

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra mechaniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bloky obvodového pláště s obsahem recyklovaných surovin

Vypracoval: Bc. Jan Horych

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Konzultant: Ing. Zdeněk Prošek

2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Horych Jméno: Jan Osobní číslo: 438062
Zadávající katedra: K 132, Katedra mechaniky
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Bloky obvodového pláště s obsahem recyklovaných surovin

Název diplomové práce anglicky: Concrete blocks containing recycled materials

Pokyny pro vypracování:

Budou navrženy minimálně 3 různé varianty bloků z pohledu geometrie pro obvodové pláště budov podle současných technických a normových požadavků. Cílem bude využít co největším množstvím recyklovaných surovin. Vlastní blok bude tvořený z vnějšího nosného jádra a uvnitř bude vylehčená směs s lepšími tepelně-izolačními vlastnostmi. Jedna z variant bude experimentálně ověřena, bude vytvořeno několik bloků a ty budou testovány a vyhodnoceny.

Seznam doporučené literatury:

Články dostupné v databázi WoS a Scopus, dostupné diplomové a bakalářské práce.

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Pavel Tesárek, Ph. D.

Datum zadání diplomové práce: 29.9. 2020 Termín odevzdání diplomové práce: 3.1. 2021
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Jan Horych

Název diplomové práce: Bloky obvodového pláště s obsahem recyklovaných surovin

Základní část: Návrh zděicích bloků podíl: 70 %

Formulace úkolů: Návrh minimálně 3 variant geometrie zděičího bloku. Optimalizace mechanických a tepelně izolačních vlastností vzhledem k současné legislativě. Návrh a použití experimentální metodiky s následným vyhodnocením výsledků.

Podpis vedoucího DP: Datum:

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: Použití recyklovaných surovin podíl: 30 %

Konzultant (jméno, katedra): Ing. Zdeněk Prošek, Katedra mechaniky

Formulace úkolů: Návrh a úprava recyklovaných materiálů.

Následný návrh a optimalizace 4 vhodných variant složení směsí s vysokým obsahem recyklovaných surovin.

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za přispění vedoucího diplomové práce doc. Ing. Pavla Tesárka, Ph.D. a konzultanta Ing. Zdeňka Proška.

Všechny podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 3. 1. 2021

.....

Bc. Jan Horych

Poděkování

Tímto způsobem bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Pavlu Tesárkovi, Ph.D. za příležitost, věcné připomínky a rady při vypracování této diplomové práce. Práce byla finančně podpořena projekty GAČR 17-06771S a TJ01000435. Dále bych chtěl poděkovat všem kolegům nejen z katedry mechaniky, zejména ale konzultantovi diplomové práce Ing. Zdeňku Proškovi za pomoc, trpělivost a spolupráci na daném výzkumu. Velká vděčnost rovněž patří i mé partnerce a rodině za nevídanou podporu a schovívavost v průběhu celého studia.

Abstrakt

Hlavním úkolem práce bylo navrhnout a posoudit geometrii obvodového zdicího bloku s podíly recyklovaných surovin. Nejdříve byl určen základní tvar prvku a následně byla vyrobena série vzorků pro zjištění mechanických a fyzikálních vlastností. Celkem bylo posuzováno 7 různých sad vzorků, z nichž jedna sada byla referenční pouze s cementem. Využívána byla vysokopecní struska, popílek, cement a podíl vápenného hydrátu ve směsi pojiva. Jako plnivo byly využívány 2 frakce lehčeného struskového kameniva. Byly měřeny dynamické moduly pružnosti, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, mrazuvzdornost a nasákavost. Závěrem byla provedena analýza napětí v prvku včetně výpočtu zatížení. Navrhované prvky byly porovnány s produkty od větších výrobců na trhu v České republice.

Klíčová slova

Betonové zdicí bloky, pasivní dům, recyklované suroviny, vysokopecní struska, popílek, mechanické vlastnosti

Abstract

The main goal of this thesis was to design a concrete masonry block with recycled materials. First the basic shape of the blocks was determined and then a series of samples were produced to investigate mechanical and physical properties. A seven sets of the samples were produced and one of the sets was with reference samples using only cement. During research a blast furnace slag, fly ash, Portland cement and slaked lime were used as a binder. An Aggregate was composed of the blast furnace slag. The dynamic modulus of elasticity, dynamic shear modulus, flexural strength, compressive strength, frost resistance and water absorption were measured. An analysis of maximum tension was made including load calculation. Moreover the unit was compared with the blocks that are currently produced.

