://cultiwall.nl/en-gb/vertical-gardens.aspx>.

¹⁰ VACEK, P. *Isover pro systémy vegetačních střešů*. Praha: Isover, 2013.

¹¹ KNAUF INSULATION. *Urbanscape Green Roll* [online]. [cit. 2015-06-03]. Praha: Knauf Insulation Trading, 2013. Dostupné z <http://www.knaufinsulation.cz/sites/cz.knaufinsulation.net/files/technicky-list/Green-Roll.pdf>.

¹² 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.

normy pro tuto aplikaci jsou proto uvedeny rovněž.^{13,14} První část normy se zabývá parametry drcené vlny před použitím (nafoukáním), druhá část se věnuje podrobnostem kontrol a zkoušek potřebných pro deklaraci, prováděnou zhotoviteli. V případě nafoukání drcené hydrofilizované vlny pro účely pěstování rostlin je částečně možné vycházet i z těchto legislativních dokumentů.



Obr. 11 – Alternativní aplikace minerální vlny foukáním

Pro aplikace výrobků z minerální vlny ve stavebních konstrukcích speciální normy chybí. Aplikační normy nejsou dostupné ani pro hydrofobizované vlny, běžně používané v projektech i na stavbách. Kategorie aplikace jsou sice popsány v normě ČSN 72 7221-1,¹⁵ nicméně doporučená použití konkrétních výrobových skupin jsou zpracována pouze pro výrobky z pěnových polystyrenů expandovaných¹⁶ nebo extrudovaných.¹⁷ Edice ČSN 72 2121 by mohla být rozšířena o čtvrtou část, kde by byla charakterizována aplikace minerálních vln (hydrofobních i hydrofilních). Takový soubor však zatím není k dispozici. Kategorie použití v první části normy zmiňuje v příloze B (specifické použití tepelněizolačních výrobků) i méně obvyklé aplikace, do kterých lze rovněž zařadit i vegetační střechy s hydrofilní vlnou.

¹³ ČSN EN 14064-1. *Tepelně izolační výrobky pro stavby – Výrobky z foukané minerální vlny vyráběné in-situ: Část 1: Specifikace výrobků před zabudováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

¹⁴ ČSN EN 14064-2. *Tepelně izolační výrobky pro stavby – Výrobky z foukané minerální vlny vyráběné in-situ: Část 2: Požadavky na zabudované výrobky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

¹⁵ ČSN 72 7221-1. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Část 1: Typy konstrukcí a kategorie použití*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

¹⁶ ČSN 72 7221-2. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Část 2: Průmyslově vyráběné výrobky z pěnového polystyrenu (EPS)*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

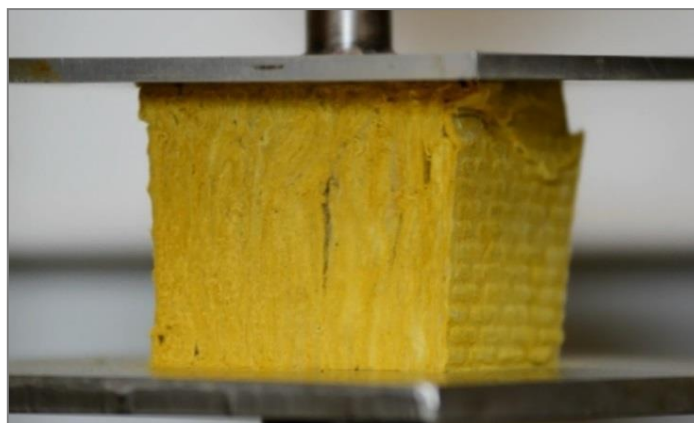
¹⁷ ČSN 72 7221-3. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Část 3: Průmyslově vyráběné výrobky z extrudovaného polystyrenu (XPS)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

Vlastnosti minerální vlny podle výrobní normy ČSN EN 13162¹⁸

Výrobní norma definuje celou řadu vlastností, které se u minerální vlny měří a certifikují. Pro potřeby disertační práce, která se zabývá hydrofilní minerální vlnou, byly vybrány pouze vlastnosti, které jsou pro zkoumaný materiál relevantní a které budou v průběhu práce používány.

Pevnost v tlaku

Jednou ze základních vlastností minerální vlny při aplikaci ve vegetačních střeších by měla být její pevnost. Nejedná se pouze o tíhu vlastního vegetačního souvrství (vegetační vrstva, stabilizační a ochranné prvky, vlastní vegetace, ...), ale i o přenášení zatížení od sněhu, ledu a dále také o provozní zatížení střechy během instalace a pravidelné údržby. V současné době není problematické měřit pevnost v tlaku suchých vzorků (Obr. 12).



Obr. 12 – Zkouška pevnosti v tlaku při 10% stlačení

Pevnost v tlaku CS se dle výrobní normy měří při okamžité 10% deformaci. Dále je možné měřit dlouhodobé pevnosti CC při dotvarování tlakem, deformaci 2 % a extrapolaci na 50 let nebo okamžité bodové pevnosti F_p . Všechny tyto zkoušky jsou nastaveny pro testování za sucha. V podrobné zkušební normě ČSN EN 826¹⁹ jsou uvedeny podmínky přípravy vzorku, na kterých je nutné provést kondicionování při ustálené teplotě a vlhkosti. Hydrofilní vlna saturovaná vodou bude mít v reálných podmínkách vlastnosti jiné. Je možné ale provést počáteční měření hydrofilních vln alespoň za sucha.

¹⁸ 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.

¹⁹ ČSN EN 826. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Zkouška tlakem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

Výrobky z minerální vlny dostupné na českém trhu mají různé pevnosti. Základní rekapitulace hydrofobizovaných vln je uvedena v Tab. 1. Pevnostem hydrofilních vln jsou potom věnovány speciální kapitoly disertační práce. Dokumentovány byly i negativní vlivy spojené se stárnutím tohoto materiálu a mechanickým poškozením vlivem provozu a postupného prokořeňování. Výsledky jsou prezentovány v kapitolách 4 a 4.2.

Hodnoty dlouhodobých pevnostní CC při dotvarování tlakem za 50 let nejsou v současné době k dispozici. Uvedená vlastnost se měří a certifikuje hlavně u výrobků XPS.²⁰

Tab. 1 – Pevnosti v tlaku standardních výrobků z minerální vlny^{21,22,23}

Výrobek	Rockwool Dachrock	Isover LAM 30	Knauf FKD	Rockwool LG1	Isover Fassil	Cultilene běžný panel
Orientace vláken	podélná	kolmá	podélná	kolmá	podélná	podélná
Použití	ploché střechy	ploché střechy	fasády – kontaktní	fasády – kontaktní	fasády – větrané	vegetační střechy
Pevnost v tlaku CS [kPa]	70	30	40	20	5	15
Bodová pevnost F_p [N]	650	—*	—*	—*	—*	—*

*Bodová pevnost se měří pouze u některých typů výrobků, např. u vrchní části souvrství plochých střech. Pro ostatní aplikace nejsou hodnoty uváděny.

Součinitel tepelné vodivosti

Desky z hydrofilní vlny, zvláště jsou-li vrstvené, budou mít dopad také na tepelnou obálku. Zahraniční práce uvádějí tepelněizolační přínos skladeb se substráty, např. Zhao et al.,²⁴ Sailor–Hagos.²⁵ V současné době je v ČR praxe taková, že vrstvy nad

²⁰ DOW. *Floormate 500-A / 700-A* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://building.dow.com/europe/cz/prod/tech/fm_200_500_700.htm.

²¹ ISOVER. *Katalog + ceník 2015*. Praha: Isover, 2015.

²² ROCKWOOL. *Rockwool katalog 2015*. Bohumín: Rockwool, 2015.

²³ KNAUF INSULATION. *Katalog a ceník minerálních izolací s příslušenstvím*. Praha: Knauf Insulation, 2015.

²⁴ 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.

hydroizolací se do výpočtu součinitele prostupu tepla nezapočítávají, nebo se počítá s jejich největší možnou tepelnou vodivostí.

Součinitel tepelné vodivosti λ lze měřit za sucha²⁶ i za vlhka,²⁷ nicméně pro certifikaci se uvádí hodnoty měřené za sucha, které se následně přepočítávají pro zvolenou vlhkost. Způsob výpočtu je uveden v české²⁸ i evropské normě,²⁹ bohužel tyto výpočty jsou zcela nekompatibilní. Evropská norma vychází z deklarovaných hodnot od výrobců tak, jak je běžně uvádí (kompatibilní požadavek s evropskou výrobovou normou). Česká norma naopak vyžaduje hodnoty charakteristické, které nejsou běžně dostupné pro žádné výrobky (vychází z jiných souborů měřených hodnot při výrobě atd.). U hydrofobizovaných minerálních vln s objemovou vlhkostí 0–15 %, které se běžně ve stavebnictví používají, lze návrhové hodnoty jednoduše dopočítat. U hydrofilních vln s objemovou vlhkostí přesahující 80 % výpočet provést nelze. Touto problematikou se podrobněji zabývají i jiné vědecké práce, např. Jerman–Černý.³⁰ V této práci jsou uvedeny měřené hodnoty tepelných vodivostí hydrofilních materiálů za vlhka. Byla proto provedena i vlastní měření výrobků z hydrofilní vlny využitelných pro aplikaci ve vegetačních střeších. 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

Množství vlhkosti, vody, případně ledu bude mít zásadní vliv na fyzikální vlastnosti hydrofilní minerální vlny ve vegetačním souvrství. Výrobová norma ČSN EN 13162

²⁵ SAILOR, D.J., HAGOS, M. An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media. *Energy and Buildings*. Philadelphia: Elsevier, 2011, č. 43, vyd. 9, s. 2298-2303. ISSN 0378-7788.

²⁶ ČSN EN 12667. *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků: Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.

²⁷ ČSN EN 12664. *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku: Suché a vlhké výrobky o středním a nízkém tepelném odporu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.

²⁸ ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov: Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

²⁹ ČSN EN ISO 10456. *Stavební materiály a výrobky – Tepelně vlhkostní vlastnosti: Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových hodnot*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

³⁰ JERMAN, M., ČERNÝ, R. Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*. Philadelphia: Elsevier, 2012, č. 53, s. 39–46. ISSN 0378-7788.

stanovuje maximální hodnoty krátkodobé a dlouhodobé nasákavosti výrobků pro stavební účely (Tab. 2). Krátkodobá nasákavost se měří po ustálení vzorku po 24 hodinách,³¹ dlouhodobá nasákavost po 28 dnech podle příslušné zkušební normy.³²

Tab. 2 – Parametry nasákavosti podle výrobní normy ČSN EN 13162

	Krátkodobá nasákavost (WS – wateriness short)	Dlouhodobá nasákavost (WL – wateriness long)
Maximální množství vody ve stavebním výrobku [kg·m ⁻²]	1,0	3,0

Stanovení výsledné nasákavosti vychází z následující rovnice (1).

$$W = \frac{m_1 - m_0}{A_t} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

kde: m_0 je počáteční hmotnost zkušební tělesa [kg],

m_1 hmotnost zkušební tělesa po úplném nebo částečném ponoření po dobu stanovených dní [kg],

A_t celková plocha povrchu zkušební tělesa vystaveného vodě [m²].

Zajímavou skutečností je fakt, že tato nasákavost se měří v jednotkách kg·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. Požadavek na limitní nasákavost lze výborně splnit pro velmi malé tloušťky výrobků, pro velké tloušťky obtížně, protože procentuálně musí mít daleko menší nasákavost. Výrobky z hydrofilních vln nasáknou vodu v řádu několika sekund, nikoliv hodin a dní, jak popisuje výrobní norma. Pro hydrofilní vlny byly tedy nad rámec evropské výrobní normy vybrány jiné postupy, které více odpovídají tomuto specifickému materiálu.

Důležité parametry hydrofilní vlny nad rámec evropské výrobní normy

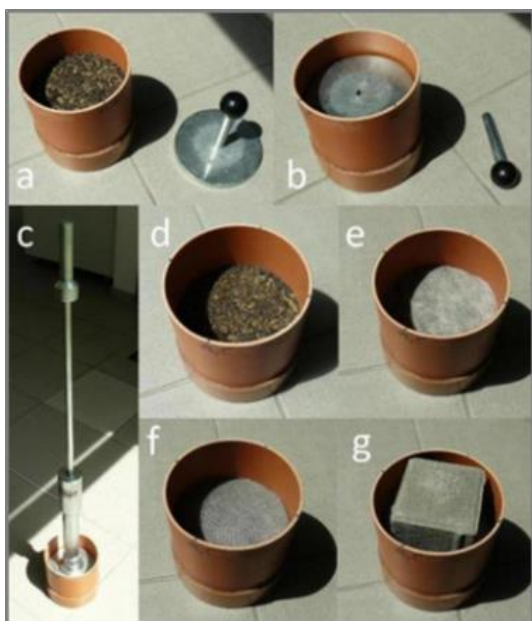
Pro dokumentaci specifických vlastností hydrofilní minerální vlny byly vybrány ještě tři další parametry.

³¹ ČSN EN 1609. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

³² ČSN EN 12087. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

Maximální vodní kapacita a vodopropustnost

Tato metoda se používá především pro střešní substráty, ale lze podle ní měřit také minerální vlnu. Legislativním základem je komplexní německá oborová norma FLL,³³ která v příloze č. 2 definuje postup měření maximální vodní kapacity a vodopropustnosti. Základem pro měření jsou testovací nádoby s průměrem 148 mm a výškou 165 mm (Obr. 14). Při měření je nutné zkušební nádoby zcela vyplnit, čímž je v případě použití minerální vlny kladen zvýšený důraz na pečlivost práce. Pokud by voda protékala netěsnostmi, ovlivnilo by to výsledky.



Obr. 13 – Proctorovo hutnicí kladivo



Obr. 14 – Detail nádob Proctorova hutnicího kladiva

Po naplnění a zhutnění zkoumaného materiálu v nádobách se provádí vážení suchého vzorku a stanovení jeho zhutněného objemu. Poté je vzorek 24 hodin sycen vodou. Zkušební postup následně vyžaduje dvouhodinové odkapávání skrze perforace ve spodní části testovací nádoby. Výsledná maximální vodní kapacita se stanovuje dle rovnice (2).

$$WK_{max} = \frac{(m_{wk} - m_f) \cdot 100}{V \text{ nebo } V_{wk}} \quad [\%] \quad (2)$$

kde: m_{wk} je hmotnost vzorku po vlhčení [g],

m_f hmotnost vzorku za sucha [g],

V objem zhutněného vzorku [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$],

V_{wk} opravený objem vzorku, pokud při vlhčení dojde k bobtnání [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$].

³³ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

Testování vodopropustnosti probíhá také ve výše popsanych nádobách, na vzorku připraveném podle stejného postupu. Při tomto testu se plně saturovaný vzorek doplní vodou až do výše 45 mm nad horní rovinu vzorku a následně se měří čas poklesu hladiny až na úroveň 35 mm nad horní rovinu vzorku dle rovnice (3).

$$mod. K_f = \frac{1}{t} \cdot \frac{h}{h+4,0} \quad [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

kde: h je výška zhutněného materiálu [cm],

t doba klesání vodní hladiny v nádobě z úrovně 45 mm do 35 mm [s].

Schopnost pro proudění vody

Tato zkouška se používá především pro geotextilie a nopové fólie, nicméně výrobky z hydrofilní minerální vlny lze tímto způsobem měřit také. Tento parametr je důležitý pro stanovení drenážních vlastností vegetačního souvrství.

Legislativním základem je evropská norma ČSN EN ISO 12958.³⁴ Podle rovnice (4) se při 20 °C vymezuje pro každý stanovený hydraulický spád a napětí schopnost pro proudění vody v rovině $q_{s,g}$.

$$q_{s,g} = \frac{V \cdot R_T}{W \cdot t} \quad [\text{l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

kde: $q_{s,g}$ je schopnost pro proudění vody v rovině na jednotku šířky při definovaném napětí a hydraulickém spádu [$\text{l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$],

V průměrný naměřený objem [l],

R_T korekční faktor pro přepočet na teplotu vody 20 °C [–],

W šířka zkušební vzorku [m],

t doba trvání testu [s].

Schopnost pro proudění vody se stanovuje pro různé sklony střechy a pro různá napětí. Zpravidla se počítá s napětím 10 kPa pro extenzivní střechy, 20 kPa pro intenzivní střechy (viz rozdělení v kapitole 1.3).

1.3 Standardy a rozdělení vegetačních střech

Současná česká technická norma, která pojednává o střechách obecně a která se okrajově zabývá také vegetačními střechami, má označení ČSN 73 1901.³⁵ Norma

³⁴ ČSN EN ISO 12958. *Geotextilie a výrobky podobné geotextiliím: Zjišťování schopnosti pro proudění vody v jejich rovině*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

udává základní terminologii, rozdělení a obecné požadavky na střešní konstrukce. Pokud by existovala speciální příloha o vegetačních střechách nebo by norma byla rozdělena na specifické části, jak je tomu např. v souboru tepelnětechnických ČSN 73 0540-X nebo aplikačních norem ČSN 72 7221-X, byla by situace pro projektanty mnohem snadnější. Takový dokument však zatím neexistuje, proto jsou projektanti při navrhování vegetačních střech odkázáni na doporučení zahraničních oborových norem z Německa,³⁶ Rakouska,³⁷ Švýcarska,³⁸ Velké Británie,³⁹ případně lze přihlídnout i k publikacím typu Ozeleněné střechy⁴⁰ apod.

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 ZinCo⁴¹ a Optigreen.⁴²

Střechy všech sklonů je možné v současnosti ozelenit. Je ale nutné si uvědomit, že extrémně malý, případně extrémně velký sklon navrhování výrazně zkomplikuje. Střechy s nulovým nebo velmi malým sklonem (cca 1 %) budou dlouhodobě vykazovat větší množství vody, které pro nejčastěji používané suchomilné rostliny není zcela optimální. Zvýšená vlhkost bude dávat živnou půdu mechům, které v těchto podmínkách mohou začít vytlačovat původně osazené suchomilné rostliny. Zvýšené množství vody bude také samozřejmě více zatěžovat i nosnou konstrukci.

Rozdělení sklonů střech vychází ze střešní normy.⁴³ Pro vegetační střechy je vhodnější doplněné členění šikmých střech na další dva podtypy (Tab. 3).

³⁵ ČSN 73 1901. *Navrhování střech – Základní ustanovení*. Změna 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

³⁶ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

³⁷ ÖNORM L 1131. *Gartengestaltung und Landschaftsbau – Begrünung von Dächern und Decken auf Bauwerken - Anforderungen an Planung, Ausführung und Erhaltung*. Wien: Austrian Standards (AS), 2010.

³⁸ SIA 312. *Begrünung von Dächern*. Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2013.

³⁹ 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.

⁴⁰ ČERMÁKOVÁ, B., MUŽÍKOVÁ, R. *Ozeleněné střechy*. Praha: Grada, 2009. edice stavitel. ISBN 978-80-247-1802-6.

⁴¹ ETA-13/0668. *European Technical Approval: Kits for Green Roofs*. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2013.

⁴² ETA-13/0534. *European Technical Approval: Kits for Green Roofs*. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2013.

⁴³ ČSN 73 1901. *Navrhování střech – Základní ustanovení*. Změna 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

Tab. 3 – Rozdělení střech podle jejich sklonu⁴⁰

Typ střechy	Sklon [°]	Sklon [%]
Plochá	do 5	do 8,75
Šikmá s mírným sklonem	5–20	8,75–36,40
Šikmá s velkým sklonem	20–45	36,40–100
Strmá	nad 45	nad 100

Střechy s velmi velkým sklonem budou odvádět dešťovou vodu poměrně snadno, nicméně takové střechy je nezbytné opatřit ochranou proti sesouvání půdy, případně dalších vrstev. Ideální sklon vegetačních střech je obecně doporučen v rozmezí 2–5°.

Velkou výhodou výrobků z hydrofilní minerální vlny je jejich tvarová stálost. Ideální je tedy použití ve strmých střechách či stěnách, kde by ozelenění se substrátem bylo výrazně komplikovanější.

Rozdělení vegetačních střech podle náročnosti údržby

Rozdělení podle náročnosti údržby je velmi často publikováno a obecně uznáváno. Je charakterizováno nejen tloušťkou vegetačního souvrství a použitými rostlinami, ale hlavně způsobem následné údržby. Neexistují přesné hranice, které toto rozdělení určují, nicméně základní struktura je uvedena v Tab. 4.

Tab. 4 – Rozdělení vegetačních střech podle náročnosti údržby

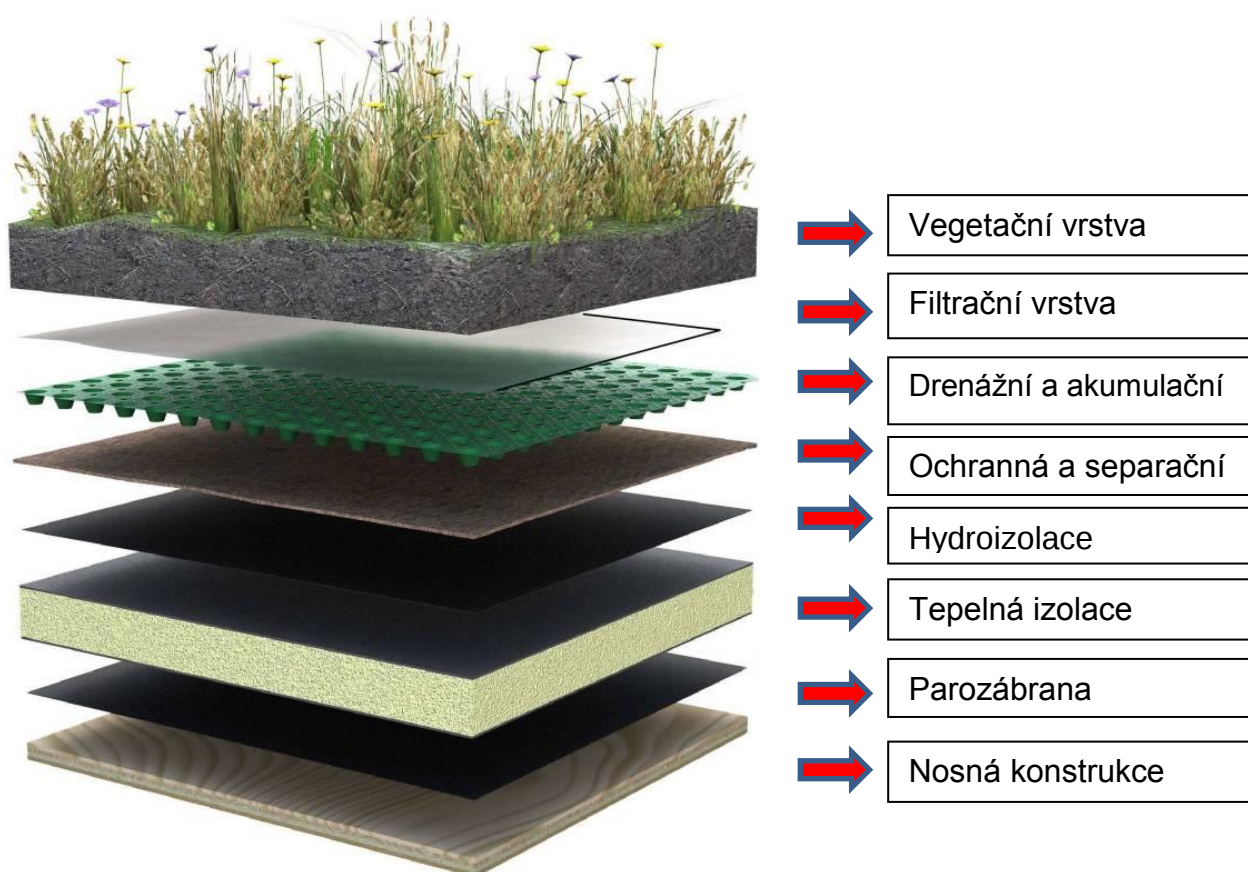
Název	Extenzivní	Polointenzivní (jednoduchá intenzivní)	Intenzivní
Obrázek			
Tloušťka [cm]	4–20 (obvykle 10)	12–100 (obvykle 20)	15–200 (obvykle 35)
Druh vegetace	rozchodníky, netřesky, skalničky	trvalky, nízké keře	bez omezení, včetně stromů
Náročnost údržby	snadná	střední	vysoká
Závlaha	ne	většinou ne	ano
Pochůznost	ne	většinou ano	ano
Zatížení [kN·m ⁻²]	10	20	20–100

Extenzivní vegetační střechy jsou převážně řešeny jako pohledové, s přístupem pouze pro pracovníky údržby. Intenzivní střechy jsou naopak většinou pochozí, často ve stylu plnohodnotné střešní zahrady. Polointenzivní střechy kombinují výhody obou typů střech – nenáročnou údržbu i neotřelou zeleň. Hydrofilní minerální vlny jsou vhodné do všech těchto typů střech.

1.4 Požadavky na vrstvy vegetační střechy při využití hydrofilních vln

Základním požadavkem vegetačních střech je poskytnout vhodné podmínky pro život střešním rostlinám. Navazujícími požadavky jsou dále bezpečné odvádění či zadržování dešťové vody a ochránění střešní konstrukce před prorůstáním kořenů, které mohou narušit hydroizolaci či jiné části budovy.

Některé materiály použité pro specifickou funkci mohou mít i další význam, čímž dochází ke sdružování a zjednodušování vegetačního souvrství. Toto pravidlo platí obzvláště pro výrobky z hydrofilních minerálních vln. Rozdělení vegetačního souvrství na jednotlivé vrstvy je uvedeno na ilustračním schématu (Obr. 15).⁴⁴



Obr. 15 – Schéma vegetační střechy bez hydrofilní vlny⁴⁴

⁴⁴ GREEN ESTATE. *Material Supply* [online]. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: http://www.greenestate.org.uk/material_supply22.

Vegetační vrstva a její mocnost

Vegetační vrstva slouží k zakořenění střešní vegetace. Musí mít správné biologické parametry, aby v ní nasázené rostliny dobře rostly, a zároveň musí mít další technické parametry, které souvisejí s funkcí vegetační střechy. Nejčastějším materiálem vegetační vrstvy je substrát. Substrát lze částečně nebo zcela nahradit alternativními materiály, jakými jsou např. hydrofilní minerální vlny. Jejich výčet je uveden v kapitole 1.5.

Tloušťka vegetační vrstvy je určena rostlinami v projektu architektonického řešení a omezena technickými podmínkami, jako jsou nosnost střechy, její sklon apod. Doporučené tloušťky jsou uvedeny v Tab. 5. Hodnoty vycházejí z německé oborové normy FLL,⁴⁵ která vyšla i v českém překladu.⁴⁶ Regionální klimatické poměry a specifické podmínky objektu se někdy mohou lišit, a proto je třeba zvolit přiměřeně větší nebo menší tloušťky v doporučeném rozpětí. Vliv na tloušťku vegetační vrstvy má i sklon střechy, pro větší sklony je možné tloušťku snížit.

Tab. 5 – Doporučené tloušťky vegetační vrstvy dle FLL

Druh vegetace / substrát v cm		4	6	8	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	150	200	
EXTENZIVNÍ	Mechy, netřesky																							
	Mechy, netřesky, byliny																							
	Sedum, byliny, trávy																							
	Byliny, trávy																							
POLOINTENZIVNÍ	Trávy, byliny																							
	Divoké trvalky, dřeviny																							
	Dřeviny, trvalky																							
	Dřeviny																							
INTENZIVNÍ	Trávník																							
	Nízké trvalky a dřeviny																							
	Středně vysoké trvalky																							
	Vysoké trvalky a keře																							
	Velké keře a malé stromy																							
	Střední a vyšší stromy																							
	Vysoké stromy																							

⁴⁵ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

⁴⁶ DOSTÁLOVÁ, J. *FLL norma Dachbegrünungsrichtlinie*. Projekt Zelené střechy – naděje pro budoucnost. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně, 2010.

Norma FLL také uvádí požadavky na kvalitu vegetační vrstvy (Tab. 6). Tyto požadavky platí pro substráty, lze je však aplikovat také na materiály z hydrofilní minerální vlny. Na základě této tabulky byly po provedení podrobného měření vyhodnoceny jednotlivé výrobky z hydrofilní vlny. Výsledky jsou součástí kapitoly 4.1 a 4.2.

Hydrofilní minerální vlna neobsahuje v základním provedení žádné živiny. Pokud by se ale přesto objevily na trhu výrobky takto obohacené, obsah živin by měl splňovat doporučení dle Tab. 7.

Tab. 6 – Požadavky na kvalitu vegetační vrstvy dle FLL

	Intenzivní skladby	Extenzivní skladby	Jednovrstvé skladby
Obsah vyplavitelných částic [%]	< 20	< 15	< 10
Obsah organických součástí [g·l ⁻¹]	≤ 90	≤ 65	≤ 40
Vodopropustnost [mm·min ⁻¹]	0,3–30	0,6–70	60–400
Maximální vodní kapacita [%]	45–65	35–65	30–65 intenzivní 20–65 extenzivní
Obsah solí [g·l ⁻¹]	< 2,5	< 3,5	< 2,5 intenzivní < 3,5 extenzivní
Hodnota pH [–]	6,0–8,5		
Obsah vzduchu při maximálním nasycení vodou [%]	> 10		
Sléhavost substrátových rohoží při výchozí tloušťce 30–50 mm	max. 20 %		
Sléhavost substrátových rohoží při výchozí tloušťce > 50 mm	max. 10 mm		

Tab. 7 – Limitní hodnoty živin dle FLL

Živina	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		Mg	
Zkušební metoda	CaCl ₂	CAT	CAL	CAT	CAL	CAT	CaCl ₂	CAT
Živiny [mg/l]	< 80	< 80	< 200	< 50	< 700	< 500	< 200	< 200

Zpravidla se živiny doplňují uměle také pro substráty, protože prvotní dávka hnojiv vydrží přibližně jeden rok. Roční doporučená dávka živin je stanovena na 8 g(N)·m⁻² (čistý dusík) pro intenzivní ozelenění, 5 g(N)·m⁻² pro extenzivní ozelenění.

Filtrační vrstva

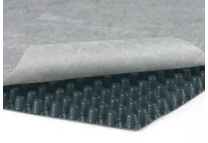
Tato vrstva separuje jemné částice substrátu a chrání tak drenážní vrstvu před ucpáním. Tvoří ji většinou netkaná geotextilie o plošné hmotnosti 100–200 g·m⁻². Důležitým parametrem filtrační vrstvy je její propustnost pro vodu kolmo k rovině, kterou popisuje norma ČSN EN ISO 11058.⁴⁷

Pokud jsou ve vegetačním souvrství nad drenážní vrstvou přítomny desky z hydrofilní minerální vlny, je použití filtrační fólie již zbytečné, protože minerální vlna jemné částice substrátu filtruje sama.

Drenážní vrstva

Drenážní vrstva primárně odvádí přebytek dešťové vody mimo vegetační vrstvu a tím chrání rostliny před přemokřením. To je důležité zvláště u extenzivních střech, kde je vegetace citlivější na přemokření a tento stav je pro ně často letální. Drenážní vrstva je obvykle tvořena děrovanou nopovou fólií z HDPE nebo neměkčeného PVC, případně prostorovou smyčkovou rohoží. Příklady nopových fólií jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 – Drenážní nopové fólie ze sortimentu f. Optigreen⁴⁸

Fólie Optigreen	FKD 10	FKD 25	FKD 40	FKD 60
				
Výška [mm]	10	25	40	60
Drenážní kapacita [l·s ⁻¹ ·m ⁻²]*	0,55	1,44	2,31	0,74
Maximální vodní kapacita [l·m ⁻²]	–	5	8,7	17**

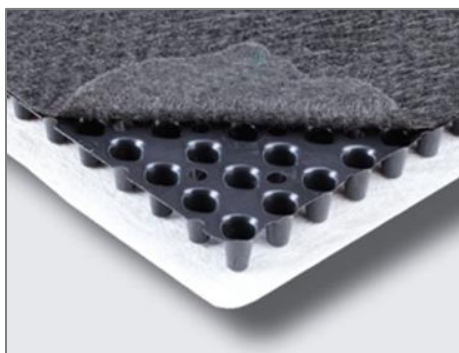
*Drenážní kapacita platí pro sklon 2 % **Množství vody po zasypání výplně z keramzitu

Do vegetačních střech se substráty se většinou používají drenážní fólie s doplňkovou hydroakumulační funkcí. Tyto fólie mají často implementovanou filtrační textilií, která brání ucpání nopů. Do střech s minerální vlnou jsou zcela dostačující fólie s obráceným

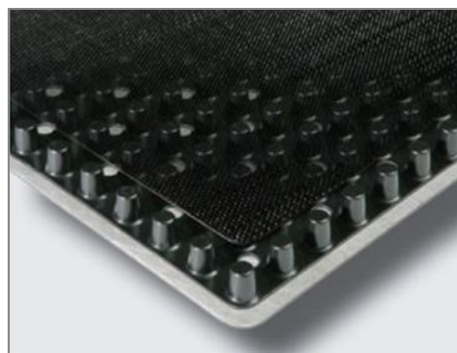
⁴⁷ ČSN EN ISO 11058. *Geotextilie a výrobky podobné geotextiliím - Zjišťování charakteristik propustnosti pro vodu kolmo k rovině, bez zatížení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

⁴⁸ OPTIGREEN. *Zelené střechy s optigreen produkty* [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <http://www.optigreen.cz/Products/Green-roofing.html>.

nopem, které slouží čistě k odvádění vody bez další hydroakumulační funkce. Hydroakumulační schopnost minerální vlny je totiž několikanásobně vyšší než u nopové fólie (kapitola 4).



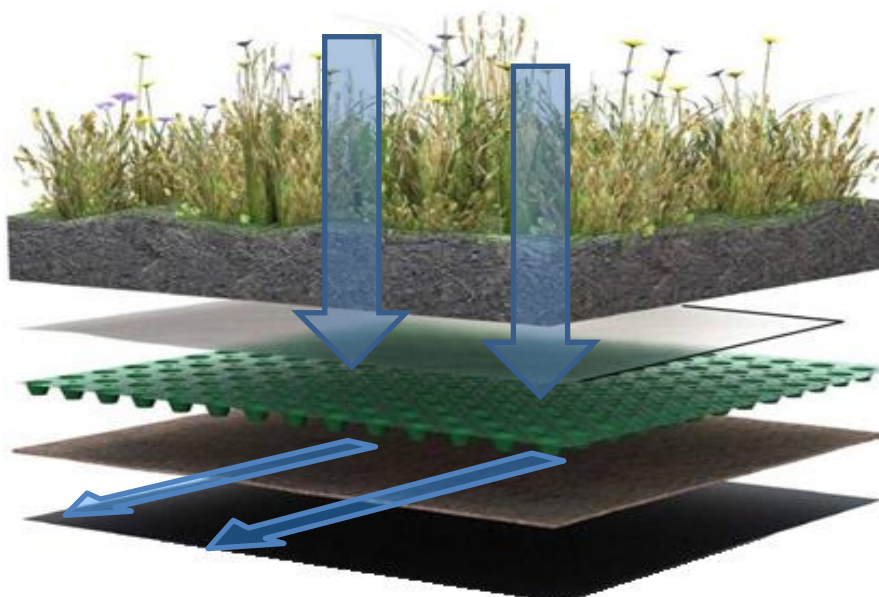
Obr. 16 – Detail drenážně-akumulační nopové fólie do vegetační střechy se substrátem



Obr. 17 – Detail drenážní nopové fólie do vegetační střechy s minerální vlnou

Drenážní vrstva musí splňovat vodopropustnost $180 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato vlastnost se zpravidla uvádí u substrátů, výjimečně také u hydrofilních minerálních vln. U nopových fólií se obvykle dokládá drenážní schopnost pomocí schopnosti pro proudění vody (podrobně popsáno v kapitole 1.2). Střecha musí spolehlivě odvádět vodu i z přívalových dešťů. Ukázka výpočtu je součástí kapitoly 4.7.

Základní princip bezpečného pohybu vody je znázorněn na Obr. 18.



Obr. 18 – Žádoucí pohyb dešťové vody ve vegetační střеше⁴⁹

⁴⁹ GREEN ESTATE. *Material Supply* [online]. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: http://www.greenestate.org.uk/material_supply22.

Voda prosakuje vegetační vrstvou směrem k hydroizolaci. Volný odtok vody zajišťuje drenážní vrstva nebo v případě jednovrstvých skladeb vrstva vegetační.

Hydroakumulační vrstva

Tato pomocná vrstva slouží k zadržování vody, čímž prospívá růstu rostlin a zpomaluje odtok dešťové vody do městské kanalizace. Je používána tam, kde vegetační vrstva nemá dostatečnou kapacitu nedokáže pojmout a udržet vodu pro rostliny nebo by spolu s drenážní vrstvou odváděla vodu příliš rychle (např. u šikmých vegetačních střeche).

Do této zásobárny vody by měly mít rostliny možnost prokořenit, neměla by tedy být od vegetační vrstvy oddělena kořenovzdornou vrstvou. Samostatná hydroakumulační vrstva může být tvořena materiály s maximální nasákavostí, např. hydrofilní minerální vlnou nebo výrobky jí podobnými (viz kapitola 1.5)

Ochranná vrstva

Ochranná vrstva brání hydroizolaci proti mechanickému poškození. Plošné drenážní prvky, jako jsou nopové fólie nebo prostorové smyčkové rohože, by se časem mohly do hydroizolace protlačit. Dalším důvodem pro použití ochranné vrstvy je složitost a velikost některých střeche, zvláště střeche intenzivních, v kombinaci s terasami. Těžké palety se střešním materiálem, např. s betonovou dlažbou, obrubníky či různými plechy, by mohly hydroizolaci poškodit již během prováděcích prací.

U novostaveb je ochranná vrstva tvořena geotextilií o plošné hmotnosti minimálně $300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. V případě použití jednovrstvých skladeb z hydrofilní minerální vlny již zpravidla není nutné ochrannou vrstvu u novostaveb použít.

U rekonstrukcí musí být ochranná vrstva doplněna o speciální fólii odolnou proti prorůstání kořenů. Tato vrstva se někdy nazývá kořenovzdorná vrstva. Některé rostliny mohou mít kořeny velmi agresivní, proto se používá dvoustupňová ochrana. Kromě značné mechanické pevnosti je povrch ochranné fólie ošetřen tak, aby směřoval kořeny od fólie. Tato fólie může být na bázi mPVC, případně i z jiných materiálů. Při aplikaci je nutné fólii svařovat nebo vzájemně překrývat s přesahem alespoň 250 mm. Vzniklý přesah musí být navíc lepen páskami či tmelem speciálně určeným k tomuto účelu.

