

# Využití minerální izolace v obvodovém plášti budovy s ohledem na jeho následnou recyklaci

Pavel TESÁREK<sup>a</sup>, Jan TREJBAL<sup>a\*</sup>, Jan RICHTER<sup>b</sup>, Zdeněk PROŠEK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6;

<sup>b</sup>České vysoké učení technické v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, Třínecká 1024, 273 43 Buštěhrad

\*Korespondenční autor, e-mail: jan.trejb@fsv.cvut.cz

## Souhrn

Článek prezentuje výsledky výzkumu zaměřeného na vývoj obvodových plášťů budov z recyklovaných surovin a s potenciálem opakovatelné recyklace. Důraz je kladen na maximální využití stavebního a demoličního odpadu a úsporu nerostných surovin, zejména při realizaci nosných konstrukcí a exteriérových zateplovacích systémů. Navržený obvodový plášť sestává ze zdicích bloků a tepelné izolace z minerálních vláken. Bloky byly vyrobeny z recyklovaného jemně mletého betonu. Skladba zateplení byla navržena ve dvou variantách s ohledem na její následnou recyklaci.

V Experimentálním centru energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT v Praze byl v říjnu 2020 realizován obvodový plášť o ploše 10 m<sup>2</sup>, který je exponován reálným podmínkám vnějšího prostředí. V současné době probíhá jeho dlouhodobý monitoring, který se soustřeďuje na analýzu teplotně-vlhkostního chování a s tím související materiálovou degradaci. Průběžná data ukazují, že obě navržené skladby kopírují chování v současnosti běžně používaných stavebních materiálů. Celá konstrukce tak vykazuje potenciál vícenásobné recyklace, včetně kontaktního zateplovacího systému. Na podzim tohoto roku dojde k její demolici a následné kompletní recyklaci. K těmto účelům bude použita nově vyvinutá linka na recyklaci tepelné izolace z minerálních vláken.

**Klíčová slova:** Stavební a demoliční odpad, Recyklace, Obvodový plášť, Zdicí bloky, Cementový kompozit, Zateplovací systémy, Tepelně-vlhkostní chování.

## Úvod

Snahy o materiálové úspory a šetrný přístup k životnímu prostředí se znatelně dotýkají všech průmyslových odvětví. Významnou oblast zájmu v tomto ohledu tvoří stavebnictví, které je extrémně závislé na těžbě a využití nerostných surovin. Dle odhadů se jich v ČR spotřebuje zhruba takové množství, jaké odpovídá všem dalším průmyslovým sektorům dohromady. Kritickou surovinou se tak staly stavební kámen a štěrkopísek, které jsou zařazeny do kategorie neobnovitelných zdrojů. Situaci navíc zhoršuje nevole veřejnosti k zakládání nových a rozšiřování stávajících lomů. Není tedy překvapením, že se v ČR za posledních třicet let neotevřel žádný nový kamenolom i přes to, že ložisek vhodných k těžbě je stále dostatek<sup>1</sup>.

Ohroženým výrobkem se tak mohou stát tepelné izolace z minerálních (nejčastěji skleněných a čedičových) vláken. Na trhu s tepelně izolačními materiály zastupují cca 60 % veškeré produkce<sup>2</sup>. Dle databáze Eurostat, která je organizační složkou Evropské komise, se v ČR v roce 2020 vyrobilo vysoce přes 200 tisíc tun vlny ze struskových a minerálních vláken<sup>3</sup>. Zmíněnou informaci lze dohledat pod "Prodcom" kódem 23.99.19.10. Je však nutné upozornit, že do této skupiny nepatří skleněné vlny. Těm náleží kód 13.20.46.00, který ale započítává i vlákna pro textilní účely. Získat informaci o vyrobeném množství tohoto materiálu je tedy velmi komplikované. Někteří odborníci odhadují, že produkce skleněné vlny tvoří přibližně 30 % té čedičové<sup>4</sup>.

Dle údajů aplikace VISOH (Veřejné informace o produkci a nakládání s odpady), spravované Ministerstvem životního prostředí ČR v rámci systému ISOH (Informační systém oběhového hospodářství) se v letech 2015 – 2019 izolační materiály skupiny 17 06 03 – 04, do nichž se minerální Patronem tohoto čísla je Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2020/21 (19. – 21. 10. 2021, Hustopeče)

izolační vata řadí<sup>5</sup>, podílely na produkci stavebního a demoličního odpadu (SDO) v průměru jen několika desetinami procent<sup>6</sup>. V tomto ohledu tedy žádný zásadní problém nenastává. Situaci ovšem znatelně komplikuje velmi obtížná recyklace vat ze zateplovacích systémů. Zejména těch, které jsou kontaminovány stavebními lepidly, omítkami a dalšími nežádoucími hmotami<sup>4,7</sup>. Běžnou praxí tak bylo tyto odpady skládkovat. Proti zavedeným zvyklostem ale stojí ekologicky motivované snahy omezit skládkování SDO. Zastřešeny jsou cílem Evropského parlamentu, který požaduje od roku 2020 recyklovat minimálně 70 % veškerého SDO<sup>8</sup>. Pro představu zmiňme, že uložení jedné tuny minerální vaty na skládku stojí cca 1750 Kč<sup>9</sup>. Celá situace tak dává vzniknout novým výzvám v oblasti recyklace minerálních vat, které sloužily v kontaktních zateplovacích systémech budov, tzn., vykazují značnou míru kontaminace nežádoucími stavebními hmotami.

V souvislosti s krizí nerostných surovin nelze nezmínit beton, který nadále zůstává suverénně nejrozšířenějším stavebním materiálem<sup>10</sup>. Pozornost se tedy již několik desetiletí obrací na jeho recyklaci. Dle již zmíněné aplikace VISOH se jedná o odpad skupiny 17 01 01, který v letech 2015 – 2019 (aktuálnější data zatím nejsou k dispozici) představoval v průměru více než 10% podíl na celkovém množství SDO. V absolutních číslech hovoříme o bezmála 10 milionech tun<sup>6</sup>.