Key words

Concrete masonry block, passive house, recycled ingredients, blast furnace slag, fly ash, mechanical properties

Obsah:

1.	Úvod	9
2.	Současný stav problematiky	10
2.1.	Bloky a cementové kompozity.....	10
2.1.1.	Alternativní pojiva.....	11
2.2.	Vliv nové legislativy	17
2.2.1.	Současné betonové bloky	19
2.2.2.	Technologie autoklávu	21
2.3.	Výsledky předcházejících experimentů	24
2.4.	Návrh geometrie prvku	30
2.4.1.	Integrace tepelné izolace	30
2.4.2.	Vnější nosná vrstva	32
3.	Praktická část.....	36
3.1.	Experimentální metody	36
3.1.1.	Zkouška sednutí kužele	36
3.1.2.	Rezonanční metoda	37
3.1.3.	Pevnost v tahu za ohybu.....	39
3.1.4.	Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	40
3.1.5.	Pevnost v tlaku	42
3.1.6.	Součinitel tepelné vodivosti	43
3.1.7.	Nasákavost	43
3.1.8.	Pevnost bočnice bloku v tahu za ohybu	45
3.2.	Použité materiály	46
3.2.1.	Portlandský cement	46
3.2.2.	Vysokopeční struska	47
3.2.3.	Betonový recyklát	49
3.2.4.	Popílek.....	51
3.2.5.	Vápenný hydrát	51
3.2.6.	Polypropylenová vlákna.....	52
3.3.	Výsledky experimentů	53
3.3.1.	Specifikace výroby	54
3.3.2.	Specifikace vzorků a vyhodnocení zkoušek.....	55
3.3.3.	Rozložení napětí v bloku.....	68
3.3.4.	Srovnání s dostupnými betonovými bloky.....	76

3.3.5.	Srovnání s dostupnými keramickými bloky	80
3.3.6.	Cenová kalkulace	82
3.3.7.	Srovnání s experimentálními prvky	85
3.3.8.	Zhodnocení výsledků	89
4.	Závěr	91
5.	Seznam použité literatury	92
6.	Seznam obrázků	98
7.	Seznam tabulek	100

1. Úvod

Stavební průmysl se posouvá stále kupředu a za poslední roky byla objevena či popsána spousta moderních řešení výstavby a nových materiálů. Složení betonu ale zůstalo zachováno. Stále je využíván cement vyrobený ze slínekových minerálů společně s přírodním kamenivem. Přírodní zdroje však již docházejí a průmysl na výrobu cementu za sebou nechává obrovskou uhlíkovou stopu (Worrell a kol., 2001).

Výzkumný tým na Fakultě stavební ČVUT v Praze se zaměřil na dané téma a tato práce se přesněji zaměřila na využití odpadních materiálů s velkým potenciálem, které jsou produkovány v místních zdrojích. Kladensko je například velkým zdrojem vysokopecní strusky, která již nemá další využití. Rovněž není žádným tajemstvím, že struska má velmi pozitivní efekt na betonové konstrukce a využívá se naprosto běžně. Stejně tak je na tom další z používaných materiálů, kterým byl popílek. Využívá se již velmi dlouho pro úpravu konzistence a zlepšení vlastností výsledných prvků. Další z využívaných materiálů byl betonový recyklát. Nyní se v praxi používá pouze jako podsyp nebo jako alternativní kamenivo. V rámci experimentů bylo však zjištěno, že správně zpracovaný recyklát má stále pojivové vlastnosti. Obsažené zreagované slínekové minerály společně s sloučeninami, jako například C-S-H gel, následně mohou vytvořit vhodné podmínky pro další chemickou reakci. Zvláště v kombinaci s materiálem jako popílek a vysokopecní struska. Přidanou hodnotu pak vytváří i malé množství nezhydratovaných cementových zrn (Topič a kol., 2016). Používané kamenivo byla také vysokopecní struska ze stejného zdroje upravena do 2 základních frakcí.

Práce byla zaměřena na návrh ekologických obvodových zdících prvků, kde budou v co největší možné míře využity zmíněné recyklované materiály. Pojivo ve vyrobených vzorcích obsahovalo zejména vysokopecní strusku, popílek, betonový recyklát a dále malý objem cementu. V rámci návrhu byl kladen velký důraz na pevnost v tlaku a součinitel prostupu tepla, jelikož na začátku roku 2020 vešla v platnost nová vyhláška (Vyhláška 264/2020 Sb., 2020). Všechny nově stavěné objekty musí být tedy dle požadavků konstruovány tak, aby splnily takzvaný pasivní standard. Daný problém byl ale vyřešen geometrií prvku. Bylo tak dosaženo potřebné únosnosti a tepelně izolační vložka rovněž z recyklovaných surovin pak vylepšila fyzikální vlastnosti.

