

# Vliv odpadní celulózy na vlastnosti autoklávovaného pórobetonu

**Lenka MÉSÁROSOVÁ, Vít ČERNÝ, Jindřich MELICHAR, Šimon BARÁNEK, Jakub HODUL, Rostislav DROCHYTKA**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/94, 605 00 Brno,  
e-mail: lenka.mesarosova@vut.cz

## Souhrn

*Příspěvek se zabývá hodnocením vlivu přídavku celulóзовých vláken, a to primární mikrocelulózy a odpadní celulózy (v množství 0,5 %, 1,0 % a 1,5 % hm.) na technologické vlastnosti v průběhu přípravy a také fyzikálně mechanické vlastnosti autoklávovaného pórobetonu. Cílem bylo experimentálně ověřit, jakým způsobem celulózová vlákna ovlivňují základní vlastnosti: objemovou hmotnost, pevnost v tlaku, koeficient konstruktivnosti, pórovou strukturu a mikrostrukturu výsledného materiálu. a tím současně prověřit možnosti využití papírového odpadu jako příměsi při výrobě pórobetonů. Z výsledků vyplývá, že odpadní celulóza může být vhodnou alternativní surovinou pro modifikaci autoklávovaného pórobetonu, jelikož pomáhá zlepšit mechanické vlastnosti. Využití této druhotné suroviny tak představuje environmentálně i technicky přínosný přístup k výrobě lehkých stavebních materiálů s nižšími environmentálními dopady.*

**Klíčová slova:** autoklávovaný pórobeton, odpadní vlákna, odpadní celulóza, mikrostruktura, pevnost v tlaku, koeficient konstruktivnosti.

## Úvod

Autoklávovaný pórobeton je anorganický kompozitní stavební materiál, který se vyznačuje velice nízkou objemovou hmotností (nejčastěji 300 až 600 kg·m<sup>-3</sup>), tvořený až z 80 % makropóry a mikropóry, které jsou uzavřené a mají průměr do 2,5 mm. Díky této struktuře je pórobeton lehký, má výborné tepelně izolační vlastnosti a je velmi snadno opracovatelný, což zrychluje možnosti výstavby z tohoto materiálu. Velký podíl pórů ve struktuře však způsobuje jeho křehkost. Platí, že se zvyšující se pórovitostí dochází ke snižování pevnosti v tlaku, která se obvykle pohybuje v rozmezí 2 až 7 MPa.

Základní suroviny pro výrobu pórobetonu můžeme rozdělit do několika skupin: maltoviny, křemičité složky, plynotvorné látky a pomocné suroviny. Mezi maltoviny patří především vápno a cement, které mají funkci pojiva a vstupují do hydrotermálních reakcí. Křemičité složky jsou zastoupeny nejčastěji v podobě křemičitého písku, ale může být použit i popílek nebo struska. Plynotvorné látky bývají přidávány nejčastěji ve formě hliníkového prášku, který reaguje s hydroxidem vápenatým obsaženým ve směsi za vzniku vodíku, který celou směs nadouvá. Jako pomocné suroviny se používají např. sádrovec nebo anhydrit<sup>1</sup>.

Mechanické vlastnosti souvisí pórovitostí, s tloušťkou stěn mezi póry a stupněm krystalinity produktů hydratačních reakcí. Díky hydrotermálnímu ošetření, které je jedním ze základních kroků průmyslové výroby, dochází k mineralogické tranzici z C-S-H II přes C-S-H I na tobermorit. Pro jeho optimální vznik je důležité zachovat poměr mezi oxidy CaO a SiO<sub>2</sub>, který se pohybuje mezi 0,8 – 1,0.<sup>2</sup>

Dosavadní výzkumy v oblasti využití vláken na organické bázi prokázaly, že přídavek organických vláken, jako jsou například bambusová celulózová vlákna<sup>3</sup>, vlákna z dřevní hmoty<sup>4,5</sup> a rýžové slupky<sup>6</sup>, do autoklávovaného pórobetonu může zlepšovat jeho mechanické vlastnosti. Jsou-li tyto materiály dávkovány v optimálním množství, je díky jejich přídavku možné zlepšit jejich pevnosti i o více než 20 %.