Podrobnější analýza českých statistických dat dále odhaluje, že recyklace kameniva z odpadního betonu v čase vytrvale stoupá a v posledních letech atakuje 15% hranici v poměru k panenskému kamenivu<sup>1</sup>. Stranou zájmu ovšem stojí jemné frakce (0 – 1 mm) recyklovaného plniva a stejně tak hydratovaná cementová matrice. Přitom v betonu zastupují 15 a v některých specifických případech dokonce 50 % hmotnosti. Oba materiály jsou charakteristické značně heterogenními povrchovými i objemovými vlastnostmi, což jejich aplikační potenciál značně limituje<sup>11</sup>. Některé studie dokonce poukazují na skutečnost, že mohou obsahovat nezanedbatelné množství (až několik jednotek procent) tzv. zbytkových cementových slínek, tedy slínek, které zpravidla kvůli nedostatku záměsové vody nebyly podrobeny hydrataci<sup>12-14</sup>. Jejich dodatečné využití s sebou přináší další potenciál v úspoře cementu. Jedná se nejen o ekonomický, ale rovněž ekologický benefit, zejména vezmeme-li v potaz, že výroba cementu souvisí s produkcí zhruba 5 – 7 % antropogenních emisí CO<sub>2</sub> (cit.<sup>15</sup>).

Jak již bylo naznačeno, využití stavebních materiálů se dostává pod drobnohled odborné i laické veřejnosti. Kladen je důraz na jejich opravdu efektivní využití zohledňující principy udržitelného rozvoje. Na zmíněnou situaci reaguje výzkum prezentovaný v tomto článku. Navržen byl nový typ lehčených bloků pro obvodový plášť s vysokým obsahem recyklovaných surovin, který je koncipován jako nosná vrstva s výrazně lepšími tepelně-technickými vlastnostmi oproti prostému betonu. Bloky jsou z vnější strany zatepleny dvěma variantami tepelné izolace na bázi minerálních vln. Celá skladba již při tloušťce 375 mm vykazuje součinitel prostupu tepla 0,16 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>. Maximální možný důraz byl kladen na co největší zastoupení recyklovaných surovin a současně na vysoký potenciál následné opakovatelné recyklace, který bude v pokračujícím výzkumu experimentálně ověřen. Celá koncepce vychází z několikaletých poznatků získaných během experimentálního výzkumu na Fakultě stavební a Centru energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT v Praze.

## Obvodový plášť budov navržený s ohledem na úsporu nerostných surovin

### Základní požadavky

Naším cílem je přispět k řešení výše uvedených problémů a navrhnout obvodový plášť budov, který je šetrný k zásobám nerostných surovin a zároveň splňuje současné tepelně-technické standardy. Jeho šetrnost k těmto surovinám spočívá jednak v aplikaci vysokého množství recyklovaných surovin a dále v optimalizaci návrhu, který zajistí jeho opakovanou 100% recyklovatelnost. Důraz je kladen na realizaci experimentu v reálných podmínkách, které ověří vyvíjená laboratorních řešení v praxi.

Z tohoto důvodu byl realizován segment obvodového pláště o ploše 10 m<sup>2</sup>, který je exponován vnějšímu prostředí. Samotný plášť sestává ze dvou základních vrstev: (i) nosná část z lehčených zdicích bloků a (ii) zateplení z desek z minerálních vláken. Celá konstrukce je dlouhodobě monitorována. Sledovány jsou následující parametry: průběh teplot, relativní vlhkosti a tepelný tok. Součástí realizovaného experimentu je i demolice a následná recyklace konstrukce, která proběhne v říjnu 2021.

## Zdicí bloky

V rámci výzkumu realizovaného v předchozích letech na Fakultě stavební ČVUT v Praze (projekt MPO Trend FV20503) byl vyvinut zdicí systém s vysokým obsahem recyklátu ve formě upravených jemných frakcí betonového recyklátu. Jedná se o komplexní řešení, které je tvořeno lehčenými bloky, speciální zdicí maltou pro tenké spáry a tenkovrstvou omítkou. Celý systém byl popsán ve čtvrtém vydání časopisu Waste forum v roce 2019<sup>16</sup>. Připomeňme, že směs pro výrobu zdicích bloků kompletně postrádá panenské plnivo. Aby bloky splnily náročné a protichůdné požadavky na mechanické (pevnost v tlaku, modul pružnosti) a tepelně-izolační vlastnosti (tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita), jejich směs byla vylehčena pomocí napěněné struktury a ztužena mikrovlákný. Vlákná dodala firma Trevos, s. r. o. a byla vyrobena z kompletně recyklovaného polypropylenu (PP). Dosahovala délky 4 mm a průměru 12 μm. Úkolem vláken bylo nejen ztuhit matici kompozitního materiálu, ale zároveň se podílet i na stabilizaci napěněné struktury matrice během tuhnutí a tvrdnutí, čímž dochází k eliminaci sesedání směsi<sup>17,18</sup>.

Jak již bylo řečeno, jemné frakce recyklovaného plniva a cementové pasty lze využít jako tzv. aktivní mikroplnivo (plnivo s částečnou pojivovou schopností)<sup>14,19</sup>. Předcházet ale musí vhodná mechanická úprava – vysokorychlostní mletí, které velikost zrn recyklátu přiblíží velikosti zrn standardního cementu. Úpravu zajistila firma Lavaris, s.r.o. Benefitem této technologie je jednak sjednocení frakce odpadu a dále obnažení (odhalení) zbytkových nezhydratovaných slínek. Vzniká tak aktivní mikroplnivo, které je schopné nejen plnohodnotně nahradit jemné frakce panenského kameniva, ale částečně i pojiva<sup>12</sup>. Opomíjená frakce odpadního betonu tak nachází velmi efektivní uplatnění při výrobě nových stavebních materiálů<sup>20</sup>. Původní receptura pro výrobu zdicích bloků byla lehce modifikována s důrazem na zvýšení použitého množství aktivního mikroplniva (frakce 0 – 0,25 mm). Shrnutí je v tabulce 1.