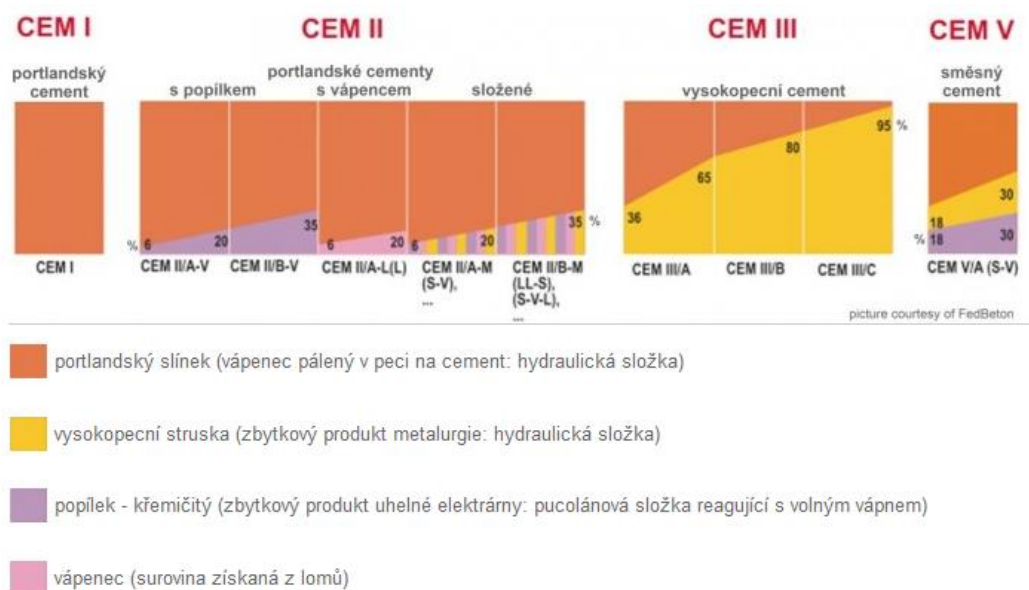
Cena recyklovaných či odpadních materiálů je nízká, avšak je nutné zohlednit dopravu, manipulaci a samotný recyklační proces. Výsledné prvky ale mají velký potenciál, nejen pro snížení ekologických dopadů, ale i ekonomicky příznivé podmínky využití v praxi.

2. Současný stav problematiky

Nosná konstrukce je nedílnou součástí každé stavby. Existuje mnoho různých druhů, ale bez pochyb, nejoblíbenější volbou je dnes beton. Spolehlivost a variabilita betonu se posouvají stále dopředu a dnes již můžeme najít či použít opravdu nepřeberné množství variant. Velké stavby a objekty obvykle vyžadují monolitický či prefabrikovaný železobeton. Co se týče malých staveb, využívají se spíše menší monolitické konstrukce pro zastropení. Pro obvodový plášť se využívají zejména zdící bloky. Jejich používání pramení již z minulosti, kdy veškeré stavby a objekty byly konstruovány pomocí kamenných kvádrů či velkých bloků. Ovšem zde bylo zapotřebí obrovské množství práce kámen vytěžit a převézt. Každý kvádr pak musel být opracován a vytvarován pro určitý účel. Jak plynul čas, tak už tento způsob nemohl dále efektivně fungovat, zahájena tedy byla výroba cihel. Produkce již nebyla zdaleka tak náročná a velký krokem kupředu byla rovněž i standardizace rozměrů a kontrola kvality cihel. Jedna značná nevýhoda ale zůstala zachována, a to pracnost a potřeba času při samotné stavbě. Obzvláště pokud se jednalo například o větší bytový objekt, stěny byly velmi tlusté a z malých kusových prvků se takové konstrukce vytvářely již velmi špatně. Bylo tedy zřejmé, že je potřeba udělat další krok kupředu, kterým byly právě zdící bloky. Jak se technologie vyvíjely, veškerá výroba se stala automatizovanou. Vyřešila se spousta problémů a díky větším rozměrům a vylehčeným konstrukcím bloku odpadá i problém s velkou pracností vyzdívání.

2.1. Bloky a cementové kompozity

Existuje nepřeberné množství různých druhů a výrobců zdících bloků a ještě více typů samotného betonu, ale tato práce se bude zabývat výhradně betonovými bloky a jejich vlastnostmi. Beton je v současné době velmi hojně využíván a jeho výroba je tak stále na vzestupu. Pro své pevnostní charakteristiky a zároveň poměrně nízkou cenu je pro mnoho investorů či stavebníků nedostižnou první volbou. Svou variabilitou a dostupností jen získává další kladné body, ale je třeba myslet i na stinné stránky. Beton má totiž rovněž i několik velkých neduhů, které je nutné při realizaci řešit. Jeho velká objemová hmotnost, velmi vysoká tepelná vodivost společně s dlouhými technologickými přestávkami či dodatečnými náklady na převoz a instalaci konstrukce pomocí jeřábu. Na různé aplikace je potřeba použít jinou technologii, či jiný druh cementu (ČSN EN 197-1 Ed. 2, 2012). Obrázek 1 popisuje jednotlivé druhy cementů s popsáním složením směsných cementů.