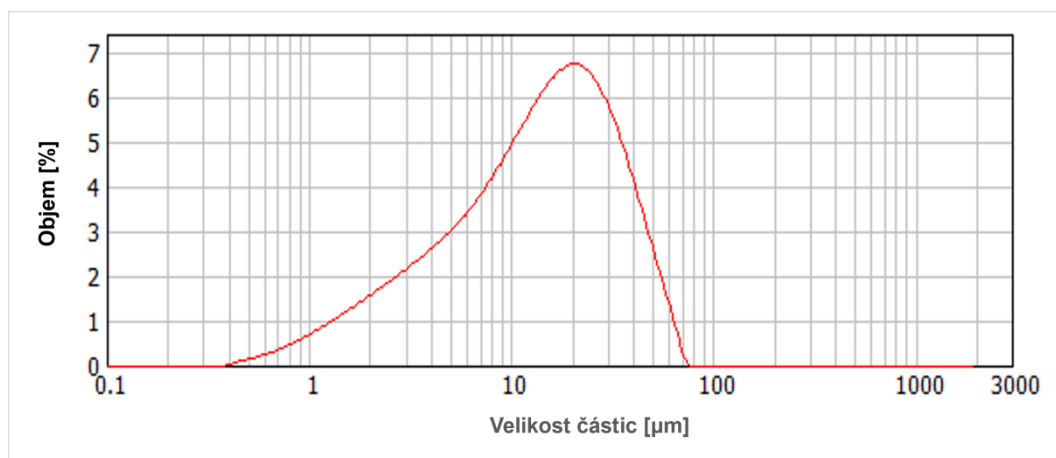
J. Zhang<sup>3</sup> v své práci uvádí, že přidání 0,3 % hmotnostních bambusových celulózových nanovláken modifikovaných 3-merkaptopropyl-trimethoxysilanem vede ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu o 49,2 % a ke zvýšení pevnosti v tlaku o 20,7 %. Chemické a mikroskopické analýzy materiálu s bambusovými

vlákna ukázaly, že silanová úprava zlepšuje mezifázovou adhezi a čerstvá směs vykazuje pseudoplastické chování s potenciálními důsledky pro zpracovatelnost. Naproti tomu M. Bentchikou<sup>7</sup> zjistil, že recyklovaná celulózová vlákna v množství až 15 % hm. snižují pevnost v tlaku i v ohybu. Ačkoliv hodnoty pevností zůstaly v rámci standardních limitů, vlákna pomohla snížit objemovou hmotnost a tepelnou vodivost. Celulózová vlákna také ovlivňují mezifázové spojení a strukturu pórů. Zhang<sup>3</sup> podrobně popsal, jak siloxanové skupiny chemicky reagují s hydroxylovými skupinami na povrchu vláken a přispívají ke zlepšení adheze vláken a matrice. T. Ni<sup>8</sup> ve své práci zdokumentoval, že přidání rostlinných vláken v množství 1,5 % hmotnosti zvyšuje pevnost v ohybu o více než 20 % bez významného vlivu na tlakové pevnosti. Banthia<sup>9</sup> zkoumal možnosti využití celulózových vláken v klasickém betonu a přišel se zjištěním, že přídavek celulózových vláken (při dávkování 0,1 – 0,3 % obj.) ovlivňuje pórovou strukturu.

Rozličné využití vláken na bázi celulózy bylo prozkoumáno v rámci jiných aplikací. Dosud provedené studie uvádějí, že účinky závisí na typu vláken, jejich úpravě, dávkování a způsobu přípravy hmoty<sup>10</sup>. Chování odpadních vláken na bázi celulózy při přípravě autoklávovaného pórobetonu však nebylo dosud dostatečně prozkoumáno. Cílem tohoto příspěvku je zhodnotit vliv konkrétních odpadních celulózových vláken vzniklých z rozvláknění odpadního papíru na fyzikálně mechanické parametry a zhodnotit tak potenciální benefity tohoto odpadního materiálu v produkci pórobetonu ošetřeného v hydrotermálních podmínkách.

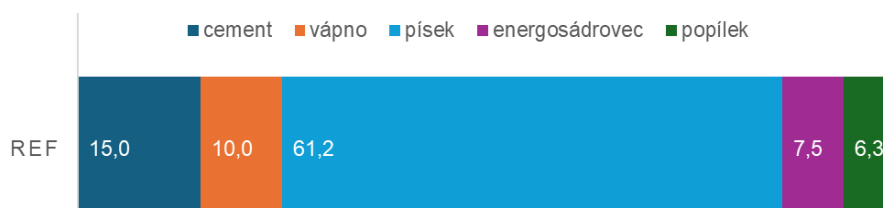
## Experimentální část

Jako vstupní suroviny referenčních vzorků byly použity nehašené vápno (s minimálním obsahem CaO 90 %), cement, fluidní popílek, křemičitý písek (s obsahem SiO<sub>2</sub> min. 90 %, pomletý na měrný povrch 200 m<sup>2</sup>/kg a velikost částic viz obrázek 1), síranové kaly (připravené z energosádrovce) a hliníkový prášek.