**Tabulka 1: Složení lehčeného zdicího bloku.**

Složka	Množství (kg/m <sup>3</sup> )	Poznámka
CEM I 42,5R	300,45	38 hm. %
Mikromletý betonový recyklát	510,68	59 hm. %
Napěňovací přísada	7,29	0,9 hm. %
Plastifikátor	9,39	1,1 hm. %
Recyklovaná mikrovlákná	8,10	1 hm. %
Voda	200	w/c = 0,5

Výroba bloků pro experimentální plášť probíhala v poloprovozním režimu v betonárně. Aplikován byl standardní postup: příprava směsi v míchacím centru a její následná doprava na místo určení pomocí automobilového domíchávače. Celý proces výroby byl rozdělen do šesti záměsí (po 0,5 m<sup>3</sup>) s celkovým objemem 3 m<sup>3</sup>. Homogenizace směsi byla provedena na planetární míchačce s vířivým bubnem. Nejprve byly míseny suché složky, do nichž byla přidána voda. Následovalo vmíchání pěny, která byla vyrobena pomocí pěnogenerátoru. Směs byla dále transportována a ukládána do forem, jak ukazuje obrázek 1.

Takto vyrobený zdicí blok dosahoval rozměrů 500×250×175 mm. Výsledná experimentálně stanovená pevnost v tlaku byla 7,2±1,1 MPa. Další materiálové vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2. Z bloků byla běžným způsobem vyzděna experimentální stěna o ploše 3×3,3 m<sup>2</sup>, která byla následně opatřena zateplovacím systémem.



**Obrázek 1: Proces nakládání čerstvé směsi do domíchávače (vlevo). Poloprovodní plnění forem (vpravo).**

### Zateplovací systém

Vyzděná stěna byla z vnější strany následně opatřena zateplovacím systémem tak, aby splňovala současné tepelně-technické nároky odpovídající středoevropskému klimatu. Návrh zateplení odrážel požadavky normy ČSN 73 0540-2<sup>21</sup>. Konkrétně bylo cíleno na dosažení součinitele prostupu tepla doporučeného pro pasivní domy  $U_{pas,2} = 0,18 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ .

Pro vnější zateplení byly zvoleny dvě varianty: (i) zateplení měkkou izolací v lehkém kovovém roštu Knauf Insulation Diagonal 2H o celkové tloušťce 460 mm, značeno jako S1 a (ii) kontaktní zateplení o celkové tloušťce 375 mm, značeno jako S2. V prvním případě je izolace zaklopena z vnější strany difúzně otevřenou fólií. Na ni navazuje větraná dutina a fasádní obklad z desek Heraklith C. Druhá varianta se opírá o klasické systémové řešení kontaktního zateplovacího systému (KZS). Návrh zateplovacího systému zohledňoval požadavky na plánovanou demolici a recyklaci (10/2021). Ve spolupráci se společností Lavaris, s.r.o. a Knauf Insulation, s.r.o. je vyvíjena speciální linka, která bude k těmto účelům určena. Linka bude mobilní, čímž umožní recyklaci přímo na staveništi. Navržena bude tak, aby zvládla zpracovat odpad v podobě čistých i kontaminovaných desek z minerální vlny. Skladby obou variant následují (od exteriéru):

S1	S2
- deska Heraklith tl. 25 mm	- tenkovrstvá omítka tl. 5 mm
- vzduchová mezera tl. 60 mm	- tepelně-izolační deska tl. 200 mm
- tepelná izolace z minerální vlny tl. 200 mm	- stěrka tl. 5 mm
- lehčený blok s obsahem betonového recyklátu tl. 175 mm	- lehčený blok s obsahem betonového recyklátu tl. 175 mm
- vnitřní omítka z recyklátu tl. 3 mm	- vnitřní omítka z recyklátu tl. 3 mm

U obou skladeb bylo dosaženo součinitele prostupu tepla  $0,16 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Vytyčený cíl tak byl lehce překonán a ukazuje potenciál pláště konkurovat běžně využívaným systémům. Materiálové vlastnosti použité tepelné izolace jsou shrnuty v tabulce 2.

**Tabulka 2: Materiálové vlastnosti výrobků použitých v obvodovém plášti.**

Materiál	Objemová hmotnost ( $\text{kg/m}^3$ )	Součinitel tepelné vodivosti ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Faktor difuzního odporu vodní páry (-)
Lehčený zdicí blok	1000±80	0,31±0,03	4,2±0,1
Cementová stěrka/malta	1500±60	0,55±0,07	7,5±0,2
Tepelná izolace – skladba S1	60±1	0,035±0,003	1,1±0,05
Tepelná izolace – skladba S2	75±2	0,035±0,002	1,2±0,04