Obrázek 1 Schéma druhů a složení cementů (ČSN EN 197-1 Ed. 2, 2012)

Velká spotřeba cementu je ale rovněž výrazným faktorem, jelikož procesy spojené s výrobou cementu jsou výrazným producentem uhlíkové stopy. Při jeho výrobě je potřeba vypalovat vápence a jíly za velmi vysokých teplot na přípravu slínku. Ekologická a ekonomická náročnost takového zpracování je tedy zřejmá a rovněž zde musíme připomenout důležitost používání přírodních zdrojů. Přidá-li se spotřeba energie a fosilních paliv na dobývání a převoz materiálu, dostaneme pak velký průmysl, který je bez větších důsledků dlouhodobě neudržitelný. Mnoho lidí si tuto skutečnost již uvědomuje a zkouší tedy nové způsoby eliminace či omezení následků pro životní prostředí. Dále jsou pak potřeba zmínit nařízení a regulace nakládání s odpady, omezování skládkování a obrovský trend recyklace.

Cílem všech experimentů a zkoušek je tedy co možná nejvíce omezit podíl cementu a částečně ho nahradit odpadními a recyklovanými materiály. Přidaná hodnota tedy vznikne i využitím těchto materiálů. Za jiných okolností by musely být skládkovány v obrovském množství, které je dnes již nepřijatelné.

2.1.1. Alternativní pojiva

Během let experimentů a výzkumů se objevilo značné množství materiálů s potenciálem reálného využití. Většina z nich byly odpadními materiály bez dalšího možného zpracování a rovněž mají pevný základ v již provedených aplikacích, kde byly použity pro své vlastnosti.

Struska

Strusek existuje velké množství, volně v přírodě může vznikat při vulkanické činnosti, ale hlavním zdrojem strusky je jakýkoliv provoz pro zpracování kovů, jako například slévárenský či ocelářský průmysl. Struska totiž samovolně vzniká při rafinaci kovů jako vedlejší produkt, ale její složení se liší jednak dle různých druhů výroby, avšak i s různými zdroji. Jinak řečeno vysokopecní struska z Kladna nebude mít stejné složení a mechanické vlastnosti, jako struska odjinud. Během experimentů byla využívána zejména vysokopecní struska, ale další studie se zaměřily na využití jiného druhu, například: ocelářské strusky, slévárenské strusky, struska indukčních elektrických pecí či struska elektrických obloukových pecí. Použití strusky v betonu není žádnou novinkou, lehčené struskové kamenivo nebo příměs do cementu pro zpomalení hydratačního procesu a omezení hydratačního tepla se využívají naprosto běžně. Nejedná se ale o odpadní strusku bez dalšího využití a samozřejmě tyto použité materiály musí splňovat daná kritéria (ČSN EN 197-1 Ed. 2, 2012).

Nicméně mnoho experimentů se snaží množství cementu omezit a nahradit ho obdobným materiálem. Demirdag a Gunduz (2008) se například zabývali využitím vulkanické strusky pro výrobu lehčených betonových bloků. Struska zde byla využívána jako lehčené kamenivo ve dvou frakcích. Drobné kamenivo frakce 0 – 4 mm a pak hrubší frakce 4 – 8 mm. Bylo vyrobeno celkem 6 sad vzorků vždy po 6 vzorcích (B1 – B6) s různými podíly cementu a struskového kameniva. Během výzkumu zde byly sledovány změny objemové hmotnosti, tepelné vodivosti a samozřejmě pevnostních charakteristik. S větším podílem struskového kameniva se snižovaly všechny sledované veličiny včetně pevnosti v tlaku. Objemová hmotnost všech vzorků se pohybovala v rozmezí 1180 až 1480 kg/m³. Součinitel tepelné vodivosti λ byl naměřen s hodnotami 0,44 až 0,65 W/mK a pevnost v tlaku zkoumaných vzorků byla 2,8 až 5,0 MPa. Experimenty dalšího výzkumného týmu se zaměřily na vliv velmi jemně mleté vysokopecní strusky na mechanické vlastnosti výsledného betonu. Byly vyrobeny celkem 4 rozdílné směsi, z nichž 2 směsi obsahovaly pouze podíly cementu, přesněji 450 a 520 kg/m³. Druhé směsi byly vyrobeny s ekvivalentním podílem pojiva, avšak 30 hm. % cementu bylo nahrazeno zmíněnou jemně mletou struskou. Hlavní charakteristiky, které byly vyšetřovány byly mechanické vlastnosti, dále pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a dynamické moduly pružnosti. Společně s nimi byly ale rovněž měřeny elektrický odpor a testy tuhnutí a tvrdnutí. V rámci studie bylo zjištěno, že beton s podílem strusky má vyšší počáteční pevnost, nižší propustnost a zvýšenou trvanlivost už i po 3 dnech od zpracování (Teng a kol., 2013). Další ze studií určovala efekt ocelářské strusky na výsledné mechanické vlastnosti zejména v počátečních stádiích a následně v pozdní fázi stáří 90 dnů.