Separační vrstva

Díky separační vrstvě jsou od sebe odděleny vrstvy, které by se mohly vzájemně negativně ovlivňovat. Používá se např. u hydroizolací, jež by poškozovaly EPS, nebo u vrstev s rozdílnou tepelnou roztažností. Tuto vrstvu je možné vytvořit např. PE fólií

tl. 0,2 mm, s plošnou hmotností cca 200 g·m⁻². Minerální vlna nepotřebuje žádné speciální separace.

Hydroizolace

Hydroizolace chrání tepelnou izolaci a prostory pod střešním pláštěm před vodou. Pro novostavby se používají vyztužené hydroizolace odolné vůči prorůstání kořenů. Nabídka dostupných materiálů je velmi rozmanitá (Tab. 9).

Tab. 9 – Doporučené typy hydroizolací odolné vůči prorůstání kořenů⁵⁰

Materiál		Vyztužení	Tloušťka [mm]
Modifikované asfaltové pásy		měděná vložka 0,1 mm vložka z polyesterové rohože vložka ze skelné rohože či tkaniny zpražené nosnou vložkou	~ 5
Termoplastické fólie s nízkým obsahem asfaltů		vložka ze skelných vláken vložka ze skelné tkaniny a skleněné mřížky	2–3
Hydroizolační fólie	mPVC	vložka ze skelných vláken	0,8–1,5
	PEC	vložka z polyesterové rohože	1,5
	EVA	vložka ze skelných vláken	1,2
	FPO	vložka ze skelné rohože vložka z polyesterové rohože	1,2–2,0
	EPDM	vložka z polyesterové rohože	1,2

Tepelná izolace

Tepelná izolace zabraňuje unikání tepla z budovy. Je nutné použít takové typy izolací, které vydrží tlak vodou nasycené zeminy, hydroakumulačních vrstev, vzrostlých rostlin, případně další zátěže. Vegetační střechy se projektují většinou na velice únosné tepelné izolace, např. z extrudovaného polystyrenu. Jednovrstvé extenzivní vegetační střechy, zvláště pokud jsou tvořeny lehkou hydrofilní minerální vlnou, lze projektovat i na méně únosné tepelné izolace. Obvyklé pevnosti tepelných izolací jsou dokumentovány v Tab. 10.

⁵⁰ ČERMÁKOVÁ, B., MUŽÍKOVÁ, R. *Ozeleněné střechy*. Praha: Grada, 2009. edice stavitel. ISBN 978-80-247-1802-6.

Tab. 10 – Rozpětí pevností v tlaku tepelných izolací, při 10% stlačení

Izolační materiál	Pevnost v tlaku CS	Izolační materiál	Pevnost v tlaku CS
Minerální vlna	15–70 kPa	XPS	200–700 kPa
EPS	50–200 kPa	Pěnové sklo	400–1600 kPa
PUR, PIR	100–150 kPa		

Parozábrana

Parozábrana zamezuje pronikání vodní páry do konstrukce střechy, především do tepelné izolace. Pro vegetační střechy nejsou uvedeny žádné speciální požadavky.

Nosná konstrukce

Nosná konstrukce musí přenést zatížení od celé střechy, včetně vegetačního souvrství a užitného zatížení. Už při projektování je nutné zohlednit i technologii provádění střechy. Při kupení substrátu na staticky nepřipravené konstrukce hrozí propadnutí střechy. Obr. 19 a Obr. 20 dokumentují právě tuto nešťastnou událost.



Obr. 19 – Propadnutí střechy garáží bytového domu Trinity, Bratislava, 2012



Obr. 20 – Propadnutí střechy supermarketu, Riga, Lotyšsko, 2013

Výhoda výrobků z hydrofilní vlny spočívá v tom, že se dodávají vždy suché, s objemovou hmotností $70\text{--}160\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je výrazně méně než hmotnost suchého substrátu (cca $450\text{--}1000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). I při koncentrovaném skladování na jednom místě střechy je riziko propadnutí střechy daleko menší než u substrátů.

Doplňující požadavky

U všech typů vegetačních střech je nutná údržba. V návrhu je tedy nezbytné počítat s přístupovými místy, vodovodní přípojkou a bezpečnostními prvky pro pracovníky údržby (vodicí lanka nebo zábradlí). U střech s hydrofilní minerální vlnou nižší pevnosti je nutné počítat i s roznášecími chodníčky, protože ne všechny desky jsou pochozí.

1.5 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.

Hydrofilní minerální vlna

V České republice jsou nabízeny deskové výrobky ze sortimentu firmy Isover (Tab. 11) nebo rolované výrobky ze sortimentu firmy Knauf Insulation (Tab. 12). V zahraničí to jsou například výrobky firmy Rockwool (Tab. 13) či Nophadrain (Tab. 14).

Tab. 11 – Deskové výrobky z hydrofilní vlny Isover⁵¹

Výrobek	Tloušťka výrobku [mm]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Ilustrační obrázek
Cultilene běžný panel	75, 100	70–80	
Cultilene zpevněný	50	110–160	

Tab. 12 – Roloované výrobky z hydrofilní vlny Knauf Insulation⁵²

Výrobek	Tloušťka výrobku [mm]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Ilustrační obrázek
Green Roll Standard	20, 40	100	
Green Roll High	20, 40	neuvedeno	

Tab. 13 – Deskové výrobky z hydrofilní vlny Rockwool⁵³

Výrobek	Tloušťka výrobku [mm]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Ilustrační obrázek
Rockwool Markplate	30–100	neuvedeno	

⁵¹ ISOVER. *Isover pro systémy vegetačních střech*. Praha: Isover, 2013.

⁵² KNAUF INSULATION. *Urbanscape Green Roll* [online]. [cit. 2015-06-03]. Praha: Knauf Insulation Trading, 2013. Dostupné z <http://www.knaufinsulation.cz/sites/cz.knaufinsulation.net/files/technicky-list/Green-Roll.pdf>.

⁵³ ROCKWOOL. *Rockwool Markplate* [online]. [cit. 2015-06-03]. Oslo: AS Rockwool, 2014. Dostupné z: <http://www.rockwool.no/produkter/u/2011.product/1685/byggisolasjon/markplate>.

Tab. 14 – Deskové výrobky z hydrofilní vlny Nophadrain⁵⁴

Výrobek	Tloušťka výrobku [mm]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Ilustrační obrázek
ND SM-25 ND SM-50	25 50	80	
ND WSM-50	50	120	

Ostatní výrobky, které by bylo možné označit jako hydrofilní minerální vlna, jsou určeny pro zemědělské účely. Jejich technické vlastnosti nejsou veřejně publikovány, proto jsou zde uvedeny pouze obchodní názvy. Jedná se především o značky Grodan, Hortisil, Argo, Pargo a další.

Polyuretanové desky

Použití polyuretanu pro zemědělské účely bylo zkoumáno již v 80. letech v Československé republice a praktické zkušenosti byly dokonce uveřejněny v publikacích dostupných také pro laickou veřejnost.⁵⁵ 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 (Tab. 15). Tyto desky dobře odvádějí vodu, zároveň dokážou akumulovat vodu podobně jako hydrofilní minerální vlna.

Tab. 15 – Drenážně-akumulační desky ze sortimentu f. Icopal⁵⁶

Desky Icoflor D30				Ilustrační obrázek
Tloušťka [mm]	30	Objemová hmotnost za sucha [kg·m ⁻³]	125	
Plošná hmotnost při nasycení vodou [kg·m ⁻²]	22	Maximální nasákavost [%]	66	

⁵⁴ NOPHADRAIN. *Productoverzicht* [online]. [cit. 2015-06-03]. Kerkrade: Nophadrain BV, 2015. Dostupné z: http://www.nophadrain.nl/media/174069/06_nl_productbrochure_09_2015_web.pdf.

⁵⁵ TAVLINOVOVÁ, G., DIENSTBIER, J. *Zelený domov*. Praha: Lidové nakladatelství, 1988. ISBN 26-017-88.

⁵⁶ ICOPAL. *Dokumenty A-Z* [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: http://www.icopal.cz/uploads/ke%20stazeni/dokumntety-AZ/Icoflor__VEGETA%C4%8CN%C3%8D%20DESKA.pdf.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

V širším kontextu se disertační práce zabývá deskami z hydrofilní minerální vlny pro vegetační střechy. Byly stanoveny následující hlavní a vedlejší cíle:

Hlavní cíle:

- analýza měřitelných vlastností hydrofilní minerální vlny jako specifického materiálu z pohledu legislativního začlenění a komparace dostupných dat existujících výrobků;
- laboratorní měření fyzikálních vlastností nových výrobků v souladu se současnou legislativou;
- ageing (stárnutí) – analýza změn vlastností materiálu ze vzorků odebraných v různých fázích životního cyklu z reálných střech při experimentálním měření zejména těchto měřitelných veličin:
 - pevnost v tlaku;
 - součinitel tepelné vodivosti;
 - maximální vodní kapacita;
 - vodopropustnost;
- ověření hypotézy hydroakumulace na reálném modelu konstrukce pultové vegetační střechy:
 - analýza schopnosti hydroakumulace výrobků z hydrofilní minerální vlny zabudovaných ve střeše a komparace se substrátovou alternativou na jednom experimentálním modelu;
 - stanovení reálných součinitelů odtoku vody ze střechy;
- vyhodnocení adaptace rostlin v různých výrobcích z hydrofilní minerální vlny;
- kvantifikace dopadů výroby, použití a konce životního cyklu výrobků z hydrofilní vlny na životní prostředí metodou LCA a komparace s ostatními materiály určenými 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

Výběr zvolených vědeckých metod podléhá stanoveným cílům práce tak, aby bylo umožněno jejich dosažení. Jedná se o kombinaci experimentálních, analytických, dedukčních a výpočtových metod.

3.1 Experimentální modely 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 (Obr. 21, 20). Model 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.



Obr. 21 – Sestavení prvního modelu extenzivní ploché střechy (6/2013)



Obr. 22 – Osazování prvních rostlin do modelu extenzivní ploché střechy (6/2013)

Model 2: Materiálový model pro výzkum ageingu (stárnutí)

Druhý model byl sestaven v květnu 2014 (Obr. 23) a měl podobný účel jako model první. Na rozdíl od prvního modelu byly použity pevnější výrobky (50mm desky minerální vlny o objemové hmotnosti $120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Kromě adaptace vzrostlých rostlin se na něm testovala také klíčivost semen trávy. Prvotní myšlenkou bylo ověření odolnosti tužšího materiálu pro intenzivní využívání (hustší vlny mají vyšší pevnosti). Model dále

sloužil k odebrání vzorků na další experimenty. Testovala se varianta desek na nopové fólii (levá část Obr. 23, detail Obr. 24) i volně ložené zdvojené desky na terénu (pravá část Obr. 23).



Obr. 23 – Sestavení druhého modelu z vysokogramážové vlny (5/2014)



Obr. 24 – Detail modelu po pěti měsících (10/2014)

Model 3: Pultová střecha garážového přístřešku

Model byl sestaven v červnu 2014 (Obr. 25). Jedná se o reálnou pultovou střechu v Brně Tuřanech o rozměrech 5,6 × 5,6 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 (Obr. 26). Součástí modelu je i soustava měřicích přístrojů pro měření hydroakumulace a součinitele odtoku.



Obr. 25 – Sestavení třetího modelu pro experiment hydroakumulace (6/2014)

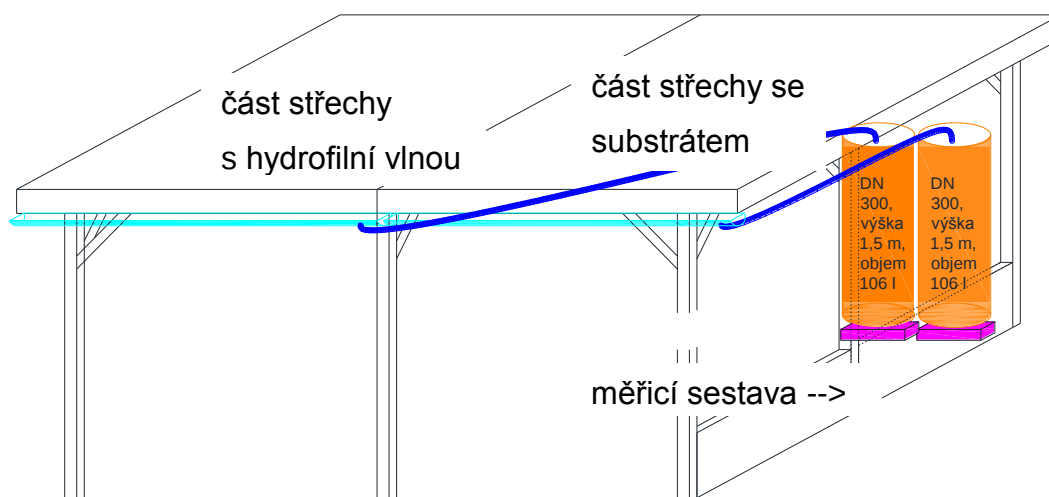


Obr. 26 – Třetí experimentální model – pohled shora (6/1014)

3.2 Ověření hypotézy hydroakumulace a určení součinitele odtoku C

Při experimentálním ověřování schopnosti hydroakumulace dešťové vody ve vegetační střeše bylo použito dedukční metody. Chování vegetačních souvrství se substráty je dostatečně dokumentováno a jeho popis je součástí norem i příruček,

jež se zabývají navrhováním vegetačních střech (kapitola 1.3). Podobně jako substrát má i hydrofilní minerální vlna schopnost akumulovat vodu, jak je dokumentováno na laboratorním měření ve výsledkové části práce (kapitola 4.1). 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, dále pak probíhalo kontrolní měření se substrátem ve druhé části modelu. Schéma měření je znázorněno na Obr. 27.



Obr. 27 – 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 (Tab. 16).

Vlastní měření probíhalo tak, že odtékající dešťová voda byla ze střechy odváděna do sběrných nádob (Obr. 30), pod kterými byla umístěna hmotnostní čidla s datalogerem (Obr. 29). Sběrné nádoby byly vyrobeny z PVC trubek DN 300 o kapacitě 106 l. Hmotnostní čidla byla připevněna ke speciálním stojanům (Obr. 28).



Obr. 28 – Podstavec s hmotnostním čidlem



Obr. 29 – Měřicí sestava s datalogerem



Obr. 30 – Celkový pohled na nádoby

Tab. 16 – Použité přístroje pro měření hydroakumulace

Meteostanice TFA 35.1075 NEXUS (srážkoměrné čidlo) ⁵⁷		
	přesnost měření	± 5 %
	rozlišení	0,8 mm
	interval měření	10 s
	paměť	3 000 hodnot
Hmotností čidlo AHLBORN K25 ⁵⁸		
	oblast měření	1 kN
	citlivost měření	0,1 N
	přesnost měření	± 0,1 %
	použitelnost při teplotách	-10 až +70 °C
Univerzální měřicí přístroj, dataloger ALMEMO 2390-5S ⁵⁹		
	počet zapojitelných čidel	3 ks
	paměť	50 000 hodnot

*Hmotnostní čidla byla financována z grantu specifického výzkumu FAST-S-14-2418, ostatní náležitosti velkého modelu s přispěním firem Isover, Rehau a GreenVille.

Součinitel odtoku C se stanovuje podle rovnice (5).

$$C = \frac{\text{množství vody, která ze střechy odteče za určenou dobu}}{\text{množství vody, která do střechy naprší za určenou dobu}} \quad [-] \quad (5)$$

Tabulkové hodnoty součinitelů odtoku jsou vyčísleny ve stavebních normách. Pro návrh vnitřní kanalizace jsou tabulkové hodnoty stanoveny v ČSN 75 6760⁶⁰ (Tab. 17). Pro návrhy vegetačních střech jsou ale často využívány i tabulkové hodnoty z německé oborové normy FLL⁶¹ (Tab. 18). Evropská norma ČSN EN 12056-3⁶² konkrétní hodnoty

⁵⁷ NEXUS. *Poloprofesionální meteostanice TFA 35.1075* [online]. [cit. 2015-2-5]. Dostupné z: <http://www.meteoshop.cz/poloprofessionalni-meteostanice-tfa-351075-nexus-p-295.html>.

⁵⁸ AHLBORN. *Zug und Druckkraft Sensor K 25* [online]. [cit. 2015-2-5]. Dostupné z: <http://www.ahlborm.com/getfile.php?1441.pdf>.

⁵⁹ AHLBORN. *Multifunction measuring instrument ALMEMO® 2390-5 with data logger option* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.ahlborm.com/download/ba/eng/23905e.pdf>.

⁶⁰ ČSN 75 6760. *Vnitřní kanalizace*. Z1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

⁶¹ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

neuvádí a odkazuje pouze na národní předpisy. Pro střechy s hydrofilní minerální vlnou byl součinitel odtoku *C* určen experimentálně.

Tab. 17 – Součinitelé odtoku *C* dle ČSN 75 6760

Druh odvodňované plochy; druh úpravy povrchu	Sklon povrchu		
	Do 1 %	1–5 %	Nad 5 %
Střechy s vrstvou kačírku (štěrk) na nepropustné vrstvě	0,9	0,9	0,9
Střechy s propustnou horní vrstvou o tloušťce do 100 mm (vegetační střechy)	0,7	0,7	0,8
Střechy s propustnou horní vrstvou o tloušťce nad 100 do 250 mm (vegetační střechy)	0,4	0,4	0,5
Střechy s propustnou horní vrstvou o tloušťce nad 250 mm (vegetační střechy)	0,3	0,3	0,3
Sady, hřiště	0,1	0,15	0,2
Zatrávněné plochy	0,05	0,1	0,15

Tab. 18 – Součinitelé odtoku *C* dle FLL

Tloušťka souvrství	Sklon střechy < 5 %	Sklon střechy > 5 %
> 50 cm	0,1	–
25–50 cm	0,2	–
15–25 cm	0,3	–
10–15 cm	0,4	0,5
6–10 cm	0,5	0,6
4–6 cm	0,6	0,7
2–4 cm	0,7	0,8

Metodika experimentálního určení součinitele odtoku *C* se podle jednotlivých norem liší. Většina systémových skladeb vegetačních střech dostupných i v České republice používá německou metodiku FLL. Striktní postup měření vyžaduje testování na speciální lavici šíře 1 m, sklonu 2 %, umístěné v kryté hale. Testuje se model vegetační střechy bez rostlin, který je maximálně nasycen vodou po dobu 10 minut a poté je nechán 24 hodin v klidu. Takto připravený model je následně vystaven „normovému

⁶² ČSN EN 12056-3. *Vnitřní kanalizace – Gravitační systémy: Část 3: Odvádění dešťových vod ze střech – Navrhování a výpočet*. Z2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

deští“ o celkovém objemu $27 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ po dobu 15 minut. Poté se určí poměr mezi vodou, která vytekla ze střechy, a vodou, která do střechy napršela – viz rovnice (5). Tento postup však nejde uplatnit na připravený model vegetační střechy s hydrofilní vlnou, kde už je vzrostlá vegetace. Navíc 15minutový „normový“ déšť zmiňovaný v FLL neodpovídá situaci v České republice a je v rozporu s normou ČSN 75 9010,⁶³ kde jsou intenzivní deště pro návrh drenážních prvků vyčísleny odlišně.

Tab. 19 – Rozpor v uvažovaném množství srážek mezi českou a německou normou

Standard	Lokalita	Celkový srážkový úhrn po dobu 15 minut normového deště [mm]	Přepočítané hodnoty normového deště [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$]
ČSN 75 9010	Praha	19,5	0,0217
	Brno	16,5	0,0183
	Ostrava	17,8	0,0198
	Horské lokality (nad 650 m n. m.)	17,0	0,0189
FLL	Německo	27,0	0,0300

Metodika stanovení součinitele odtoku C podle evropské normy ČSN EN 12056-3⁶² je pro experimentální model vhodnější. Vychází z následujícího vzorce (6).

$$Q = i \cdot A \cdot C \quad [\text{l} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

kde: Q je odtok dešťových vod [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$] – neboli MNOŽSTVÍ VODY ZACHYCENÉ V AKUMULAČNÍCH NÁDOBÁCH;

i intenzita deště [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$] – neboli SKUTEČNÉ HODNOTY NAMĚŘENÉ SRÁŽKOMĚREM;

A účinná plocha střechy [m^2];

C součinitel odtoku [–] – V PŘÍPADĚ EXPERIMENTU CÍLOVÁ VELIČINA.

U pultových a šikmých střech je nutné přepočítat účinnou plochu střechy (7). Do výpočtu vstupuje i déšť hnaný větrem pod úhlem 26° ke svislé ose střechy (citace normy ČSN EN 12056-3).

⁶³ ČSN 75 9010. *Vsakovací zařízení srážkových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

$$A = L_R \cdot (B_R + \frac{H_R}{2}) \quad [\text{m}^2] \quad (7)$$

kde: L_R je délka okapu [m];

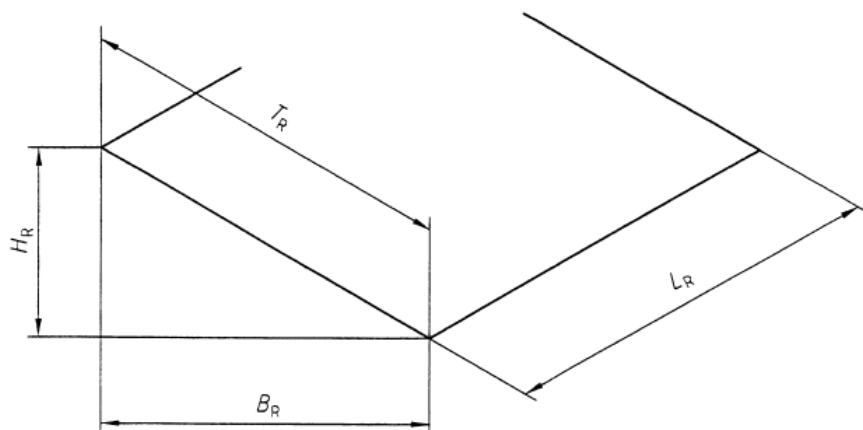
B_R vodorovný průmět střechy od střešního žlabu po hřeben střechy [m];

H_R výška střechy od střešního žlabu po hřeben střechy [m];

T_R vzdálenost mezi střešním žlabem a hřebenem střechy měřená podél střechy [m];

A účinná nepropustná plocha střechy [m^2].

Pro lepší pochopení vztahu (7) jsou jednotlivé části střechy popsány na Obr. 31.



Obr. 31 – Schéma šikmé střechy s popisem

Reálný součinitel odtoku C , pokud by se kalkulovalo s půdorysnými rozměry střechy, bude počítán z upravené rovnice (8).

$$C = \frac{Q}{r \cdot A} = \frac{\frac{F}{9,81}}{r \cdot L_R \cdot (B_R + \frac{H_R}{2})} \quad [-] \quad (8)$$

kde: F je síla vyvolaná tíhou akumulční nádoby [N]. Ostatní veličiny odpovídají popisu v rovnicích (6) a (7).

3.3 Analýza stálosti vlastností v čase (ageing)

Existují metody simulace umělého stárnutí výrobků. Jsou popsány např. ve standardech pro polyuretanové pěny,⁶⁴ kde se takto uměle „staří“ polyuretanová pěna na dobu 25 let. Během testu jsou zkušební vzorky uloženy po dobu 175 dní do prostředí s určenou teplotou a vlhkostí, následně se měří jejich vlastnosti, zejména součinitel tepelné vodivosti. Po tuto dobu dojde zpravidla k úniku pentanového nadouvadla a ke zvýšení součinitele tepelné vodivosti. V případě minerálních vln tuto metodu použít nelze (není zde žádný vzácný plyn, který by mohl unikat), proto jsou všechny vzorky hydrofilní vlny stařeny pouze přirozeně, čili nezrychleně. Ke změnám vlastností zde může docházet pouze z důvodu postupného prokořeňování rostlinami, ucpávání jemnými částicemi substrátu nebo kvůli strukturálním změnám pojiva, dlouhodobě vystavenému vodě.

Pro testy byly použity pouze vzorky z experimentálních modelů popsaných výše. Na přístrojích v Tab. 20 se měřily zejména tyto vlastnosti:

- součinitel tepelné vodivosti λ za sucha⁶⁵ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] pomocí R-Matic²;
- pevnost v tlaku CS [kN]⁶⁶ pomocí Mecmesin PFI 1000 N;
- maximální vodní kapacita WK_{max} [%]⁶⁷ pomocí Proctorova kladiva;
- vodopropustnost $mod.K_f$ [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]⁶⁷ pomocí Proctorova kladiva.

Tab. 20 – Použité přístroje pro měření vybraných vlastností v čase

R-Matic² 	Přístroj na profesionální měření součinitele tepelné vodivosti	
	přesnost měření	±1 %
	aktivní měřící plocha	305 × 305 mm
	kalibrace na tloušťku	50 mm
	kalibrace na hustotu	50,4 kg·m ⁻³

⁶⁴ ČSN EN 13165. *Tepelněizolační výrobky pro budovy – Průmyslově vyráběné výrobky z tvrdé polyuretanové pěny (PU) – Specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

⁶⁵ ČSN EN 12667. *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků: Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.

⁶⁶ ČSN EN 826. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Zkouška tlakem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

⁶⁷ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

Tab. 21 – Použité přístroje pro měření vybraných vlastností v čase – pokračování

Mecmesin PFI 1000 N	Přístroj na měření pevnosti v tlaku	
	kalibrace na sílu	1 kN
	relativní chyba měření q	-0,28 %
	nejistota měření W	0,32 %
Nádoby proctorova hutnicího kladiva	Nádoby na měření maximální vodní kapacity a vodopropustnosti	
	výška	148 mm
	šířka	165 mm

3.4 Kvantifikace a komparace dopadů na životní prostředí

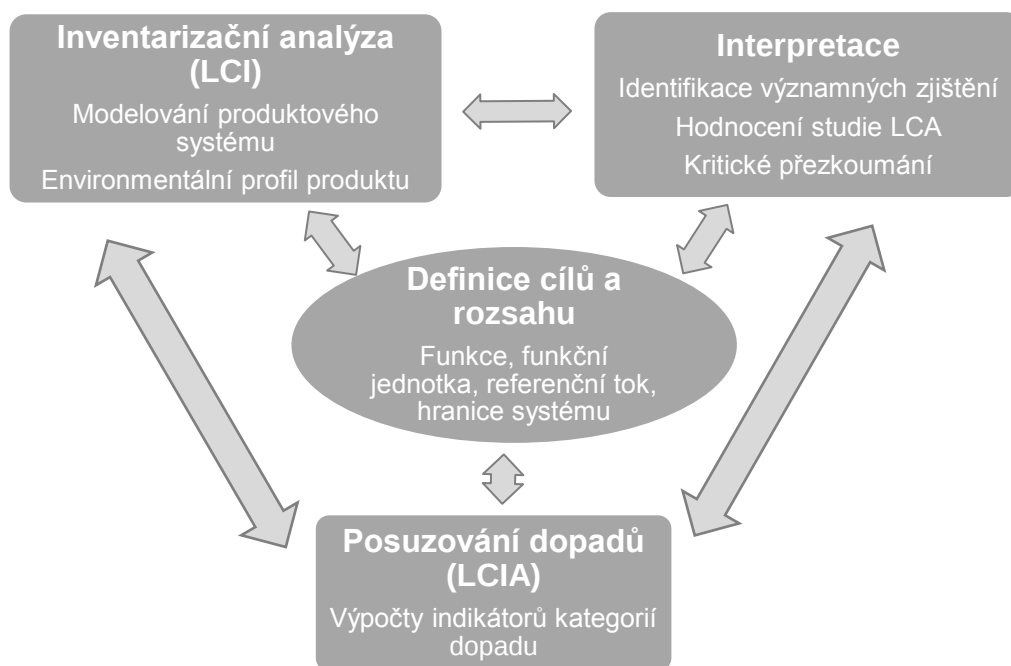
Nelze tvrdit, že každá vegetační „zelená“ střecha je ve skutečnosti ekologická. Svědčí o tom celá řada zahraničních prací a výzkumů, např. Bianchini–Hewage⁶⁸ nebo Kosareo–Ries.⁶⁹ Jednotlivé stavební materiály, konstrukční subsystémy i celé budovy lze hodnotit z pohledu jejich životního cyklu LCA (Life Cycle Assessment). Legislativním základem pro sestavení studie LCA jsou harmonizované evropské normy ČSN EN ISO 14040⁷⁰ a ČSN EN ISO 14044.⁷¹ Studie LCA je složena ze čtyř základních fází: stanovení cílů a rozsahu, inventarizační analýzy, posuzování dopadů a interpretace. Jejich vzájemný vztah je znázorněn na Obr. 32.

⁶⁸ 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.

⁶⁹ KOSAREO, L., RIES, R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*. Philadelphia: Elsevier, 2007, č. 42, vyd. 7, s. 2606–2613. ISSN 0360-1323.

⁷⁰ ČSN EN ISO 14040. *Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

⁷¹ ČSN EN ISO 14044. *Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Požadavky a směrnice*. Praha: Český normalizační institut, 2006.



Obr. 32 – Procesní schéma sestavování studií LCA⁷² (upraveno)

Obousměrné šipky znázorňují iterační podstatu přístupu sestavování jednotlivých LCA, kdy poznatky z jedné fáze mohou ovlivnit východiska fáze předcházející, kterou je třeba zpětně přehodnotit a pokračovat opět k fázi následující.

Definice cílů a rozsahu studie LCA

Cílem studie je dokumentace vlivu vegetační střechy na životní prostředí, zejména zjištění jak velkou roli hrají v tomto ohledu materiály na bázi minerální vlny oproti běžně užívaným výrobkům.

Funkční jednotka byla stanovena jako 1 m² celého vegetačního souvrství. Za referenční tok je obvykle považováno množství výrobku, které je třeba k naplnění funkce definované funkční jednotkou. V případě LCA studie vegetačních střech reprezentuje referenční tok množství substrátu potřebného k dostatečné funkci střechy (z pohledu vývoje rostlin, odvádění srážek apod.). Referenční tok bude následně upřesněn v kapitole 4.5, kde je uvedena rovněž podrobná inventarizační analýza vstupů.

Hranice systému určují množství procesů započítávaných do kalkulace a její geografický a časový rozsah. Obvyklé hranice systému při posuzování stavebních výrobků jsou uvažovány ve třech scénářích (Tab. 22).

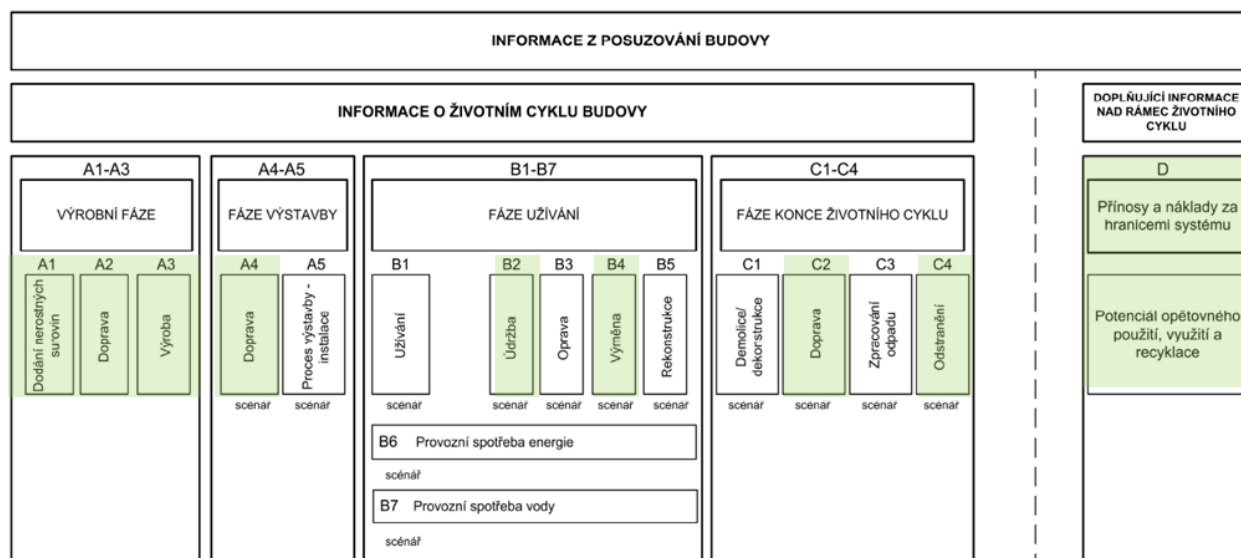
⁷² KOČÍ, V. *Posuzování životního cyklu – Life Cycle Assessment – LCA*. Chrudim: Ekomonitor, 2009.

Tab. 22 – Obvyklé hranice systému LCA

Anglický název	Český název	Započítaný životní cyklus výrobku
Cradle to gate	od kolébky po bránu závodu	zahrnuje těžbu surovin, dopravu na výrobu, vlastní výrobu, příp. skladování
Cradle to grave	od kolébky do hrobu	celý životní cyklus včetně fáze užití a konce životního cyklu
Cradle to site	od kolébky na místo stavby	zahrnuje těžbu surovin, dopravu na výrobu, vlastní výrobu, příp. skladování, expedici a dopravu na místo stavby

V této studii vegetačních střech je počítáno se všemi procesy a emisemi spojenými s výrobou, instalací, užíváním a koncem životního cyklu čili „Cradle to grave“. Pravidla jejich sestavení jsou popsána v normě ČSN 15804⁷³ a ČSN EN 15978.⁷⁴

Na schématu Obr. 33 jsou vyznačeny všechny možné a ve výpočtu uvažované fáze životního cyklu. Kromě A-fáze, která zahrnuje těžbu surovin, výrobu stavebního materiálů až k „bráně“ výrobního závodu, je dále hodnocena B-fáze LCA (vliv použití ve střeše – např. hnojení střešní vegetace), C-fáze LCA (skládání dosloužilých materiálů na konci jejich životního cyklu) a také doplňující D-fáze LCA (přínosy a náklady nad rámec běžného hodnocení, např. následná recyklace apod.).



Obr. 33 – Hranice systému, započítané fáze životního cyklu vegetační střechy⁷³

⁷³ ČSN EN 15804. *Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

⁷⁴ ČSN EN 15978. *Udržitelnost staveb – Posuzování environmentálních vlastností budov – Výpočtová metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

Některé fáze jsou z hranice systému odstraněny, např. B3 (Opravy). Uvažovaná délka zkoumaného životního cyklu je 20 let. Během této doby bude prováděna jen základní údržba. S velkými opravami se v tomto modelu nepočítá, pouze s částečnou náhradou substrátu po pěti letech, který je postupně odstraňován při údržbě vegetace (pletí). Energie na provoz ani provozní spotřeba vody nejsou započítávány, protože se jedná ve všech čtyřech případech o polointenzivní střechy, které jsou schopny základní množství vody akumulovat, a umělá zálivka proto není do hodnocení zahrnuta.

Regionální určení (pro kalkulaci správného energetického mixu a dopravy) je 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.

Jejich přesná skladba a popis je součástí kapitoly 4.5.

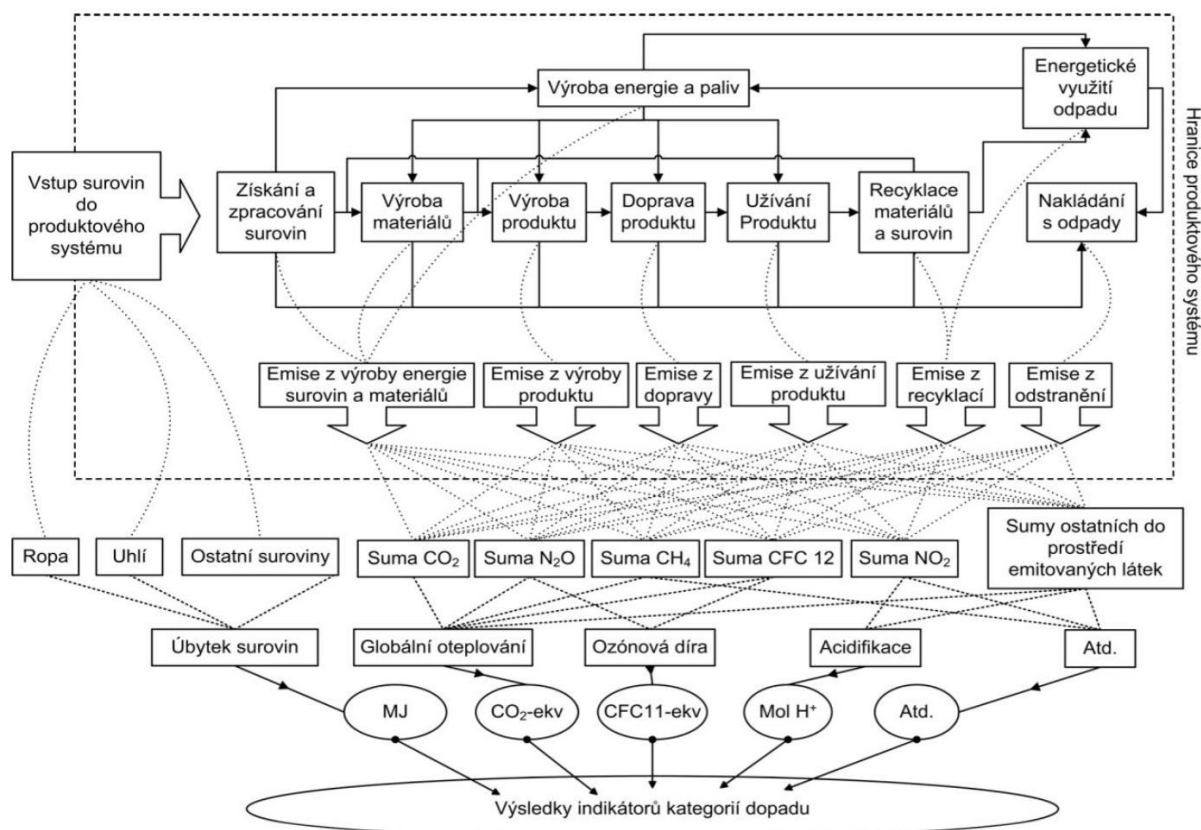
Výstupem inventarizační analýzy je sada hodnot shrnující materiálové a energetické toky produktového systému. Tato sada je nazývána inventarizační profil nebo ekovektor.

Výpočet je prováděn v programu GaBi 4 s databází Ecoinvent v. 2.0⁷⁵ a profesionální databází.⁷⁶ Schéma životního cyklu včetně vyznačení všech materiálových a energetických toků je naznačeno na Obr. 34.

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 práce.

⁷⁵ ECOINVENT CENTRE. *Ecoinvent v. 2.0*. Švýcarsko: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007. Dostupné z: <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>.

⁷⁶ PE INTERNATIONAL. *Professional Database*. Německo: PE International. Dostupné z: <http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases/professional>.