### **Realizace konstrukce obvodového pláště**

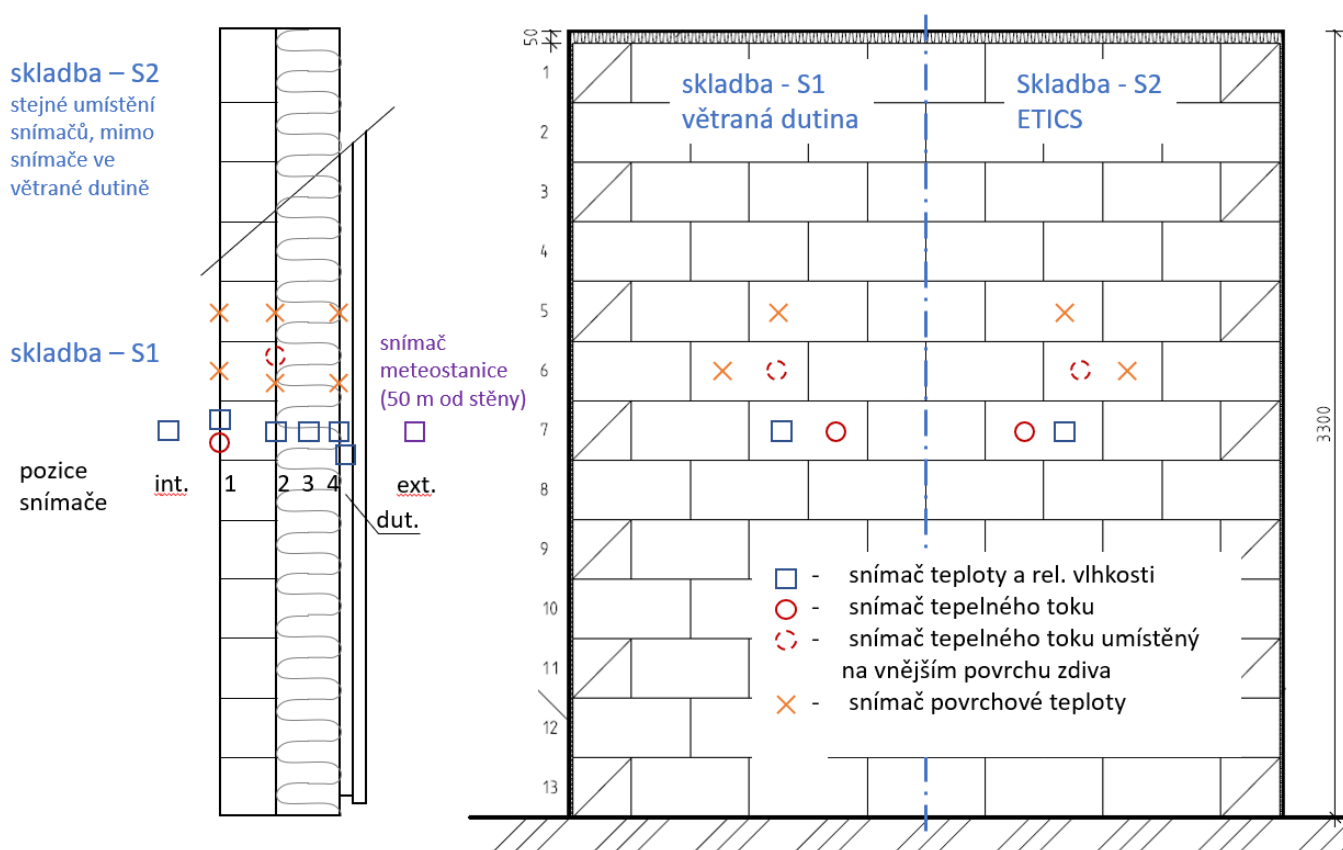
Dlouhodobý monitoring tepelně-vlhkostního chování obou skladeb obvodových plášťů je prováděn na experimentální fasádě v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Buštěhradu. Osazen byl jeden ze šesti experimentálních otvorů v obvodovém plášti o rozměru  $3 \times 3,3$  metry. Obrázek 2 ukazuje pohled na plášť z exteriéru. V jeho pravé části je umístěn plášť s větranou dutinou (skladba S1), zatímco v levé části je systém KZS (skladba S2). Vnější povrch obou konstrukcí je exponován exteriérovým podmínkám jihozápadní fasády. Vnitřní povrch navazuje na klimatickou místnost s definovatelnými tepelně-vlhkostními podmínkami. Na začátku experimentu byly podmínky vzduchu v místnosti nastaveny na teplotu  $20 \pm 1$  °C a relativní vlhkost  $55 \pm 2$  %. Jedná se o parametry odpovídající zimním návrhovým podmínkám vnitřního prostředí v obývacích místnostech podle ČSN 73 0540-3<sup>22</sup>, včetně bezpečnostní přírážky vlhkosti 5 % vlhkostních.

Jedná se o první realizaci vyvinutého pláště v reálných podmínkách. Mimo níže popisovaný monitoring tepelně-vlhkostního chování proto byly sledovány i technologické aspekty. Ukázalo se, že manipulace s bloky se nikterak nevymyká běžným zdicím materiálům (např. pórobetonu). Při zdění byly použity standardní technologické postupy. Bloky bylo možné řezat běžnými nástroji. Bezproblémově se jevila i interakce se zdicím, omítkovým či zateplovacím systémem.

Pro sledování tepelně-vlhkostního chování obou variant obvodových plášťů byly do každé ze skladeb osazeny tepelně-vlhkostní snímače Rotronic Instruments HC2, snímače povrchové teploty Pt1000 firmy Sensit a snímače tepelného toku. Snímače povrchových teplot a kombinované snímače byly umístěny na vnitřním a vnějším povrchu konstrukcí a na všech rozhraních jednotlivých vrstev. Snímače tak dokumentují tři lineární profily po tloušťce každé z konstrukcí. Jeden kombinovaný snímač byl dále umístěn do poloviny tloušťky tepelné izolace. Snímače tepelného toku byly osazeny na vnitřním a vnějším líci zdiva (viz obrázek 3). Kombinované snímače byly chráněny před mokřými procesy (přestěrkování atp.) kapsičkou z difuzně otevřené podstřešní folie (viz obrázek 4). Vlastní monitoring byl zahájen dne 18. prosince 2020. Skladby budou monitorovány po dobu 10 měsíců, tedy přibližně do října 2021.