Rovněž zde byl zkoumán vliv vodního součinitele na celkové výsledky zkoušek. Při konstantním vodním součiniteli se mechanické vlastnosti zhoršovaly s vyšším podílem strusky a to zejména v počáteční fázi tvrdnutí. Vodní součinitel způsobil urychlení procesu smršťování v ranném stádiu, ale na konečné smrštění má struska minimální vliv. Bylo pak zjištěno, že v počáteční fázi reakce má beton se struskou menší pevnost v tlaku, avšak při dlouhodobém zkoumání pak byla pevnost stejné směsi vyšší než pevnost betonu pouze s cementem. Beton s ocelářskou struskou tedy ve výsledku měl obdobné mechanické vlastnosti (Wang a kol., 2013). Výzkum univerzity v Pekingu se zase snažil použít vysokopecní strusku společně se struskou z elektrických pecí. Zmíněné materiály zde byly použity jako jemné plnivo a během experimentů byly sledovány vlastnosti vzorků a vliv jednotlivých druhů strusek. Vzorky byly vyrobeny s rozdílnými podíly vždy od 25 do 100 hm. % strusky s tím, že byl vyroben i referenční vzorek s klasickým přírodním pískem. Vzorky byly sledovány již od ranného stádia, kdy byla zkoumána zpracovatelnost za použití superplastifikátoru. Dále například byla vyšetřena nasákavost, odolnost proti průniku iontů chloridu, požární odolnost a samozřejmě i mechanické vlastnosti. Po celou dobu zkoušek se zdála být vysokopecní struska velmi perspektivní, měla sice jemně negativní vliv na zpracovatelnost, avšak při všech ostatních zkouškách byl prokázán pozitivní vliv. Vyšší pevnosti v tlaku byly doprovázeny nižší nasákavostí, vyšší požární odolností a nižší objemovou hmotností. Nicméně struska z elektrické pece byla téměř přesným opakem, jelikož u většiny testů byl zaznamenán negativní nebo zanedbatelný vliv. Závěrem tedy bylo doporučeno využívat buďto podíl 75 hm. % vysokopecní strusky, a nebo 25 hm. % strusky z elektrické pece (Sun a kol., 2019).

Popílek

S výhodou je rovněž využíván další z materiálů, kterým je elektrárenský popílek. Jedná se o anorganickou zplodinu, která vzniká při spalování pevných paliv v uhelných elektrárnách. Materiál je zachycen z kouřových plynů pomocí mechanických a elektrických odlučovačů. Stejně jako v případě strusky se může chemické složení popílku výrazně lišit díky jinému zdroji. Do betonu se začal přidávat jako příměs, jelikož zlepšuje čerpatelnost betonu, zvyšuje odolnost proti krvácení a v neposlední řadě zvyšuje pevnost v tlaku výsledného prvku. Daný popílek ale rovněž musí splňovat normová kritéria a požadavky (ČSN EN 450-1, 2013).

Výzkumů zaměřených na popílek je opět velké množství. Studie výzkumného týmu Oner, Akyuz, Yildiz se například zabývala mechanickými vlastnostmi a podíly vhodnými do betonu. Celkem bylo vytvořeno 28 záměsí ve 4 skupinách. Dále byly vyrobeny referenční