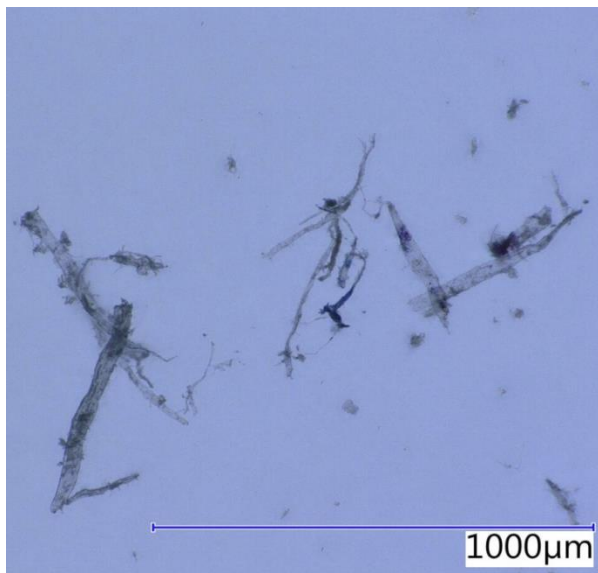
**Obrázek 1: Distribuce velikosti částic použitého křemičitého písku.**

Hlavní složky byly dávkovány dle základní receptury v poměru uvedeném na obrázku 2.

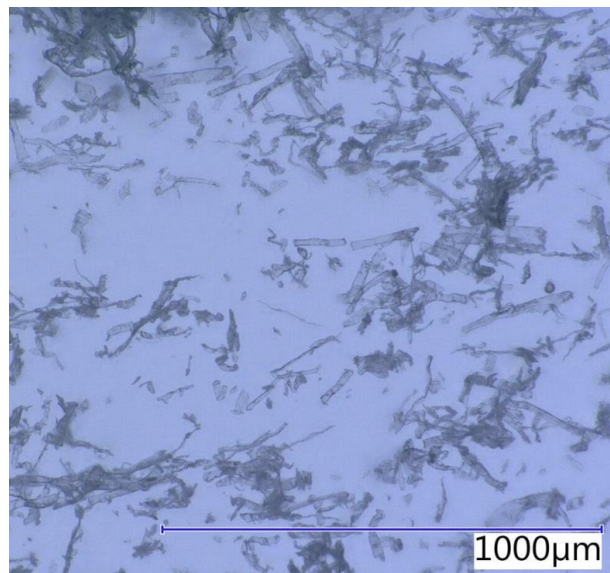


**Obrázek 2: Základní receptura (dávkování v % hm.)**

Upravené receptury navíc obsahovaly přídavek celulóзовých vláken dvojího typu. Jednak primární mikrocélulózu (značena MC) a dále celulózu získanou rozvlákněním odpadního papíru (značena OC). Receptura byla modifikována přídavkem celulóзовých vláken MC (resp. OC) v množství 0,5 %, 1,0 % a 1,5 % hm. Celulóza je polysacharid se sumárním vzorcem  $(C_6H_{10}O_5)_n$  a tvoří dlouhé nerozvětvené řetězce a vlákna obou typů celulózy mají tedy nepravidelnou strukturu (jak je patrné i z obrázků 3 a 4).