Obr. 34 – Schéma životního cyklu s vyznačením hranice produktového systému⁷⁷

Důležitým vstupem, který velmi ovlivní výpočet, je i uvažovaný energetický mix. Veškeré materiály v konstrukčním souvrství pocházejí z ČR a s tímto mixem (ve verzi z roku 2011) je tedy počítáno.

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 základní midpointové indikátory CML2001⁷⁸ (Tab. 23).

⁷⁷ KOČÍ, V. *Metoda posuzování životního cyklu* [online]. [cit. 2016-01-21]. Dostupné z: <http://www.unilevervzva.cz/udrzitelnost/35.metoda-posuzovani-zivotniho-cyklu>.

⁷⁸ 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>.

Tab. 23 – Kategorie dopadu na životní prostředí

Parametr	Jednotka
Potenciál globálního oteplování (<i>GWP</i>)	[kg CO ₂ ekv.]
Potenciál úbytku stratosférické ozonové vrstvy (<i>ODP</i>)	[kg CFC 11 ekv.]
Potenciál acidifikace půdy a vody (<i>AP</i>)	[kg SO ₂ ekv.]
Potenciál eutrofizace (<i>EP</i>)	[kg PO ₄ ³⁻ ekv.]
Potenciál tvorby přízemního ozonu (<i>POCP</i>)	[kg Ethene ekv.]
Potenciál úbytku surovin (<i>ADP, prvky</i>) pro nefosilní zdroje ^a	[kg Sb ekv.]
Potenciál úbytku surovin (<i>ADP, fosilní paliva</i>) pro fosilní zdroje ^a	[MJ] výhřevnost
^a Potenciál úbytku surovin je počítán a deklarován pro dva rozdílné indikátory: – <i>ADP, prvky</i> : zahrnují všechny neobnovitelné zdroje nerostných surovin (tj. kromě fosilních zdrojů); – <i>ADP, fosilní paliva</i> : zahrnují všechny fosilní zdroje.	

Vysvětlení pojmů kategorií dopadu – viz příloha Vymezení pojmů na konci práce.

Interpretace

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

Výsledky interpretace s komentáři jsou prezentovány v kapitole 4.5.

4 VÝSLEDKY PRÁCE A NOVÉ POZNATKY

4.1 Výsledky měření počátečních vlastností desek z hydrofilní vlny

Popis technických vlastností výrobků z hydrofilní minerální vlny, jenž je součástí dosud publikovaných prací, není z daleka dostatečný k tomu, aby na jeho základě bylo možné zodpovědně projektovat vegetační střechy. Byla proto provedena měření, která výrazně prohlubují informace o tomto specifickém materiálu. Nová měření probíhala v různých laboratořích a zkušebnách: v laboratořích výrobního závodu minerální vlny v Častolovicích, ve zkušebnách Centra stavebního inženýrství v Praze a na pracovišti Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví v Průhonicích.

Tab. 24 uvádí naměřené hodnoty vlastností hydrofilní vlny tak, jak byly certifikovány protokoly laboratoře CSI.^{79,80} Volba měřených veličin vychází z rešerše relevantních parametrů souvisejících s využitím hydrofilní vlny v konstrukcích vegetačních střech.

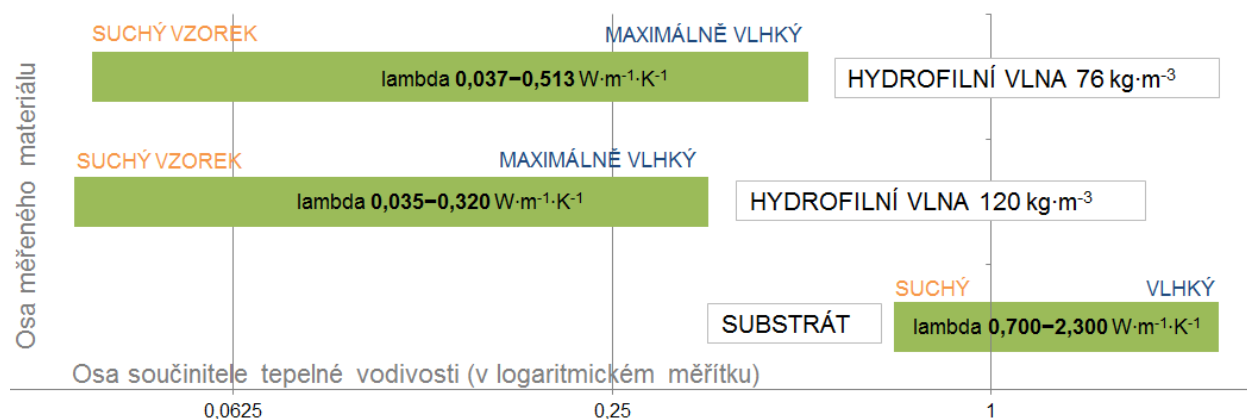
Tab. 24 – Počáteční vlastnosti hydrofilní minerální vlny podle certifikačních protokolů

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

⁷⁹ 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.

⁸⁰ 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.

Součinitel tepelné vodivosti hydrofilní minerální vlny se při maximální saturaci vodou blíží hodnotám, které platí pro vodu ($\lambda_{vody} = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Přesto jsou tyto naměřené hodnoty výrazně lepší než hodnoty substrátů, které jsou dokumentovány v ČSN 73 0540-3 (Obr. 35).⁸¹ Pokud by se nahradil substrát hydrofilní vlnou, tento rozdíl v součinitelích tepelné vodivosti by měl značný vliv na tepelné vlastnosti střechy.



Obr. 35 – Vývoj součinitele tepelné vodivosti na základě míry saturace vodou

Tepelněizolační funkce materiálů střešního souvrství bude přímo závislá na množství vody v nich obsažených. V praxi nelze předpokládat, že tyto materiály budou úplně vyschlé a budou mít maximální tepelněizolační schopnosti. V reálných podmínkách ale nelze počítat ani s druhým extrémem, kterým je maximální nasycení vodou během celého zimního období. Tab. 25 názorně ukazuje, jaké množství tepelné izolace by bylo možné ušetřit, kdyby se do součinitele prostupu tepla střechou započítala i plná náhrada substrátu za hydrofilní minerální vlnu. Modelový příklad počítá s intenzivní vegetační střechou s tloušťkou vegetační vrstvy 400 mm. Jsou zde kalkulovány dva scénáře. První je na straně bezpečnosti a počítá s maximální možnou vlhkostí materiálů, druhý počítá s částečnou vlhkostí materiálů 25 % (teoretická hodnota – odhad autora).

Problematika náhrady substrátu za hydrofilní minerální vlnu a její dopad na zvýšení tepelněizolační funkce střechy byla podrobněji řešena v odborném článku v časopise *Advanced Material Research*.⁸²

⁸¹ ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov: Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

⁸² 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.

Tab. 25 – Vliv substrátu a hydrofilní minerální vlny na tepelněizolační funkci střechy

Materiál vegetační vrstvy tloušťky 400 mm. (intenzivní vegetační souvrství)	Tepelný odpor R [m ² ·K ⁻¹ ·W ⁻¹]		Ekvivalentní tloušťka tepelné izolace ($\lambda = 0,039$) [cm]	
	Maximální vlhkost	Teoretická dlouhodobá vlhkost 25 %	Maximální vlhkost	Teoretická dlouhodobá vlhkost 25 %
Substrát	0,174	0,533	0,7	2,1
Hydrofilní minerální vlna 76 kg·m ⁻³	0,780	2,908	3,1	11,6
Hydrofilní minerální vlna 120 kg·m ⁻³	1,125	4,098	4,5	16,4

Další měření vlastností nových výrobků z hydrofilní minerální vlny a vlastností těchto výrobků v čase probíhala v laboratořích v Častolovicích a Průhonicích. Na těchto specializovaných pracovištích bylo možné provést i doplňující měření, která se při certifikaci běžně neprovádějí. Pro úplnost jsou tedy dokumentovány v Tab. 26 a Tab. 27. Všechna měření vycházejí z metodiky FLL⁸³ a metod popsanych v ČSN EN 13162.⁸⁴

Tab. 26 – Podrobná měření počátečních vlastností hydrofilní vlny 76 kg·m⁻³

	Základní měření		Podrobnosti				
	Maximální vodní kapacita WK_{max} [%]	Vodo-propustnost $mod.K_f$ [mm·min ⁻¹]	Objemová hmotnost za sucha ρ_f^* [kg·m ⁻³]	Objemová hmotnost po vlhčení ρ_{wk}^* [kg·m ⁻³]	Pevná fáze MV [%]	Celková pórovitost GPV [%]	Obsah vzduchu po maximálním nasycení PV_{maxW} [%]
1	89,0	215,8	83,0	972,7	3,0	97,0	8,0
2	89,0	218,1	83,0	972,9	3,0	97,0	8,0
3	89,8	206,5	80,0	978,7	2,9	97,1	7,2
Ø	89,3	213,5	81,9	974,8	3,0	97,0	7,7

*Měřeno v nádobách Proctorova kladiva

⁸³ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

⁸⁴ 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.

Průměrná objemová hmotnost za sucha $81,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ je o 8 % vyšší než deklarovaná objemová hmotnost od výrobce. Tento rozdíl je způsoben tím, že nádoby Proctorova kladiva mají kruhový tvar a není úplně snadné celý tento prostor beze zbytku vyplnit minerální vlnou. Pokud by zde vznikly mezery, protékala by jimi voda, a tím by se znehodnotilo měření vodopropustnosti. Z tohoto důvodu byly nádoby vyplněny minerální vlnou raději natěsno. Objemová hmotnost je tedy kvůli zmáčknutí mírně vyšší (o 8 %).

Podrobnosti měření základních veličin (WK_{max} a $mod.Kf$) byly popsány v kapitole 3.3. Metodika výpočtu doplňujících vlastností z Tab. 26 je uvedena v následujících rovnicích (9, 10, 11).

$$MV = \frac{\rho_f \cdot 100}{\rho_{sf}} \quad [\%] \quad (9)$$

kde: MV je objem pevné fáze vzorku [%];

ρ_f objemová hmotnost vzorku za sucha [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$];

ρ_{sf} specifická objemová hmotnost vzorku za sucha [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

(v tomto případě je to specifická objemová hmotnost vlákna minerální vlny ($2750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)).

$$GPV = 100 - MV \quad [\%] \quad (10)$$

kde: GVP je celková pórovitost vzorku [%];

MV objem pevné fáze vzorku [%].

$$PV_{maxW} = GPV - WK_{max} \quad [\%] \quad (11)$$

kde: PV_{maxW} je obsah vzduchu po maximálním nasycení [%];

GPV celková pórovitost vzorku [%];

WK_{max} maximální vodní kapacita [%].

Obdobná měření byla provedena i na vzorcích hydrofilní minerální vlny o vyšší objemové hmotnosti (Tab. 27).

Tab. 27 – Vlastní měření počátečních vlastností hydrofilní vlny 120 kg·m⁻³

	Základní měření		Podrobnosti				
	Maximální vodní kapacita WK_{max} [%]	Vodo-propustnost $mod.K_f$ [mm·min ⁻¹]	Objemová hmotnost za sucha ρ_f^* [kg·m ⁻³]	Objemová hmotnost po vlhčení ρ_{wk}^* [kg·m ⁻³]	Pevná fáze MV [%]	Celková pórovitost GPV [%]	Obsah vzduchu po maximálním nasycení PV_{maxW} [%]
# 1	84,3	74,5	143	985,0	5,2	94,8	10,6
# 2	84,2	99,4	143	984,1	5,2	94,8	10,7
# 3	83,0	69,9	141	970,9	5,1	94,9	11,9
Ø	93,8	81,3	142	980,0	5,2	94,8	11,0

*Měřeno v nádobách Proctorova kladiva

U obou druhů minerální vlny byly také změřeny hodnoty pH v roztoku CaCl₂ podle ČSN ISO 10390.⁸⁵ Tyto hodnoty jsou součástí vyhodnocovací tabulky Tab. 28.

Dílčí závěr

Výsledky provedených měření technických vlastností hydrofilní vlny byly prezentovány na konferenci EnviBUILD 2014 a PROGRESS 2014,⁸⁶ kde také vyšly ve sbornících.

Pokud se porovnají požadavky FLL na vegetační vrstvu (Tab. 6), hydrofilní vlna jako přímá náhrada substrátu nevyhoví v několika bodech (Tab. 28). Je to zejména kvůli její velké vodopropustnosti a maximální vodní kapacitě. Nadprůměrné hodnoty vodopropustnosti mohou být výhodou při využití hydrofilní vlny ve zjednodušených skladbách, protože odpadne použití plošných odvodňovacích prvků a tím dojde ke zlevnění celého vegetačního souvrství. Nevýhodou bude tato vlastnost hydrofilní vlny představovat pro střechy s větším sklonem, protože dešťová voda velmi rychle odeteče.

Velmi vysoká nasákavost by však mohla xerofilním střešním rostlinám uškodit, stejně jako nedostatečný obsah vzduchu při plném nasycení minerální vlny. Úplná náhrada

⁸⁵ ČSN ISO 10390. *Kvalita půdy – Stanovení pH*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

⁸⁶ 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.

substrátů hydrofilní minerální vlnou není tabulkově možná. Experimentální zkoušky adaptace rostlin v minerální vlně ale dokazují opak (viz kapitola 4.4).

Tab. 28 – Celkové porovnání naměřených hodnot s požadavkem FLL

	Požadavky FLL			Hydrofilní vlna	
	Intenzivní skladby	Extenzivní skladby	Jednovrstvé skladby	76 kg·m ⁻³	120 kg·m ⁻³
Obsah vyplavitelných částic [%]	< 20	< 15	< 10	neměřeno	neměřeno
Obsah organických součástí [g·l ⁻¹]	≤ 90	≤ 65	≤ 40	neměřeno	neměřeno
Vodopropustnost [mm·min ⁻¹]	0,3–30	0,6–70	60–400	213,5	81,3
Maximální vodní kapacita [%]	45–65	35–65	30–65 intenzivní 20–65 extenzivní	89,3	93,8
Obsah solí [g·l ⁻¹]	< 2,5	< 3,5	< 2,5 intenzivní < 3,5 extenzivní	neměřeno	neměřeno
Hodnota pH [–]	6,0–8,5			7,5	7,3
Obsah vzduchu při maximálním nasycení vodou [%]	> 10			7,7	11,0
Sléhavost substrátových rohoží při výchozí tloušťce 30–50 mm	max. 20 %			viz kapitola 4.2	viz kapitola 4.2
Sléhavost substrátových rohoží při výchozí tloušťce > 50 mm	max. 10 mm			viz kapitola 4.2	viz kapitola 4.2

4.2 Výsledky měření ageingu (stárnutí) hydrofilní vlny v čase

V předchozí části práce bylo dokumentováno, že hydrofilní vlna nesplňuje všechny nároky, které jsou na materiály vegetační vrstvy kladeny. Při použití hydrofilní minerální vlny čistě jako hydroakumulačního materiálu nebo jako plošné drenáže je proto vhodné zjistit, jak se bude tento materiál chovat po několika letech užívání na střeše. Toto

kritérium není nikde pevně stanoveno, nicméně z pohledu dlouhodobé funkčnosti vegetačního souvrství je velmi relevantní.

Ze zkušebních modelů byly tak 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 ageingu probíhalo na těchto materiálových skupinách. Pro objektivní porovnání obou materiálových skupin byly odebrány vzorky po uplynutí 16 a 17 měsíců po zabudování.

Jako první byly měřeny vzorky z modelu 1, který obsahuje minerální vlnu o objemové hmotnosti 76 kg·m⁻³. Protože model byl původně zamýšlen jen k pozorování adaptace rostlin (tak to bylo dohodnuto s majiteli střechy), bylo možné vyříznout pouze vzorek o rozměrech 300 × 200 mm (Obr. 36) a na něm postupně provést měření. Nejprve byl změřen součinitel tepelné vodivosti λ (vzorek vcelku) a poté byl vzorek nařezán na menší části pro další měření. Dokumentace naměřených hodnot je uvedena v Tab. 29 a dále pak v souhrnném grafu na Obr. 43.

Desky byly vegetací značně poškozeny (Obr. 37). Rozptyl měření je značný, vzorky byly totiž prokořeněny různě vzrostlými rostlinami. Po vyjmutí nadzemní části rostlin (kořeny byly ve vzorku ponechány) byl vzorek vysušen a kondicionován.



Obr. 36 – Odebírání vzorku z modelu 1



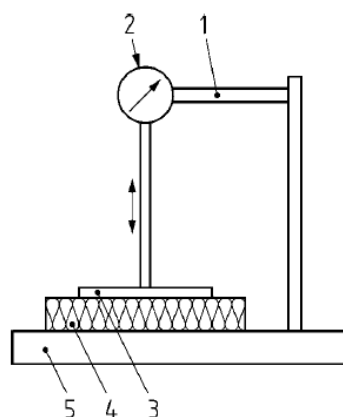
Obr. 37 – Detail vzorku po 16 měsících, bez vegetace, vysušený

Tab. 29 – Soubor výsledků vlastností desek odebraných z modelu č. 1 po 16 měsících

Tloušťka desek t				+ Komentář 1
Naměřené hodnoty [mm]	Průměr [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Původní hodnota [mm]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]
78	87	7,39	100	-13 %
96				
86				
Součinitel tepelné vodivosti za sucha λ				+ Komentář 2
Naměřené hodnoty [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Průměr [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Směrodatná odchylka [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Původní hodnota [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]
0,0391	0,0391	0,00	0,037	+6 %
Pevnost v tlaku CS				+ Komentář 3
Naměřené hodnoty [kN]	Průměr [kN]	Směrodatná odchylka [kN]	Původní hodnota [kN]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]
6,7	6,0	1,39	15,0	-60 %
4,1				
7,3				
Maximální vodní kapacita WK_{max}				+ Komentář 4
Naměřené hodnoty [%]	Průměr [%]	Směrodatná odchylka [%]	Původní hodnota [%]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]
83,8	88,2	3,22	89,3	-1 %
89,5				
91,3				
Vodopropustnost $mod.K_f$				+ Komentář 5
Naměřené hodnoty [mm·s ⁻¹]	Průměr [mm·min ⁻¹]	Směrodatná odchylka [mm·min ⁻¹]	Původní hodnota [mm·min ⁻¹]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]
121,7	103,8	13,91	213,5	-51 %
87,8				
101,9				

Komentář 1 k Tab. 29

Tloušťka desek tepelné izolace byla měřena kombinací postupu popsaneého v ČSN EN 823⁸⁷ a kontrolním doměřením pomocí běžného metru. Normový postup vyžaduje stabilizaci vzorku přitlačnou deskou ve tvaru čtverce o hraně 200 mm při vyvolání základního tlaku 50 nebo 250 Pa. Teprve pak se odečítá skutečná tloušťka. Princip měření je naznačen na Obr. 38.



- 1 tuhý rám
- 2 číselníkový úchylkoměr
- 3 čtvercová přitlačná deska
- 4 zkušební těleso
- 5 rovinná tuhá základová deska

Obr. 38 – Měření tloušťky izolace normovou metodou

Komentář 2 k Tab. 29

Bylo možné provést pouze jedno měření, protože vzorek byl příliš malý. Pro toto měření musel být vzorek doplněn hydrofilní vlnou stejného typu na rozměry 300 × 300 mm, což je velikost teplosměnných ploch přístroje R-Matic². Třetina takto doplněného vzorku tedy nebyla stařená, což bohužel zkresluje výsledky testu. Reálné zvýšení lambdy oproti původnímu stavu bude tedy pravděpodobně vyšší než 6 %. Kořeny rostlin dokázaly tuto hydrofilní vlnu značně poškodit už po roce a půl. V minerální vlně vznikly nehomogenity, které jsou buď částečně vyplněny zbytkem substrátu či kořeny nebo zůstaly prázdné. V takto vzniklých tepelných mostech se bude teplo šířit výrazně rychleji než v homogenní části minerální vlny.

Komentář 3 k Tab. 29

Pevnost v tlaku vyšla na těchto vzorcích výrazně menší (o 60 %) než na vzorcích těsně po vyrobení izolace. Mohlo to být zapříčiněno tím, že povrch desek byl velmi nerovný, poškozený a 10% stlačení se tedy dosáhlo při daleko menším tlaku. Dalším možným důvodem mohla být malá velikost vzorků. Testovalo se na vzorcích o velikosti 100 × 100 mm, což zkušební norma ČSN EN 826 sice dovoluje, ale u takto

⁸⁷ ČSN EN 823. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

nehomogenních vzorků to není příliš vhodné. Majitel střechy nicméně nedovolil odebrání dalších vzorků k měření. Dalším důvodem tak výrazného snížení pevnosti by mohla být i degradace pojiva, čemuž je věnován větší prostor v Komentáři 8.

Komentář 4 k Tab. 29

Maximální vodní kapacita desek zůstala prakticky beze změny. Starší práce⁸⁸ zmiňují postupný pokles schopnosti resaturace hydrofilní vlny v čase, což se při tomto měření po roce a půl neprojevovalo.

Komentář 5 k Tab. 29

Padesátiprocentní snížení vodopropustnosti bylo pravděpodobně způsobeno „ucpáním“ minerální vlny jemnými frakcemi substrátu, který tvořil kořenový bal rostlin (Obr. 39), a zbytkově i krycí substrátovou vrstvou (Obr. 40). Zkoumaný vzorek byl měřen bez krycí vrstvy substrátu, nicméně zbytkový substrát nebyl z panelu vyklepán, což ovlivnilo rychlost proudění vody a také součinitel tepelné vodivosti u předchozího měření. Vyklepání zbytkového substrátu by neodpovídalo reálné situaci na střeše.

Snížení vodopropustnosti způsobené ucpáním jemnými částicemi substrátu může nastat i filtrační textilií. Reálná schopnost propouštět vodu se tak může lišit i u tohoto materiálu, což výrobová norma ČSN EN 13252⁸⁹ nezmiňuje. Tento fakt by měl být zohledněn v obecných doporučeních pro navrhování vegetačních střech – parametry propustností výrobků se po určité době používání změní, nelze s nimi tedy počítat bez jakékoliv bezpečnostní přírážky. Podle aktuálních měření může být u hydrofilní vlny tato přírážka až 50 %.



Obr. 39 – Sazení rostlin s kořenovým balem původního substrátu v modelu 1



Obr. 40 – Zasypání substrátem s velkým podílem jemných částic

⁸⁸ KIPP, J. A., WEVER, G. *Characterisation of the hydrophysical behaviour of stonewool*. Applied Plant Research, 2005.

⁸⁹ ČSN EN 13252. *Geotextilie a výrobky podobné geotextiliím – Vlastnosti požadované pro použití v odvodňovacích systémech*. Praha: Český normalizační institut, 2001.

Druhá sada vzorků byla odebrána z modelu 2 po roce od výsevu semen. Jednalo se o model s hydrofilní minerální vlnou vyšší gramáže ($120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a tomu také odpovídalo prokořenění – nebylo tak mohutné jako u modelu 1. Prokořenění je dobře vidět na Obr. 41, odebírání vzorků na testy pak na sadě Obr. 42.



Obr. 41 – Jemné prokořenění trávou na modelu 2

Minerální vlna byla zbavena povrchové vrstvy substrátu a vegetace. V desce zůstaly kořeny, které ovlivňují vlastnosti hydrofilní vlny (pevnost v tlaku, vodopropustnost, maximální vodní kapacitu apod.).



Obr. 42 – odebírání vzorků na testy 3/2015

Tyto desky zůstaly i po roce prokořeňování daleko stabilnější a kompaktnější než desky nižší gramáže. Jejich tloušťka se výrazně nezměnila, a to i přesto, že byly vystaveny běžnému provozu na zahradě (chodilo se po nich). Testy proběhly v následujícím pořadí: součinitel tepelné vodivosti (na vzorcích $300 \times 300 \text{ mm}$), pevnost v tlaku (na vzorcích $100 \times 100 \text{ mm}$, vždy v místě většího kořenu) a jako poslední se testovala maximální vodní kapacita a vodopropustnost na kruhových vzorcích o průměru 148 mm .

Výsledky měření jsou podrobně popsány v Tab. 30 a přehledně pak na Obr. 44.

Tab. 30 – Soubor výsledků vlastností desek odebraných z modelu č. 2 po 17 měsících

Tloušťka desek t					+ Komentář 6
Naměřené hodnoty [mm]	Průměr [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Původní hodnota [mm]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]	
50	47	2,29	50	-6 %	
49					
44					
Součinitel tepelné vodivosti za sucha λ_d					+ Komentář 7
Naměřené hodnoty [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Průměr [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Směrodatná odchylka [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Původní hodnota [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]	
0,0362	0,0355	0,00	0,035	+1 %	
0,0349					
0,0353					
Pevnost v tlaku CS					+ Komentář 8
Naměřené hodnoty [kN]	Průměr [kN]	Směrodatná odchylka [kN]	Původní hodnota [kN]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]	
6,4	6,23	1,68	20	-69 %	
8,2					
4,1					
Maximální vodní kapacita WK_{max}					+ Komentář 9
Naměřené hodnoty [%]	Průměr [%]	Směrodatná odchylka [%]	Původní hodnota [%]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]	
88,6	92,1	3,56	93,8	-2 %	
95,7					
Vodopropustnost $mod.K_f$					+ Komentář 10
Naměřené hodnoty [mm·s ⁻¹]	Průměr [mm·min ⁻¹]	Směrodatná odchylka [mm·min ⁻¹]	Původní hodnota [mm·min ⁻¹]	Rozdíl oproti původnímu stavu [%]	
121,0	109,0	12,01	81,3	+34 %	
97,0					

Komentář 6 k Tab. 30

Poškození desek kořeny a snížení tloušťky bylo u druhého modelu daleko nižší. Dokonce i vizuálně vypadaly vzorky s gramáží $120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ daleko lépe než vzorky z prvního modelu, kde byla gramáž pouze $76 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Komentář 7 k Tab. 30

Součinitel tepelné vodivosti se od počátečního měření prakticky nezměnil. Na rozdíl od vzorků z modelu 1 byly tyto vzorky kompaktní, takže zde nevznikly „tepelné mosty“ vlivem štěrbin, substrátu a vegetace. Vzorky obsahovaly pouze jemné kořeny.

Komentář 8 k Tab. 30

Snížení pevnosti v tlaku skoro o 70 % bylo u takto „zachovalých“ vzorků velkým překvapením. Možnou příčinou může být i degradace pojiva vlivem dlouhodobé vlhkosti. Většina minerálních izolací je používána za sucha, čili bez přítomnosti kapalné vody, pouze s malým množstvím zkondenzované vody, která se do minerální vlny může dostat. Hydrofilní vlna se ve skleníkových kulturách používá většinou pouze 1–2 roky. Ve vegetačních střechách je ale vlna vystavena vodě po dobu několika let.

Tuto problematiku by bylo vhodné podrobněji řešit i na úrovni výrobního závodu, což už převyšuje rámec této disertační práce. Částečně o této problematice pojednává i nedávno vydaný článek italských vědců.⁹⁰

Komentář 9 k Tab. 30

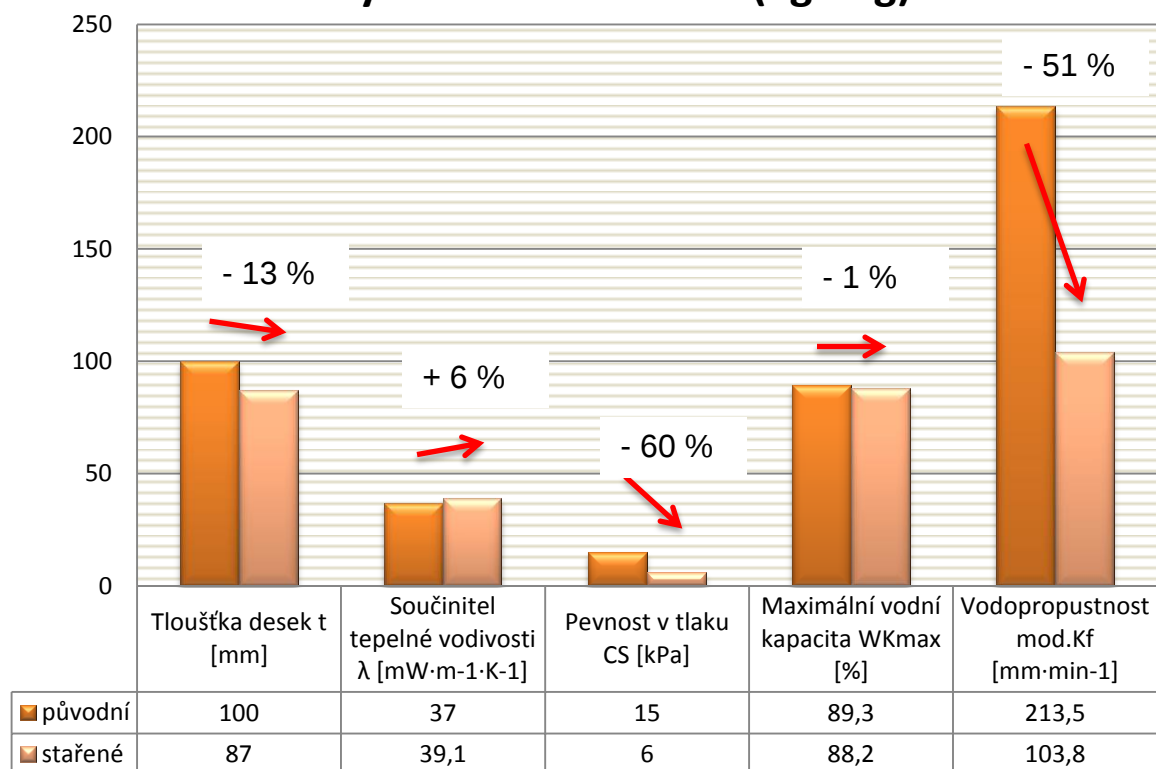
Maximální vodní kapacita používaného vzorku vyšla také téměř beze změn, podobně jako u prvního modelu. Rozdíl 2 % je zanedbatelný.

Komentář 10 k Tab. 30

Vodopropustnost naměřená u stařené vlny vyšla vyšší než u nového materiálu. Bylo to způsobeno nedokonalostí měřicího postupu FLL, kde se kruhový otvor Proctorova kladiva (Obr. 14) vyplňuje zkoumaným vzorkem. Při tomto měření byl kruhový otvor vyplněn ze dvou kusů hutné minerální vlny. Vzniklými mezerami pravděpodobně protékala voda, která zkreslila výsledky měření. Pro tento druh materiálu by bylo vhodnější aplikovat měření vodopropustnosti tak, jako se měří fólie, např. podle normy ČSN EN 13252.

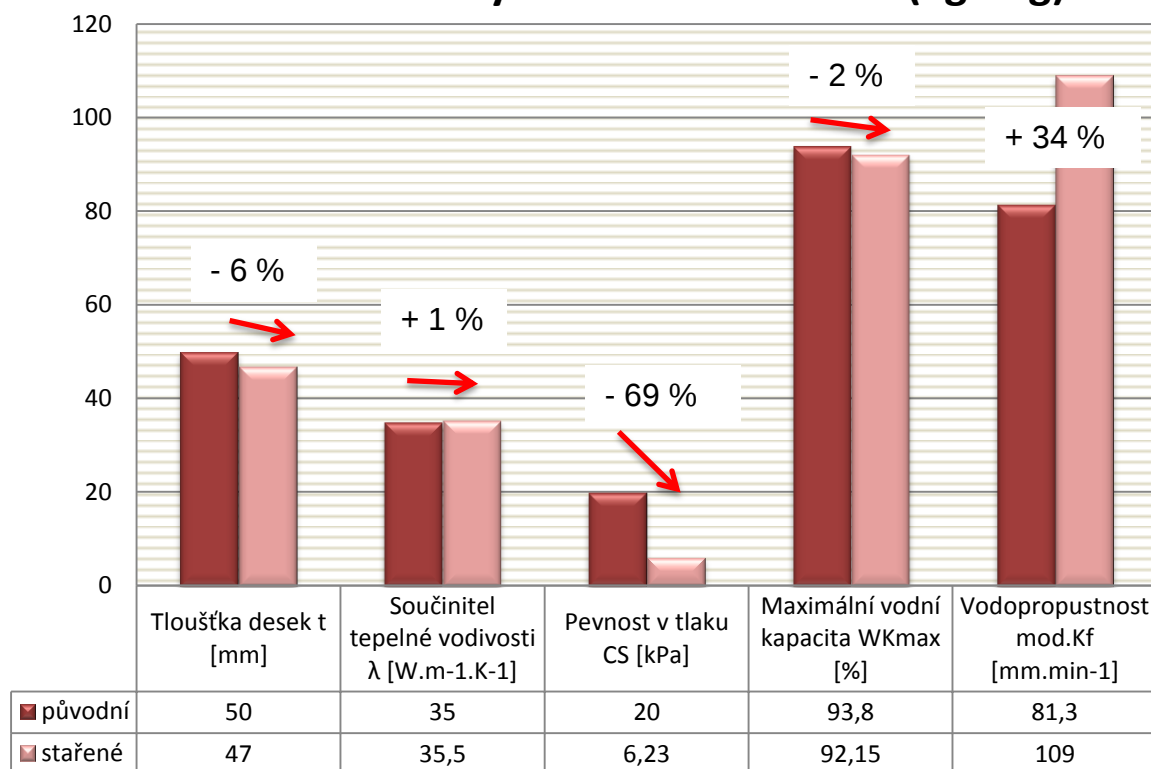
⁹⁰ STAZI, F. et al. Assessment of the actual hygrothermal performance of glass mineral wool insulation applied 25 years ago in masonry cavity walls. *Energy and Buildings*. Philadelphia: Elsevier, 2014, č. 68, vyd. A, s. 292–304. ISSN 0378-7788.

Hydrofilní vlna OH76 (ageing)



Obr. 43 – Grafické znázornění změny vlastností v čase hydrofilní vlny 76 kg·m⁻³

Hydrofilní vlna OH120 (ageing)



Obr. 44 - Grafické znázornění změny vlastností v čase hydrofilní vlny 120 kg·m⁻³

Dílčí závěr

Jediným parametrem, který se podle normy FLL u minerální vlny vyhodnocuje v čase, je její sléhavost. Tabulka požadovaných vlastností vegetační vrstvy (Tab. 6) je tedy doplněna o naměřené hodnoty (Tab. 31). Procentuální sléhavost byla u 1,5 roku starých vzorků splněna, ale absolutní sléhavost menší než 10 mm nikoliv.

Tab. 31 – Porovnání naměřených hodnot s požadavkem FLL

Požadavky FLL		Hydrofilní vlna	
		76 kg·m ⁻³ (100 mm)	120 kg·m ⁻³ (50 mm)
Sléhavost substrátových rohoží při výchozí tloušťce 30–50 mm	max. 20 %	13 %	6 %
Sléhavost substrátových rohoží při výchozí tloušťce > 50 mm	max. 10 mm	13 mm	3 mm

Nad rámec požadavků FLL se tedy vyhodnocovaly další parametry. Největší rozdíly mezi výrobky novými a stařenými byly v pevnosti v tlaku, téměř 70 %. Toto by mohl být velký problém do budoucna, zvláště při použití hydrofilní vlny jako hydroakumulační vrstvy intenzivních vegetačních střeš, kde hmotnost 1 m² celého souvrství včetně rostlin může být až 1 000 kg.

Další velké rozdíly vykazuje vodopropustnost. Měřicí postup dle FLL není primárně určen pro hydrofilní vlnu, protože může dojít k protečení v nádobách Proctorova hutnicího kladiva (viz komentář 10 k Tab. 27), nicméně při testování hydrofilní vlny střední gramáže vyšly opakovaně výrazně menší hodnoty vodopropustnosti než u nových desek. Průměrné zhoršení je 51 %, což je skutečně vysoká hodnota. Tato možná degradace by měla být v návrhu vegetační střešy, ve které se používá hydrofilní vlna, zohledněna. V kapitole Čl. 4 je proveden ověřovací výpočet drenážní kapacity se započítáním tohoto jevu.

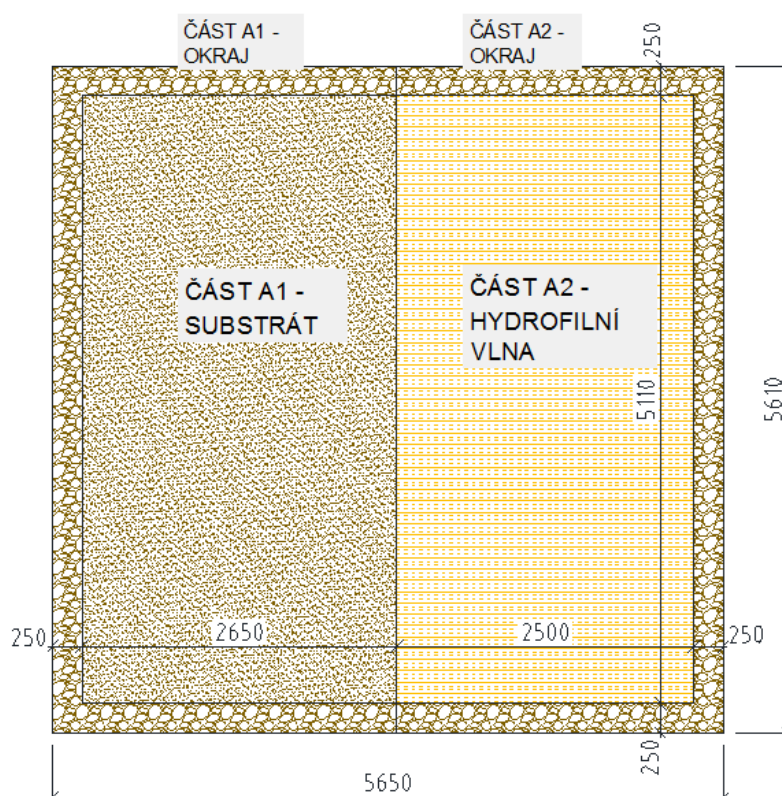
Hodnoty maximální vodní kapacity a součinitele tepelné vodivosti vyšly u obou typů zkoumaného materiálu prakticky beze změn.

Problematika změny vlastností hydrofilní minerální vlny v čase (ageing) byla podrobně zpracována v impaktovém časopise.⁹¹

⁹¹ 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.

4.3 Výsledky experimentálního měření hydroakumulace na modelu

Měření probíhala na experimentálním modelu 3 v Brně (Obr. 25). Přesné vymezení měřených ploch je zobrazeno na Obr. 45. Jedná se o skutečné rozměry střechy ve sklonu 4°. Tloušťka vegetační vrstvy obou částí střechy je 70 mm. V části A2, kde je 50 mm hydrofilní minerální vlny (OH120), bylo doplněno ještě 20 mm extenzivního substrátu jako krycí vrstvy. Pokud by zde nebyl substrát, vegetace by pravděpodobně vůbec nezakořenila (viz kapitola 4.4). Dále je pod substrátem i pod minerální vlnou ještě ochranná geotextilie o plošné hmotnosti 300 g·m⁻². Všechny tyto části byly započítávány při kalkulaci hydroakumulace (Tab. 32).