**Obrázek 2: Segment obvodového pláště na fasádě budovy UCEEB v Buštěhradu. Dokončená část fasády s KZS a rozpracovaná část provětrávané fasády (vlevo) a finální podoba experimentální fasády (vpravo).**



**Obrázek 3: Schéma umístění snímačů v testovaných skladbách obvodového pláště; vlevo: řez; vpravo: pohled z interiéru.**



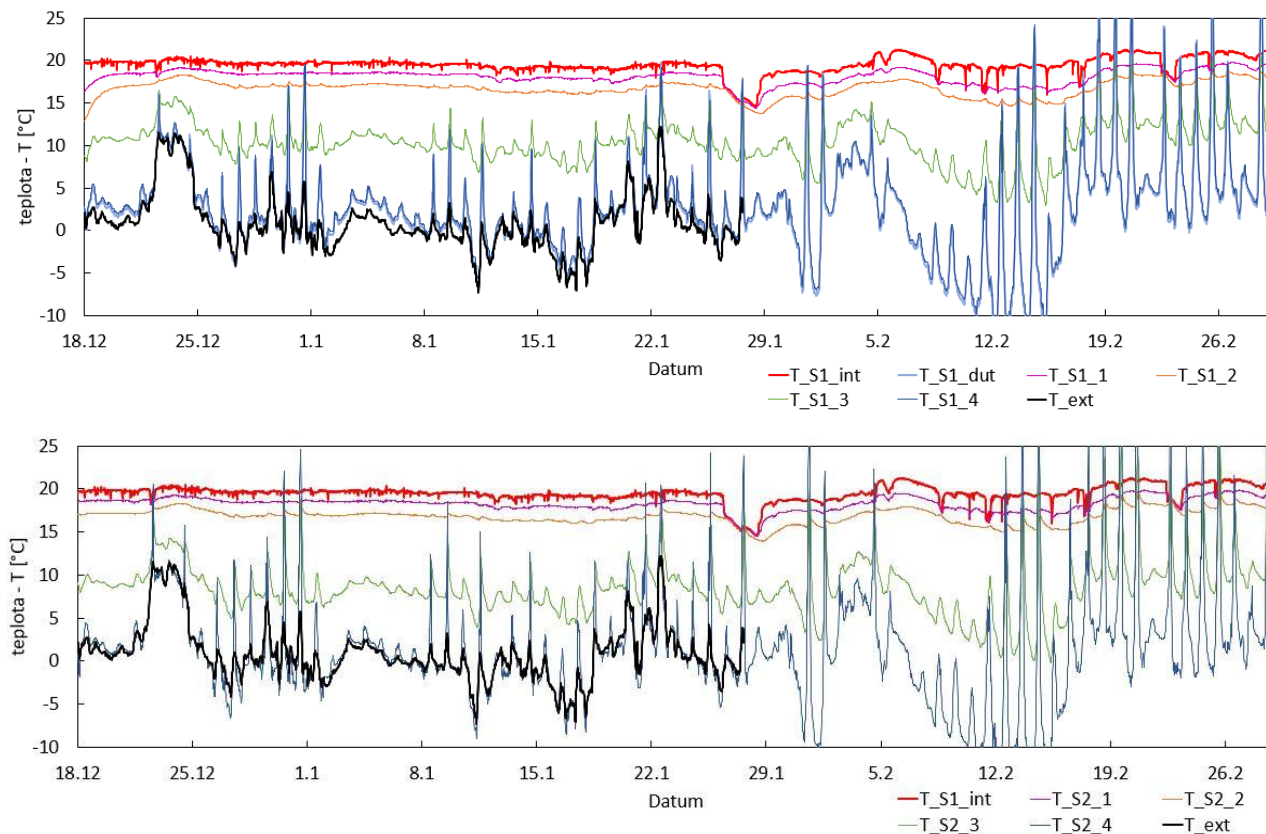
**Obrázek 4: Osazení snímačů na vnitřní straně zdicích bloků (vlevo) a snímače na povrchu tepelné izolace souvrství KZS (vpravo)**