**Obrázek 3. Odpadní celulóza (OC)  
při zvětšení 200×**

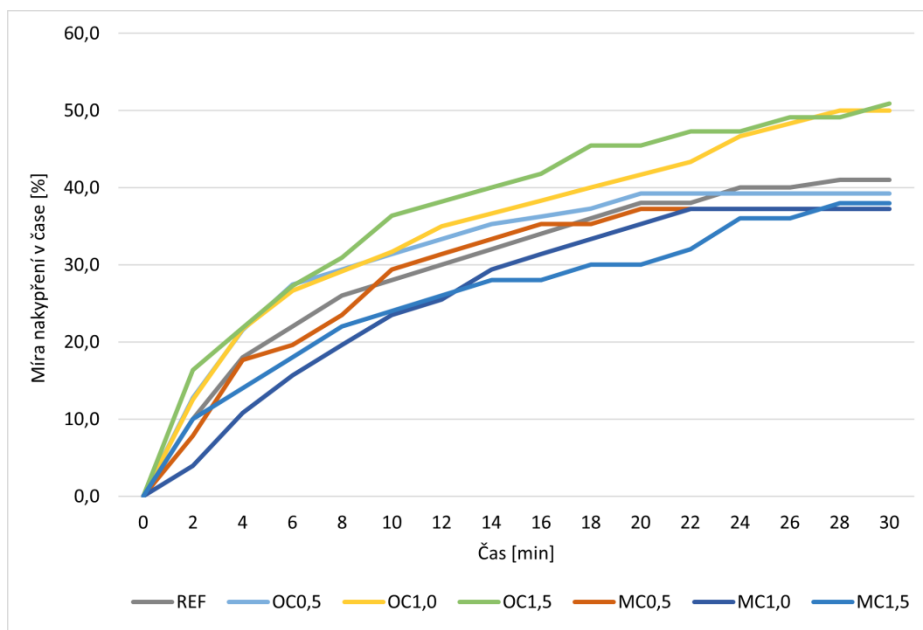


**Obrázek 4. Mikrocélulóza (MC)  
při zvětšení 200×**

Přitestování čerstvé směsi byla sledována konzistence za pomoci zkoušky rozlití. V rámci předchozího výzkumu bylo experimentálně stanoveno, že čerstvá hmota má optimální konzistenci při rozlití  $(200 \pm 2)$  mm. Reologické vlastnosti jsou závislé na teplotě čerstvé směsi i okolí. Z tohoto důvodu byly zkoušky prováděny v laboratorním prostředí a všechny vstupní suroviny byly před vlastním mícháním temperovány na 50 °C. Požadované konzistence bylo dosaženo při vodním součiniteli  $w=1,5$ . Pro stanovení míry nakypření v čase bylo 100 ml čerstvé směsi nadávkováno do odměrného válce a byl sledován průběh změny objemu směsi po 2 minutách. Výsledkem měření je závislost procentuální změny objemu na čase. Vzorky ve tvaru krychlí o hraně 100 mm byly následně autoklávovány v prostředí s nasycenou vodní parou s maximální dosaženou teplotou 194 °C s izotermickou výdrží 8 hodin. Na hydrotermálně ošetřených vzorcích byla stanovována objemová hmotnost dle normy ČSN EN 678 „Stanovení objemové hmotnosti v suchém stavu autoklávovaného pórobetonu“ a pevnost v tlaku dle normy ČSN EN 679 „Stanovení pevnosti v tlaku autoklávovaného pórobetonu“. Koeficient konstruktivnosti byl vypočten jako poměr mezi pevností v tlaku a objemovou hmotností s bezrozměrnou jednotkou. Mikrostruktura a pórová struktura byly analyzovány vizuálně a dále pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu Tescan MIRA3.

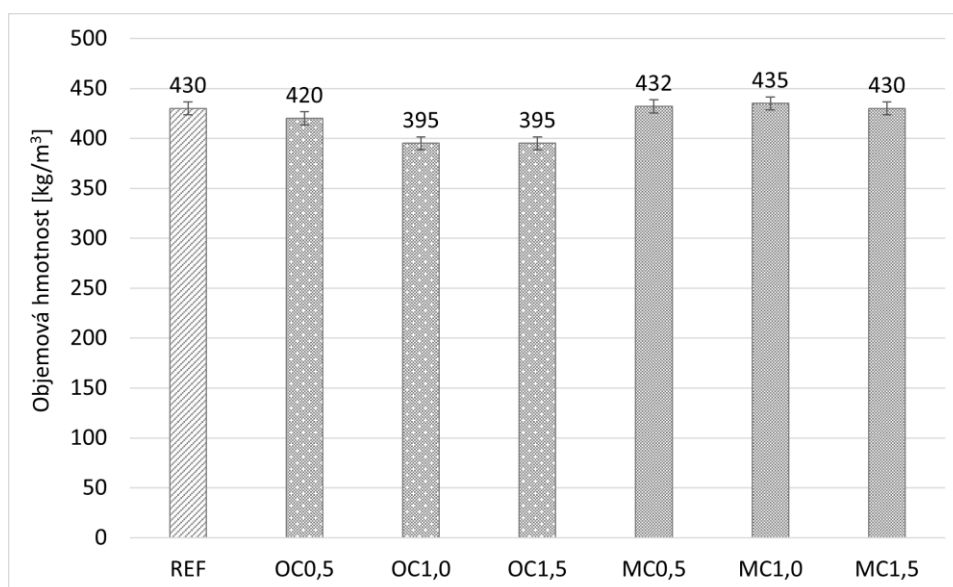
## Výsledky a diskuse

Přídavek odpadní celulózy (OC) ovlivnil proces nakypření směsi zejména v počátečních minutách. Vzorky s OC vykazovaly rychlejší nárůst objemu, což naznačuje zvýšenou reaktivitu a efektivnější uvolňování plynu. Směsi s mikrocélulózou (MC) vykazovaly s rostoucí dávkou pomalejší nárůst objemu. Na základě výsledků (viz obrázek 5) lze říci, že přídavek odpadní celulózy urychlil a zefektivnil proces expanze čerstvé směsi bez výrazného zhoršení stability.