Obr. 45 – Podrobné schéma povrchu modelu 3

Maximální vodní kapacita hydrofilní vlny byla převzata z provedených měření (viz kapitola 4). Technické informace o substrátu použitém na modelu nebyly dostupné, proto se do výpočtu teoretické vodní kapacity započítala data ekvivalentního materiálu podle technického listu výrobce Optigreen.⁹² Údaje o ostatních materiálech byly převzaty z doporučených hodnot normy FLL.⁹³ Následně byla kalkulována celková

⁹² OPTIGREEN. *Extensive Single Layer Substrate Type M-light* [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.optigreen.de>.

⁹³ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

teoretická vodní kapacita obou částí střechy, uvažovaná pro celé experimentální měření.

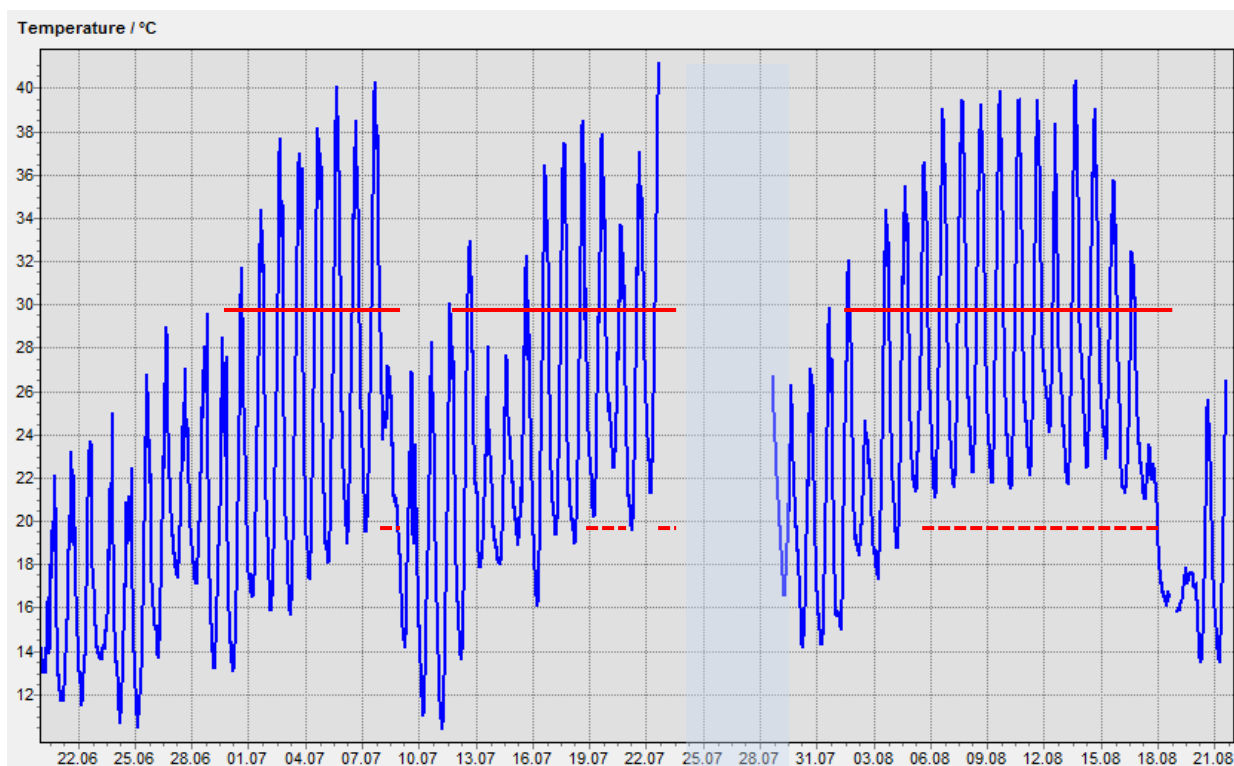
Tab. 32 – Maximální vodní kapacita jednotlivých částí modelu

Část střechy	Plocha [m ²]	Tloušťka [mm]	Maximální vodní kapacita [%]	Maximální vodní kapacita [m ³]	Celková teoretická vodní kapacita [l]
A1 – substrát	13,54	70	20	18,956	21 200
A1 – geotextilie	13,54	3	27	1,097	
A1 – okraj	2,73	70	6	1,147	
A2 – hydrofilní vlna	12,78	50	93,8	59,938	67 198
A2 – krycí vrstva	12,78	20	20	5,112	
A2 – geotextilie	12,78	3	27	1,035	
A2 – okraj	2,65	70	6	1,113	

Z lokální meteostanice byly postupně získávány informace o teplotě, dešťových srážkách, jejich intenzitě a časovém určení. Z hmotnostních čidel pod sběrnými nádobami byla poté sbírána data o množství odtékající vody ze střechy. Takto byla ověřována skutečná hydroakumulační schopnost střechy.

Měření probíhala v létě 2015, které bylo nadprůměrně horké (Obr. 46). Bylo zaznamenáno mnoho tropických dní, kdy teplota přes den překročila hranici 30 °C (v diagramu červenou plnou čarou), i tropických nocí, kdy naopak neklesla pod 20 °C (v diagramu červenou čárkovanou čarou).

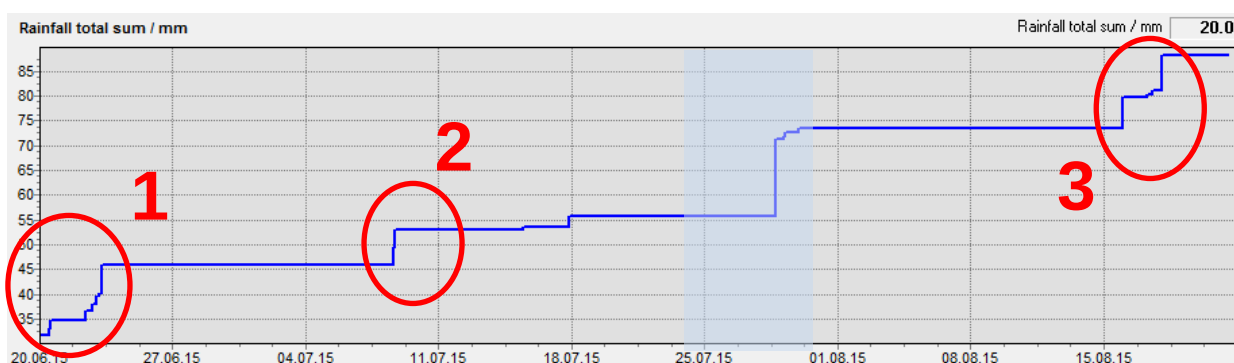
Srážky byly v tomto období podprůměrné. Jejich vývoj je za měřené dvouměsíční období dokumentován na Obr. 47. Záznam srážek pochází z lokální meteostanice, která byla umístěna v místě experimentálního modelu. V období 22. 7. – 28. 7. byla stanice šest dní mimo provoz, což je na obou grafech označeno světle modrým obdélníkem.



Obr. 46 – Vývoj venkovních teplot v létě 2015, kdy probíhalo měření

Určení součinitelů odtoku C

Součinitel odtoku byl kalkulován podle evropské normy, jak je popsáno v kapitole 3.2. Nebyla uvažována simulace nárazového 15minutového deště, ale hodnoty reálných srážek z experimentálního modelu. 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. 47) vyznačeny červeně.

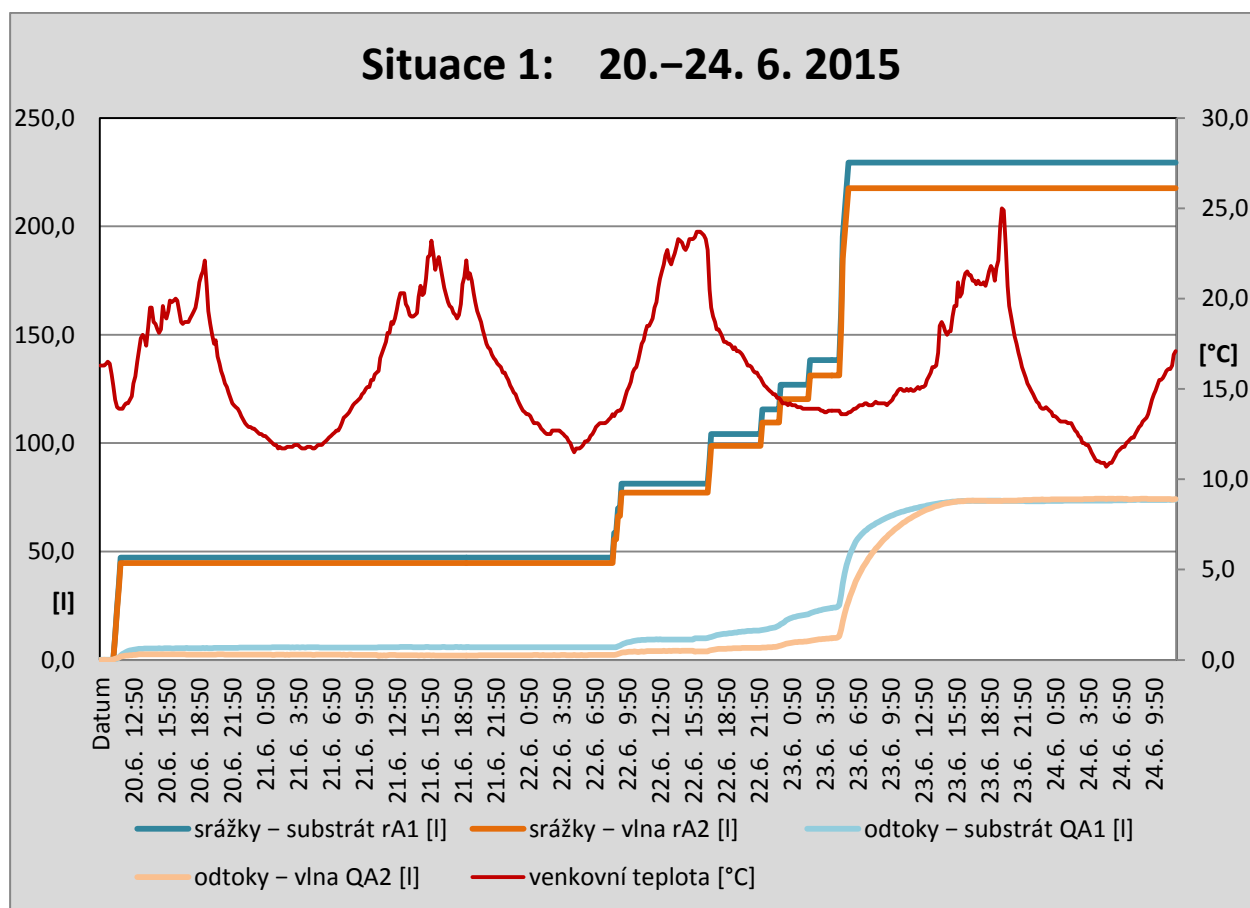


Obr. 47 – Označení tří reálných situací pro dokumentaci hydroakumulace střech

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

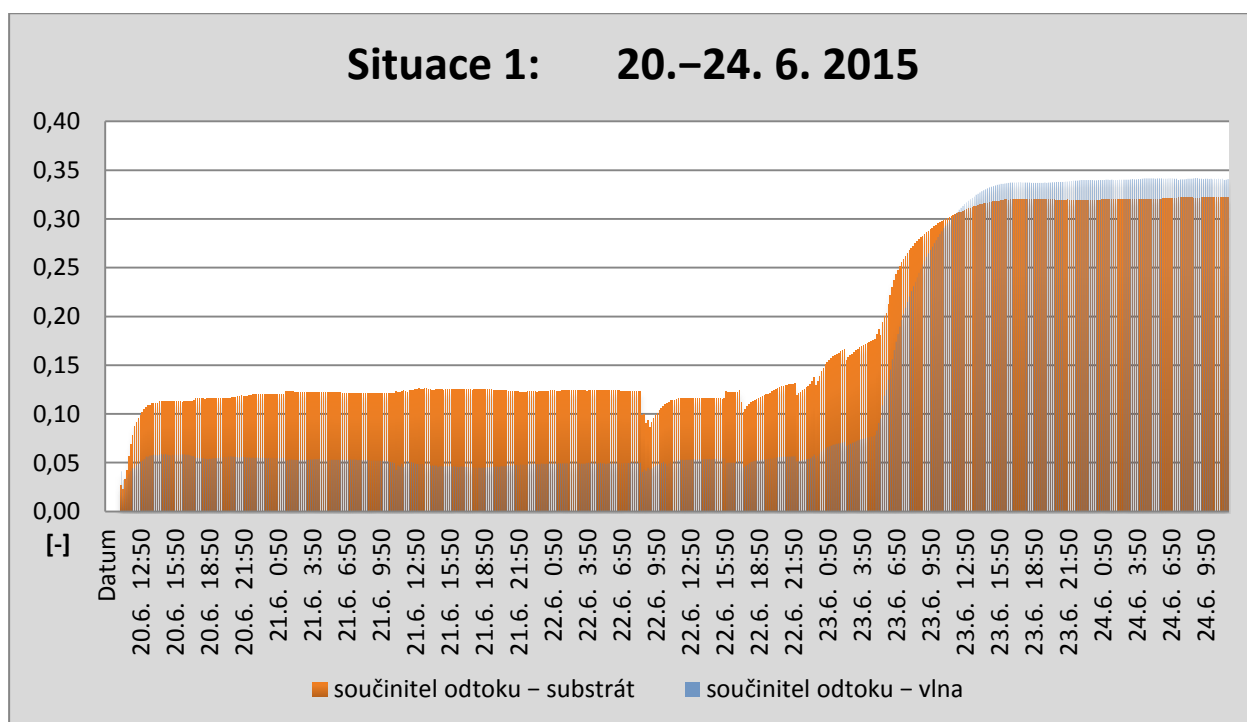
množství intenzivního deště, které uvádí norma ČSN 75 9010⁹⁴ pro oblast Brna. Přesto i při těchto srážkách lze pozorovat rozdílné chování části střechy čistě se substrátem oproti části střechy, kde je hydroakumulační vrstva z minerální vlny. Podrobnosti jsou graficky znázorněny na Obr. 48. V tomto grafu jsou srážky přepočítány na reálné plochy jednotlivých částí střechy, které jsou popsány v Tab. 32. Srážky jsou tedy v litrech, stejně jako odtoky, které byly měřeny v akumulačních nádobách pod experimentálním modelem. Doplňkem grafu je pak venkovní teplota, která může mít vliv na vysychání střechy a hydroakumulaci.

Následující graf (Obr. 48) uvádí poměr mezi vodou, která otekla ze střechy, a vodou, která do střechy natekla (součinitel odtoku C podle rovnice (5)). 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.



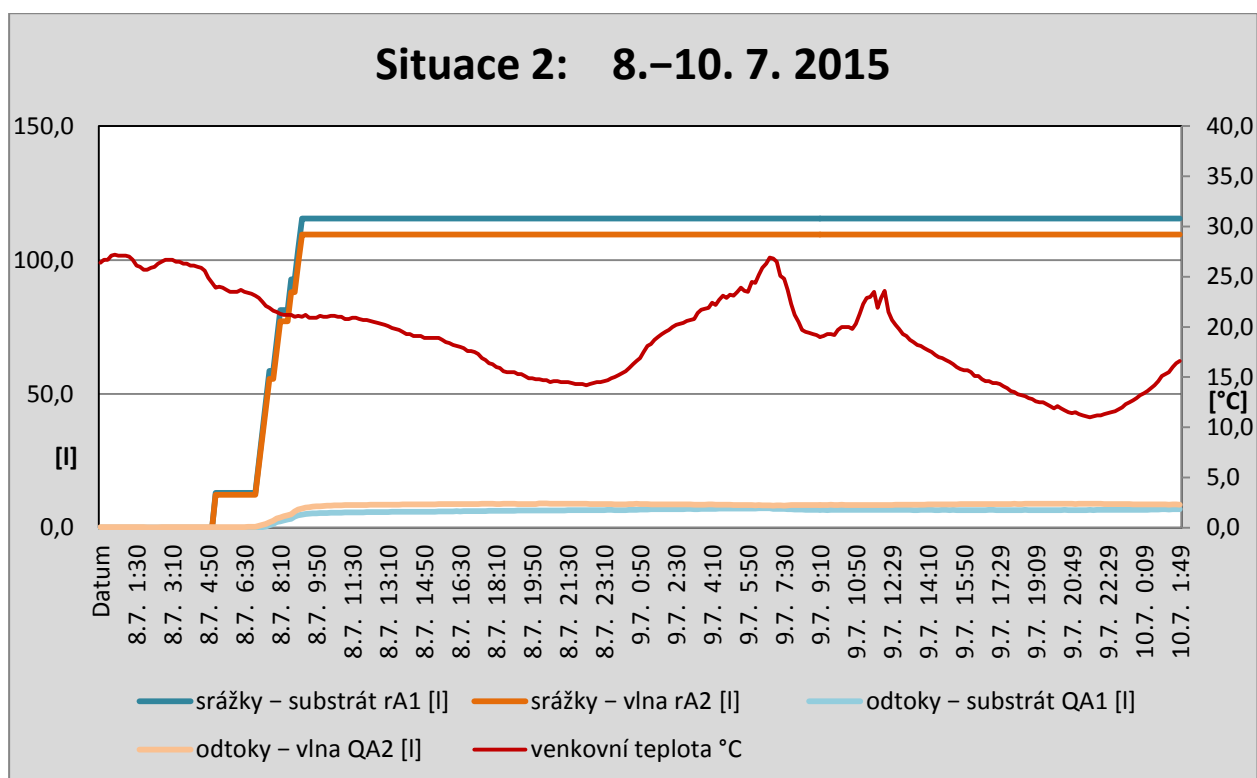
Obr. 48 – Znázornění srážek a odtoků v situaci 1

⁹⁴ ČSN 75 9010. *Vsakovací zařízení srážkových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

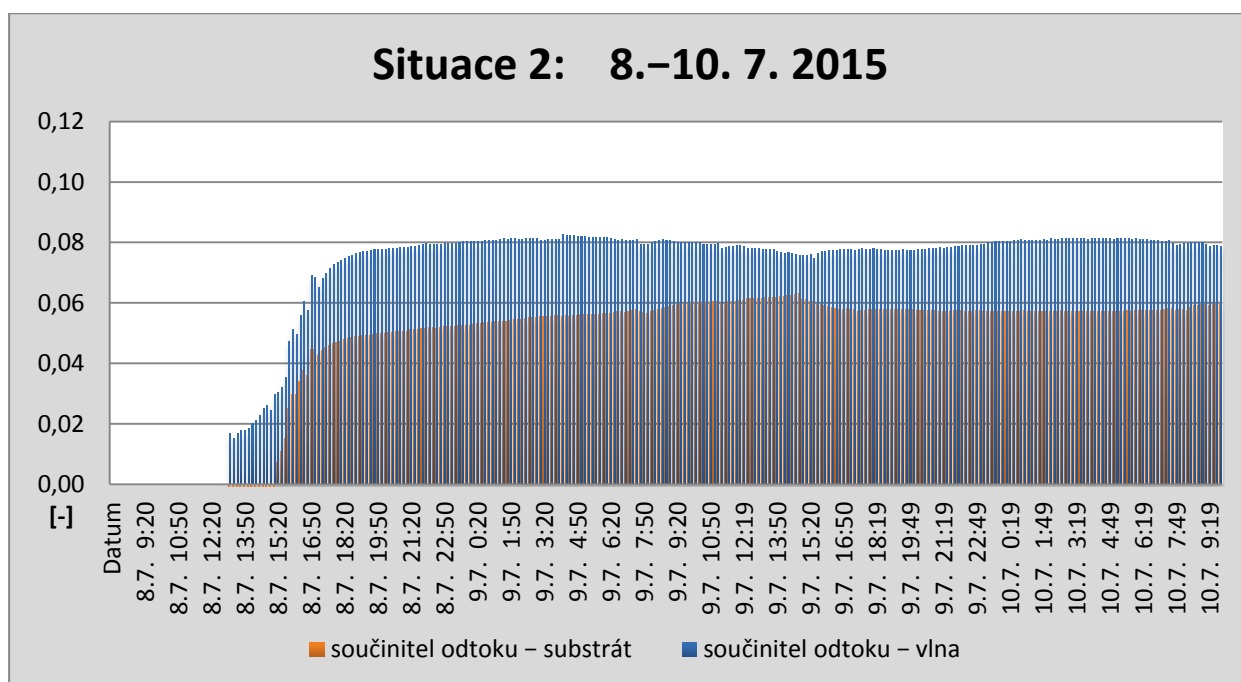


Obr. 49 – Součinitel odtoku C v situaci 1

Situace 2 popisuje první červencový déšť o intenzitě 7,1 mm. Takto nízké dešťové srážky se téměř všechny udržely ve střeše. Součinitel odtoku ze situace 2 se pohyboval pod hodnotou 0,1, jak je vidět v následujících grafech (Obr. 50, Obr. 51).



Obr. 50 – Znázornění srážek a odtoků v situaci 2



Obr. 51 – Součinitelé odtoku C v situaci 2

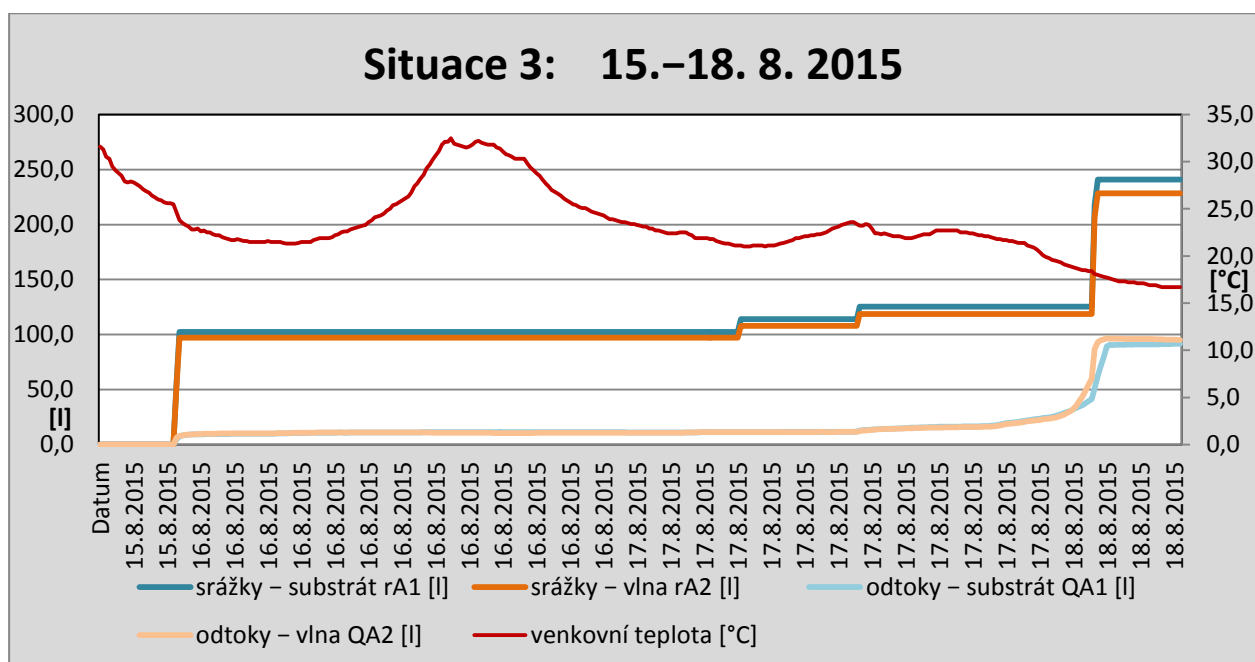
Situace 3 dokumentuje tři dny uprostřed srpna 2015, kde byly lokální meteostanice naměřeny největší srážky v úhrnu 14,8 mm (Obr. 54, Obr. 55). Situace se podobá té ze začátku léta (situace 1), kde byl zaznamenán srážkový úhrn 14,1 mm. Je zajímavé, že součinitel odtoku vyšel v tomto případě stejný pro obě části střechy. Střecha se substrátem zadržela prakticky stejné množství srážek jako střecha s hydrofilní vlnou. Pravděpodobně to bylo způsobeno vzrostlou vegetací, které se v tomto období v části se substrátem výborně dařilo (Obr. 52). Část střechy s minerální vlnou byla ve stejném období téměř bez rostlin (Obr. 53).



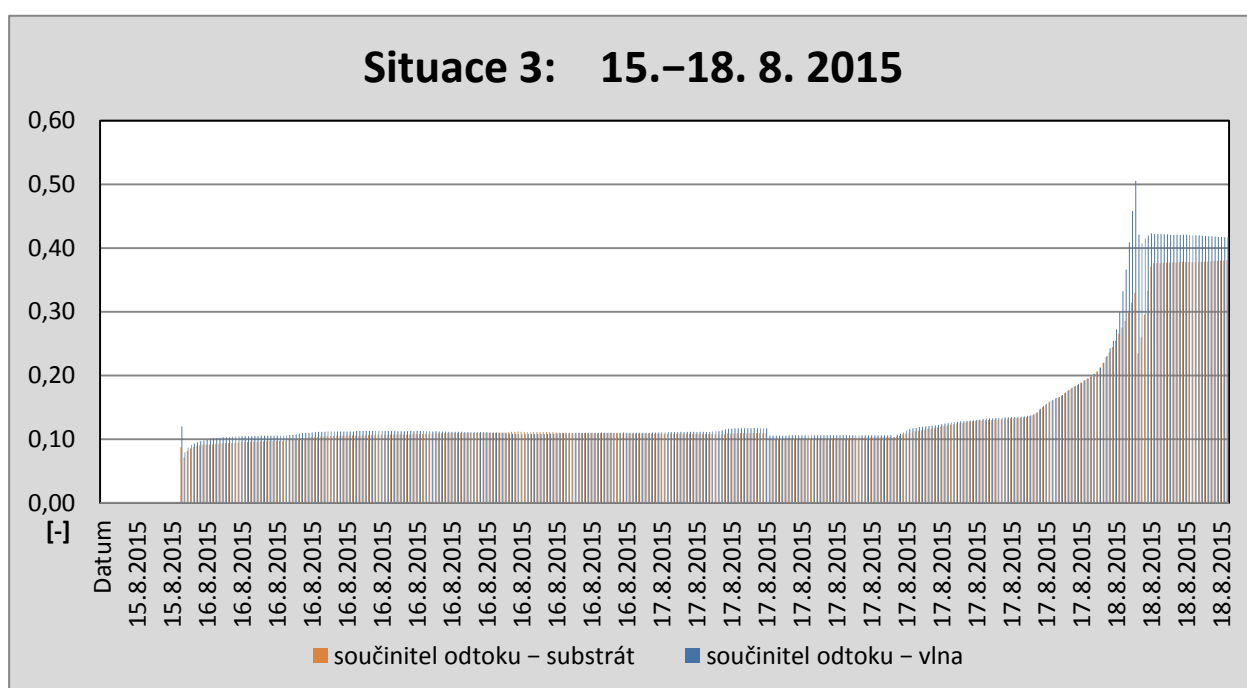
Obr. 52 – Část střechy se substrátem (8/2015)



Obr. 53 – Část střechy s minerální vlnou (8/2015)



Obr. 54 – Znázornění srážek a odtoků v situaci 3



Obr. 55 – Součinitelé odtoku C v situaci 3

Dílčí závěr

Celková bilance hydroakumulačních parametrů zaznamenaných měření a následným výpočtem je shrnuta v Tab. 33. Na experimentálním modelu nebylo prokázáno, že střecha s hydrofilní minerální vlnou má vyšší hydroakumulační kapacitu než střecha se substrátem. Velký vliv na výsledky měření měla i vegetace. Dešťové srážky 7–14 mm, rozprostřené do několika hodin, se nemusely vůbec dostat do

vegetačního souvrství, ale mohly být zachyceny střešní vegetací, jak je vidět na Obr. 52. Součinitel odtoku podle německé normy FLL je patrně proto měřen na modelech bez rostlin. Evropská norma, podle které byla provedena kalkulace,⁹⁵ požadavek na přítomnost rostlin neuvádí, což může být při vyhodnocování součinitele odtoku zavádějící. Celkový stav vegetace na modelu 3 je podrobně popsán v kapitole 4.4.

Tab. 33 – Celková bilance experimentální hydroakumulace

Situace/ materiál	Délka trvání měření [h]	Srážky [mm]	Celkové srážky ve střeše [l]	Teoretická vodní kapacita [l]	Celkový odtok ze střechy [l]	Experi- mentálně určený součinitel odtoku C [-]	Součinitel odtoku C podle národní normy ⁹⁶ [-]	Součini- tel odtoku C podle FLL ⁹⁷ [-]
1/ substrát	66	14,1	229,4	21200	73,9	0,32	0,7	0,5
1/vlna			217,6	67198	74,2	0,34		
2/ substrát	50	7,1	115,5	21200	6,9	0,06		
2/vlna			109,6	67198	8,6	0,08		
3/ substrát	57	14,8	240,8	21200	91,0	0,38		
3/vlna			228,4	67198	95,9	0,42		

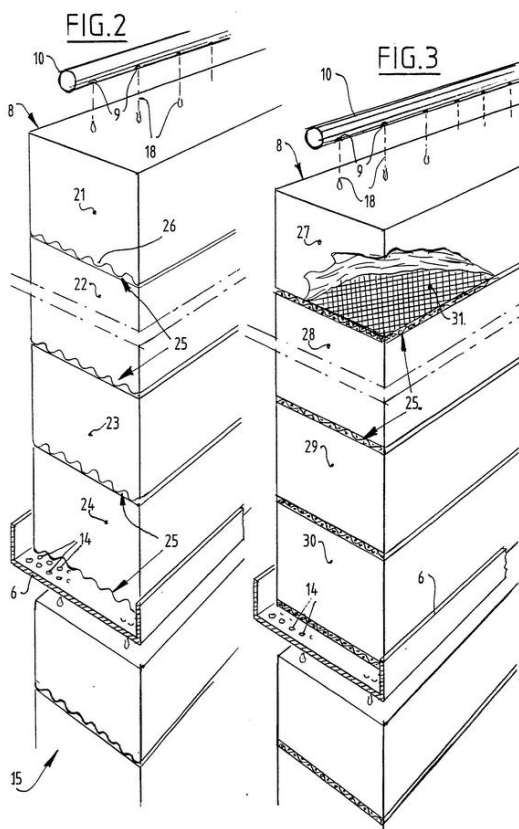
Velký vliv na hydroakumulační kapacitu měl i sklon střechy, který činil 4°. Vysoké hodnoty vodopropustnosti $mod \cdot K_f$ a schopnosti podélného proudění vody minerální vlny $q_{s,g}$ (Tab. 24) způsobily prakticky okamžitý transport dešťové vody k podokapním žlabům, jak je vidět na grafech všech třech situací. Zpoždění odtoku díky vysoké maximální vodní kapacitě WK_{max} se projevilo prakticky pouze v první měřené situaci (Obr. 48). Pro využití hydrofilní minerální vlny jako hydroakumulační vrstvy by bylo vhodnější i při takto malých sklonech použít systém drenážních zpomalovačů. Podobný systém byl s různými obměnami patentován pro vegetační stěny – nejprve firmou

⁹⁵ ČSN EN 12056-3. *Vnitřní kanalizace – Gravitační systémy: Část 3: Odvádění dešťových vod ze střech – Navrhování a výpočet*. Z2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

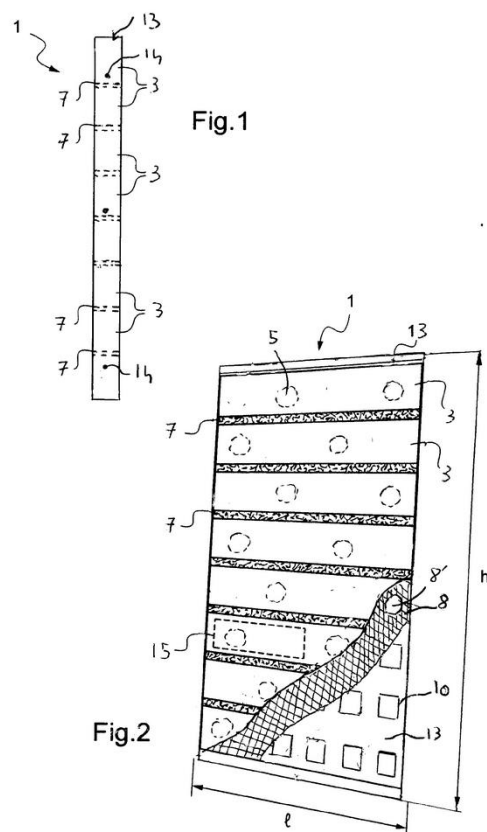
⁹⁶ ČSN 75 6760. *Vnitřní kanalizace*. Z1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

⁹⁷ FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.

Rockwool⁹⁸ a později doplněn a zdokonalen firmou CultiWall.⁹⁹ 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 (Obr. 56, Obr. 57). Takto by šlo upravit proudění vody i v pultových a šikmých střeších. Po provedeném experimentu je zřejmé, že je to nezbytné i pro střechy se sklonem 4°.



Obr. 56 – Schéma použití hydrofilní vlny ve stěnách podle patentu EP0393735 A1



Obr. 57 – Schéma použití hydrofilní vlny ve stěnách podle patentu EP2564689 A1

Drenážní zpomalovače, jejich materiál, rozmístění, účinnost v kombinaci s různými typy hydrofilní vlny nebyly v této disertační práci vzhledem k doporučenému rozsahu stran řešeny. Optimalizace drenážních zpomalovačů šikmých střech, nejenom v systémech s hydrofilní minerální vlnou, může být tématem navazujícího výzkumu.

⁹⁸ GROOT, J. F. *Wall on which vegetation can grow* [patent]. Patent, EP0393735 A1. Uděleno 24. října 1990. <http://www.google.com.sl/patents/EP0393735A1?cl=en>.

⁹⁹ LAUTENBACH, K. *Bewachsene Fassadenplatte und zugehörige bewachsene Wand* [patent]. Patent, EP2564689 A1. Uděleno 6. března 2013. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/EP2564689A1>.

4.4 Vyhodnocení modelů hydrofilní vlny z pohledu adaptace rostlin

V této části je dokumentována evoluce jednotlivých modelů popsanych v kapitole 2, včetně několika doplňkových situací. Jednotlivé modely jsou sestaveny z různých typů minerálních vln v rozdílném uspořádání. Bylo ověřováno zakořeňování dospělých rostlin, řízků (částí rostlin), klíčivost semen a dále pak vhodnost konkrétních typů hnojiva.

Rekapitulace modelu 1

Model 1 sloužil k první exploataci materiálu v praxi. Jednalo se o střechu garážového přístavku ve Velkém Poříčí a model byl sestaven na jaře roku 2013. Původní hydroizolace nebyla připravená pro účely systémového ozelenění (Obr. 58), takže bylo nutné použít ochrannou fólii odolnou vůči prorůstání kořenů – Plantex Rootbarrier¹⁰⁰ (Obr. 59). Tato fólie nebyla svařována, ale lepena oboustrannými systémovými páskami.



Obr. 58 – Původní střecha



Obr. 59 – Protikořenová ochrana

V roce 2013 ještě nebyly k dispozici údaje z měření vodopropustností ani rychlostí podélného proudění vody, takže na tomto modelu byla na přání majitele střechy použita alespoň prostorová smyčková rohož Petexdren (Obr. 60),¹⁰¹ jako doplňková drenáž. Hlavní vegetační vrstvu tvořila hydrofilní minerální vlna o objemové hmotnosti $78 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a tloušťce 100 mm (Obr. 61). Tento materiál se velmi osvědčil v hydroponickém

¹⁰⁰ DUPONT. *Plantex Rootbarrier* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.dupont.cz/vyrobky-a-sluzby/construction-materials/professional-landscape-solutions/folder-brands/plantex/products/plantex-rootbarrier.html>.

¹⁰¹ JUTA. *Petexdren 400* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.juta.cz/vyrobní-programy/geosyntetika/vyrobky/petexdren.html>.

pěstování zeleniny (viz kapitola 1.1), měl by být tedy také vhodný pro extenzivní střešní vegetaci, která je méně náročná.



Obr. 60 – Detail smyčkové rohože



Obr. 61 – Desky hydrofilní vlny

Zvoleny byly rostliny pro extenzivní až polointenzivní vegetační střechy (skalničky a malé keře brslenu). Zasazeny byly včetně kořenového balu do původní zeminy (Obr. 62). Vzhledem k tomu, že hydrofilní vlna je na rozdíl od substrátu naprosto bez živin, přidávaly se spolu s rostlinami i tablety s postupným uvolňováním pro počáteční výživu rostlin (Obr. 63). Jednalo se o tablety Silvamix Forte 60,¹⁰² NPK hnojivo z močovinoformaldehydu. Tyto velké tablety (10 g) dokážou uvolňovat živiny po dobu dvou až tří let. Byly rozmístěny rovnoměrně po celé střeše v počtu $6 \text{ ks} \cdot \text{m}^{-2}$ v rastru cca $400 \times 400 \text{ mm}$ do střední části desky.



Obr. 62 – Sazení rostlin s kořenovým balem do předem vyříznutého otvoru



Obr. 63 – Tablety s postupným uvolňováním živin

Střecha se následně zasykala krycí vrstvou zahradního substrátu (Obr. 64) a dekorační kůry (Obr. 65). Pokud by střecha byla větších rozměrů nebo byla umístěna

¹⁰² ECOLAB. *Silvamix Forte 60* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.silvamix.com>.

na větrem exponovaném místě, musely by se ještě okraje vegetačního souvrství stabilizovat proti sání větru, např. kačírkem nebo sítěmi. To v tomto případě nebylo nutné.



Obr. 64 – Krycí vrstva zahradního substrátu



Obr. 65 – Finální stav modelu po montáži (6/2013)

Na Obr. 66, Obr. 67 je dokumentován stav po prvním měsíci od zhotovení střechy. Všechny zasazené rostliny se v hydrofilní vlně ujaly a dolní část střechy byla doplněna o další malé rostliny rodu *Sedum*, *Sempervivum* a *Saxifraga*.