## Výsledky a diskuse

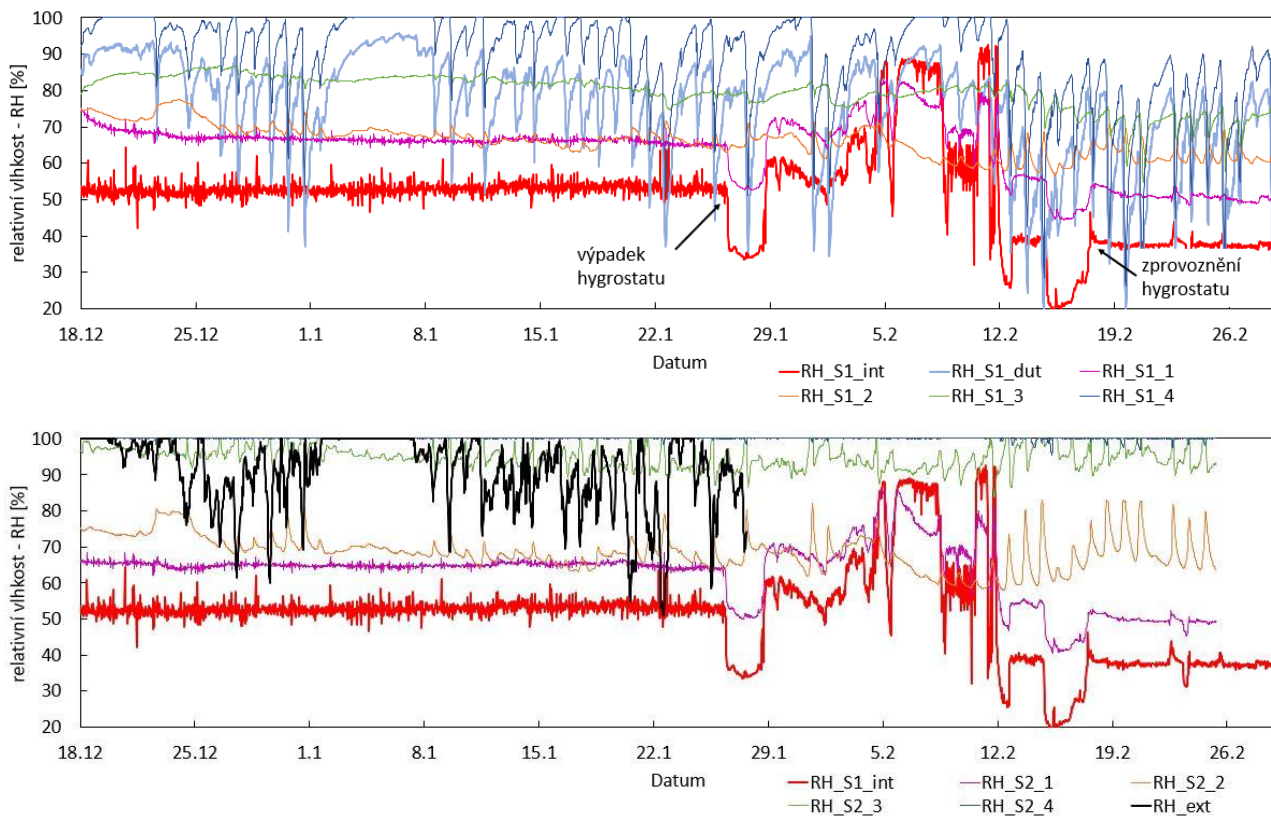
Výsledky ukazují záznam z měření probíhajícího nepřetržitě přes 2 měsíce (od 18. prosince 2020 do 26. února 2021). Obrázek 5 zachycuje průběh teplot ve skladbách jako funkci času. Pro obě varianty společně (S1 a S2) platí, že nejvyšších a velmi stabilních hodnot dosahuje teplota v interiéru ( $T_{S1\_int}$ ). Její průběh věrně kopíruje teplota na vnitřním a vnějším povrchu bloků ( $T_{S1\_1}$ , resp.  $T_{S1\_2}$ ). Teplotní spád přes zdicí bloky je cca 4 – 5 °C navzdory velmi malé tloušťce. Dokazuje tak jejich slušné tepelně-izolační vlastnosti. Dle očekávání lze největší oscilace hodnot zachytit čidlem v provětrávané dutině ( $T_{S1\_dut}$  či  $T_{S1\_4}$ ), která je ohřívána slunečním zářením. Naměřená teplota dokonce několikrát přesáhla teplotu interiéru navzdory zimnímu období. Zachycené rozdíly přesahují 35 °C, což je zhruba o 15 – 20 °C větší rozptyl, než jakého dosahovaly teploty vzduchu v exteriéru ( $T_{ext}$ ).

Co se týká průběhů relativní vlhkosti, na obrázku 6 je vidět, že od konce ledna nebyla po dobu několika týdnů v interiéru udržována relativní vlhkost na konstantní úrovni 55 % ( $RH_{S1\_int}$ ). Jednalo se o následek výpadku hygrostatu v klimatické místnosti. Je zřejmé, že v tomto období byla vlhkost v místnosti významně ovlivněna vlhkostmi okolních prostředí. Uvedená skutečnost však měření ani budoucí srovnání dat s numerickou simulací neohroží, protože okrajové podmínky působící na konstrukci, ačkoliv se výrazně mění, jsou v tomto období zaznamenány. Vzhledem k závislosti relativní vlhkosti na teplotě nejsou její průběhy po tloušťce konstrukce rovnoměrně rozloženy jako v případě teplot. Za pozornost stojí klesající tendence průběhu vlhkosti bloků ( $RH_{S1\_1}$  a 2), která dokumentuje jejich postupné vysychání.

Rozvrstvení hodnot by však mělo být patrné z průběhu koncentrací vodní páry (absolutních vlhkostí), viz obrázek 7. Ani tam ale k takovému rozložení nedošlo. Důvodem je s největší pravděpodobností kapalná voda zadržovaná ve vrstvě zdiva, která postupně vysychá. To potvrzuje i rozdíl hodnot tepelného toku na interiérové a exteriérové straně zdiva (obrázek 8). Původ této vody bude dále analyzován. Rozdíl v dodané a odcházející energii (cca 4,5 Wm<sup>-2</sup>) je tedy s největší pravděpodobností využit na přeměnu skupenství vody z kapalného na plynné. Z hodnot tepelných toků bylo dále možné stanovit aktuální hodnotu tepelné vodivosti silikátových tvárnic, jejíž průměr se shoduje s předběžnou hodnotou stanovenou laboratorně – 0,31 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Lze ale předpokládat, že po vyschnutí zdiva se tato hodnota sníží.