vzorky s podíly 250 až 400 kg/m³. V každé skupině pak bylo odebráno zhruba 20 hm. % cementu, počáteční množství tedy bylo v rozmezí 200 až 320 kg/m³. Následně pak byly přidány podíly od 15 do 58 hm. % popílku, kde byla obsažena již zmíněná redukovaná množství cementu. Pevnosti v tlaku pak byly měřeny po 28 a 180 dnech pro určení optimálního a maximálního množství popílku. Konečné výsledky ukázaly velmi pozitivní vliv popílku, avšak maximální podíl, který se ale zdál perspektivní byl 40 hm. %. Pevnost v tlaku do tohoto bodu narůstala a při vyšším zastoupení již podíl popílku výslednou pevnost snižoval (Oner a kol., 2005). Experimenty v Australském Melbourne byly zaměřeny na celkové vyšetření mechanických vlastností geopolymerního pěnového betonu na bázi popílku. Ke sledování byly využity experimentální metody i numerické modelování. Základními metodami byly rentgenová počítačová tomografie, diskrétní modelování prvku a klasická jednoosá zkouška pevnosti v tlaku. Zkoumána byla rovněž distribuce vzduchových dutin jednotlivých vzorků a jejich vliv na pevnost v tlaku. Vyrobeno bylo 62 vzorků s různými objemovými hmotnostmi od 370 do 600 kg/m³. Velmi nízká objemová hmotnost ale přinesla i nižší pevnost v tlaku, ta se pohybovala mezi hodnotami 0,4 až 1,7 MPa (Nguyen a kol., 2017). Další ze studií se zabývala zkoumáním pevnosti v tlaku a smršťováním betonu při využití velkého množství popílku. Přesněji bylo nahrazeno 50 a 70 hm. % Portlandského cementu popílkem. Vodní součinitel směsi byl držen co nejmenší, v rozsahu 0,28 až 0,34, a jedna skupina vzorků byla vytvořena se superplastifikační přísadou. Výsledky experimentů ukázaly, že vzorky s podílem popílku dosáhly slibných pevností v tlaku a v tahu za ohybu již při stáří 1 den. Dále pak, že vzorky s podílem 50 hm. % popílku měly vyšší pevnost v tlaku, než vzorky pouze s Portlandským cementem i při stáří 28 dnů a více. Rovněž bylo prokázáno, že při využití velkého množství popílku a nízkého vodního součinitele došlo k redukcí smrštění až o 30 %. Při použití superplastifikátoru se však tento pozitivní vliv zredukoval zhruba na polovinu (Atiş, 2003). Výzkum zpracováváný v Indii se pak například orientoval na mechanické vlastnosti lehčeného pěnového betonu s podílem popílku. Bylo připraveno 6 sad vzorků s rozdílnými hodnotami vylehčení, 15, 17 a 20 obj. % bylo nahrazeno sulfátovou pěnou. Po dokončení výroby byly vzorky podrobeny zkouškám pevnosti v tlaku a tepelné vodivosti. Dosažené objemové hmotnosti se pohybovaly v rozmezí 860 až 1245 kg/m³ a pevnost v tlaku byla naměřena od 2,5 až 6,5 MPa. Součinitel tepelné vodivosti se pak pohyboval mezi hodnotami 0,021 až 0,035 W/mK (Vinith Kumar a kol., 2018).

Vápenec

Materiál, který se rovněž v současné době využívá je vápenec. Opět se nejedná o žádnou novinku, cementy s příměsí vápence se v evropských zemích využívají již desetiletí. Obecná idea je snížení podílu klasického Portlandského slínku, který má dle mnohých výzkumů největší dopad na životní prostředí bez výrazných propadů mechanických vlastností betonu. Během experimentů týkajících se této práce nebyla příměs vápence využita, ale jedná se důležitou součástí tématu náhrady cementu a současných možností.

Nedávný kanadský výzkum (Bushy & Meil, 2014) se na dané téma zaměřil a zkoumal přesné rozdíly mezi klasickým Portlandským cementem a Portlandským vápenným cementem. Základem pro jejich studii byl Portlandský cement s podíly 92 hm. % slínku, 3 hm. % vápence a 5 hm. % sádrovce, zatímco vápenný cement měl pouze 82 hm. % slínku, 13 hm. % vápence a 5 hm. % sádrovce. Sledovány byly hlavně takzvané „Kategorie dopadu“, kterými byly:

- Globální oteplování vyjádřeno pomocí produkce CO₂ na jednotku cementu.
- Celková dodaná primární energie.
- Spotřeba neobnovitelné energie.
- Acidifikace (produkce SO₂).
- Eutrofizace (produkce dusíku).
- Kvalita ovzduší (uvolňování jemných prachových částic).
- Smog.
- Narušení ozónu (vyčíslená přidružená produkce chlor-fluorovaných uhlovodíků).

Získáním všech výsledných hodnot bylo zjištěno, že Portlandský vápenný cement byl ve všech sledovaných hodnotách o 10 až 12 % ekologičtější než klasický Portlandský cement. Bezpochyby tak získaná data potvrzují důležitost náhrady cementu a dopady jeho produkce na životní prostředí.

Betonový recyklát

V rámci experimentů byl rovněž využíván betonový recyklát. Stejně jako v předchozích případech se recyklovaný beton využívá již déle, avšak pouze jako podsyp a částečně pak jako plnivo v nové betonové konstrukci. Důvodem jeho zkoumání a využití je fakt, že beton nebo popřípadě recyklát samotný obsahují slínkové minerály společně s produkty dřívějších chemických procesů odpovědných za pevnost materiálu. Dále se na reakci podílí nezreagovaná zrna, která je možno odkryt. Vhodnou úpravou a kombinací materiálů tak lze použít recyklát jako alternativní pojivo (Topič a kol., 2016). Samozřejmě je nutné další

zpracování, ale na dané téma se již některé společnosti zaměřují. Ne každý beton je ale vhodný ke zpracování. Beton musí splnit kritéria, které omezují jeho využití. Zejména se jedná o chemickou nebo biologickou kontaminaci daných prvků. Beton například nesmí být znečištěn zeminou, jelikož nový beton by tak byl degradován, nebo by bylo dokonce zabráněno správné chemické reakci a tvorbě vazeb. Nehledě na legislativní regulace, jelikož látky obsažené v těchto znečištěných prvcích jsou často jedovaté a nebezpečné pro lidské zdraví (Vyhláška 387/2016 Sb., 2018).