Obr. 66 – Stav rostlin po měsíci (7/2013)



Obr. 67 – Pohled na model shora (7/2013)

Po roce je na střeše patrný výrazný progres (Obr. 68). Všechny rostliny bujně rostou a kvetou, dokonce se daří i mrazuodolnému kaktusu rodu *Opuntia* (Obr. 69), který v těchto podmínkách vykvetl. Střecha se během roku vůbec nezalézala a nehnojila. Při počátečním hnojení tedy bylo použito cca šest desetigramových tablet na 1 m². Hnojivo o hmotnosti 60 g obsahuje podle technického listu výrobce¹⁰² celkem 10 g čistého dusíku na 1 m² (NPK 17,5-17,5-10,5). Pokud by se tyto živiny uvolňovaly po dobu dvou

let, je toto množství v souladu s doporučením FLL pro extenzivní střechy (viz poznámka pod Tab. 7).



Obr. 68 – Stav rostlin po roce (6/2014)



Obr. 69 – Stav rostlin po roce, pohled od domu (6/2014)

Následující fotky (Obr. 70, Obr. 71) dokumentují stav střechy po zimě. Rostliny se postupně vzpamatovávají a začínají růst.



Obr. 70 – Stav rostlin po zimě (4/2015)



Obr. 71 – Stav rostlin po zimě (4/2015)

Vyhodnocení modelu 1

Zvolené rostliny, hnojivo a údržba se ukázaly na této střechě z hydrofilní minerální vlny o objemové hmotnosti $76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ jako výborné, navzdory zjištěným teoretickým nedostatkům popisovaným v závěru kapitoly 4.1. Plná náhrada substrátu za hydrofilní vlnu je tedy prakticky možná. Pro ověření funkčnosti tohoto řešení byla sestavena podobná vegetační střecha ještě na jiném objektu (střecha ve Všerubech). Její popis a vyhodnocení jsou uvedeny v závěru této kapitoly.

Rekapitulace modelu 2

Model 2 sloužil k testování velmi husté minerální vlny o gramáži $120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Tento materiál se používá převážně jako hydroakumulační vrstva ve skladbách intenzivních zelených střech. Experimentem měla být ověřena hydroakumulační výhoda v praxi při výsevu trávníku bez dodatečné zálivky. Díky své zvýšené pevnosti mají desky potenciál i pro střechy s častým provozem, kde tento tužší materiál lze využít jako vrchní zpevňující vrstvu na deskách hydrofilní vlny nižších gramáží. Experiment sloužil také pro následné měření technických vlastností vlny v čase.

Sestavení modelu proběhlo v říjnu 2013. Desky se pokládaly na rostlý terén ve dvou pěticentimetrových vrstvách (Obr. 72, Obr. 73 vpravo), nebo v jedné vrstvě na nopovou fólii¹⁰³ s hydroakumulační schopností (vlevo). Na rozdíl od předchozího modelu, kde se velké tablety s postupným uvolňováním zabudovávaly přímo do desek, se v tomto případě použilo mikrogranulové trávníkové hnojivo,¹⁰⁴ které bylo vyseto spolu s travním semenem. Vysévání na holý panel se ukázalo jako problematické, protože semena na hladkém tvrdém povrchu vlivem větru nevydržela.



Obr. 72 – Sestavování modelu 2 (10/2013)



Obr. 73 – Setí trávy a prvotní hnojení (10/2013)

Po jednom měsíci nebylo travní semeno téměř vůbec zakořeněno. Největší problém představoval vítr, jehož vlivem se semena na holém panelu neudržela. Část modelu na nopové fólii dopadla nepatrně lépe (Obr. 74), avšak tráva uspokojivě vyklíčila prakticky pouze ve spárách mezi deskami, kde byla proti větru chráněna (Obr. 75). Tento způsob výsevu byl proto vyhodnocen jako nevyhovující. Pokud by se vysévalo do desek přímo,

¹⁰³ FASTRAD. *Nopovka 20 green* [online]. [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: <http://www.fastrade.cz/izolace-nopove-drenazni-folie-nopovka-katskup03060000.php>.

¹⁰⁴ SUBSTRAL. *100denní hnojivo pro trávník* [online]. [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: http://www.substral.cz/100_denni_hnojiva.php.

muselo by to být v kryté hale nebo ve skleníku. Ve venkovních podmínkách je nutné semena stabilizovat substrátem.



Obr. 74 – Travní semeno na desce nad nopovou fólií (11/2013)



Obr. 75 – Travní semeno na desce položené volně (11/2013)

Z původního zatravnění nezbylo po zimě téměř nic. Restart modelu proběhl v květnu 2014, přičemž znovuosetí neprobíhalo na holém panelu, ale už na tenké vrstvě substrátu. Tráva byla seta částečně na substrát a částečně na holý panel (Obr. 76), který byl ihned doplněn krycí vrstvou substrátu (Obr. 77). Celková vrstva substrátu byla cca 20 mm. Takto byla travní semena včetně mikrogranulového hnojiva stabilizována na minerálním panelu.



Obr. 76 – Znovuosetí modelu (5/2014)



Obr. 77 – Náhled hotového modelu

Experimentálně byl použit i květinový koberec Roll N Grow Plant Flowers se semeny ve speciálním plastu, který se po namočení postupně rozpadá (Obr. 78). Metoda se zkoušela pro zjednodušení ozeleňování šikmých střech. Nosný materiál květinového koberce se rozpadl několik minut po namočení (Obr. 79). Pro šikmé střechy nebude tento druh výrobku vhodný, protože semena by byla ihned po rozpadnutí plastu

odplavena deštěm či povrchovou zálivkou. Pro tuto aplikaci by bylo vhodnější, kdyby se plast, který obsahuje semena, rozpadl až po zakořenění rostlin (cca po měsíci od setí).



Obr. 78 – Detail květinového koberce



Obr. 79 – Rozpad nosné vrstvy květinového koberce po zalití vodou

Semena květinového koberce vůbec nevyklíčila. Travní semena vyklíčila na deskách hydrofilní minerální vlny o takto vysoké gramáži pouze v části, kde byla umístěna nopová fólie (Obr. 80). Model nebyl zaléván, takže byl odkázán pouze na akumulovanou vodu. Primární zálivka se dobře držela v hydrofilní vlně na plastové nopové fólii, ze které nemohla odtéci tak rychle jako z části, kde byly desky volně položeny na terén. Zde trvalo klíčení výsevu výrazně pomaleji (Obr. 81).



Obr. 80 – Vyklíčení travních semen v části nad nopovou fólií (5/2014 – po 14 dnech)



Obr. 81 – Náhled na celý experimentální model (5/2014 – po 21 dnech)

Model se následně nechal bez údržby volně zarůst rostlinami. Po roce už byl plně zarostlý trávou, náletem plevelu a odnožemi jahod z vedlejšího záhonu. Vzorky z takto prokořeněných přirozeně stařených desek hydrofilní vlny byly následně detailně měřeny, aby byly dokumentovány změny technických parametrů desek. Výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 4.2.



Obr. 82 – Vegetace na modelu 2 po pěti měsících (10/2014)



Obr. 83 – Minerální vlna porostlá trávou (10/2015)



Obr. 84 – Minerální vlna prorostlá kořeny trávy a jahod (10/2014)



Obr. 85 – Detail jemného prokořenění (10/2014)

Vyhodnocení modelu 2

Semenům trávy se dařilo klíčit výrazně lépe v části modelu, kde byla umístěna plastová nopová fólie a hydrofilní vlna byla pouze v jedné 50mm vrstvě. Dešťové srážky se plně držely v deskách po dobu několika dní. Takto měl výsev dostatek vláhy pro vyklíčení. V části modelu umístěném na terénu, kde byly desky ve dvou vrstvách, se dešťové srážky kvůli vysoké vodopropustnosti (kapitola 4) držely pouze ve spodní části souvrství. Horní vrstva desek tedy byla sušší než spodní část, což mělo kritický dopad na klíčivost semen.

Hydroakumulační výhoda desek z minerální vlny se potvrdila při výsevu do tenkých desek na částečně propustné podložce. Při výsevu do desek o tloušťce 100 mm už bude nutné použít standardní zálivky jako u substrátu, protože hydroakumulace probíhá kvůli velké vodopropustnosti zejména ve spodní části desek.

Rekapitulace modelu 3

Třetí model sloužil zejména pro ověření a kalkulaci hydroakumulace spojené s určením reálného součinitele odtoku vody ze střechy. Model je podrobně popsán v kapitolách 2 a 3.2. Následující fotodokumentace proto už jenom přibližuje vývoj a stav rostlin v čase.



Obr. 86 – Hydrofilní vlna tloušťky 50 mm a hustoty $120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$



Obr. 87 – Sazení rostlin včetně kořenového balu



Obr. 88 – Zасыпání minerální vlny tenkou vrstvou substrátu (20 mm)



Obr. 89 – Dosazení řízků rostlin; na obě části modelu byly vysázeny shodné druhy rostlin ve stejném množství (pohled z boku 6/2014)

V prvním modelu byly sázeny rostliny kompletně s kořenovým balem, což je nejdražší, ale nejbezpečnější způsob ozelenění střechy. Používá se hlavně u střech malých rozměrů. Ve druhém modelu bylo použito setí semen, což představuje neekonomičtější způsob ozelenění, který má nevýhodu v časové náročnosti. Na modelu 3 byla pro úplnost použita metoda řízkování. Řízky jsou malé části rostlin, které se rovnoměrně rozmístí do plochy střechy. Je to metoda cenově optimální a z pohledu časové náročnosti ozelenění stále přijatelná. Kromě několika rostlin, které byly vsazeny

včetně kořenového balu (Obr. 86, Obr. 87), bylo řízkování aplikováno na celém modelu (Obr. 88, Obr. 89).

Použitý substrát byl už předem nahnojen od výrobce, takže hnojivo bylo aplikováno pouze v části minerální vlny. Byly použity stejné tablety jako na modelu 1,¹⁰⁵ ale výrazně v menším množství (čtvrtiny tablet rovnoměrně rozmístěné cca 400 mm od sebe). Toto množství se podle vizuálního hodnocení rostlin ukázalo po dvou měsících jako nedostatečné, tudíž byla část střechy z anorganických minerálních desek doplněna ještě o mikrogranulové dlouhodobé hnojivo, stejné jako na modelu 2.¹⁰⁶



Obr. 90 – Pohled z horní části modelu. Vlevo část se substrátem, vpravo část s vlnou (8/2014)



Obr. 91 – Pohled ze spodní části modelu. V pravé části, kde je substrát, je vidět lepší prospívání rostlin (8/2014)

Po dohnojení trávnickovým hnojivem nastal prudký nárůst vegetace na minerální vlně (Obr. 92, Obr. 93). Pro vyrovnání vegetace i v části střechy se substrátem byla tato část dohnojena stejným způsobem jako část s anorganickou vlnou.



Obr. 92 – Pohled z horní části modelu. Minerální vlna v pravé části (9/2014)

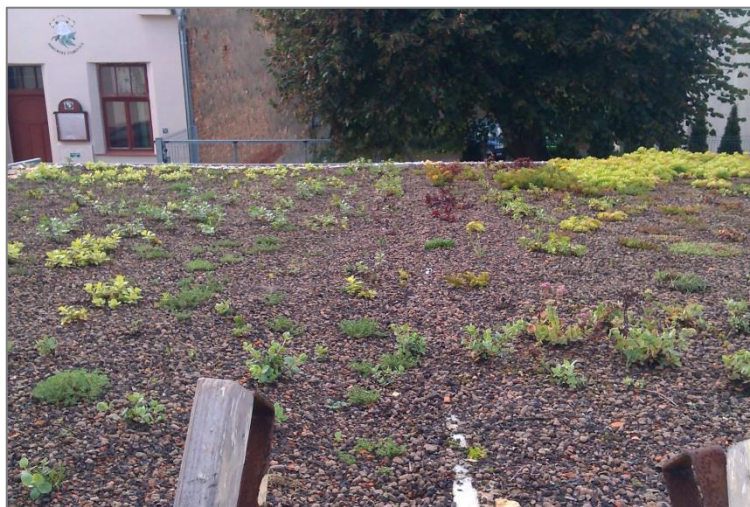


Obr. 93 – Pohled zespodu na prospívající vegetaci na minerální vlně (9/2014)

¹⁰⁵ ECOLAB. *Silvamix Forte 60* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.silvamix.com>.

¹⁰⁶ SUBSTRAL. *100denní hnojivo pro trávník* [online]. [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: http://www.substral.cz/100_denni_hnojiva.php.

Dohnojení proběhlo úspěšně, v říjnu už byly obě části střechy ozeleněny rovnoměrně (Obr. 94).



Obr. 94 – Vyrovnaný stav rostlin (10/2014)

Během zimy 2014/2015 došlo k uhynutí části rostlin, zejména na hydrofilní vlně, proto byly do střechy doplněny nové rostliny ve formě řízků.



Obr. 95 – Stav po zimě (4/2015).
Minerální vlna vpravo



Obr. 96 – Dosázení rostlin (5/2015).
Minerální vlna vpravo

Léto 2015 bylo extrémně suché. Experimentální model byl veden čistě jako extenzivní střecha, takže zde neprobíhalo žádné zalévání, ani když byly znovu osázeny řízky rostlin. Úplné vynechání zálivky se ukázalo jako chyba, rostliny nezvládly zakořenění ani v části s hydrofilní minerální vlnou, která měla lépe držet vodu. Projevil se fakt, že vlna na střeše se sklonem 4° spíše vodu odváděla, než zadržovala. Stav rostlin je dokumentován na Obr. 97, Obr. 98. Na hydrofilní vlně takto vysoké gramáže (120 kg·m⁻³) se vegetace udržela hlavně ve spodní části pultové střechy, kde bylo dostatek vody, která se zde hromadila.



Obr. 97 – Část střechy se substrátem (6/2015) Obr. 98 – Část střechy s vlnou (6/2015)

Vyhodnocení modelu 3

Stejně jako měření reálné hydroakumulace (kapitola 3.2) také analýza stavu rostlin potvrzuje, že u hydrofilní minerální vlny převažuje schopnost vodu propouštět nad schopností vodu zadržovat. Pokud by na tomto modelu střechy o sklonu 4° byly instalovány drenážní zpomalovače, jak je popisováno v závěru kapitoly 4.3, výrazně by se zvýšila hydroakumulační kapacita střechy, distribuce vody by byla rovnoměrnější, což by následně prospělo i střešní vegetaci.

Instalace kombinovaných desek minerální vlny ve Všerubech u Plzně

Model 1 s minerální vlnou OH76 byl z pohledu adaptace rostlin vyhodnocen jako vynikající. Modely 2 a 3 s minerální vlnou OH120 byly vyhodnoceny jako ne zcela vyhovující. Na realizaci vegetační střechy garáže v Plzni se použily oba typy těchto desek ve vzájemné kombinaci. Na tomto doplňkovém modelu nebylo prováděno žádné měření technických vlastností, byl vyhodnocován pouze stav a vývoj rostlin.

Střecha garáže má sklon 2° , je zde provedeno standardní hydroizolační souvrství, z vrchní strany překryté protikořenovou fólií. Vegetační souvrství je tvořeno kombinací desek tvrdých (OH120, tloušťka 50 mm) a středních (OH76, tloušťka 100 mm). Pevnější desky byly umístěny jako spodní vrstva vegetačního souvrství (Obr. 99), v části střechy tvořily tyto pevnější desky vrchní, zpevňující vrstvu. Na této střeše nebyla umístěna žádná plošná drenáž typu nopové fólie nebo smyčkové rohože.

Pro výživu rostlin byly použity velké tablety Silvamix Forte 30 v počtu cca $6 \text{ ks} \cdot \text{m}^{-2}$, podobně jako na modelu 1. Jejich rozmístění je znázorněno na Obr. 100.



Obr. 99 – Pokládka základní vrstvy hydrofilní vlny (6/2013)



Obr. 100 – Hnojivové tablety mezi deskami minerální vlny (6/2013)

V okrajových částech střechy byla plánována vegetace z kosodřevin a malých keřů. Z tohoto důvodu bylo nutné zvýšit tloušťku vegetační vrstvy. Bylo tedy použito vrstvení desek minerální vlny až do celkové výšky 350 mm (Obr. 101). Hrany desek byly seříznuty a do desek byly vykrojeny otvory pro osazování rostlin. Ty se sázely s kořenovým balem (Obr. 102). Na této střeše nebyly použity řízky rostlin ani výsev. Všechny rostliny byly sázeny už předpěstované. Jednalo se už o druhy polointenzivní zeleně, jako např. okrasné trávy, větší rozchodníky, brsleny, kosodřeviny apod.



Obr. 101 – Vrstvení desek OH76 v okrajových částech střechy (6/2013)



Obr. 102 – Sazení rostlin s kořenovým balem včetně původního substrátu (6/2013)

Modelace terénu byla provedena také na vnitřní ploše střechy (Obr. 103). Ta se pak zasypala okrasným kamenivem pro lepší stabilizaci a ochranu proti větru a doplnil se chodník z plochých kamenů (Obr. 104).



Obr. 103 – Doplnění okrasného kameniva a umělá modelace terénu pomocí minerální vlny



Obr. 104 – Celkový náhled na dokončenou střechu (6/2013)

Střecha byla vedena, na rozdíl od předchozích 3 modelů, jako polointenzivní. V období dlouhotrvajících bezdeští byla střecha dodatečně zalévána. Rostliny proto mohly pohodlně zakořenit do obou typů desek minerální vlny. Po roce a půl už byly rostliny výrazně vzrostlejší (Obr. 105, Obr. 106).



Obr. 105 – Stav střechy na podzim (10/2014)



Obr. 106 – Stav střechy na podzim – pohled 2 (10/2014)

Vyhodnocení střechy ve Všerubech

Kombinace obou typů desek z hydrofilní minerální vlny (OH76 a OH120) se ukázala jako možná. Nejdůležitější je správné zakořenění rostlin, protože minerální vlna sice dokáže zadržovat vodu, ale ta se kumuluje ve spodní části desek. Řízky rostlin nebo malé rostliny je tedy potřeba zalévat až do doby, kdy kořeny dosáhnou té části vlny, kde je nahromaděná voda. Na fotkách vytvořených po dvou letech už je vidět úspěšně propojená vegetace, která začíná tvořit souvislé plochy (Obr. 107, Obr. 108).



Obr. 107 – Stav střechy po 2 letech – spojená vegetace (6/2015)



Obr. 108 – Stav střechy po 2 letech (6/2015)

Experimenty klíčení semen v chráněném prostředí

Na hlavních modelech 2 a 3 bylo testováno klíčení semen a zakořeňování částí rostlin v minerální vlně ve venkovním prostředí. Tyto experimenty byly prováděny na extenzivních střechách bez dodatečné zálivky. Ukázalo se, že ani hydrofilní vlna nedokáže udržet dostatek vody pro uspokojivou klíčivost. Doplnkově byly proto provedeny experimenty s klíčivostí v chráněném prostředí a kontrolovanou zálivkou. Testovala se klíčivost řeřichy a kočičí trávy v minerální vlně OH76 (Obr. 109, Obr. 110) a klíčivost mrazuodolných kaktusů v minerální vlně OH45 (Obr. 111, Obr. 112). Výsledky doplňkových experimentů u obou typů minerální vlny byly vyhodnoceny z pohledu klíčivosti jako výborné.



Obr. 109 – Test klíčivosti řeřichy (vlevo) a kočičí trávy (vpravo)



Obr. 110 – Stav řeřichy po osmi dnech



Obr. 111 – Klíčivost kaktusových semen



Obr. 112 – Detail rostliny po 15 měsících

4.5 Výpočet vlivu hydrofilní vlny na životní prostředí a interpretace jeho výsledků

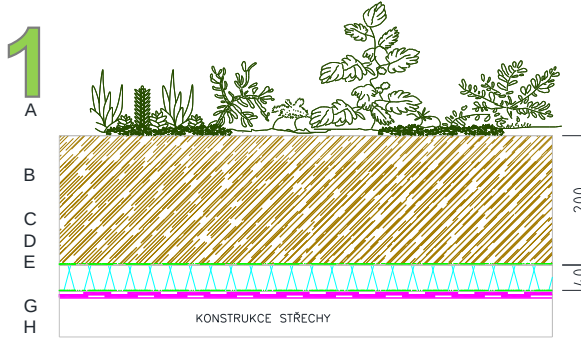
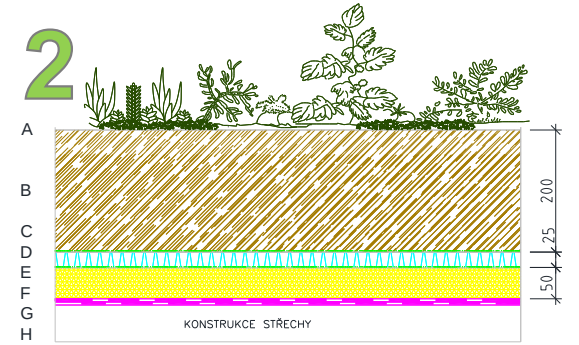
V návaznosti na metodiku celého výpočtu (LCA) a inventarizační analýzu (LCI) z kapitoly 3.4 jsou v následující části práce podrobně popsány jednotlivé druhy vegetačních střech a vyčíslen jejich dopad na životní prostředí v určených kategoriích dopadu (LCIA).

Modelově jsou řešeny čtyři typy polointenzivních plochých vegetačních střech, s různým zastoupením výrobků z hydrofilní minerální vlny, ale vždy se stejně silnou vegetační vrstvou (200 mm), která charakterizuje referenční tok funkční jednotky (1 m²). Všechny skladby obsahují shodnou hydroizolační vrstvu z dvou asfaltových pásů. Toto bitumenové souvrství je speciálně navrženo pro aplikaci ve vegetačních střechách, obsahuje vyztužení proti prorůstání kořenů. Nosnou konstrukci tvoří železobetonový střešní panel, který ale není součástí environmentálního hodnocení.

První skladba vegetační střechy je tvořena substrátem, pod nímž je umístěna drenážně-akumulační nopová fólie s integrovanou filtrací (Obr. 16). Tato skladba je velmi rozšířená a byla i legislativně ukotvena v ETA standardech.¹⁰⁷ Kompletní složení skladby je popsáno v Tab. 34. Pro simulaci v programu GaBi bylo nutné substrátovou směs rozdělit na jednotlivé součásti a ty zadat do kalkulace zvlášť. Podrobné složení substrátových směsí je znázorněno v Tab. 35. Pro skladby 1 a 2 byl použit kvalitní substrát s vyšším podílem organických částí, aby se snížila míra umělého hnojení během dalších let údržby střechy.

¹⁰⁷ ETA-13/0668. *European Technical Approval: Kits for Green Roofs*. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2013.

Tab. 34 – Polointenzivní vegetační střechy bez hydrofilní minerální vlny

1		2		
A	polointenzivní vegetace			300 mm
B	substrát	200 mm	substrát	200 mm
C	filtrační geotextilie 120 g·m ⁻²	1 mm	filtrační geotextilie 120 g·m ⁻²	1 mm
D	drenážně-akumulační HDPE fólie	40 mm	drenážně-akumulační HDPE fólie	25 mm
E	ochranná geotextilie 300 g·m ²	2 mm	nesmáčivá WSP fólie 190 g·m ⁻²	1 mm
F			doplňková tepelná izolace z XPS třídy CS300	50 mm
G	vyztužené hydroizolační souvrství z bitumenových pásů odolné proti prorůstání kořenů			6 mm
H	nosná konstrukce střechy (není součástí hodnocení)			

Tab. 35 – Složení kalkulovaných substrátů

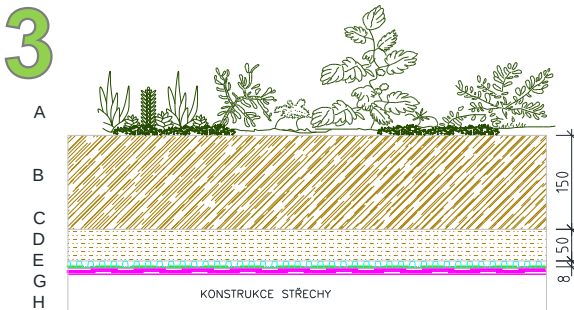
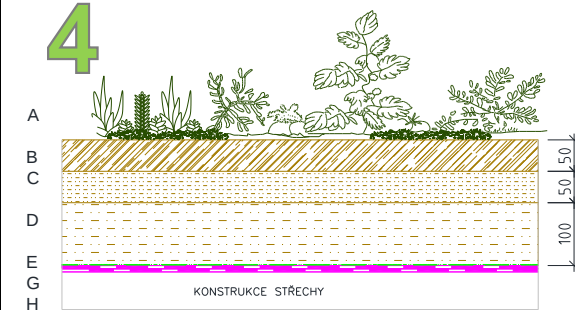
Materiál	Objemová hmotnost	Objemový obsah [%]	
	[kg·m ⁻³]	Intenzivní	Extenzivní
Keramzit (expandovaný jíł)	450	60	70
Cihlová drť	1 800	10	10
Struska	900	10	10
Rašelina	500	10	5
Kompost	500	10	5

Skladba 2 vychází ze skladby předchozí, navíc je doplněna o 50 mm tepelné izolace z extrudovaného polystyrenu. Nad XPS je položena nesmáčivá fólie, aby se snížilo množství vody zateklé do izolace a tím se snížily i tepelné ztráty střechy. Vliv této fólie

na tepelněizolační vlastnosti střešních pláštíků vegetačních střech byl podrobně popsán v odborném článku autora.¹⁰⁸ Materiál XPS bude zvyšovat energetickou náročnost vstupních materiálů, ale následně bude energii šetřit, protože zabrání tepelným únikům ze střešní konstrukce. Tento fakt je také zohledněn v komplexním hodnocení.

Následující skladby vegetačních střech už jsou kalkulovány s použitím hydrofilní vlny (Tab. 36). Ve skladbě 3 je použita hydrofilní minerální vlna o vysoké hustotě $120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Primární funkcí této desky je zvýšení míry hydroakumulace a tím snížení nákladů na údržbu (střecha se bude méně zalévat). Takto hustá deska je zde proto, aby vydržela tlak substrátu a vegetace nad ní a také aby se desky nebořily do drenážní fólie. V tomto případě byla použita čistě drenážní fólie (Obr. 17).

Tab. 36 – Polointenzivní vegetační střechy s hydrofilní minerální vlnou

3			4		
					
A	polointenzivní vegetace				300 mm
B	substrát	150 mm	substrát		50 mm
C	hydrofilní vlna 120 kg·m ⁻³	50 mm	hydrofilní vlna 120 kg·m ⁻³		50 mm
D	drenážní HDPE fólie	8 mm	hydrofilní vlna 76 kg·m ⁻³		100 mm
E	ochranná geotextilie 300 g·m ⁻²	2 mm	ochranná geotextilie 300 g·m ⁻²		2 mm
G	vyztužené hydroizolační souvrství z bitumenových pásů odolné proti prorůstání kořenů				6 mm
H	nosná konstrukce (není součástí hodnocení)				

Skladba 4 je celá založena na hydrofilní vlně. Spodní vrstvu tvoří deska nižší gramáže $76 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, která má však velmi vysokou vodopropustnost (viz kapitola 4.1), takže v této skladbě odpadá použití plošné drenáže z nopové fólie. Pro zvýšení tuhosti je ve vrchní vrstvě použita hydrofilní vlna vyšší hustoty (stejná jako ve skladbě 3) a pro lepší zakořeňování rostlin i 50 mm střešního substrátu. Tato skladba je zde uvedena

¹⁰⁸ 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, 2015, č. 824. ISSN 1660-9336. IF=0,15.

proto, aby se zjistil vztah mezi energií potřebnou k výrobě minerální izolace a mezi energií ušetřenou během provozu, protože minerální vlna má i za vlhka relativně dobré tepelněizolační vlastnosti (viz výsledky měření v kapitole 4.1).

U všech čtyř skladeb je počítáno s postupným doplňováním živin na jaře a na podzim (Tab. 37). Jedná se o polointenzivní vegetační střechy (mezistupeň mezi extenzivními a intenzivními skladbami), čemuž je přizpůsobeno i umělé hnojení. Skladby 1 a 2 obsahující na živiny bohatší intenzivní substrát budou hnojeny dávkami hnojiva doporučenými pro extenzivní systémy. Skladby 3 a 4 s anorganickou minerální vlnou a na živiny chudším extenzivním substrátem budou hnojeny dle doporučení pro intenzivní skladby (viz komentář pod Tab. 7). Takto bude možné simulovat vliv hnojiva v rámci fází B2 (údržba) a celkovém kontextu ostatních fází LCA.

Tab. 37 – Plánované hnojení modelovaných polointenzivních střech

Hnojení	Poměr NPK	Doplňování hnojiva [g(N)·m ⁻²]	
		Intenzivní substrát	Extenzivní substrát
Jarní dávka	19:06:12	3	4
Podzimní dávka	10:09:19	3	4

V rámci údržby střech (fáze B4) je počítáno s pletím, odstraňováním náletů rostlin, listů a také s doplňováním substrátu, který bude postupně odebírán při pletí. Roční ztráta substrátu je počítána 1 % a jeho doplnění bude probíhat v pětiletých cyklech. Odumřelé rostliny, nálet a plevel bude vyhozen spolu s komunálním odpadem a toto množství (0,5 kg·m⁻²·rok⁻¹) je započítáno do LCA modelu.

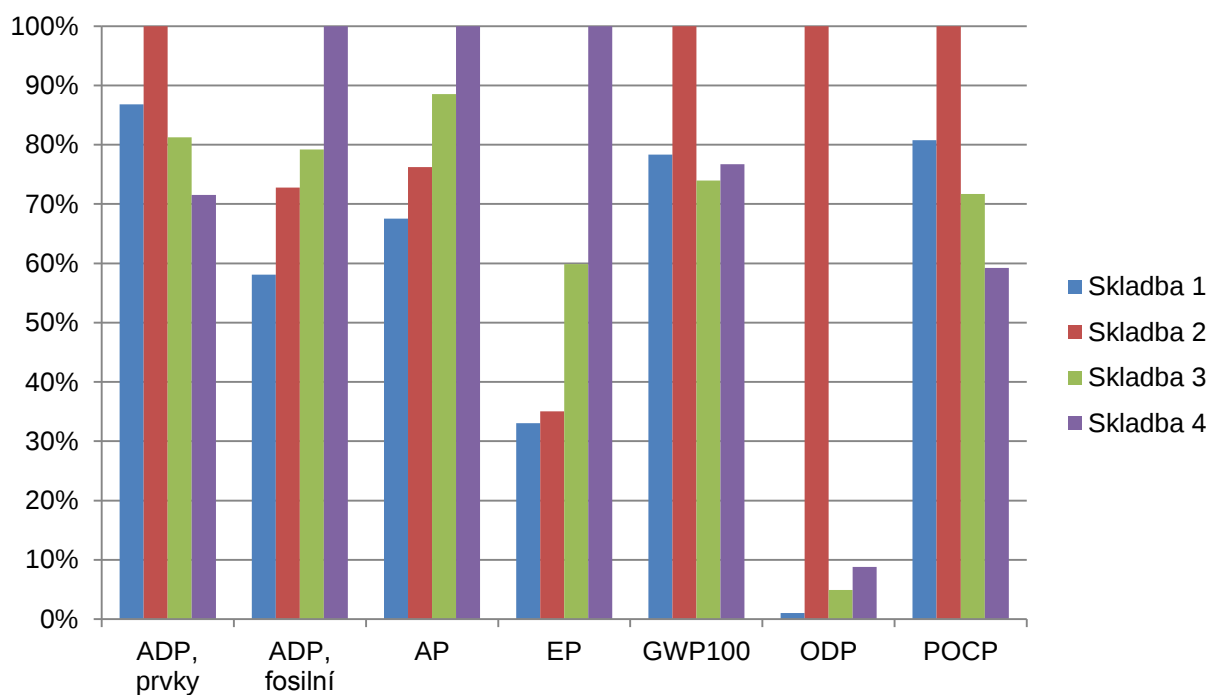
Při modelování fází dopravy je vždy počítáno s menším nákladním vozidlem s dieslovým motorem a emisní třídou EURO 4. U fází A2 a A4 je počítáno s dopravou střešních materiálů 100 km od výroby. V rámci konce životního cyklu střechy je veškerý materiál odvážen na skládku, která je modelována 20 km od místa střechy.

Výsledky kalkulace

Celkové výsledky kalkulace dopadů na životní prostředí všech čtyř skladeb ve všech čtyřech fázích LCA jsou vyčísleny v Tab. 38 a graficky znázorněny na Obr. 113.

Tab. 38 – Celkový vliv na životní prostředí zkoumaných vegetačních střeš ve zvolených kategoriích dopadu

Kategorie dopadu	Jednotka	Skladba 1	Skladba 2	Skladba 3	Skladba 4
<i>ADP, prvky</i>	[kg Sb ekv.]	9.02E-05	1.04E-04	8.45E-05	7.44E-05
<i>ADP, fosilní</i>	[MJ]	6.27E-01	7.85E-01	8.54E-01	1.08E+00
<i>AP</i>	[kg SO ₂ ekv.]	3.17E-01	3.58E-01	4.16E-01	4.70E-01
<i>EP</i>	[kg PO ₄ ³⁻ ekv.]	5.80E-02	6.15E-02	1.05E-01	1.75E-01
<i>GWP100</i>	[kg CO ₂ ekv.]	9.78E+01	1.25E+02	9.23E+01	9.58E+01
<i>ODP</i>	[kg CFC 11 ekv.]	5.14E-06	4.95E-04	2.43E-05	4.35E-05
<i>POCP</i>	[kg Ethene ekv.]	3.09E-02	3.82E-02	2.74E-02	2.26E-02



Obr. 113 – Porovnání jednotlivých skladeb vegetačních střeš v jednotlivých dopadových kategoriích LCIA

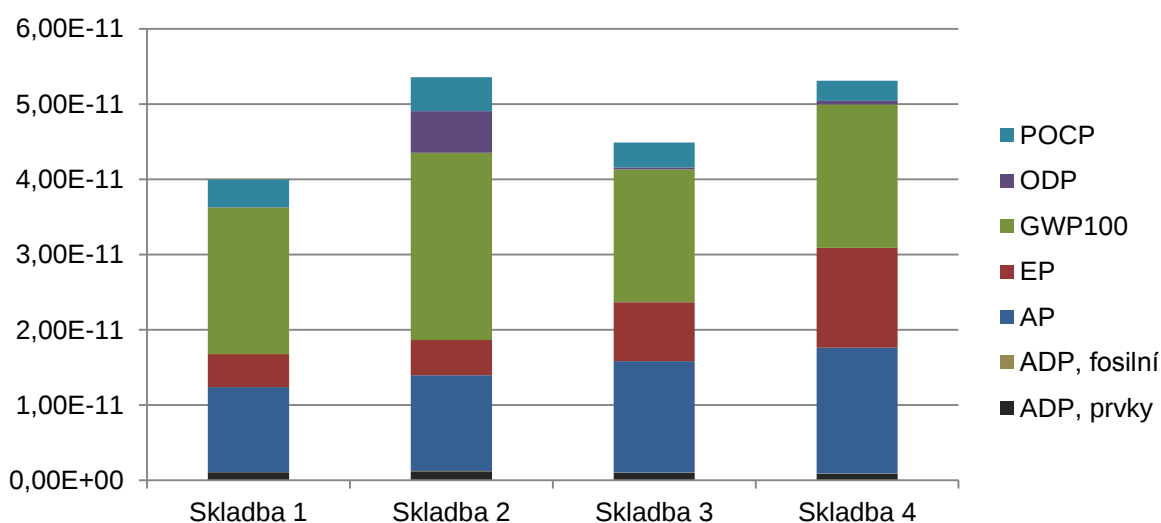
Skladba č. 2 s extrudovaným polystyrenem (červený sloupec) má největší vliv na životní prostředí ve čtyřech kategoriích dopadu (potenciál úbytku surovin *ADP* nefosilních zdrojů, potenciál globálního oteplování *GWP100*, potenciál úbytku stratosférické ozonové vrstvy *ODP* a potenciál tvorby přízemního ozonu *POCP*). Tento velký dopad na životní prostředí je pravděpodobně zapříčiněn materiálovým zdrojem XPS, což je ropa – neobnovitelný zdroj.

Skladba 4 tvořena zejména hydrofilní minerální vlnou (fialový sloupec) nejvíce ovlivňuje zbývající tři kategorie dopadu na životní prostředí (potenciál úbytku surovin *ADP* fosilních zdrojů, potenciál acidifikace půdy a vody *AP* a potenciál eutrofizace *EP*). Důvodem těchto zvýšených dopadů je zejména energetická náročnost výroby minerální vlny a energetický mix České republiky, který je z převážné většiny tvořen uhelnými elektrárnami (57 %). Další podrobnosti o dopadu hydrofilní minerální vlny na životní prostředí viz EPD v příloze práce.

Přímá interpretace v jednotlivých kategoriích dopadu se může jevit jako nesnadno pochopitelná. Byla proto provedena normalizace výsledků, kde je vyčíslena a následně zobrazena velikost jednotlivých kategoriích dopadu v určených skladbách vegetačních střeš (Tab. 39, Obr. 114).

Tab. 39 – Normalizované environmentální dopady vegetačních střeš ve zvolených kategoriích dopadu

Kategorie dopadu	Jednotka	Skladba 1	Skladba 2	Skladba 3	Skladba 4
<i>ADP, prvky</i>	[-]	1.07E-12	1.23E-12	1.01E-12	8.79E-13
<i>ADP, fosilní</i>	[-]	1.99E-14	2.49E-14	2.77E-14	3.42E-14
<i>AP</i>	[-]	1.13E-11	1.27E-11	1.48E-11	1.67E-11
<i>EP</i>	[-]	4.39E-12	4.66E-12	7.81E-12	1.33E-11
<i>GWP100</i>	[-]	1.95E-11	2.49E-11	1.77E-11	1.91E-11
<i>ODP</i>	[-]	5.75E-14	5.54E-12	2.74E-13	4.86E-13
<i>POCP</i>	[-]	3.64E-12	4.51E-12	3.31E-12	2.66E-12
Σ	[-]	3.99E-11	5.36E-11	4.49E-11	5.31E-11



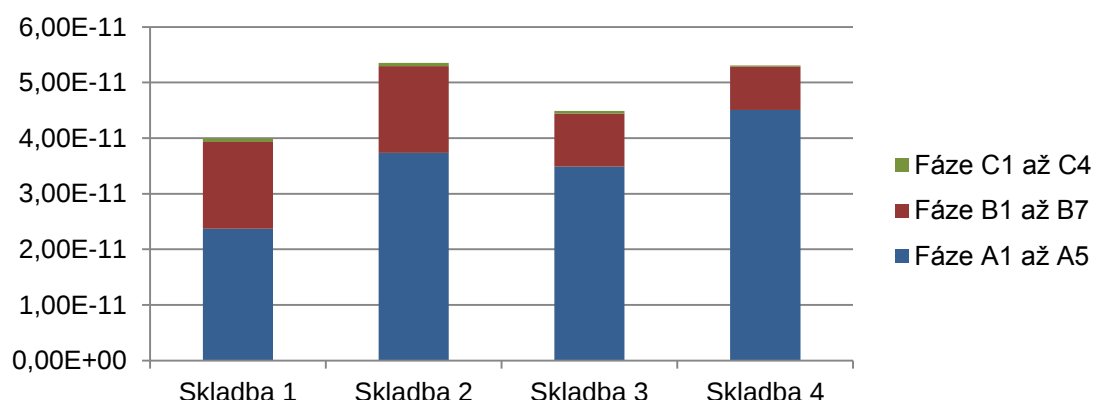
Obr. 114 – Grafické zobrazení normalizovaných výsledků

Z grafu (Obr. 114) 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*). U hydrofilní minerální vlny tvoří jmenované potenciály 92,81 % ze všech kategorií dopadu. 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 CO₂ způsobující skleníkový efekt.