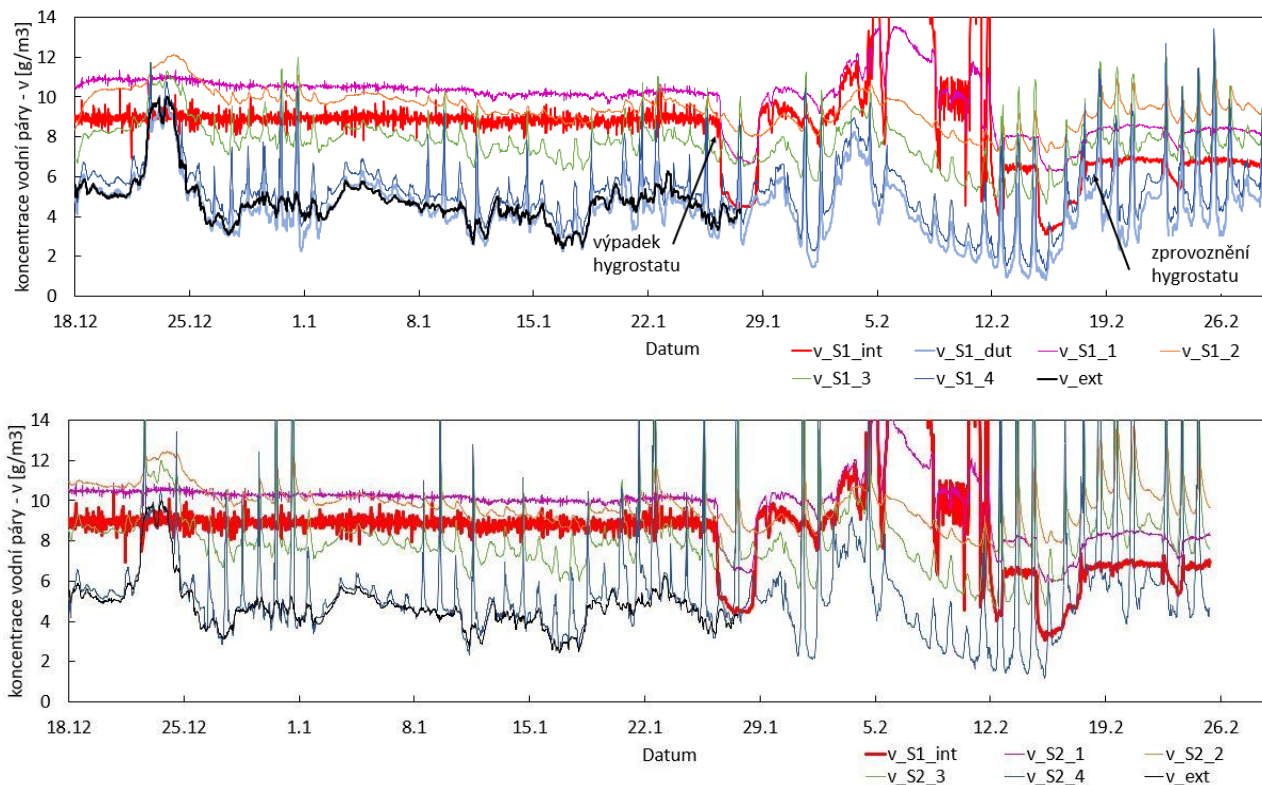


**Obrázek 5: Průběhy teplot v konstrukci – skladba S1 (nahore) a S2 (dole).**

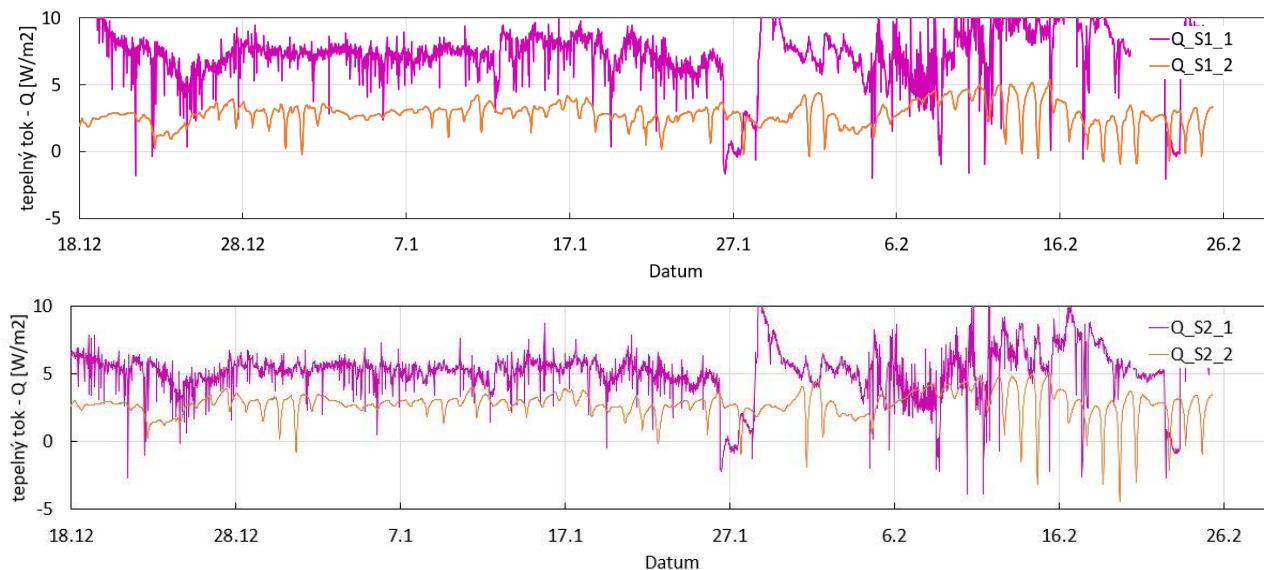


**Obrázek 6: Průběhy relativních vlhkostí v konstrukci – skladba S1 (nahore) a S2 (dole).**





**Obrázek. 7: Průběhy koncentrací vodní páry v konstrukci – skladba S1 (nahore) a S2 (dole).**



**Obrázek. 8: Průběhy tepelných toků na vnitřním a vnějším líci zdiva – skladba S1 (nahore) a S2 (dole).**

## Závěry

Na Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT byl realizován experimentální obvodový plášť sestávající z nosné a tepelně-izolační vrstvy. Nosná vrstva byla vyrobena z bloků z recyklovaného jemně mletého betonu, zatímco tepelně-izolační tvořily desky z minerálních vláken. Účel tohoto experimentu byl dvojitý: (i) ověřit aplikační potenciál dříve vyvinutých zdicích bloků a (ii) navrhnout a připravit konstrukci na následnou demolici a opakovatelnou recyklaci.

Během realizace konstrukce bylo potvrzeno, že dříve vyvinuté zdicí bloky dosahují stejných funkčních vlastností jako standardní materiály. Během realizace nebyly odhaleny žádné technologické problémy či nedostatky. Navržené řešení tak může přispět k redukci problémů s nedostatkem nerostných surovin ve stavebnictví.