**Obrázek 5: Intenzita nakypření v čase.**

U vzorků s přidavkem odpadní celulózy došlo v porovnání s referenční směsí k mírnému snížení objemové hmotnosti (o cca 10 %), což je důsledkem zvýšené pórovitosti vzniklé při nakypření (obrázek 6 znázorňující rozdíly v objemové hmotnosti vč. směrodatné odchylky). Efekt snižující se objemové hmotnosti byl výraznější s rostoucí dávkou vláken (1,0 – 1,5 % hm.), naproti tomu přidavek mikrocelulózy neměl na objemovou hmotnost vliv.

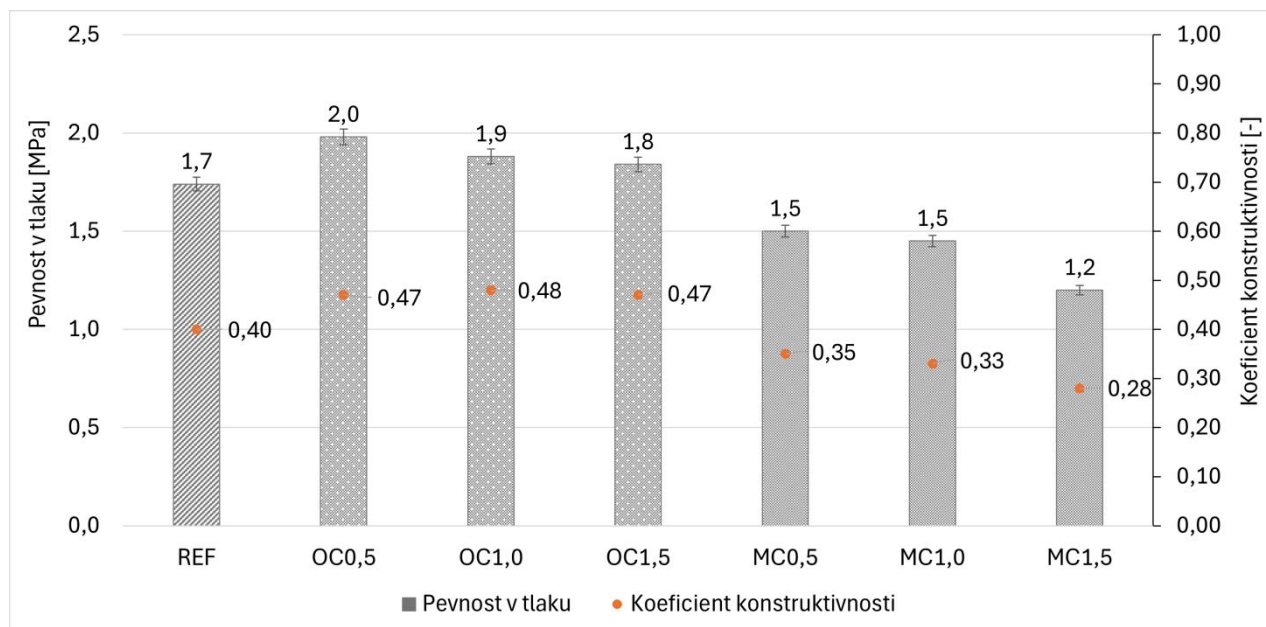


**Obrázek 6: Objemová hmotnost.**

Pevnostní zkoušky ukázaly, že odpadní celulóza pozitivně ovlivnila pevnost v tlaku, zejména při dávkování 1 a 1,5 % hm., což je patrné z obrázku 7, na kterém jsou znázorněny hodnoty pevnosti včetně směrodatné odchylky. Nárůst tlakové pevnosti lze přičíst lepšímu provázání mezi maticí a vlákny a rovnoměrnější distribuci pórů. Mikrocelulóza naopak způsobila mírný pokles pevnosti (až 30% pokles u vzorku s 1,5% hm. podílem mikrocelulózy). Ukázalo se, že odpadní celulóza přispěla ke zvýšení mechanické stability autoklávovaného pórobetonu.

Díky koeficientu konstruktivnosti je možné lépe posoudit, jakým způsobem ovlivňuje přidavek vláken fyzikálně mechanické parametry, jelikož současně zohledňuje hodnoty objemové hmotnosti i tlakové

pevnosti. Zatímco u klasických cementových kompozitů, jejichž mění se vlastnosti vlivem použití celulóзовých vláken při dávkování 0,2 až 0,5 % hm. ve své práci porovnává A. Sičáková<sup>11</sup>, dochází ke snižování nejen objemové hmotnosti, ale i pevností v tlaku, z výsledků získaných v rámci experimentálního ověření na vzorcích pórobetonu je patrné, že směsi s odpadní celulózou dosahovaly lepších vlastností oproti referenční směsi i oproti vzorkům s mikrocelulózou. Na základě tohoto porovnání se jako nejvýhodnější jeví dávkování 1 % hm. odpadní celulózy. Přídavek mikrocelulózy vedl ke zhoršení vlastností.