Normalizované výsledky lze interpretovat i z pohledu rozdělení vlivu na životní prostředí podle jednotlivých fází životního cyklu výrobku nebo subsystému. Tabulka (Tab. 40) a graf (Obr. 115) ukazuje normalizované rozdělení podle evropské normy ČSN EN 15978.¹⁰⁹

Tab. 40 – Normalizované dopady na životní prostředí ve třech fázích LCA

Fáze	Jednotka	Skladba 1		Skladba 2		Skladba 3		Skladba 4	
A1 až A5	[-]	2.37E-11	59.38 %	3.73E-11	69.69 %	3.48E-11	77.64 %	4.51E-11	84.88 %
B1 až B7	[-]	1.56E-11	39.07 %	1.56E-11	29.14 %	9.58E-12	21.35 %	7.85E-12	14.79 %
C1 až C4	[-]	6.17E-13	1.55 %	6.28E-13	1.17 %	4.51E-13	1.01 %	1.72E-13	0.32 %
Σ	[-]	3.99E-11	100 %	5.36E-11	100 %	4.49E-11	100 %	5.31E-11	100 %



Obr. 115 – Grafické zobrazení dopadů jednotlivých fází LCA

¹⁰⁹ ČSN EN 15978. *Udržitelnost staveb – Posuzování environmentálních vlastností budov – Výpočtová metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

Fáze A se týká výroby a dopravy komponentů vegetačních souvrství na stavbu a je pochopitelně nejdominantnější. Fáze B (užívání), jak bylo řečeno již v inventarizační analýze, je ovlivněna množstvím použitého hnojiva, pletím a následnou likvidací plevelu a postupnou náhradou substrátu. Poslední fáze normalizovaných výsledků (C) se týká konce životního cyklu a v kontextu předchozích fází životního cyklu má jen nepatrný význam. Detailní analýza jednotlivých fází následuje dále v textu.

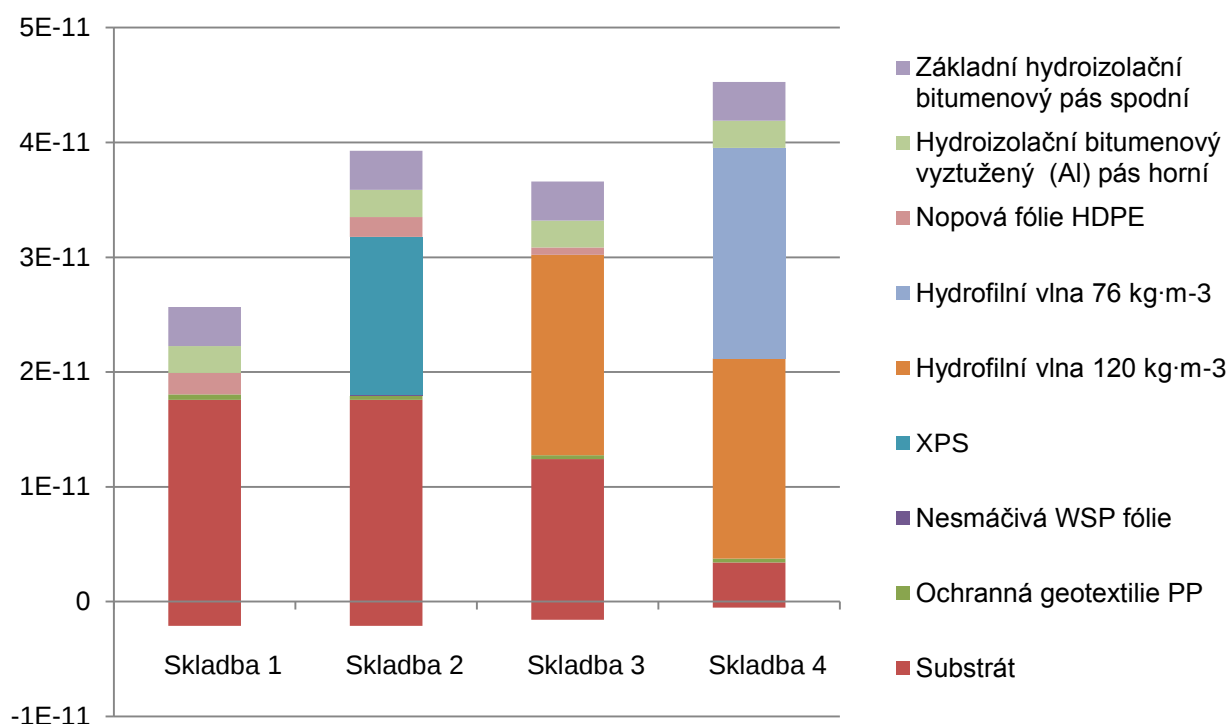
Celá produktová fáze A se skládá z výrobní fáze (A1–A3) a fáze výstavby (A4–A5). Pro tuto studii byla z fáze výstavby započítána pouze doprava, která má dopad menší než 1 % z celkových dopadů na životní prostředí. Vliv konkrétních částí vegetačního souvrství (pouze produktové fáze A1–A3) je interpretován v Tab. 41 a Obr. 116.

Tab. 41 – Normalizované dopady fází A1–A3

Materiál	Jednotka	Normalizované dopady fází A1 až A3			
		Skladba 1	Skladba 2	Skladba 3	Skladba 4
Substrát	[-]	1.55E-11	1.55E-11	1.09E-11	2.88E-12
Ochranná geotextilie	[-]	4.78E-13	3.33E-13	3.33E-13	3.33E-13
Nesmáčivá WSP fólie	[-]	---	1.16E-13	---	---
XPS	[-]	---	1.37E-11	---	---
Hydrofilní vlna 120 kg·m ⁻³	[-]	---	---	1.74E-11	1.74E-11
Hydrofilní vlna 76 kg·m ⁻³	[-]	---	---	---	1.84E-11
Nopová fólie	[-]	1.86E-12	1.74E-12	6.38E-13	---
Hydroizolační bitumenový pás vyztužený (Al)	[-]	2.35922E-12	2.36E-12	2.36E-12	2.36E-12
Základní hydroizolační bitumenový pás	[-]	3.39E-12	3.39E-12	3.39E-12	3.39E-12

Ve skladbách 1 a 2 má největší vliv použitý substrát (červený sloupec na Obr. 116). Nejedná se v žádném případě o ornici, ale pečlivě připravenou směs (Tab. 35). Tato směs obsahuje z velké části (60–70 %) i expandované jíly, které mají zvýšenou energetickou náročnost výroby. Podobně je tomu i ve skladbách 3 a 4, kde je nejdominantnější hydrofilní minerální vlna, která má také velkou energetickou náročnost výroby (viz EPD v příloze práce). Důvodem záporných dopadů substrátových směsí je přítomnost cihelné drtě a strusky, které jsou kalkulovány jako suroviny z recyklátu.

Nekončí tedy na skládce, ale jsou dále využity. Do jejich procesu zpracování je započítáváno ještě drcení na menší kousky (podobně jako u procesu expandovaných jíílů).



Obr. 116 – Podíly jednotlivých materiálů kalkulovaných vegetačních střeš ve výrobní fázi LCA

Při podrobné analýze skladby 4, tvořené hydrofilní minerální vlnou, je patrné, že oba typy minerální vlny mají stejný dopad na životní prostředí. Přitom se v prvním případě jedná o desku tloušťky 100 mm a ve druhém případě o desku tloušťky 50 mm. Je to způsobeno tím, že energetické procesy tavení, rozvlákňování, pečení a transformace (Obr. 3) výrazně převýší vliv množství suroviny na výrobu silnějšího materiálu. Neplatí tedy premisa, že deska o dvojnásobné tloušťce bude mít dvojnásobný dopad na životní prostředí.

Mezi další environmentálně významné součásti souvrství patří extrudovaný polystyren ve skladbě 2 (modrý sloupec na Obr. 116). Přímá energetická náročnost výroby XPS ve výrobním závodě není velká. Probíhá zde pouze pění pomocí CO₂ a formátování rozměrů. Nejzásadnější vliv je výroba suroviny pro pěnové polystyreny – kopolen. Ten se vyrábí složitými procesy z ropy, což je neobnovitelný zdroj.

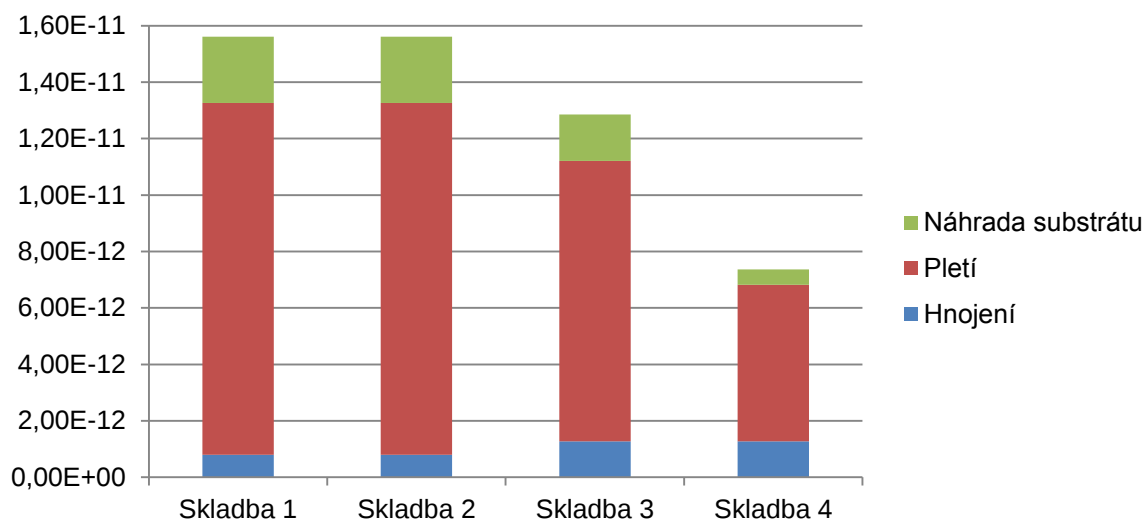
Z pohledu rozložení dopadů do jednotlivých fází LCA (Obr. 115) je patrné, že velký vliv má i fáze B – užívání. Byly proto vyčísleny podrobné dopady ve fázích B2 a B4 (Tab. 42, Obr. 117). Ostatní části „B“ byly z hodnocení vyjmuty – viz komentář pod Obr. 33.

Tab. 42 – Normalizované dopady fází B2 a B4

Fáze	Jednotka	Normalizované dopady fází B2 a B4			
		Skladba 1	Skladba 2	Skladba 3	Skladba 4
Hnojení	[-]	7.98E-13	7.98E-13	1.28E-12	1.28E-12
Pletí	[-]	1.25E-11	1.25E-11	9.94E-12	5.55E-12
Náhrada substrátu	[-]	2.34E-12	2.34E-12	1.64E-12	5.46E-13
Hnojení	[-]	7.98E-13	7.98E-13	1.28E-12	1.28E-12

Největší dopady na životní prostředí překvapivě nemá hnojení umělými hnojivy, ale pletí. V modelu je uvažováno, že odumřelé rostliny a plevel, spolu se substrátem na kořenech, budou vyhozeny do komunálního odpadu a poté spáleny. Za kalkuloovanou dobu životního cyklu (20 let) je to přibližně 35 kg odpadu tohoto typu. Plevel je spolu se zbytky substrátu pálen a s tím jsou spojeny i emise plynů. Pokud by byl plevel profesionálně kompostován, environmentální dopady by se výrazně snížily.

Nutnost náhrady substrátu je menší ve skladbách, kde je minerální vlna. Především je to patrné na grafu skladby 4 (Obr. 117), kde je pouze minerální vlna s malou vrstvou substrátu. U pletí vegetace v minerální vlně nedochází k takovému úbytku materiálu jako u substrátu, protože desky jsou soudržnější.



Obr. 117 – Podíly jednotlivých procesů ve fázi LCA užívání

Zohlednění různých úrovní tepelněizolačních vlastností jednotlivých skladeb

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 (Obr. 35, Obr. 43, Obr. 44). Proto byl proveden doplňkový výpočet všech čtyř skladeb, kde referenčním tokem naplnění funkce funkční jednotky není množství substrátu pro růst rostlin (v předchozí kalkulaci 200 mm vegetační vrstvy), ale jednotný referenční tok tvoří skladby s požadovanými hodnotami součinitele prostupu tepla konstrukcí. Podle ČSN 730540-2¹¹⁰ platí pro střechy požadovaná hodnota $0,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Tuto hodnotu ani jedna skladba nesplňuje, proto musí být přidáno určité množství EPS. Skladba 2 už obsahuje extrudovaný polystyren, který má výborné tepelněizolační vlastnosti a je nenasákavý vodou. Tato konstrukce tedy bude potřebovat nejmenší množství přidaného EPS. Skladba 1, která obsahuje pouze substrát, bude naopak potřebovat největší množství přidané izolace (Tab. 43). Skladba 4 s minerální vlnou dosahuje podobných výsledků tepelné účinnosti jako skladba s XPS.

Tab. 43 – Množství přidaného EPS pro dosažení požadovaného $U = 0,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

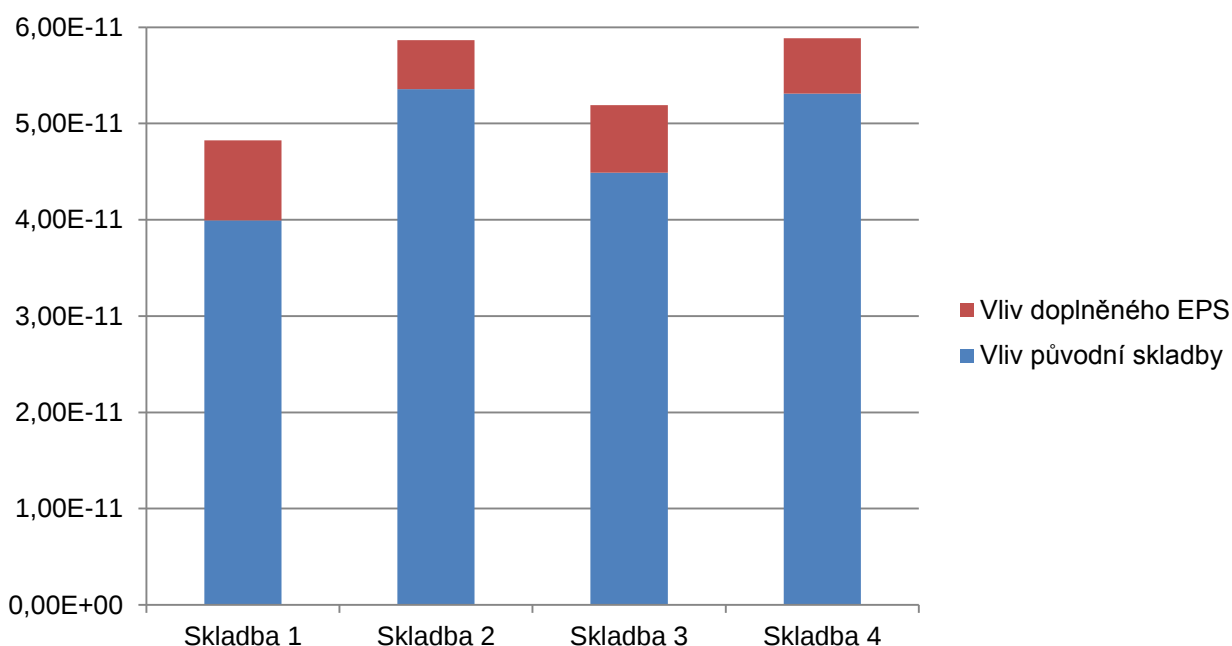
	Skladba 1	Skladba 2	Skladba 3	Skladba 4
Množství EPS [mm]	130	80	110	90

Po přepočítání environmentálních dopadů a normalizaci výsledků je možné posoudit vliv EPS na celkové výsledky analýzy životního cyklu (Tab. 44, Obr. 118).

Tab. 44 – Celkové normalizované dopady včetně přidaného EPS pro dosažení upraveného referenčního toku

	Jednotka	Skladba 1	Skladba 2	Skladba 3	Skladba 4
Vliv původní skladby	[-]	3.99E-11	5.36E-11	4.49E-11	5.31E-11
Vliv doplněného EPS	[-]	8.31E-12	5.11E-12	7.03E-12	5.75E-12
Σ	[-]	4.82E-11	5.87E-11	5.19E-11	5.88E-11

¹¹⁰ ČSN 73 730540-2. *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Změna 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.



Obr. 118 – Grafické znázornění normalizovaných dopadů včetně EPS

Environmentálně nejlepší skladbou i po úpravě referenčního toku a doplnění EPS zůstává skladba 1, která je tvořena substrátem. Rozdíl oproti skladbě založené na hydrofilní vlně (4) se ale snížil z 24,77 % na 18,01 %. Také rozdíl oproti skladbě založené na hydrofilní vlně pouze částečně (3) se snížil, a to z původních 11,02 % na současných 7,06 %.

Celkové vyhodnocení vlivu hydrofilní vlny na životní prostředí

Z podrobného hodnocení environmentálních dopadů konstrukcí vegetačních střech v celém jejich životním cyklu vyplývá, že hydrofilní vlna má v tomto ohledu dominantní vliv. Je to způsobeno především její velmi náročnou výrobou. Zejména procesy tavení kameniva a tvrzení vlny (Obr. 3) se na energetické náročnosti podílejí nejvíce. V České republice stále v energetickém mixu převažují uhelné elektrárny (57 %, EIA2011). Pokud by výroba minerální vlny probíhala na území, kde je větší podíl jaderných elektráren a obnovitelných zdrojů energie, dopady hydrofilní vlny na životní prostředí by se výrazně snížily. Normalizované dopady na výrobu 1 MJ elektrické energie podle databáze Ecoinvent v. 2.0¹¹¹ jsou uvedeny v Tab. 45.

¹¹¹ ECOINVENT CENTRE. *Ecoinvent v. 2.0*. Švýcarsko: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007. Dostupné z: <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>.

Tab. 45 – Porovnání normalizovaných dopadů jednotlivých energetických mixů

Energetický mix	Jednotka	Normalizovaný dopad	Procentuální podíl vzhledem k ČR
Česká republika	[-]	4.79E-12	100 %
Rakousko	[-]	1.65E-12	34 %
Francie	[-]	6.57E-13	14 %

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 v tomto směru porovnatelná s ostatními umělými materiály, nicméně její vliv na životní prostředí je ze zkoumaných výrobků nejvyšší.

4.6 Dokumentace zvýšení vzduchové neprůzvučnosti

Vegetační střechy mají potenciál přispívat ke zvyšování vzduchové neprůzvučnosti střešních konstrukcí. Existují přímá měření, která tuto tezi potvrzují, např. Connelly–Murray.¹¹² Čím silnější je vegetační vrstva a hustší vegetace, tím lepší výsledky zlepšení akustiky lze očekávat. Větší potenciál mají proto střechy intenzivní, kde je vrstva substrátu až 1 m silná, než extenzivní vegetační souvrství, tvořená jen slabou vrstvou lehkého substrátu s malou plošnou hmotností a nízkou vegetací.

Hydrofilní minerální vlna ve vegetačním souvrství zvyšuje celkový součinitel prostupu tepla střechy. Byly změřeny součinitele tepelných vodivostí za sucha i za vlhka (kapitoly 4 a 4.2) a jejich vliv na tepelné vlastnosti střechy jsou uvedeny v Tab. 25. Kromě tepelněizolačních vlastností má minerální vlna i předpoklady pro zlepšování akustických vlastností konstrukcí, v nichž je použita.

Provedené experimentální měření kvantifikuje změnu vzduchové neprůzvučnosti R_w skladby lehké ploché střechy systému ProtectRoof®¹¹³ při aplikaci jednovrstvé vegetační střechy na bázi hydrofilní minerální vlny. Skladby ProtectRoof® jsou určeny především pro opláštění střech skladových a výrobních hal, kde je nutné doložit požární odolnost minimálně 15 minut. Některé objekty vyžadují i splnění zvýšených akustických

¹¹² 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.

¹¹³ ISOVER. *Lehké požárně odolné střechy PROTECTROOF® Požární odolnost REI 15 – REI 45 DP1-DP3: Podklady pro projektování*. Praha: Isover, 2015. Dostupné z: <http://www.isover.cz/data/files/protectroof-final-1545.pdf>.

nároků, proto byla provedena nová měření, mimo jiné i s vegetačním souvrstvím. Skladba původní konstrukce a její doplněná verze je uvedena v Tab. 46.

Tab. 46 – Skladba konstrukce při měření vzduchové neprůzvučnosti

Základní skladba		Doplňek základní skladby o extenzivní vegetační souvrství	
Materiál	Tloušťka [mm]	Materiál	Tloušťka [mm]
fólie Sikaplan 15G	1,5	rozchodníkový koberec	20
skelný vlies 120 g/m ²	1	substrát	30
Isover EPS 100S	120	geotextilie 300 g/m ²	1
Isover P ve dvou vrstvách s posunem spár	60	hydrofilní vlna OH76	50
PE fólie	0,2		
trapézový plech 150/280/0,75	0,75		

Následující fotky dokumentují sestavení modelu v akustické zkušebně Centrum Stavebního Inženýrství a.s. ve Zlíně. Provedená zkouška vznikla na náklady firem Saint-Gobain Construction Products CZ a.s., divize Isover a firmy Kovové profily, spol. s r. o.

Na trapézové plechy kryté parozábranou z polyetylenové fólie se nejprve položila dvojitá vrstva hydrofobizované minerální vlny Isover P (Obr. 119), která se následně doplnila pěnovým polystyrenem (Obr. 120).



Obr. 119 – Pokládání hydrofobní vlny



Obr. 120 – Doplnění vrstvy EPS

Hydroizolační fólie na skelném vliesu uzavírala základní střešní souvrství, které bylo akusticky měřeno v prvním kroku. Následně byla skladba doplněna o hydrofilní vlnu (Obr. 121), separační geotextilii, vrstvu substrátu (Obr. 122, Obr. 123) a rozchodníkový

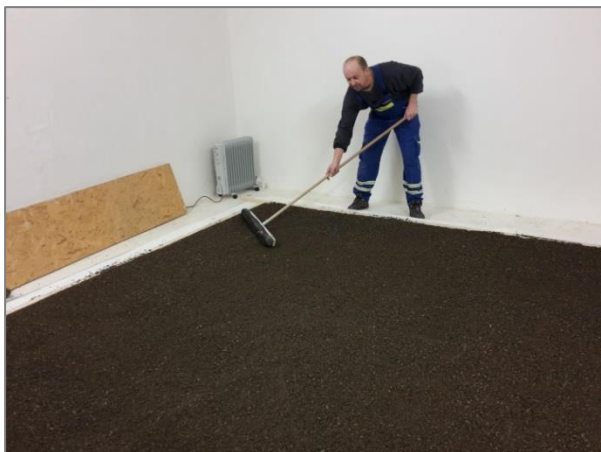
koberec (Obr. 124, Obr. 125). Všechny komponenty byly instalovány v suchém stavu, resp. s běžnou vlhkostí. Objemová hmotnost substrátu byla naměřena $986 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, plošná hmotnost rozchodníkového koberce pak $14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.



Obr. 121 – Pokládání hydrofilní vlny



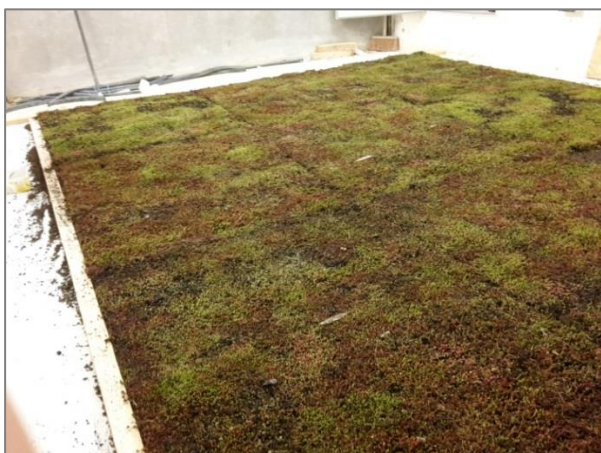
Obr. 122 – Substrát na separační geotextili



Obr. 123 – Rozhrnování a zarovnávání substrátu na výšku 30 mm



Obr. 124 – Pokládání rozchodníkového koberce po kusech o velikosti cca $1 \times 1 \text{ m}$



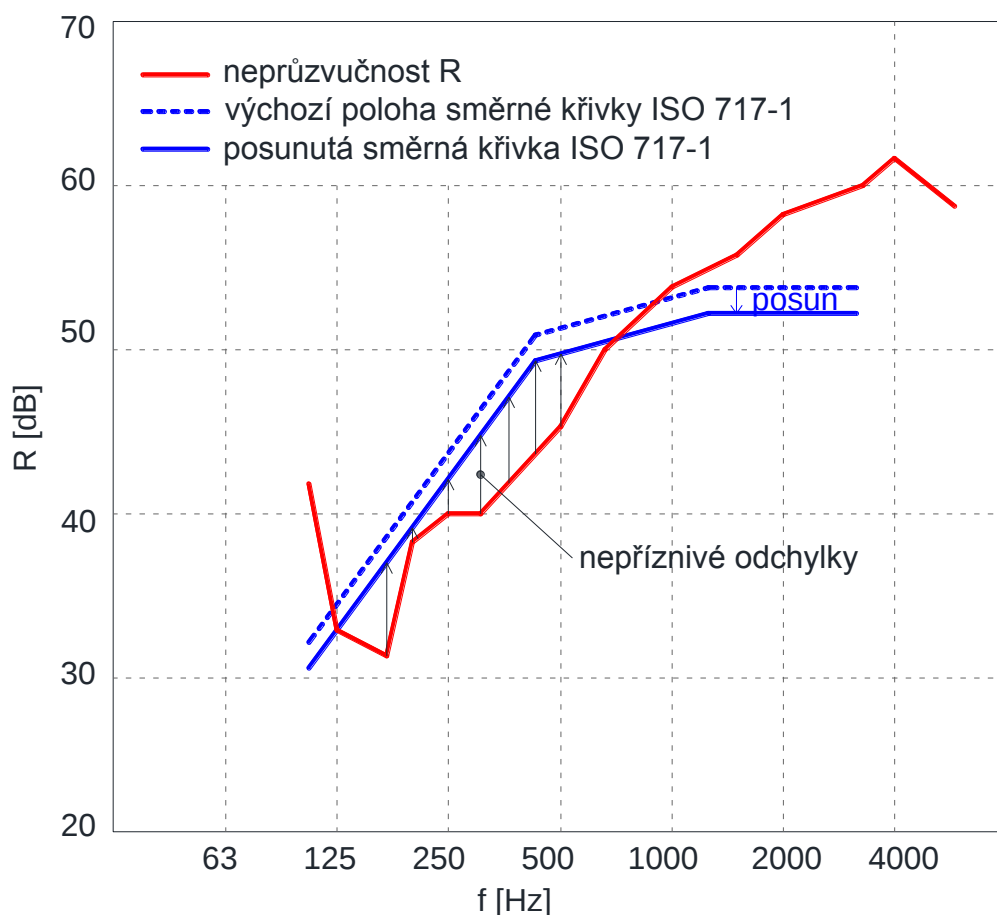
Obr. 125 – Finální povrch měřené skladby



Obr. 126 – Příprava měřicí aparatury

Měření a následné vyhodnocení obou konstrukcí proběhlo v souladu s postupem, definovaným v ČSN EN ISO 717-1¹¹⁴ v třetinooktávových pásmech od 100 Hz do 3150 Hz. Příslušná směrná křivka se posouvá směrem ke křivce naměřených hodnot neprůzvučnosti s krokem 1 dB, dokud součet nepříznivých odchylek není roven hodnotě co nejbližší, avšak ne vyšší než 32 dB. Odchytky jsou nepříznivé, pokud je hodnota směrné křivky vyšší než hodnota neprůzvučnosti. Vážená neprůzvučnost se potom určí jako hodnota posunuté směrné křivky v třetinooktávovém pásmu 500 Hz. Postup stanovení vážené neprůzvučnosti je naznačen na Obr. 127.¹¹⁵ (upraveno)

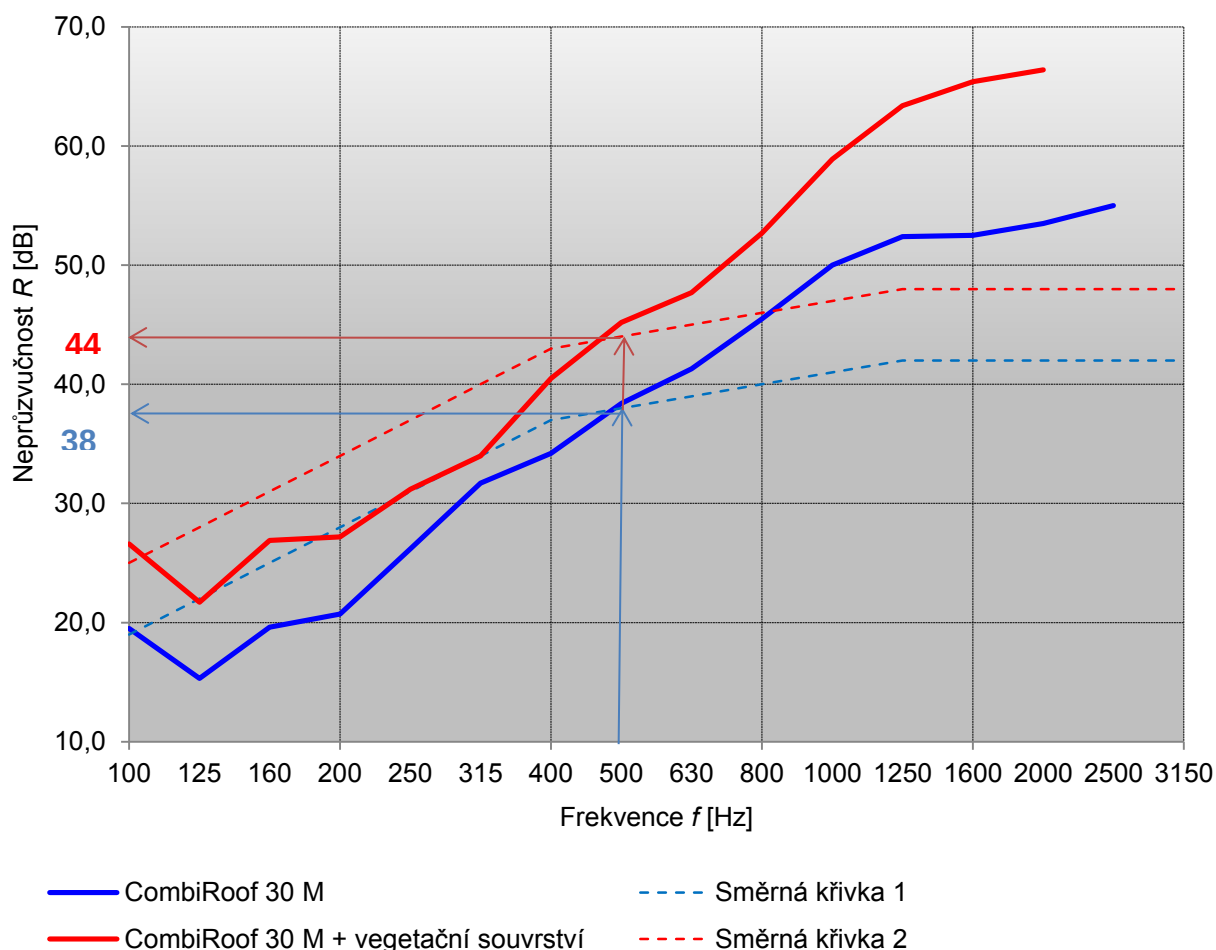
Výsledné hodnoty měřených neprůzvučností jsou vyznačeny na Obr. 128.



Obr. 127 – Postup stanovení vážené neprůzvučnosti

¹¹⁴ ČSN EN ISO 717-1. *Akustika – Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

¹¹⁵ NOVÁČEK, J. *Vážená neprůzvučnost* [online]. [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/185-vazena-nepruzvucnost>.



Obr. 128 – Graf výsledku měření vzduchových neprůzvučností

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.

V prezentaci výsledků vzduchové neprůzvučnosti konstrukcí je nutné uvést i faktory přizpůsobení spektru. Faktor C se používá pro zdroje zvuku, jejichž spektrum přibližně odpovídá růžovému šumu (například činnosti v bytě, kolejová doprava o středních a vysokých rychlostech, dálková silniční doprava). Faktor C_{tr} se používá pro zdroje zvuku s výraznější složkou nízkých a středních kmitočtů (například městský dopravní hluk, kolejová doprava o nízkých rychlostech, disko hudba).

Vzduchová neprůzvučnost střechy bez úpravy $R_w(C;C_{tr})$ je 38(-3;-8) dB.

Vzduchová neprůzvučnost střechy s vegetačním souvrstvím $R_w(C;C_{tr})$ je 44(-2;-7) dB.

4.7 Zásady pro navrhování vegetačních střech s hydrofilní vlnou

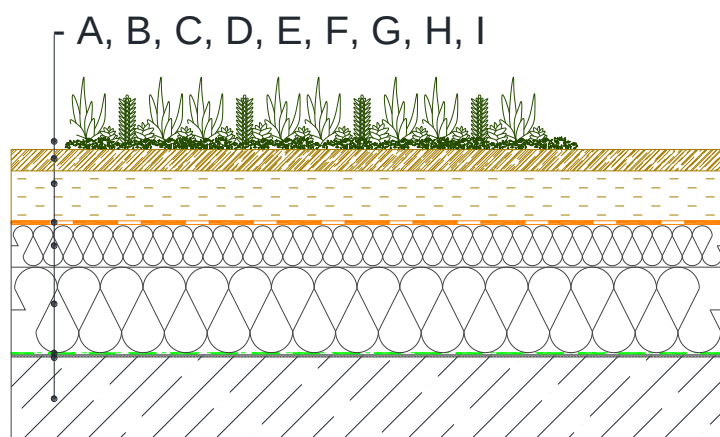
Na základě podrobné analýzy dostupných informací o hydrofilní vlně, standardech pro navrhování vegetačních střech a vyhodnocení experimentálních měření je možné stanovit následující zásady pro navrhování vegetačních střech s hydrofilní minerální vlnou.

Čl. 1 Aplikace ve zjednodušené extenzivní vegetační střeše

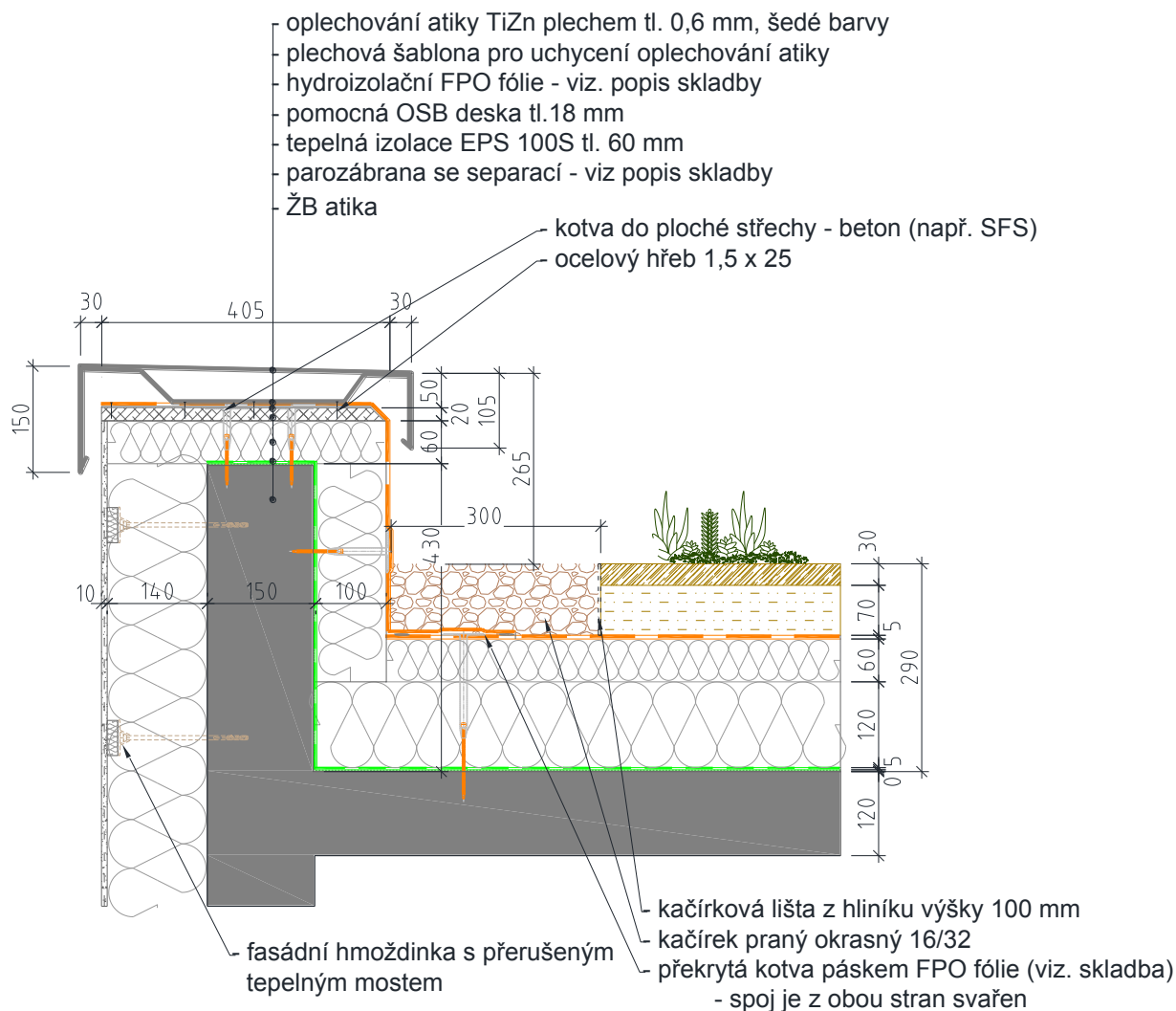
Vhodnou aplikací hydrofilní vlny jsou zjednodušené konstrukce extenzivních střech. Pro obvyklou tloušťku vegetační vrstvy extenzivní střechy 100 mm (Tab. 4, Tab. 5) lze kombinovat hydrofilní vlnu OH76 se substrátem v poměru 50/50 mm nebo 70/30 mm. Při dodržení této relace je možné použití standardních rostlin pro extenzivní střechy (*Sedum*, *Sempervivum* apod.). Aplikace větších tlouštěk 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.