Plánovaná recyklace se soustředí na zpracování zateplovacího systému, které je v současné době stále limitované zejména kvůli kontaminaci vláken stavebními lepidly, omítkami a dalšími hmotami. Recyklaci musí předcházet podrobný popis dlouhodobé materiálové degradace konstrukce vystavené reálným podmínkám. Z toho důvodu je již několik měsíců sledováno tepelně-technické chování skladeb. Dosavadní data neodhalila žádné nežádoucí změny ve sledovaných materiálech, takže lze předpokládat, že při aplikaci vhodné recyklační technologie může být jejich funkční potenciál využíván opakovaně.

## Poděkování

*Tento příspěvek byl připraven díky podpoře projektu TA ČR Zéta TJ04000208 "Mobilní recyklační linka na zpracování stavebního odpadu z minerálních tepelně-izolačních materiálů a využití recykláž, včetně možnosti přímé aplikace na stavbách" a v rámci implementace výsledků projektu MPO Trend FV20503 „Lehčené zdicí materiály na bázi mikromletých minerálních vedlejších produktů s řízenými užitnými vlastnostmi“.*

*Poděkování dále patří společnostem Knauf Insulation, s.r.o., Lavaris, s.r.o., Visco, s.r.o., Českomoravský cement, a.s., Sika CZ, s.r.o., Destro, s.r.o., Trevos Košťálov, s.r.o., Uniq Development, s.r.o., díky kterým bylo možné segment obvodového pláště v této podobě realizovat.*

## Literatura

1. Škopán M.: *Sborník příspěvků 25. ročníku konference Recycling 2020* (Škopán, M. ed.), str. 9, Brno 2020.
2. Papadopoulos A. M.: *Energy Build* 37 77 (2005).
3. <https://ec.europa.eu/eurostat>, staženo 22. 3. 2021.
4. Väntsi O., Kärki T.: *J Mater Cycles Waste Manag* 16 62 (2014).
5. Mueller A., Leydolph B., Stanelle K.: *Int Ceram Rev* 152 (2009).
6. <https://isoh.mzp.cz/visoh>, staženo 18. 3. 2021.
7. Pavlů T., Pešta J., Volf M., Lupíšek A.: *Katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin pro použití ve stavebnictví*, ČVUT v Praze, Praha 2018.
8. The European Parliament and of the Council on Waste. Directive regarding demolition waste. 2008.
9. Průša D., Šťastník S., Šuhajda. K, Polášek J.: *Sborník příspěvků 25. ročníku konference Recycling 2020* (Škopán, M. ed.), str. 82, Brno 2020.
10. Gastaldi D., Canonico F., Capelli L., Buzzi L., Boccaleri E., Irico S.: *Cem Concr Compos* 61 29 (2015).
11. Trejbal J., Prošek Z., Tesárek P., Karra'a G.: *Sborník příspěvků 23. ročníku konference Recycling 2018* (Škopán, M. ed.), str. 125, Brno 2018.
12. Prošek Z., Trejbal J., Nežerka V., Goliáš V., Faltus M., Tesárek P.: *Resour Conserv Recycl* 155 (2020).

Pavel TESÁREK, Jan TREJBAL, Jan RICHTER, Zdeněk PROŠEK: Využití minerální izolace v obvodovém plášti budovy s ohledem na jeho následnou recyklaci

13. Bordy A., Younsi A., Aggoun S., Fiorio B.: *Constr Build Mater* 132 1 (2017).
14. Topič J., Prošek Z., Fládr J., Tesárek P.: *Waste Forum* 2 268 (2018).
15. Paris J.M., Roessler J.G., Ferraro C.C., Deford H.D., Townsend T.G.: *J Clean Prod* 121 1 (2016).
16. Prošek Z., Trejbal J., Tesárek P., Karra'a G.: *Waste Forum* 4 291 (2019).
17. Rasheed M.A., Prakash S.S.: *Constr Build Mater* 98 613 (2015).
18. Castañeda D., Silva G., Salirrosas J., et al.: *Constr Build Mater* 253 2 (2020).
19. Prošek Z., Nežerka V., Hlůžek R., Trejbal J., Tesárek P., Karra'a G.: *Constr Build Mater* 201 702 (2019).
20. Zhao Z., Courard L., Gros Lambert S., Jehin T.: *Resour Conserv Recycl* 157 1 (2020).
21. ČSN 73 0540-2: *Tepelná Ochrana Budov – Část 2: Požadavky*.
22. ČSN 73 0540-3: *Tepelná Ochrana Budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin*.

## Use of mineral wool in building envelopes with regards to their future recycling

Pavel TESÁREK<sup>a</sup>, Jan TREJBAL<sup>a\*</sup>, Jan RICHTER<sup>b</sup>, Zdeněk PROŠEK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Thákurova 7, 166 29 Prague 6, Czech Republic

<sup>b</sup><sup>a</sup>Czech Technical University in Prague, University Centre for Energy Efficient Buildings, Třínecká 1024, 273 43 Buštěhrad, Czech Republic

\*Corresponding author, e-mail: jan.trejbal@fsv.cvut.cz

### Summary

The paper presents research results that are focused on development building envelopes based on recycled materials. The main aim is to utilize construction and demolition waste and to save mineral resources. Moreover, it is also targeted to design such constructions which are suitable for further and multiple recycling. The designed envelope is made from building blocks and rock wool heat insulation. The blocks were made of recycled finely ground concrete. The insulation was designed in two variants regarding its further recycling. In the University Centre for Energy Efficient Buildings, CTU in Prague, the building envelope having 10 square meters was made during 10/2020 which is now exposed to real conditions of exterior. Currently, a long-term monitoring is in progress, focusing on temperature-humidity measurement and material degradation. Ongoing data show that both constructions follow the behavior of standard materials. The constructions thus exhibit potential for repeatable recycling, that will be done using the newly developed machine for rock wools recycling in 10/2021.

**Keywords:** Construction and Demolition Waste, Recycling, Building Envelope, Masonry Blocks, Cement Composite, Heat Insulation system, Heat-moisture Behavior