Vyšetření mechanických vlastností za použití betonového recyklátu je důležitý úkol před uvedením do širší praxe. Čínská studie výzkumného týmu Guo, Tu, Chen a Lehman se tedy například zaměřila na produkci zdicích bloků s podílem 75 hm. % betonového recyklátu jako plnivo. Daný blok byl následně podroben řadě laboratorních testů a zkoušek pro zjištění mechanických charakteristik a trvanlivosti. Dále pak byl určen environmentální dopad produkce pomocí metody posuzování životního cyklu. Výsledkem vysokého podílu recyklovaného kameniva bylo mírné snížení pevnosti v tlaku a zhoršení trvanlivosti bloků. Nicméně konečné závěry prokázaly, že předmětné bloky bez potíží splňují požadavky na pevnost v tlaku, smrštění a odolnosti proti mrazu dané Čínskými normami. Sledované vlastnosti totiž byly srovnatelné se standardními betonovými bloky, avšak s mnohem menším dopadem na prostředí (Guo a kol., 2018). Výzkum ze sbírky „Construction and Building materials“ se zase zabýval tepelnými vlastnostmi bloku s použitím recyklovaného betonového kameniva. Během experimentů bylo vyrobeno více druhů vzorků s různým zastoupením betonového recyklátu. Přesněji větší zdicí blok s obsahem hrubého kameniva a dále pak menší cihla, ve které bylo použito jemné kamenivo. Vše pak bylo porovnáváno s blokem z klasického betonu a samotné posouzení proběhlo porovnáním součinitelů prostupu tepla. Výsledky ukázaly velmi výrazný vliv použitého hrubého kameniva na tepelnou vodivost a rovněž byl zjištěn znatelný lineární vztah mezi podílem recyklovaného kameniva a tepelnou vodivostí (Zhu a kol., 2015). Dvojice Poon a Chan experimentovala s možnými většími podíly kontaminantů v betonovém recyklátu. Zkoumanými materiály, které znehodnocovaly recyklát byly úlomky dřeva, skla, pálených cihel a keramické dlažby. Po vytvoření experimentálních vzorků byly zkoumány objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, nasákavost, odolnost proti abrazi a trvanlivost. Současné standardy se snaží přítomnost těchto znečišťujících materiálů co nejvíce omezit. Avšak výsledky studie naznačily možnost navýšení podílů bez výrazného zhoršení mechanických vlastností výsledných produktů. Závěrem pak byly vytvořeny návrhy na změnu a doporučení procentuálního zastoupení jednotlivých zkoumaných materiálů (Poon & Chan, 2007).

Problém betonového recyklátu se rovněž řešil již dříve na půdě Fakulty stavební. Jednalo se o experimenty, kde betonový recyklát nebyl použit pouze jako kamenivo, ale rovněž jako alternativní pojivo. Bylo však nutné materiál zpracovat a využít tak možnosti nahradit cement. V případě zmíněných studií se jednalo o spolupráci s průmyslovým partnerem, při které byla použita technologie vysokorychlostního mlýnu. Při procesu totiž dochází k obnažení nezhydratovaných cementových zrn, což znamená, že proběhla takzvaná mechanická aktivace. Pro experimenty byly vyrobeny sady vzorků s podílem 50 hm. % jemně mletého betonového recyklátu společně s referenčními vzorky. V průběhu vyzrávání vzorků byly vždy po 7 dnech provedeny nedestruktivní zkoušky pomocí rezonanční metody pro zjištění dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu. Již při prvních měřeních byl znatelný pozitivní vliv mletého recyklátu. Výsledné testy pak prokázaly, že vzorky s recyklátem dosáhly až dvojnásobné pevnosti v tahu. Díky náhradě cementu byly konečné hodnoty pevnosti v tlaku nižší než u referenčních vzorků, avšak s použitím mletí se propad hodnot výrazně snížil. Studie tedy podpořila a potvrdila použití recyklátu v praxi (Topič a kol., 2016), (Prošek, 2018b). Dalším evropským zástupcem, zabývajícím se danou problematikou je například belgická studie, kde byly opět vytvořeny experimentální zdicí bloky s recyklovaným betonem. Vzorky obsahovaly 0, 30 a 100 hm. % recyklátu se stejným zastoupením všech frakcí a stejným postupem výroby jako klasické bloky v uzpůsobené továrně. Výsledky vzorků s recyklátem naznačily mírný pokles pevnosti v tlaku společně se zhoršením trvanlivosti. Nicméně bloky s plným podílem recyklovaného kameniva dosáhly pevnosti v tlaku 11,1 MPa po 28 dnech, čímž splňuje pevnostní požadavky pro použití. Ostatní nároky na nasákavost, smršťování či odolnost proti mrazu blok rovněž bez problému splnil. Závěrem bylo provedeno posouzení životního cyklu na všech vzorcích, a s použitím recyklovaného betonu lze dosáhnout znatelně vyšší ekologické a ekonomické efektivity (Zhao a kol., 2020).