Kromě extrémní nasákavosti má hydrofilní vlna i velmi vysokou vodopropustnost. Díky tomu je možné realizovat zjednodušené střechy bez nopové fólie. Požadavek FLL na vodopropustnost jednovrstvých skladeb ($60\text{--}400\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) je dlouhodobě splněn ($104\text{--}227\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Voda se nadržuje v celém objemu vlny rovnoměrně, ale prostupuje vlnou ve směru gravitace. Rychlost tohoto proudění byla změřena a její výsledky jsou uvedeny v Tab. 24. Při dodržení alespoň minimálního sklonu střechy (2°) je umožněno přebytečné vodě odtékat a díky tomu nedochází k přemokření a následnému zahnívání kořenů rostlin. Drenážní kapacitu střechy je nutné přepočítat podle postupu v Čl. 4.

Doporučená skladba zjednodušené extenzivní vegetační střechy s hydrofilní vlnou je znázorněna na Obr. 129 a popsána v Tab. 47. Detaily napojení vegetačního souvrství na vpusť a atiku jsou zakresleny na Obr. 130 a Obr. 131.



Obr. 129 – Doporučená skladba zjednodušené extenzivní střechy s hydrofilní vlnou



Obr. 131 – Příklad řešení detailu u atiky extenzivní skladby s hydrofilní vlnou

Vzhledem k anorganickému složení hydrofilní vlny je nutné doplňovat živiny uměle. Doporučené dávkování 5 g čistého dusíku na m^2 (Tab. 7) 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 $5 \text{ ks} \cdot \text{m}^{-2}$, jako na modelu 1 a na doplňujícím modelu ve Všerubech (viz kapitola 4.4) – 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 plevelu, náletů apod.

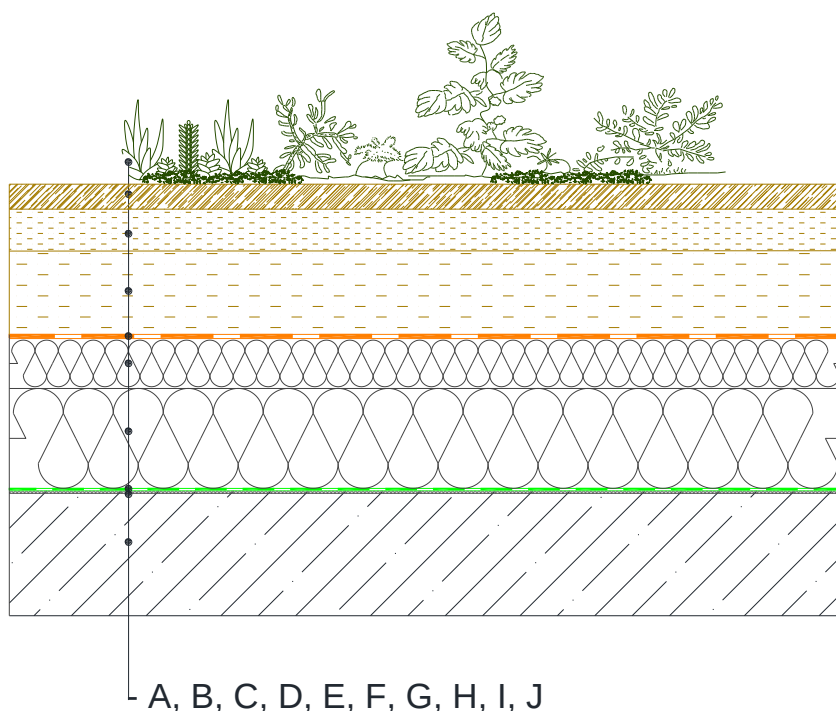
Čl. 2 Aplikace v polointenzivní vegetační střeše

Podobně jako u extenzivních střech lze řešit polointenzivní vegetační souvrství jako zjednodušené, resp. bez použití plošné drenáže.

V typové skladbě je použito dvou typů hydrofilní vlny, jak se prakticky osvědčilo na střeše ve Všerubech (kapitola 4.4). Spodní část může být tvořena měkčí, ale propustnější hydrofilní vlnou OH76, ve vrchní části je použita pevnější deska s OH120. Celková tloušťka typového vegetačního souvrství je 200 mm. Velká část souvrství je tvořena hydrofilní vlnou s maximální vodní kapacitou převyšující doporučené hodnoty FLL. Navzdory tomuto nesouladu prokázaly experimenty provedené na modelu 1 a následně na ověřovacím modelu ve Všerubech (kapitola 4.4), že aplikace hydrofilní vlny v takto velké míře může být plně funkční.

Rostliny ve střeše tohoto typu je třeba sázet s kořenovým balem, protože řízkování nebo hydroosev se na takto hustém panelu projevily jako problematické (kapitola 4.4). Hustší panel naproti tomu přináší výhodu zvýšené pevnosti a tím možnost částečného provozu. Vzhledem k vyšším nasákavostem celého souvrství je 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.

Doporučená skladba této varianty s hydrofilní vlnou je znázorněna na Obr. 132 a popsána v Tab. 48.



Obr. 132 – Doporučená skladba polointenzivní střechy s hydrofilní vlnou

Tab. 48 – 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	–

Doporučené dávkování hnojiva bude uzpůsobeno poměru hydrofilní vlny a substrátu a zároveň použitým rostlinám. Výše uvedená skladba má velký poměr anorganické minerální vlny bez živin a pouze malý poměr substrátu. Množství hnojiva u tohoto typu polointenzivní vegetační střechy je doporučeno mírně zvýšit, než je obvyklé u substrátů. Množství roční dávky živin přepočteno na čistý dusík, je stanoveno na 8 g(N)·m⁻², jako pro intenzivní ozelenění.

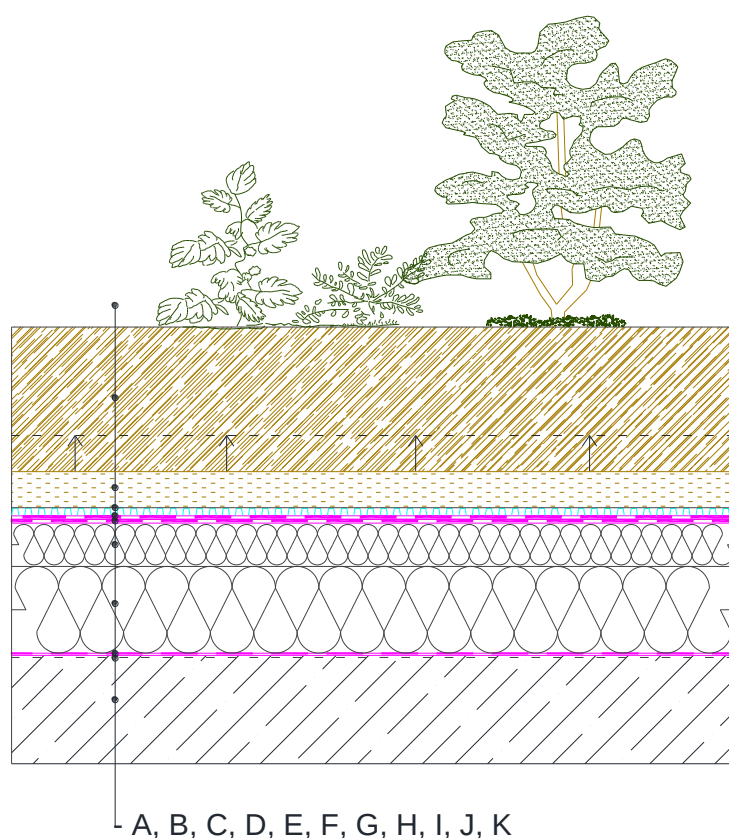
Čl. 3 Aplikace v intenzivní vegetační střeše

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 (Tab. 49).

Tab. 49 – Hmotnost vegetační vrstvy tloušťky 400 mm

	Suchý stav [kg·m ⁻²]	Mokrý stav [kg·m ⁻²]
Intenzivní substrát ¹¹⁶	400	720
Extenzivní substrát ¹¹⁷	300	580
Kombinace hydrofilní vlny OH76 a OH120	40	400

Výběr rostlin pro tento typ střechy bude v souladu s obecným doporučením pro intenzivní střechy (např. FLL nebo Standardy pro navrhování, provádění a údržbu).¹¹⁸ Detail skladby s popisem materiálů zachycuje Obr. 133 a Tab. 50.



Obr. 133 – Doporučená skladba polointenzivní střechy s hydrofilní vlnou

¹¹⁶ OPTIGREEN. *Intensive Substrate Type i* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: http://www.optigreen.de/http://www.optigreen.com/fileadmin/contents/sprache_englisch/datenblaetter/04_Substrate/Optigreen-Intensive_Substrate-Type_i-EN.pdf.

¹¹⁷ OPTIGREEN. *Extensive Multi-Layer Substrate Type E* [online]. [cit. 2016-02-03]. http://www.optigreen.com/fileadmin/contents/sprache_englisch/datenblaetter/04_Substrate/Optigreen-Extensive_Multi_Layer_Substrate-Type_E-EN.pdf.

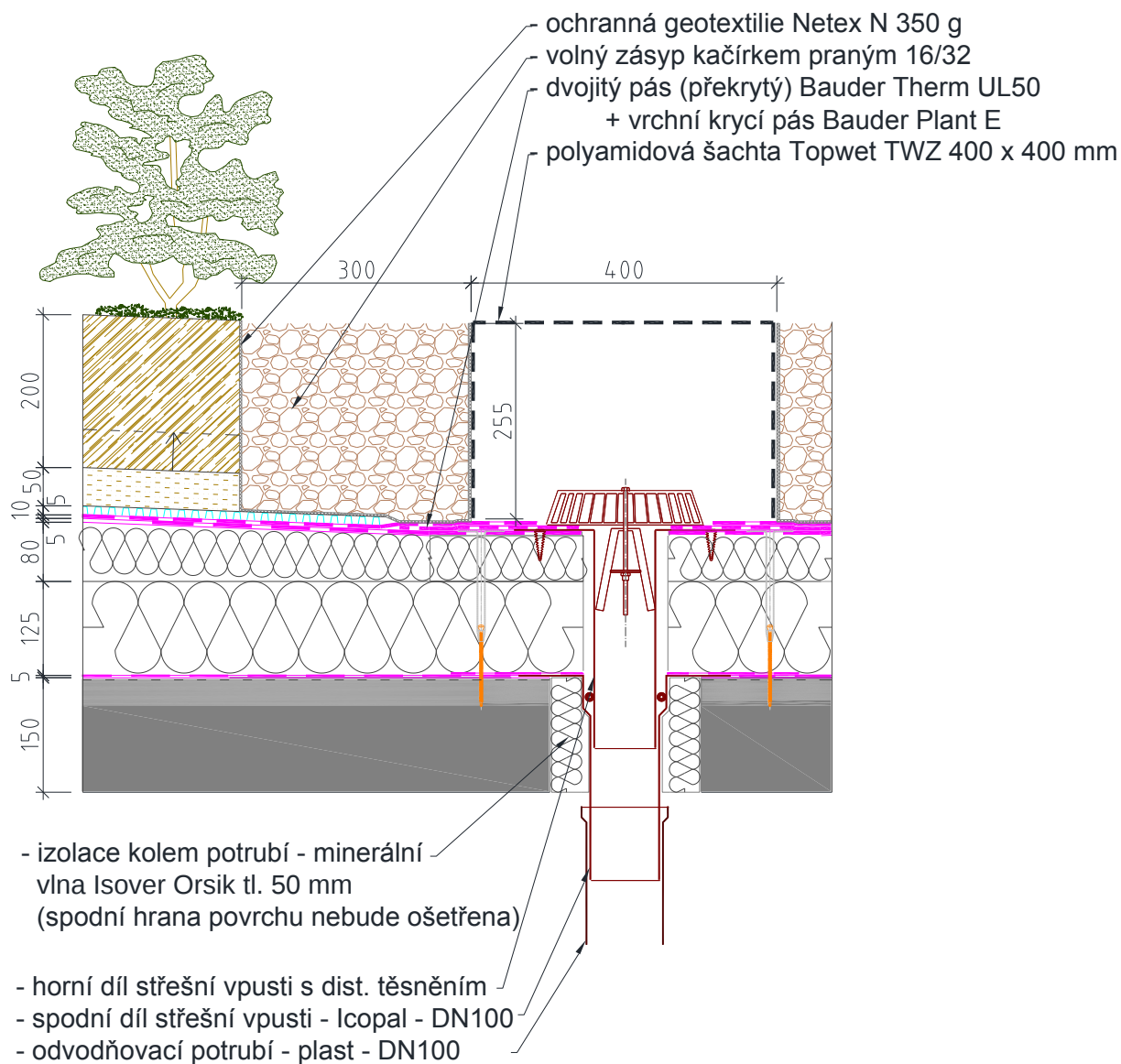
¹¹⁸ BURIAN, S., DOSTÁLOVÁ, J., DUBSKÝ, M., CHALOUPEK, K., VACEK, P., STRAKOVÁ, M., ŠRÁMEK, F. *Vegetační souvrství zelených střech – standardy pro navrhování, provádění a údržbu*. Brno: Odborná sekce Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně, 2016.

Tab. 50 – Doporučená skladba polointenzivní střechy s hydrofilní vlnou

	Vrstva	Upřesnění vrstvy	Tloušťka [mm]
A	vegetace	intenzivní – středně vysoké keře, vysoké trvalky a dřeviny	100–500
B	krycí vrstva	substrát	200–400
C	zpevňující vegetační vrstva	hydrofilní vlna OH120–170	100–200
D	vegetační vrstva	perforovaná nopová fólie bez hydroakumulační funkce	10
E	hydroizolace	odolná proti prorůstání kořenů, např. vyztužená mPVC nebo FPO fólie	1–2
F	vrchní část tepelné izolace	EPS nebo XPS minimální pevnosti CS100	50–100
G	spodní část tepelné izolace	EPS nebo XPS minimální pevnosti CS100	100–300
H	parozábrana	nespecifikováno	–
I	separační vrstva	netkaná geotextilie gramáže cca 350 g·m ⁻²	2
J	nosná konstrukce	podle statického výpočtu	–

Hnojení intenzivních střech s hydrofilní vlnou bude shodné s hnojením vegetačních střech se substrátem, tedy 8 g N·m⁻². Množství hydrofilní vlny pro potřeby dodatečné hydroakumulace je stanoveno na 50–100 mm. Pro vylehčování velmi silných skladeb je možné použít desky ve více vrstvách.

Příklady napojení skladby na atiku a střešní vpust' jsou znázorněny na Obr. 135 a Obr. 134.



Obr. 134 – Příklad řešení u vpusti intenzivní skladby s hydrofilní vlnou

drenážní vrstvou směrem k odvodňovacímu zařízení (Obr. 18). Pokud by vegetační souvrství nebylo schopné pojmout větší množství srážek, hrozí vznik povrchového proudění vody, které může poškozovat rostliny a odplavovat vrstvu krycího substrátu.

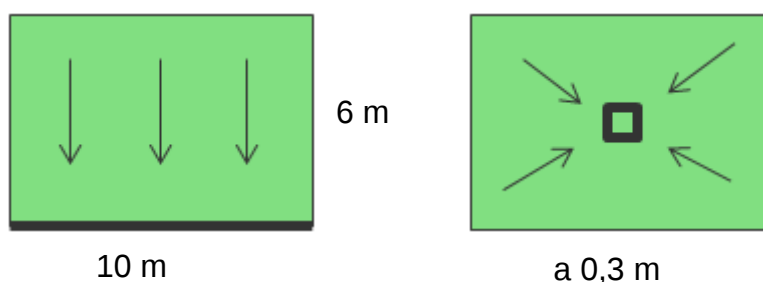
Výpočet požadované drenážní kapacity bude proveden podle rovnice (12).

$$q' = \frac{A \cdot C \cdot q}{b} \quad [\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (12)$$

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 (Tab. 17).¹²⁰

Návrhový déšť q musí respektovat podmínky ČR. Národní norma ČSN 75 9010¹²¹ uvádí srážková maxima za desetileté a dvacetileté období ve 22 hydrometeorologických stanicích. Hodnoty pro některá česká města jsou uvedeny i v Tab. 19. Výpočtová odtoková šířka b určuje cílový perimetr odváděné dešťové vody, který je pro ilustraci znázorněn na Obr. 136.



Obr. 136 – Odtoková šířka v případě žlabu (vlevo: $b_I = 10 \text{ m}$) a vpustě (vpravo: $b_{II} = 1,2 \text{ m}$)

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 (Tab. 24).

¹²⁰ ČSN 75 6760. *Vnitřní kanalizace*. Z1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

¹²¹ ČSN 75 9010. *Vsakovací zařízení srážkových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

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 (Obr. 43), je doporučeno drenážní schopnosti hydrofilní vlny pro výpočet snížit na 50 %.

Ukázka výpočtu

Dosazením konkrétních hodnot modelové skladby extenzivní ploché střechy (Obr. 129, Tab. 47) do vzorce (12) bude ověřena oprávněnost vynechání plošného drenážního prvku v této jednovrstvé konstrukci s hydrofilní vlnou. Dle schématu na Obr. 136 budou vypočítány obě varianty odvodu dešťové vody. Tloušťka vegetační vrstvy je uvažována 80 mm a je umístěna do města Brna.

$$q'_I = \frac{A \cdot C \cdot q}{b_I} = \frac{36 \cdot 0,5 \cdot 0,0183}{10} = 0,03 \text{ [l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (13)$$

$$q'_{II} = \frac{A \cdot C \cdot q}{b_{II}} = \frac{36 \cdot 0,5 \cdot 0,0183}{1,2} = 0,28 \text{ [l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (14)$$

Vypočítané odtoky q se následně porovnají s hodnotami uváděnými pro hydrofilní vlnu (Tab. 24).

$$q'_I (0,03) \ll q'_{\text{hydrofilní vlny OH76}} (1,53) \quad (15)$$

$$q'_{II} (0,28) < q'_{\text{hydrofilní vlny OH76}} (1,53) \quad (16)$$

I při uvažování poloviční drenážní schopnosti hydrofilní vlny ($1,53 \rightarrow 0,77$) bude střecha bezpečně odvádět i přívalové srážky bez použití nopové fólie. Odvodňovací schopnosti hydrofilní vlny jsou s nopovými fóliemi srovnatelné (Tab. 8).

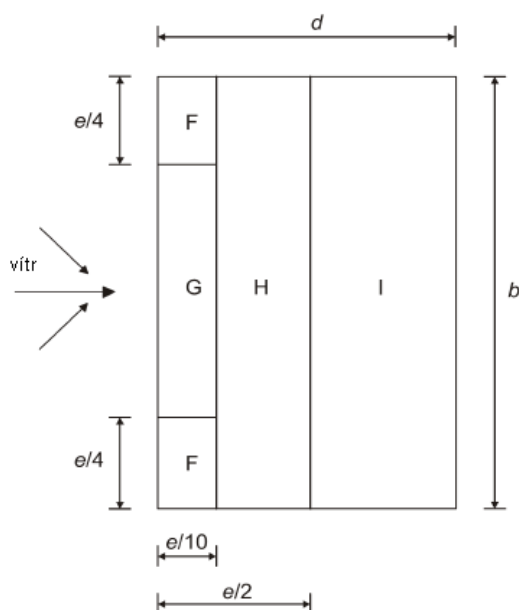
Čl. 5 Ochrana proti sání větru

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 1991-1-1¹²² a ČSN EN 1991-1-4.¹²³

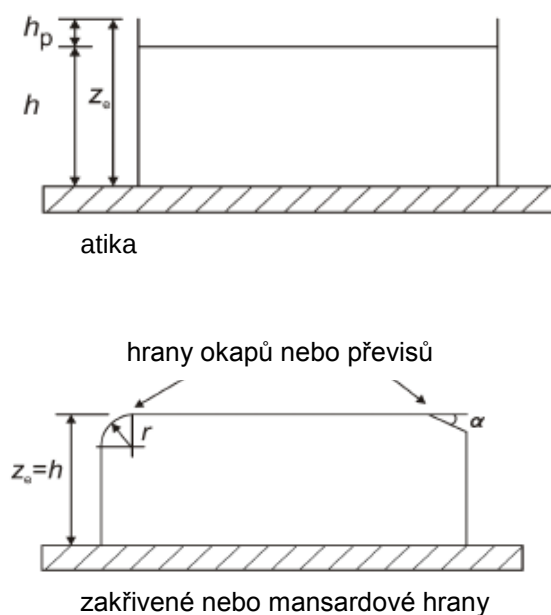
Při ověřování schopnosti odolávat sání větru se nejprve určí oblasti namáhání sáním na střeše (Obr. 137, Obr. 138).

¹²² ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Z2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

¹²³ ČSN EN 1991-1-4 ed. 2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.



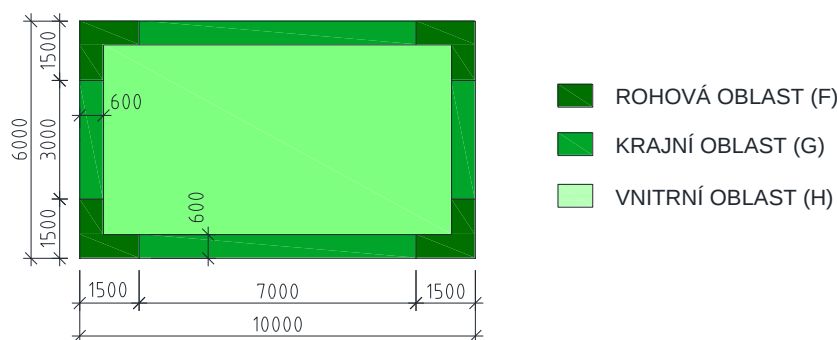
Obr. 137 – Oblasti střechy dle ČSN EN 1991-1-4



Obr. 138 – Doplnující řezy pro rozdělení střešních oblastí

Rozmanitost tvarů a velikostí střech je velmi široká a ke každé střeše je nutné přistupovat individuálně. Jako modelový příklad byla opět vybrána středně velká plochá střecha garáže u rodinného domu, která je projektována jako jednovrstvá extenzivní vegetační střecha z hydrofilní minerální vlny. Její skladba a popis je uveden v Obr. 129 a Tab. 47. Velikost střechy bude stejná jako při ověřování drenážní kapacity – 6×10 m (Obr. 136). Vzdálenost e je podle normy brána jako menší z hodnot b (půdorysný rozměr budovy kolmý na směr větru) nebo $2h$ (dvojnásobek výšky budovy). Výška modelové střechy bez atiky je 3 m. Půdorys střechy má obdélníkový tvar, proto je nutné provést určení ploch v obou směrech (v podélném i příčném). V podélném směru platí, že $b = 6$ m, $2h = 6$ m, čili vzdálenost e je určena 6 m ($e/2 = 3$ m, $e/4 = 1,5$ m, $e/10 = 0,6$ m). V příčném směru platí, že $b = 10$ m, $2h = 6$ m. Rozhoduje menší z obou hodnot, takže vzdálenost e je v tomto případě také 6 m ($e/2 = 3$ m, $e/4 = 1,5$ m, $e/10 = 0,6$ m).

Rozdělení střechy na plochy je znázorněno na Obr. 139.



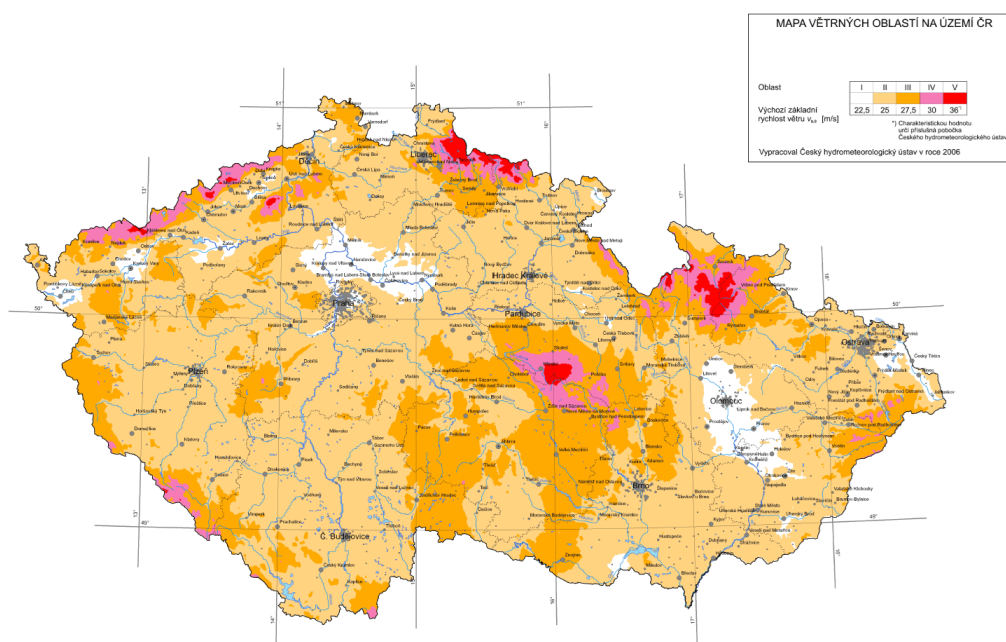
Obr. 139 – Rozdělení střechy na plochy podle ČSN EN 1991-1-4

V závislosti na větrné oblasti (Obr. 140) bude následně vypočítána velikost sání větru. Pro zjednodušení jsou silové účinky větru převzaty z publikace DEKPLAN střešní fólie – montážní návod.¹²⁴ Tabulkové hodnoty z Tab. 51 platí pro následující okrajové podmínky:

- budova výšky do 10 m;
- kategorie terénu II, III, IV;
- sklon terénu max. 5 %;
- v okolí posuzované budovy se nenachází výrazně vyšší budova;
- zanedbatelný tlak vzduchu působící na vnitřní povrchy.

Tab. 51 – Zatížení od silových účinků větru v jednotlivých oblastech střechy

Větrná oblast	Vnitřní oblast	Krajní oblast	Rohová oblast
	[kPa]	[kPa]	[kPa]
1	-1,4	-2,3	-2,8
2	-1,7	-2,8	-3,5
3	-2	-3,4	-4,2



Obr. 140 – Mapa větrných oblastí podle 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.

¹²⁴ KÁNĚ, L., ODEHNAL, L. et al. *DEKPLAN střešní fólie – Montážní návod*. Praha: Dektrade, 2015.

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 Fortrac¹²⁵ nebo skelné tkaniny Adfors¹²⁶ (Tab. 52).

Tab. 52 – 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.

¹²⁵ GEOSYNTETIKA. *Standardní typy geomříží Fortrac® vyrobené z polyesteru* [online]. [cit. 2016-2-6]. Dostupné z: <http://www.geosyntetika.cz/new/nabizene-materialy.php?p=14&p2=18&p3=108>.

¹²⁶ ADFORS. *Vertex® Grid* [online]. [cit. 2016-2-6]. Dostupné z: http://vertexgrid.co.uk/technicke_parametry#2.

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 výrokové normy pro minerální vlnu a částečně podle postupů určených pro substráty, geotextilie a nopové fólie.

Naměřené hodnoty se následně porovnaly 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 výrobkové 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 výrobková 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 střešů 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 střešů bude nezbytné navrhnout i systém drenážních zpomalovačů,**

kteře 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 střeších je velmi omezené.**

Zcela nové poznatky přináší práce v oblasti environmentálního hodnocení materiálů vegetačních střešů 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 střešů 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 tvrzení 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 střešy (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 střešy i ve vlhkém stavu, což bylo prokázáno měřením i výpočty.

Z doplňujících testů plyne, že hydrofilní vlna má ve skladbě lehké ploché vegetační střešy významný vliv také na akustiku. **Měření tohoto typu nebylo u halových objektů dosud publikováno.** Využití zjednodušené skladby vegetační střešy 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 střešů, 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 pojiva.

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.
- [13] ČSN 72 7221-2. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Část 2: Průmyslově vyráběné výrobky z pěnového polystyrenu (EPS)*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

- [14] ČSN 72 7221-3. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Část 3: Průmyslově vyráběné výrobky z extrudovaného polystyrenu (XPS)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [15] ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov: Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [16] ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov: Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [17] ČSN 73 1901. *Navrhování střech – Základní ustanovení*. Změna 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [18] ČSN 73 730540-2. *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Změna 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [19] ČSN 75 6760. *Vnitřní kanalizace*. Z1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [20] ČSN 75 9010. *Vsakovací zařízení srážkových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [21] ČSN EN 12056-3. *Vnitřní kanalizace – Gravitační systémy: Část 3: Odvádění dešťových vod ze střech – Navrhování a výpočet*. Z2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [22] ČSN EN 12087. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [23] ČSN EN 12664. *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku: Suché a vlhké výrobky o středním a nízkém tepelném odporu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [24] ČSN EN 12667. *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků: Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [25] 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.
- [26] ČSN EN 13165. *Tepelněizolační výrobky pro budovy – Průmyslově vyráběné výrobky z tvrdé polyuretanové pěny (PU) – Specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [27] ČSN EN 13252. *Geotextilie a výrobky podobné geotextiliím – Vlastnosti požadované pro použití v odvodňovacích systémech*. Praha: Český normalizační institut, 2001.

- [28] ČSN EN 14064-1. *Tepelně izolační výrobky pro stavby – Výrobky z foukané minerální vlny vyráběné in-situ: Část 1: Specifikace výrobků před zabudováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [29] ČSN EN 14064-2. *Tepelně izolační výrobky pro stavby – Výrobky z foukané minerální vlny vyráběné in-situ: Část 2: Požadavky na zabudované výrobky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [30] ČSN EN 15804. *Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [31] ČSN EN 15978. *Udržitelnost staveb – Posuzování environmentálních vlastností budov – Výpočtová metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [32] ČSN EN 1609. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [33] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Z2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [34] ČSN EN 1991-1-4 ed. 2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [35] ČSN EN 823. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení tloušťky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [36] ČSN EN 826. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Zkouška tlakem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [37] ČSN EN ISO 10456. *Stavební materiály a výrobky – Tepelně vlhkostní vlastnosti: Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových hodnot*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [38] ČSN EN ISO 11058. *Geotextilie a výrobky podobné geotextiliím - Zjišťování charakteristik propustnosti pro vodu kolmo k rovině, bez zatížení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [39] ČSN EN ISO 12958. *Geotextilie a výrobky podobné geotextiliím: Zjišťování schopnosti pro proudění vody v jejich rovině*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [40] ČSN EN ISO 14040. *Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

- [41] ČSN EN ISO 14044. *Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Požadavky a směrnice*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [42] ČSN EN ISO 717-1. *Akustika – Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [43] ČSN ISO 10390. *Kvalita půdy – Stanovení pH*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [44] DOSTÁLOVÁ, J. *FLL norma Dachbegrünungsrichtlinie*. Projekt Zelené střechy – naděje pro budoucnost. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně, 2010.
- [45] DOW. *Floormate 500-A / 700-A* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://building.dow.com/europe/cz/prod/tech/fm_200_500_700.htm.
- [46] DUPONT. *Plantex Rootbarrier* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.dupont.cz/vyrobky-a-sluzby/construction-materials/professional-landscape-solutions/folder-brands/plantex/products/plantex-rootbarrier.html>.
- [47] ECOINVENT CENTRE. *Ecoinvent v. 2.0*. Švýcarsko: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007. Dostupné z: <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>.
- [48] ECOLAB. *Silvamix Forte 60* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.silvamix.com>.
- [49] ETA-13/0534. *European Technical Approval: Kits for Green Roofs*. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2013.
- [50] ETA-13/0668. *European Technical Approval: Kits for Green Roofs*. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2013.
- [51] EURIMA – upraveno autorem. *Výrobní proces kamenné minerální vlny* [online]. Brusel, 2011. Dostupné z: <http://www.eurima.org/about-mineral-wool/production-process.html>.
- [52] FASTRADE. *Nopovka 20 green* [online]. [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: <http://www.fastrade.cz/izolace-nopove-drenazni-folie-nopovka-katskup03060000.php>.
- [53] FLL. *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2008.
- [54] GAMES, S., THOMAS, J.H. OWENS CORNING FIBERGLASS CORP. *Agricultural application of glass wool [patent]*. Patent, US2192939 A. Uděleno 12. března 1940. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US2192939>.
- [55] GEOSYNTETIKA. *Standardní typy geomříží Fortrac® vyrobené z polyesteru* [online]. [cit. 2016-2-6]. Dostupné z: <http://www.geosyntetika.cz/new/nabizene-materialy.php?p=14&p2=18&p3=108>.

- [56] GREEN ESTATE. *Material Supply* [online]. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: http://www.greenestate.org.uk/material_supply22.
- [57] GROOT, J. F. *Wall on which vegetation can grow* [patent]. Patent, EP0393735 A1. Uděleno 24. října 1990. <http://www.google.com.sl/patents/EP0393735A1?cl=en>.
- [58] 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.
- [59] HAROLD, T. C., MANVILLE, J. *Mineral wool composition* [patent]. Patent, US2116303 A. Uděleno 3. května 1938. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US2116303>.
- [60] ICOPAL. *Dokumenty A-Z* [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: http://www.icopal.cz/uploads/ke%20stazeni/dokumnety-AZ/Icoflor__VEGETA%C4%8CN%C3%8D%20DESKA.pdf.
- [61] ISOVER. *Isover pro systémy vegetačních střech*. Praha: Isover, 2013.
- [62] ISOVER. *Katalog + ceník 2015*. Praha: Isover, 2015.
- [63] ISOVER. *Lehké požárně odolné střechy PROTECTROOF® Požární odolnost REI 15 – REI 45 DP1-DP3: Podklady pro projektování*. Praha: Isover, 2015. Dostupné z: <http://www.isover.cz/data/files/protectroof-final-1545.pdf>.
- [64] JERMAN, M., ČERNÝ, R. Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*. Philadelphia: Elsevier, 2012, č. 53, s. 39–46. ISSN 0378-7788.
- [65] JUTA. *Petexdren 400* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.juta.cz/vyrobní-programy/geosyntetika/vyroby/petexdren.html>.
- [66] KÁNĚ, L., ODEHNAL, L. et al. *DEKPLAN střešní fólie - Montážní návod*. Praha: Dektrade, 2015.
- [67] KIPP, J. A., WEVER, G. *Characterisation of the hydrophysical behaviour of stonewool*. Applied Plant Research. 2005.
- [68] KNAUF INSULATION. *Katalog a ceník minerálních izolací s příslušenstvím*. Praha: Knauf Insulation, 2015.
- [69] KNAUF INSULATION. *Urbanscape Green Roll* [online]. [cit. 2015-06-03]. Praha: Knauf Insulation Trading, 2013. Dostupné z: <http://www.knaufinsulation.cz/sites/cz.knaufinsulation.net/files/technicky-list/Green-Roll.pdf>.
- [70] KOČÍ, V. *Metoda posuzování životního cyklu*. [online]. [cit. 2016-01-21]. Dostupné z: <http://www.unilevervzva.cz/udrzitelnost/35.metoda-posuzovani-zivotniho-cyklu>.
- [71] KOČÍ, V. *Posuzování životního cyklu – Life Cycle Assesment – LCA*. Chrudim: Ekomonitor, 2009.

- [72] KOSAREO, L., RIES, R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*. Philadelphia: Elsevier, 2007, č. 42, vyd. 7, s. 2606–2613. ISSN 0360-1323.
- [73] LAUTENBACH, K. *Bewachsene Fassadenplatte und zugehörige bewachsene Wand* [patent]. Patent, EP2564689 A1. Uděleno 6. března 2013. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/EP2564689A1>.
- [74] NEXUS. *Poloprofesionální meteostanice TFA 35.1075* [online]. [cit. 2015-2-5]. Dostupné z: <http://www.meteoshop.cz/poloprofessionalni-meteostanice-tfa-351075-nexus-p-295.html>.
- [75] NOPHADRAIN. *Productoverzicht* [online] [cit. 2015-06-03]. Kerkrade: Nophadrain BV, 2015. Dostupné z: http://www.nophadrain.nl/media/174069/06_nl_productbrochure_09_2015_web.pdf.
- [76] NOVÁČEK, J. *Vážená neprůzvučnost* [online]. [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/185-vazena-nepruzvucnost>.
- [77] ÖNORM L 1131. *Gartengestaltung und Landschaftsbau – Begrünung von Dächern und Decken auf Bauwerken - Anforderungen an Planung, Ausführung und Erhaltung*. Wien: Austrian Standards (AS), 2010.
- [78] OPTIGREEN. *Extensive Multi-Layer Substrate Type E* [online]. [cit. 2016-02-03]. http://www.optigreen.com/fileadmin/contents/sprache_englisch/datenblaetter/04_Substrate/Optigreen-Extensive_Multi_Layer_Substrate-Type_E-EN.pdf.
- [79] OPTIGREEN. *Extensive Single Layer Substrate Type M-light* [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.optigreen.de>.
- [80] OPTIGREEN. *Intensive Substrate Type i* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: http://www.optigreen.de/http://www.optigreen.com/fileadmin/contents/sprache_englisch/datenblaetter/04_Substrate/Optigreen-Intensive_Substrate-Type_i-EN.pdf.
- [81] OPTIGREEN. *Zelené střechy s optigreen produkty* [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <http://www.optigreen.cz/Products/Green-roofing.html>.
- [82] PE INTERNATIONAL. *Professional Database*[online]¹²⁷. Německo: PE International. Dostupné z: <http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases/professional>.
- [83] PRACTICAL HYDROPONICS & GREENHOUSES. *Free articles* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.hydroponics.com.au/category/free-articles>.
- [84] ROCKWOOL. *Åstak og torvtak* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.rockwool.no/produkter/u/2011.construction/1325>.
- [85] ROCKWOOL. *Rockwool katalog 2015*. Bohumín: Rockwool, 2015.