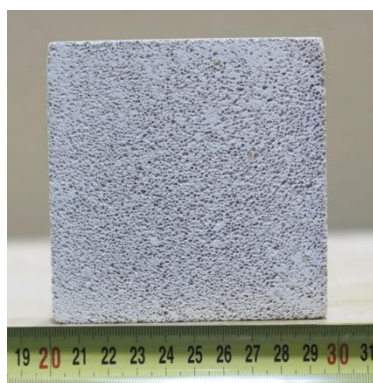


**Obrázek 7: Pevnost v tlaku a koeficient konstruktivnosti zkoumaných vzorků.**

Vizuální zhodnocení (obrázek 8 až 10) i mikroskopická analýza (obrázek 11 až 13) potvrdily, že přídavek celulózy ovlivňuje velikost, tvar i distribuci pórů. Využití odpadní celulózy vedlo ke vzniku pravidelnějších a rovnoměrněji distribuovaných pórů s menším počtem defektů. Naopak při použití mikrocelulózy docházelo během procesu expanze k postupnému slučování původně jemně dispergovaných pórů do větších celků, což vedlo k narušení pravidelné pórové struktury materiálu a následnému poklesu jeho mechanických pevností v důsledku snížené efektivní nosné plochy matricové fáze.



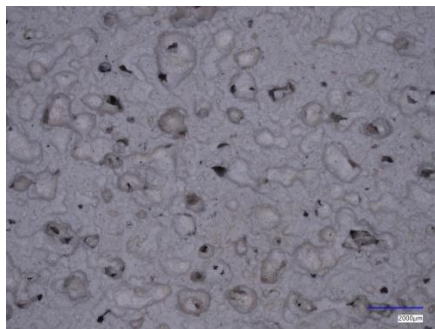
**Obrázek 8:**  
**Pórová struktura**  
**referenčního vzorku v řezu.**



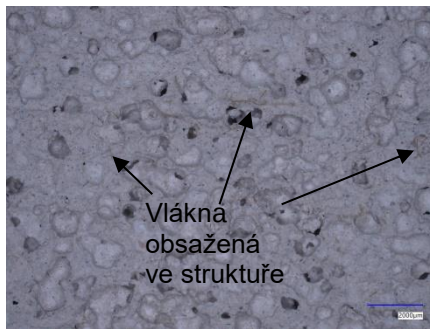
**Obrázek 9:**  
**Pórová struktura vzorku**  
**s odpadní celulózou (v řezu).**



**Obrázek 10:**  
**Pórová struktura vzorku**  
**s mikrocelulózou (v řezu).**



**Obrázek 11:**  
**Pórová struktura referenčního vzorku v řezu při zvětšení 20x.**

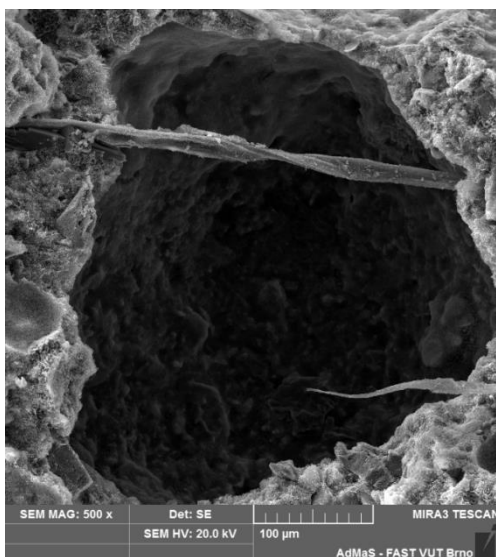


**Obrázek 12:**  
**Pórová struktura vzorku s odpadní celulózou při zvětšení 20x (v řezu).**

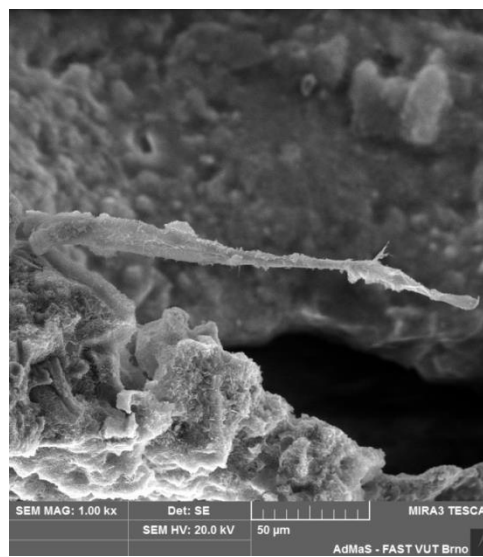


**Obrázek 13:**  
**Pórová struktura vzorku s mikrocelulózou při zvětšení 20x (v řezu).**

Z analýzy provedené pomocí elektronové mikroskopie vyplývá, že odpadní celulóza je ve struktuře pórobetonu rovnoměrně rozptýlena a dobře zakotvená v matrici. Vlákna vytvářejí mostky přes mikroskopické póry, čímž napomáhají přenosu napětí (obrázek 11). U vzorků s obsahem mikrocelulózy nebylo tohoto efektu dosaženo (obrázek 12). Pozorované rozdíly korelují s vyšší pevností a koeficientem konstruktivnosti u vzorků s odpadní celulózou.



**Obrázek 14. Odpadní celulóza v pórové struktuře na snímku z elektronového mikroskopu při zvětšení 1000x.**



**Obrázek 15. Mikrocelulóza v pórové struktuře na snímku z elektronového mikroskopu při zvětšení 1000x.**

V porovnání s ostatními dosavadními výzkumy (provedenými za použití klasických vláken o délce cca 30 mm na bázi celulózy získaných z jutových<sup>13</sup>, sisalových<sup>14</sup> nebo kokosových<sup>13</sup> vláken), které ukazují, že délka vláken nemá při nízkých dávkách (do 0,25 %) významný vliv na tlakové pevnosti klasických betonů a že při vyšších dávkách (1 až 2 %) vykazují kratší vlákna lepší vlastnosti než vlákna delší, a při výzkumu cementových kompozitů s využitím nanocelulózy a mikrokrytalické celulózy v nízkých dávkách (0,4 – 0,75 %) konzistentně zvyšují pevnosti v tlaku, zatímco větší mikroválkna ve vyšších dávkách (>1 %) pevnost obvykle snižují, ve sledované sadě vzorků pórobetonu dochází k výsledkům, které kombinují tyto poznatky. Zatímco mikroválkna o menší délce 10 až 200 mikrometrů (MC) se zvyšujícím

se dávkováním spíše zhoršovaly tlakové pevnosti vlivem změněné tvorby pórové struktury, vlákna o délce 400 až 500 mikrometrů (OC) měly při dávkování 0,5 až 1,5 % na tlakovou pevnost a koeficient konstruktivnosti pozitivní vliv. Problematikou degradace, biologického narušení či objemových změn, ke kterým by mohlo docházet u neošetřených celulózových vláken vlivem působení vlhkosti, se ve svojí práci zabýval J. Claramunt<sup>15</sup> a S. Fernando<sup>16</sup>. Trvanlivost cementových kompozitů s využitím celulózových vláken podle jejich práce souvisí se zvýšením lomu vláken a snížením jejich soudržnosti s matricí vlivem narušení vláken působením alkálií, migrací hydratačních produktů do lumenů a pórových systémů vláken a objemových změn způsobených jejich vysokou absorpcí. V rámci navazujícího výzkumu by tedy bylo vhodné prověřit, jestli v průběhu kombinované mineralizace vláken (působením cementové suspenze, vápenné suspenze a termického ošetření) došlo ke stabilizaci struktury výsledného kompozitního materiálu a jestli tedy dochází působením cyklických změn vlhkosti k nějakým změnám ve vlastnostech u těchto materiálů.

## Závěry

Přídavek celulózových vláken měl na vlastnosti autoklávovaného pórobetonu významný vliv, přičemž rozdíly mezi použitím mikrocelulózy a odpadní celulózy byly zřetelné. Odpadní celulóza z rozvlákněného papíru vedla ke zlepšení fyzikálně-mechanických parametrů, především pevnosti v tlaku a koeficientu konstruktivnosti, přičemž optimální dávkování se pohybovalo kolem 1,0 % hmotnosti. Díky použití odpadní celulózy došlo ke snížení objemové hmotnosti a zjemnění pórové struktury. Přídavek mikrocelulózy se projevil spíše negativně, zejména kvůli horší homogenitě směsi a tvorbě oslabených míst v podobě pórových shluků. Celkově lze konstatovat, že využití odpadní celulózy představuje efektivní a environmentálně přínosný způsob modifikace autoklávovaného pórobetonu s potenciálem pro praktické uplatnění v nízkooenergetických stavebních materiálech. Využití přídavku by v praxi mohlo vést ke zvýšení pevnosti materiálu bez nutnosti zvýšení jeho objemové hmotnosti.