- [86] ROCKWOOL. *Rockwool Markplate* [online]. [cit. 2015-06-03]. Oslo: AS Rockwool, 2014. Dostupné z:
<http://www.rockwool.no/produkter/u/2011.product/1685/byggisolasjon/markplate>.
- [87] SAILOR, D. J., HAGOS, M. An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media. *Energy and Buildings*. Philadelphia: Elsevier, 2011, č. 43, vyd. 9, s. 2298-2303. ISSN 0378-7788.
- [88] SIA 312. *Begrünung von Dächern*. Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [89] STAZI, F. et al. Assessment of the actual hygrothermal performance of glass mineral wool insulation applied 25 years ago in masonry cavity walls. *Energy and Buildings*. Philadelphia: Elsevier, 2014, č. 68, vyd. A, s. 292–304. ISSN 0378-7788.
- [90] SUBSTRAL. *100denní hnojivo pro trávník* [online]. [cit. 2016-01-14]. Dostupné z:
http://www.substral.cz/100_denni_hnojiva.php.
- [91] TAVLINOVOVÁ, G., DIENSTBIER, J. *Zelený domov*. Praha: Lidové nakladatelství, 1988. ISBN 26-017-88.
- [92] TODAY IN SCIENCE HISTORY. *Mineral wool or mineral cotton* [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z:
<http://todayinsci.com/Events/Technology/MineralWool.htm>.
- [93] VOLCANO HAZARDS PROGRAM. *Pele's hair* [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: <http://volcanoes.usgs.gov/images/pglossary/PeleHair.php>.
- [94] 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.

7 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, č. x, s. x. ISSN 0959-6526. IF=3,8.

8 Vymezení pojmů, zkratk

CAL	metoda měření živin substrátu v roztoku Calcium Acetat Lactat;
CAT	metoda měření živin substrátu v roztoku CAT;
CML2001	skupina midpointových indikátorů sestavená v roce 2001 na univerzitě v Leidenu (Nizozemsko);
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav;
Deklarovaná hodnota	hodnota vlastnosti stavebního výrobku pro určené použití, normou dané referenční podmínky; deklarovaná výrobcem podle normy výrobku;
Drenážní vrstva	vrstva umožňující odvedení vody ze střešního souvrství;
Endpointový indikátor	druh kategorie dopadu měřitelný v prostředí (např. tvorba nebezpečného odpadu);
Energetický mix	podíl jednotlivých zdrojů energie při výrobě elektřiny;
EPD	environmentální produktová deklarace (Environmental Product Declaration);
Extenzivní vegetační střecha	obsahuje jednoduché vegetační souvrství a základní vegetaci s minimálními požadavky na údržbu;
Filtrační vrstva	vrstva zachycující jemné podíly sypkých látek vyplavované ze skladby střešního pláště nebo vodou vnášené do skladby střešního pláště;
Funkční jednotka (FU)	určuje velikost zvolené funkce v měřitelných jednotkách (např. 1 m ² , 1 kg apod.);
Hranice systému	určuje množství procesů započítávaných do kalkulace LCA a její geografický a časový rozsah;
Hydroakumulační vrstva	vrstva sloužící ke krátkodobému zachycení požadovaného množství vody ve skladbě střechy;
Hydrofilní minerální vlna	velmi nasákavá hmota ve formě desek nebo rohoží, tvořena rozvlákněnou horninou a pojivem, pro svoje specifické vlastnosti určená zejména pro zemědělství;
Hydrofobní minerální vlna	rozvlákněná hornina ve formě desek nebo rohoží, tvořena rozvlákněnou horninou, pojivem a hydrofobizačními oleji s velmi malou nasákavostí, určena je výhradně pro stavebnictví;
Hydroosev	speciální způsob osévání ploch, při kterém se na určenou plochu rovnoměrně nanáší směs osiva, vody, umělého hnojiva, organické hmoty a protierozních přísad na určenou plochu;
Charakteristická hodnota	hodnota vlastnosti stavebního výrobku (u tepelných veličin určená ČSN 73 0540-2 a ČSN 73 0540-3);

Indikátor kategorie dopadu	měřitelná veličina kategorie dopadu na životní prostředí s jasně definovanými jednotkami;
Intenzivní vegetační střecha	zpravidla obsahuje složité vegetační souvrství a vegetaci s vysokými požadavky na údržbu;
Inventarizační profil (ekovektor)	vyčíslení množství spotřebovaných surovin a množství látek emitovaných do prostředí;
Jednovrstvá vegetační střecha	velmi zjednodušené vegetační souvrství, kde substrát zajišťuje také drenážní a hydroakumulační funkci;
Kategorie dopadu	druhy dopadů na životní prostředí, např. čerpání neobnovitelných zdrojů (vstup), tvorba odpadů při výrobě (výstup);
Kondicionování	ustálení podmínek (zejména teploty a vlhkosti) pro měření technických vlastností výrobku;
Kořenovzdorná vrstva	speciálně vyztužená ochranná vrstva, která brání proti prorůstání agresivních kořenů rostlin;
Krycí vrstva	slabá vrstva substrátu nebo drobného kameniva na povrchu vegetačního souvrství, zejména hydrofilní vlny;
LCA	hodnocení životního cyklu (Life Cycle Assessment) produktu či budovy z pohledu vybraných environmentálních dopadů;
LCI	inventarizační analýza (Life Cycle Inventory);
LCIA	indikátory kategorie dopadu (Life Cycle Impact Assessment);
Midpointový indikátor	druh kategorie dopadu určující vlastnosti látky (např. potenciál globálního oteplování);
Návrhová hodnota	hodnota dané vlastnosti určená za specifických venkovních a vnitřních podmínek, které mohou být považovány za typické pro chování stavebních materiálů, výrobků a konstrukcí;
Normalizované dopady	přepočítané dopady na životní prostředí dle jejich relevance;
Normový déšť	množství vody charakterizující návrhovou mimořádnou situaci dle příslušné normy (např. déšť vyskytující se jednou za 20 let pro ověření drenážního výkonu vegetačního souvrství);
NPK hnojivo	hnojivo založené na dusíku, fosforu a draslíku;
Obsah organických součástí	určuje vhodnost substrátu pro extenzivní, případně intenzivní ozelenění;
Obsah vyplavitelných částic	obsah jemných částic o průměru do 0,063 mm v substrátech;
OH76, OH120	objemová hmotnost minerální vlny o hodnotě 76 kg·m ⁻³ (resp. 120 kg·m ⁻³);

Ochranná vrstva	vrstva chránící hydroizolaci před mechanickým poškozením při montáži nebo údržbě;
Polointenzivní vegetační střecha	jednoduchá intenzivní střecha, kombinace extenzivní a intenzivní střechy, umožňuje použití náročnějších rostlin s minimálními požadavky na údržbu;
Primární energie	energie ve formě, v jaké se vyskytuje v přírodě (např. uhlí, ropa, dřevo, vítr, vodní energie, sluneční záření apod.);
Referenční tok	množství výrobku, které je třeba k naplnění funkce definované funkční jednotkou;
Resaturace	znovunasyacení po předchozím úplném vyschnutí;
Rostlinné společenstvo	skupina rostlin s podobnými nároky na prostředí, která tvoří harmonické celky a je charakteristická pro jednotlivé typy vegetačních střech;
Rozchodníkový koberec	předpěstované rozchodníky na tkanině a tenké vrstvě substrátu
Separační vrstva	navzájem od sebe odděluje sousední materiály nebo prvky, které by se mohly vzájemně ovlivňovat;
Skleníkový efekt	přirozený jev na zemi, kdy atmosféra propouští z vesmíru sluneční záření, ale tepelné záření o větších vlnových délkách nepropouští zpět (může být zesílen činností člověka);
Směrná křivka	pomocí ní se určuje index vzduchové neprůzvučnosti;
Staření	příprava vzorku pro měření technických vlastností simulujících stárnutí výrobku během užívání;
Střešní plášť	část střechy tvořená nosnou vrstvou, k níž jsou zpravidla přiřazeny některé další vrstvy v závislosti na funkci pláště;
Substrát	tvoří vegetační vrstvu, je tvořen různým podílem organických a anorganických komponent vhodných pro růst rostlin;
Umělý materiál	materiál vzniklý složitým výrobním procesem;
Vegetace	tvoří ji jednotlivé rostliny a rostlinná společenstva;
Vegetační souvrství	soubor vrstev nad hydroizolací, které svými vlastnostmi a společným působením tvoří vhodné a trvalé prostředí pro život a růst rostlin;
Vegetační střecha (zelená střecha)	střecha nebo jiná plošná stavební konstrukce, jejíž povrch je tvořen vegetačním souvrstvím s vegetací;
Vegetační vrstva	vrstva určená pro růst rostlin, je základním prostředím pro kořenění a růst rostlin a svým fyzikálním, chemickým a biologickým složením a vlastnostmi je k tomu uzpůsobena;
XPS	extrudovaný polystyren.

9 Přehled použitých veličin

Bodová pevnost	F_p	[N]	bodové zatížení při deformaci 5 mm;
Celková pórovitost	GPV	[%]	celkový podíl vzduchu v materiálu;
Dlouhodobá nasákavost	WL	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$	množství vody, které materiál nasákne za dobu 28 dní; limitní hodnota u izolací je $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;
Dlouhodobá pevnost	CC	[kPa]	dotvarování tlakem extrapolované na 10–50 let při určené deformaci (zpravidla 2,5 mm);
Drenážní kapacita	q'	$[\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$	určuje odvodňovací schopnosti celého vegetačního souvrství;
Faktory přizpůsobení spektru	C, C_{tr}	[dB]	zohledňují vliv různých ruchů, které snižují schopnost vzduchové neprůzvučnosti konstrukcí;
Hydro-akumulační kapacita	WK	$[\text{l} \cdot \text{m}^{-2}]$	odvozený termín (vlastní definice); určuje odvodňovací schopnosti celého vegetačního souvrství;
Krátkodobá nasákavost	WS	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$	množství vody, které materiál nasákne za dobu 24 hodin; limitní hodnota u izolací je $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;
Maximální vodní kapacita	WK_{max}	[%]	množství vody, které materiál nasákne v určeném čase; měřeno po určené době odkapávání; veličina se používá zejména pro substráty;
Nasákavost	W	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$	množství vody, které materiál nasákne v určeném čase; veličina se používá zejména u tepelných izolací;
Objemová hmotnost po vlhčení	ρ_{wk}	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota měřeného materiálu (substrátu) při určené vlhkosti (zpravidla při maximální vlhkosti);
Objemová hmotnost za sucha	ρ_f	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota měřeného materiálu (substrátu) při běžné teplotě a vlhkosti;
Obsah vzduchu po maximálním nasycení	PV_{maxW}	[%]	zbytkový podíl vzduchu v materiálu po maximálním nasycení vodou;
Pevná fáze	MV	[%]	podíl pevné části substrátu nebo minerální vlny;
Pevnost v tlaku	CS	[kPa]	pevnost v tlaku při 10% deformaci;

Potenciál acidifikace půdy a vody	<i>AP</i>	[kg SO ₂ ekv.]	svázané ekvivalentní emise SO ₂ způsobující okyselování (acidifikaci) prostředí; nejedná se pouze o emise SO ₂ , ale také o emise dalších plynů, jejichž efekt je přepočítán na úroveň efektu SO ₂ ;
Potenciál eutrofizace	<i>EP</i>	[kg PO ₄ ³⁻ ekv.]	množství ekvivalentních atmosférických emisí z odpadních vod vyprodukovaných během celého životního cyklu daného výrobku nebo jeho částí, způsobujících nepřírozené zvyšování obsahu živin ve vodách a půdách (eutrofizaci);
Potenciál globálního oteplování	<i>GWP</i>	[kg CO ₂ ekv.]	svázané ekvivalentní emise CO ₂ způsobující skleníkový efekt; nejedná se pouze o emise CO ₂ , ale také o emise dalších skleníkových plynů (např. metanu);
Potenciál globálního oteplování (100 let)	<i>GWP 100</i>	[kg CO ₂ ekv.]	potenciál globálního oteplování za určenou dobu životního cyklu 100 let;
Potenciál tvorby přízemního ozonu	<i>POCP</i>	[kg Ethene ekv.]	ekvivalentní emise C ₂ H ₄ (ethen), způsobující tvorbu přízemního ozonu (vznik fotooxidantů);
Potenciál úbytku nerostných surovin	<i>ADP, prvky</i>	[kg Sb ekv.]	úbytek neobnovitelných nerostných surovin;
Potenciál úbytku stratosférické ozonové vrstvy	<i>ODP</i>	[kg CFC 11 ekv.]	ekvivalentní emise CFC-11 (freony) způsobující ničení stratosférické ozonové vrstvy;
Potenciál úbytku surovin	<i>ADP, fosilní</i>	[MJ] výhřevnost	úbytek fosilních surovin (obnovitelných i neobnovitelných);
Schopnost pro proudění vody	<i>q_{s,g}</i>	[l·m ⁻¹ ·s ⁻¹]	určuje rychlost proudění vody v rovině měřeného materiálu, převážně u geotextilie nebo nopové fólie;
Součinitel odtoku	<i>C</i>	[-]	poměr množství vyteklé vody ke srážkovému úhrnu během jednoho časového bloku deště určené intenzity;
Součinitel prostupu tepla	<i>U</i>	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	uvádí, jak daná konstrukce vede teplo;

Součinitel tepelné vodivosti	λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	uvádí, jak daný materiál vede teplo;
Tloušťka desek	t	$[\text{mm}]$	tloušťka měřená na normovém stole při určeném tlaku;
Vodo- propustnost	$mod \cdot K_f$	$[\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}]$	určuje rychlost pronikání vody do materiálu; veličina se používá zejména pro substráty;
Vzduchová neprůzvučnost	R_w	$[\text{dB}]$	schopnost dělicí konstrukce zabránit přenosu zvuku šířícího se vzduchem z jednoho prostoru do druhého.

10 Příloha: EPD výrobků z hydrofilní minerální vlny

Obecné informace

Následující EPD bylo sestaveno pro účely disertační práce. Získaná data sloužila jako podklad pro kalkulaci dopadů na životní prostředí vybraných subsystémů vegetačních střeš. V EPD jsou kalkulovány výrobky z hydrofilní minerální vlny o objemové hmotnosti $76 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Flora) a $120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Intense). Jedná se o výrobky určené zejména pro vegetační střechy.

Nezbytné úvodní informace o EPD dle ČSN EN 15804¹²⁸ a ČSN ISO 14025¹²⁹ jsou uvedeny v Tab. 53. Kalkulace byla provedena v programu Ecobilan Team 5.1.

Tab. 53 – Úvodní informace o EPD

Výrobce:	Saint-Gobain Construction Products CZ, divize Isover Počernická 272/96, 108 03 Praha 10, Česká republika, VAT CZ25029673
O firmě:	Mezinárodní společnost působící v 64 zemích světa, část skupiny Saint-Gobain s více než 190 000 zaměstnanci. Předmětem podnikání divize Isover je výroba a prodej izolačních výrobků z minerální vlny, pěnového polystyrenu a jejich příslušenství do oblastí stavebnictví, zemědělství a dopravy. Dále pak technická podpora prodáváných výrobků.
Název produktu a výrobní závod:	Flora 100 mm, Intense 50 mm výrobní závod Častolovice, Masarykova 197, 517 50 Častolovice, Česká republika
Pravidla produktové kategorie (PCR):	EN 15804
Provozovatel programu EPD:	Národní program environmentálního značení
Registrační číslo:	–
Vydáno dne	1. 2. 2016, platné do: 1. 2. 2021

¹²⁸ ČSN EN 15804. *Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

¹²⁹ ČSN ISO 14025. *Environmentální značky a prohlášení – Environmentální prohlášení typu III – Zásady a postupy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.

Popis produktů

Oba výrobky lze použít do vegetačních střech. Substrátové desky Flora mohou v těchto konstrukcích plně, nebo částečně nahradit substrát. Vyznačují se nízkou hmotností, jsou vzdušné a kromě ozeleňování novostaveb jsou vhodné i pro rekonstrukce. Z důvodu velmi dobré vodopropustnosti je lze použít také v jednovrstvých extenzivních skladbách, kde odvádějí přebytečnou dešťovou vodu v celém svém objemu. Rozměry desek jsou 1200 × 1000 mm. Modelová aplikace viz Obr. 141.

Zpevněné desky Intense se používají jako vyztužující vrstva nad desky Flora v místech častějšího provozu nebo jako spodní hydroakumulační vrstva. Jejich vodopropustnost není tak výrazná jako u desek Flora, proto je nutné jejich aplikaci doplnit i plošným drenážním prvkem. Výrobek je dodáván v rozměrech 600 × 1000 mm. Modelová aplikace viz Obr. 142.



Obr. 141 – Modelová ukázka aplikace výrobku Flora¹³⁰



Obr. 142 – Modelová ukázka aplikace výrobku Intense¹³⁰

Oba výrobky jsou dodávány na dřevěných paletách chráněných polyetylenovou fólií (Obr. 143). Podrobnější údaje o vstupních hodnotách pro kalkulace jsou uvedeny v Tab. 54, chemické složení v Tab. 55.



Obr. 143 – Ukázka balení a distribuce výrobků Flora a Intense

¹³⁰ VACEK, P. *Isover pro systémy vegetačních střech*. Praha: Isover, 2013.

Tab. 54 – Údaje pro inventarizační kalkulaci

Parametr	Jednotka	Flora	Intense
Druh minerální vlny	[-]	hydrofilní	hydrofilní
Objemová hmotnost	[kg·m ⁻³]	78	120
Kalkulovaná tloušťka	[mm]	100	50
Druh balení	[-]	volné desky na paletě chráněné PE fólií	volné desky na paletě chráněné PE fólií
Velikost balení	[m ³]	2,94	1,5
Množství PE fólie na balení	[g·m ⁻²]	17,35	16,67

Tab. 55 – Údaje o chemickém složení produktů

Chemická látka	C.A.S. číslo ²	Koncentrace	Klasifikace a označení (Nařízení (CE) č. 1272/2008)	Klasifikace a označení (Evropská směrnice 67/548/EEC) ⁴
Kamenná vlna ¹	neklasifikováno	nad 95 %	neklasifikováno ³	neklasifikováno
pojivo	neklasifikováno	do 5 %	neklasifikováno	neklasifikováno

(1): Umělá skleněná (silikátová) vlákna s nahodilou orientací s obsahem oxidů alkalických kovů a oxidů alkalických zemin (Na₂O + K₂O + CaO + MgO + BaO) větším než 18 % hmotnostních a splňující jednu z podmínek nóty Q.

(2): C.A.S. : Chemical Abstract Service (chemická služba).

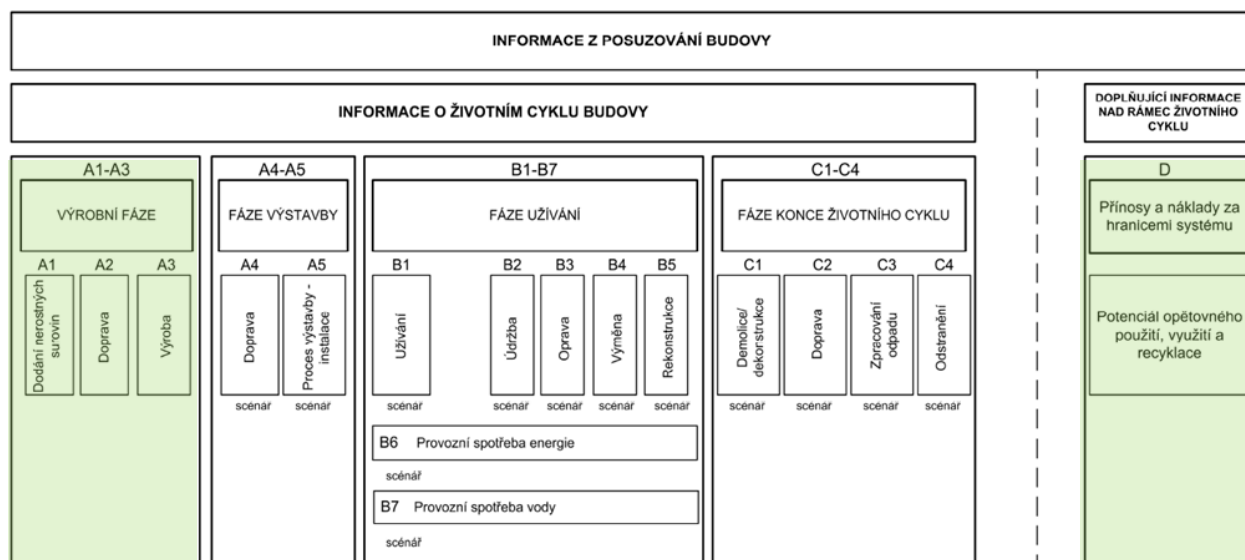
(3): Podle nóty Q směrnice 97/69/EEC a nařízení č. 1272/2008 (strana 335 z JOCE L353, 31 prosince 2008) nejsou kamenná minerální vlákna klasifikována jako karcinogenní.

(4): Pokud jsou látky klasifikovány v souladu s nařízením (CE) č. 1272/2008 v období od jeho vstupu v platnost až do 1. prosince 2010, může být toto nařízení přidáno v bezpečnostním listu společně s klasifikací podle směrnice 67/548/EEC. Od 1. prosince 2010 do 1. června 2015 se v bezpečnostních listech látek uvádí klasifikace podle směrnice 67/548/EEC a nařízení (CE) č. 1272/2008 (článek 57 nařízení (CE) 1272/2008, Úřední věstník L353, s. 27).

Specifikace kalkulace

Funkční jednotka byla stanovena na 1 m² produktu, v tloušťce 100, resp. 50 mm (viz Tab. 54). Uvažovaná hranice systému je „From cradle to gate“, čili pouze LCA fáze A1–A3. Doplnkově je uveďa možnost recyklace – doplňková fáze D nad rámec 132

životního cyklu (Obr. 144). Nejsou započítány toky, které vyplývají z lidské činnosti – doprava zaměstnanců. Není zahrnuta ani stavba závodu, výroba strojů a dopravní systém, jelikož související toky jsou zanedbatelné v porovnání s výrobou stavebních materiálů. Veškerá vstupní data jsou kalkulována v podmínkách České republiky. Inventarizační analýza je provedena na základě ucelených dat z roku 2012.



Obr. 144 – Hranice systému, započítané fáze životního cyklu produktu v EPD

Výrobní fáze A1–A3

Hranice systému je stanovena tak, aby zahrnovala jak procesy, které poskytují materiálové a energetické vstupy do systému a následující výrobní a dopravní procesy až po bránu výroby, tak zpracovávání veškerého odpadu plynoucího z těchto procesů.

A1, Dodání vstupních surovin

Tento modul zahrnuje těžbu a zpracování všech vstupních surovin a také energii potřebnou k tomuto procesu (mimo výrobní závod).

Za vstupní suroviny jsou považovány složky na výrobu pojiv a zdroje surovin pro výrobu vláken kamenné vlny – čedič a struska. Kromě těchto surovin je do vsázky přidáván vlastní recyklovaný materiál v podobě briket.

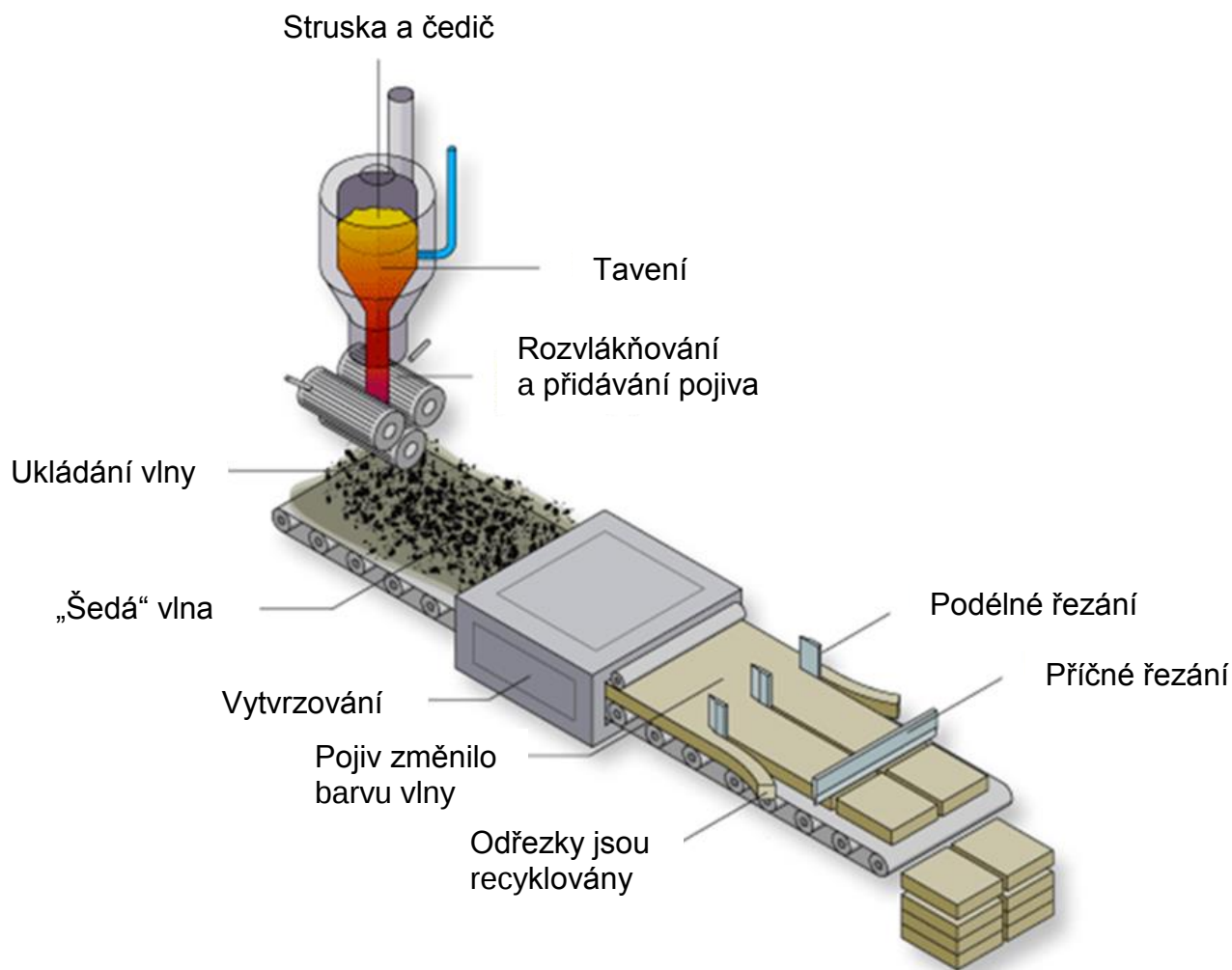
A2, Doprava do výroby

Vstupní suroviny jsou dopraveny k výrobní lince. V modelu je počítáno se silniční dopravou (průměrná hodnota).

A3, Výroba

Třetí část výrobní fáze spočívá ve výrobě materiálu a jeho balení. Proces výroby minerální izolace je znázorněn na Obr. 145. V této fázi je rovněž zahrnuta výroba

balicího materiálu. Dle normy ČSN EN 15 804 je možné sloučení modulu A1, A2 a A3. Zmíněné pravidlo je použito v tomto EPD.



Obr. 145 – Výroba čedičové minerální vlny¹³¹

Výsledky LCA

Podrobné výsledky kalkulace jsou zobrazeny v následujících tabulkách. Jedná se o kombinaci měřitelných vlastností látky, charakterizované v midpointových kategoriích dopadu (Tab. 56) a skupinou endpointových indikátorů, které jsou měřitelné v prostředí (Tab. 57 – Tab. 59).

Vysvětlení jednotlivých termínů LCIA jsou uvedeny ve slovníku na konci práce.

¹³¹ EURIMA – upraveno autorem (překlad). *Výrobní proces kamenné minerální vlny* [online]. Brusel, 2011. Dostupné z: <http://www.eurima.org/about-mineral-wool/production-process.html>.

Tab. 56 – Midpointové dopady výrobní fáze

Parametr	Jednotka	Flora	Intense
Potenciál globálního oteplování (GWP)	[kg CO ₂ ekv.]	3,1E+01	2,4E+01
Potenciál úbytku stratosférické ozonové vrstvy (ODP)	[kg CFC 11 ekv.]	1,1E-06	9,1E-07
Potenciál acidifikace půdy a vody (AP)	[kg SO ₂ ekv.]	2,0E-01	1,6E-01
Potenciál eutrofizace (EP)	[kg PO ₄ ³⁻ ekv.]	1,2E-02	9,6E-03
Potenciál tvorby přízemního ozonu (POCP)	[kg Ethene ekv.]	2,3E-02	1,8E-02
Potenciál úbytku surovin (ADP-prvky) pro nefosilní zdroje ^a	[kg Sb ekv.]	7,8E-06	6,2E-06
Potenciál úbytku surovin (ADP-fosilní paliva) pro fosilní zdroje ^a	[MJ] výhřevnost	5,3E+02	4,2E+02
^a Potenciál úbytku surovin je počítán a deklarován pro dva rozdílné indikátory: – ADP-prvky: zahrnují všechny neobnovitelné, surovinové materiálové zdroje (tj. kromě fosilních zdrojů); – ADP-fosilní paliva: zahrnují všechny fosilní zdroje.			

Tab. 57 – Endpointové dopady výrobní fáze – využívání zdrojů

Parametr	Jednotka	Flora	Intense
Využití obnovitelné primární energie	[MJ/FU]	3,8E+01	6,9E+01
Využití neobnovitelné primární energie	[MJ/FU]	4,3E+02	3,4E+02
Využití druhotných surovin	[kg/FU]	1,1E+01	8,5E+00
Využití čerstvé vody	[m ³ /FU]	9,7E-02	7,7E-02

Tab. 58 – Endpointové dopady výrobní fáze – odpady

Parametr	Jednotka	Flora	Intense
Nebezpečný odpad	[kg/FU]	5,5E-03	4,3E-03
Obyčejný směsný odpad	[kg/FU]	5,7E+00	4,6E+00
Radioaktivní odpad	[kg/FU]	5,6E-04	4,6E-04

Tab. 59 – Endpointové dopady výrobní fáze – výstupní toky

Parametr	Jednotka	Flora	Intense
Materiál k recyklaci	[kg/FU]	1,3E+01	1,0E+01
Exportovaná energie	[MJ/FU]	9,0E-03	1,3E-02

Závěrečná interpretace

Závěrečná interpretace prezentuje vybrané midpointové i endpointové kategorie dopadu výrobní fáze LCA (Tab. 60). Tento výklad je v souladu s interními pravidly výrobce a vychází z LCA reportu výrobního závodu Častolovice.¹³²

Tab. 60 – Závěrečná interpretace

	Potenciál globálního oteplování	Spotřeba neobnovitelných zdrojů	Spotřeba energie	Spotřeba vody	Produkce odpadu
					
Jednotka	[kg CO ₂ ekv./FU]	[MJ/FU]	[MJ/FU]	[m ³ /FU]	[kg/FU]
Flora	30,52	531,58	464,76	0,10	5,76
Intense	24,4	423,65	410,86	0,08	4,56

Doplňující informace nad rámec životního cyklu

Důležitou vstupní surovinou pro výrobu minerální vlny je také recyklát ve formě briket. Tyto brikety se přidávají spolu se směsí kameniva do tavicí pece. Brikety tvoří rozemleté kusy minerální vlny pojené cementem. V současné době není pro tyto účely využíván recyklát ze staveb, ale pouze interní recyklát. Ukázka briket viz Obr. 146, Obr. 147.

¹³² VACEK, P., MEDARD, M. *General report on Isover LCA Castolovice*. Paris: Isover, 2015.



Obr. 146 – Brikety z recyklované vlny



Obr. 147 – Brikety z recyklované vlny – detail

Další možností jak recyklovat minerální vlnu je její nasekání na menší kusy a následné nafoukání do střešních konstrukcí nebo jiných dutin v budově. Takový materiál může časem slehnout, jak zmiňuje i aplikační norma ČSN EN 14064-1.¹³³ Ukázka možné aplikace recyklované vlny viz Obr. 148, Obr. 149.



Obr. 148 – Ukázka foukané izolace v podkroví



Obr. 149 – Ukázka foukané izolace v dutině stropu

¹³³ ČSN EN 14064-1. *Tepelně izolační výrobky pro stavby – Výrobky z foukané minerální vlny vyráběné in-situ: Část 1: Specifikace výrobků před zabudováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

11 Résumé

Hydrophilic mineral wool has been an integral part of greenhouse culture in modern vegetable cultivation. Its usage as a building product, especially in green roof structures, is, however, not that common and improper application may cause significant complications. The thesis documents an integration of hydrophilic mineral wool products according to the national and European building legislative as well as their possible application in green roof systems.

Hydrophilic wool can be used as multipurpose material, especially for hydroaccumulative, drainage, filter or vegetative function. Current portfolio of hydrophilic wool products completely lacks technical information on properties required for usage in green roof systems. This is caused by the fact, that **neither product nor application standards for mineral wool are prepared for clasification of such products in hydrophilic variant. A more detailed review of these products is thus recommended.**

The detailed measurement of relevant properties of mineral wool was carried out based on specific requirements for separate functional layers. The measurements were executed partially according to product standard requirements for mineral wool and partially according to procedures designed for substrates, geotextiles or nep foils. The measured values were consequently compared with German standard FLL, which represents the most comprehensive set of technical information about green roofs issue. It has been found out that the hydrophilic mineral wool products dispose with excellent water permeability, and thus can be classified in simplified compositions of extensive green roofs, where a separate drainage is not present. Their maximum water capacity exceeding standard requirements is a negative aspect. Increased humidity may harm xerophilous plants, which are usually planted on extensive roofs. The percentage qualification of air content of the hydrophilic wool at full saturation came out to the limits of acceptable values. **Based on the analysis of standard requirements and on own experiments of plants adaptation, it can be state that complete substitution of roof substrates with mineral wool is possible only with plants tolerant to overdampness.**

Because of higher moisture rate of mineral wool is for standard extensive plants reccomended to combine mineral wool with airier substrates, which secure sufficient airiness even during a long-term rain. In addition to technical properties of hydrophilic wool measured immediately after its production, properties of products which had been built in structures for a specific period, were also subjected to measurement in the very

138

same way. The only parameter requiring measuring in time is compression rate.

Requirements of proportional compression were fulfilled by products applied for a year, requirements of absolute compression however not. Beyond the FLL or mineral wool product standards were also documented other technical properties. These parameters may change over time in hydrophilic wool. **Based on experimental measusements, significant difference between properties of new products and products already applied has been proved.** This fact has not been stated by product nor application standards for mineral wools so far. The greatest differences between new products and aged products were found in compressive strength parameter, exceptionally almost 70 %. Decrease of strength may be caused by deformation of fiber structure behalf plants roots and also by change of mineral wool binder in a long-term wet conditions. Applied in greenhouse cultures, hydrophilic wool's lifetime is expected between 1 and 3 years. If the mineral wool is used in roof structures with life expectancy of 50 years, the decrease of strength will then be crucial. Hydrophilic wool as a lower hydroaccumulative layer of intensive vegetative roofs is pressed by all green roof layers, including plants with total weight exceeded 1 000 kgs per square meter! Such a large pressure may deform hydrophilic wool, and thus prevent its intended usage. **Continue with the long-term strength test in wet conditions is faithfully suggested as well as investigation of potential binder modifications.**

Very high values of maximum water capacity are generally connected with consequent ability of real hydroaccumulation. Accordingly to this presumption was constructed a real model of green roof for synchronous measurement of hydroaccumulation capacity. The roof was devided into two parts – one with hydrophilic mineral wool – second with substrate. Based on experimental measurements were set outflow coefficients subsequently compared with norm values. The measured values are lower than it is reported in national and European legislation.

At already 4° roof inclination the increased water permeability of hydrophilic wool overshadowed theoretical advantage of hydroaccumulative ability identified within laboratory measurements. **The experimental measurments clearly proved that presence of hydrophilic wool as such in the roof structure does not automatically increase its hydroaccumulative capacity and it will be necessary to design also a subsidiary system of drainage inhibitors which will keep water in the hydroaccumulative layer even.** This is the only way how to take advantage of the double water capacity potential of the hydrophilic wool compared to roof substrates. The thesis states a basic research of these inhibitors, which have been internationally

patented and which are already available on the European market.

Several hydrophilic wool products were set by various plants to explore their adaptation. In this manner, rooting of seeds, cuttings and plants were inspected. The most successful was hydrophilic wool with lower bulk density. Although this advantage, lower density also cause lower compressive strength of mineral wool, so its use within green roofs structures is very limited.

Environmental assessment of hydrophilic mineral wool and other green roof materials bears brand new knowledge to this scientific topic. Impacts on environment were calculated in various categories using the LCA method.

As a base of further calculation was prepared an environmental product declaration of two selected hydrophilic wool products. This declaration provides data of environmental impact of product manufacturing (cradle to gate model). Afterwards, four model situations of green roofs were created. Service life was set to 30 years. Impacts of all materials were closely described and ultimately subjected to comparison. The detailed evaluation shows that hydrophilic wool has a dominant influence in selected structures. This is mainly due to its energetically very demanding production. Especially processes of aggregate melting and wool hardening are most involved in the energy demands. Comparable effects on the environment are caused by other artificial materials, such as XPS or expanded clays, which form the basis of most currently used substrates for green roofs (60-70 % of expanded clay in substrate mixtures). **Based on the calculation, hydrophilic mineral wool is in the overall context environmentally comparable with other artificial materials.** Energy demand of the production is partially offset by its ability to increase thermal insulation properties of a roof even in wet condition, which was demonstrated by measuring as well as by calculations.

As additional tests show, the hydrophilic wool in the light flat green roof structure of warehouse building has a significant influence on the acoustics as well. **This type of measurements has not been published so far.** Use of simplified composition of the green roof with hydrophilic mineral wool may help these type of objects meet hygiene requirements for noise propagation in case it is a production facility with noisy traffic, which is in close proximity to residential area. Moreover, these green areas not only improve the acoustics, but also the environment quality with other green roof benefits, such as reduction of dust, CO₂ and heat leakage. They either increase humidity, oxygen production, and also have considerable aesthetic function.

For the practical point of use, thesis establishes principles for hydrophilic wool application within green roof systems. Sample assemblies and construction details as

well as essential rules for maintenance were set. These new information are included in the new Czech green roof standard proposal, which is being just negotiated.

As the valued contribution for science development can be either included obtaining The Best Paper Award from the ICAET 2015 conference, where the results of hydrophilic wool ageing process were presented. The international conference was held in Autumn 2015 in the Incheon University, Korea. The contribution of the conference was subsequently published as an article in the impact factor journal.

For further science development, it is possible to recommend following topics to the follow-up research:

- design of drainage inhibitors for hydrophilic wool and system solution of anchoring applicable in pitched green roofs;
- documentation of fire resistance influence of hydrophilic wool in green roof structures;
- development of a product with lower water absorption exclusively for extensive green roofs;
- research of long-term strength of hydrophilic wool in wet conditions and document stability of the binder.