## Poděkování

*Práce na tomto článku byla podpořena grantem Grantové agentury České republiky č. 23-04824S s názvem „Vliv alternativních surovinových komponent na zlepšení fyzikálně mechanických vlastností autoklávovaného pórobetonu“.*

## Literatura

1. Saad, A. M., Gorse, C., Goodier, C. I., Blay, K., Cavalaro, S.: Autoclaved aerated concrete in reinforced building applications: A systematic review of AAC/RAAC in the last 40+ years. Results in Engineering, 24(November), 103431 (2024).
2. Matoušek, M., Drochytka, R. Atmosférická koroze betonů. 1. vydání. Praha: IKAS, 1998, 171 stran, IBSN 80-902558-0-9.
3. Zhang J., Huang F., Wu Y., Fu T., Huang B., Liu W., Qiu R.: Mechanical properties and interface improvement of bamboo cellulose nanofibers reinforced autoclaved aerated concrete, Cem. Concr. Compos., vol. 134, p. 104760 (2022).
4. He, T., Xu, R., Da, Y., Yang, R., Chen, C., Liu, Y.: Experimental study of high-performance autoclaved aerated concrete produced with recycled wood fibre and rubber powder. Journal of Cleaner Production, 234, 559 – 567 (2019).
5. Xu R., He T., Da Y., Liu Y., Li J., Chen C.: Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete, Constr. Build. Mater. 208 (2019).
6. Kumar M. A., Prasanna, K., Raj, C. C., Parthiban, V., Kulathaivel, P., NArasimman, S., Naveen, V. Bond strength of autoclaved aerated concrete manufactured using partial replacement of flyash with fibers – A review,” Mater. Today Proc., vol. 65, pp. 581 – 589 (2022).

7. Bentchikou, M., Guidoum, A., Scrivener, K., Silhadi, K., Hanini, S.: Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 451 – 456 (2012).
8. Ni, T., Zhang, L., Yuan, B.: Influence of wollastonite or plant fiber on performance of autoclaved cement concrete, *Appl. Mech. Mater.*, vol. 99–100, pp. 692 – 695 (2011).
9. Banthia, N.; Sappakittipakorn, M.; Jiang, Z.: On permeable porosity in bio-inspired fibre reinforced cementitious composites. *International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems (IJSMSS)*, Vol. 1, No. 1 (2012).
10. Michelini, E.; Ferretti, D.; Miccoli, L., Parisi, F. Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments. *Construction and Building Materials*. 2023, vol. 402. ISSN 09500618.
11. Sicakova, A.; Hospodarova, V.; Stevulova, N.; Vaclavik, V. Effect of selected cellulosic fibers on the properties of cement based composites, vol. 9, no. 8, pp. 606 – 609 (2018).
12. Bentur, A.; Akers, S. A. S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced autoclaved cement composites, *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, vol. 11, no. 2, pp. 111 – 115 (1989).
13. H. Jamshaid et al., “Natural Cellulosic Fiber Reinforced Concrete: Influence of Fiber Type and Loading Percentage on Mechanical and Water Absorption Performance,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 3, (2022).
14. Vinaykumar, B. K., Prathap, D., Varsha, P., Pavan, K. J., Supriya, C. L., “Study on the Strength of Sisal Fiber Reinforced Concrete,” no. October, pp. 5383–5389 (2019).
15. Claramunt, J., Ardanuy, M., Fernandez-Carrasco, L. J., Wet/dry cycling durability of cement mortar composites reinforced with micro- and nanoscale cellulose pulps. *BioResources*, vol. 10, no. 2, pp. 3045 – 3055 (2015).
16. Fernando, S. Gunasekara, C., Shahpasandi, A., Nguyen, K., Sofi, M., Setung, S., Mendis, P., Rahman R., Sustainable Cement Composite Integrating Waste Cellulose Fibre: A Comprehensive Review *Polymers*, vol. 15, no. 550 (2023).

## The influence of waste cellulose on the properties of autoclaved aerated concrete

**Lenka MÉSZÁROSOVÁ, Vít ČERNÝ, Jindřich MELICHAR, Šimon BARÁNEK, Jakub HODUL and Rostislav DROCHYTKA**

*Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Czech Republic*

### Summary

*This article presents comparison of cellulose fibre addition, concretely addition of primary micro cellulose fibres and waste cellulose (in amounts of 0.5 %, 1.0 % a 1.5 % wt. of the solid matter) on technological properties during the preparation and also on physico mechanical properties of autoclaved aerated concrete. The aim was to experimentally verify how cellulose fibers affect the basic properties: bulk density, compressive strength, coefficient of constructive quality, pore structure, and microstructure of the resulting material. At the same time, the possibilities of using paper waste-based fibres as an additive in the production of aerated concrete were examined. The results show that waste cellulose can be a suitable alternative raw material for modifying autoclaved aerated concrete because it can help to improve its mechanical properties. The use of this secondary raw material represents an environmentally and technically beneficial approach to the production of lightweight building materials with lower environmental impacts.*

**Keywords:** autoclaved aerated concrete, waste fibres, waste cellulose, microstructure, compressive strength, coefficient of constructive quality.