2.2. Vliv nové legislativy

Na začátku roku přešla v platnost nová vyhláška (Vyhláška 78/2013 Sb., 2013), která předepisuje nové požadavky a podmínky pro veškeré nové stavby. Zmíněná norma byla již novelizována a měněna v podobě nového znění vyhlášky (Vyhláška 230/2015 Sb., 2015) a od 1. 9. 2020 přešla v platnost nová vyhláška (Vyhláška 264/2020 Sb., 2020), která ruší obě již zmíněné předešlé vyhlášky.

Tabulka 1 Výňatek z normy s požadavky pasivního standardu (ČSN EN 73 0540-2, 2002)

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla [$W/(m^2 \cdot K)$]		
	Požadované	Doporučené	Doporučené hodnoty
	hodnoty	hodnoty	pro pasivní budovy
	$U_{N,20}$	$U_{rec,20}$	$U_{pas,20}$
Stěna vnější	0,30 ¹⁾	těžká: 0,25	0,18 až 0,12
		lehká: 0,20	
Střecha strmá se sklonem nad 45°	0,3	0,2	0,18 až 0,12
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop s podlahou nad venkovním prostorem	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop pod nevytápěnou půdou (se střechou bez tepelné izolace)	0,3	0,2	0,15 až 0,10
Stěna k nevytápěné půdě (se střechou bez tepelné izolace)	0,30 ¹⁾	těžká: 0,25	0,18 až 0,12
		lehká: 0,20	
Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině ^{4), 6)}	0,45	0,3	0,22 až 0,15
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k nevytápěnému prostoru	0,6	0,4	0,30 až 0,20
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k temperovanému prostoru	0,75	0,5	0,38 až 0,25
Strop a stěna vnější z temperovaného prostoru k venkovnímu prostředí	0,75	0,5	0,38 až 0,25
Podlaha a stěna temperovaného prostoru přilehlá k zemině ⁶⁾	0,85	0,6	0,45 až 0,30
Stěna mezi sousedními budovami ³⁾	1,05	0,7	0,5
Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně	1,05	0,7	
Stěna mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně	1,3	0,9	
Strop vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně	2,2	1,45	
Stěna vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně	2,7	1,8	

Všechny objekty musí splňovat podmínky takzvaného pasivního standardu, což znamená velkou změnu a obrovský úkol pro všechny vývojáře a výrobce na trhu. Tabulka 1 popisuje nově vzešlé požadavky a ta nejdůležitější hodnota pro tuto práci je hodnota součinitele prostupu tepla $U = 0,18$ až $0,12$ W/m^2K . Předmětná legislativa vychází z evropské směrnice (EPBD II, 2010). Samotné požadavky směrnice nejsou úplnou novinkou, změny České legislativy probíhaly již od roku 2016. Nové požadavky se ale týkaly hlavně větších objektů,

jako jsou administrativní či bytové domy. Od 1. 1. 2020 však požadavky platí již pro všechny nové objekty včetně rodinných domů, kde je hlavní využití zdicích bloků.

Idea všech změn je snížit množství energie, která je potřeba pro fungování domácnosti, a tím snížit dopady stavebního průmyslu a současné generace na životní prostředí. Dle platné legislativy je několik určujících faktorů, kterým se říká „Ukazatele energetické náročnosti budovy“.

- Primární energie z neobnovitelných zdrojů energie vztažená na metr čtvereční energeticky vztažené plochy.
- Celková dodaná energie za rok vztažená na metr čtvereční energeticky vztažené plochy.
- Dílčí dodané energie pro technické systémy vytápění, chlazení, nucené větrání, úpravu vlhkosti vzduchu, přípravu teplé vody a osvětlení vnitřního prostoru budovy za rok vztažené na metr čtvereční energeticky vztažené plochy.
- Průměrný součinitel prostupu tepla.
- Součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí na systémové hranici.
- Účinnost technických systémů.

Každý ze zmíněných faktorů má přesně určené postupy a výpočty, které je nutné vždy dodržovat. Veškeré shromážděné informace jsou posuzovány a vztaženy na takzvanou „Referenční budovu“. Po uvážení všech konstrukcí a vazeb se zpracují výsledky a výstupem tohoto posouzení je „Průkaz energetické náročnosti budovy“. Zde jsou shrnuty a popsány veškeré vlastnosti a jednoduše znázorněny pomocí stupnice A až G (Vyhláška 264/2020 Sb., 2020).

2.2.1. Současné betonové bloky

Trh se zdicími bloky je nasycen velkým množstvím různých značek, výrobců a ještě větším množstvím produktů. Bloky prochází neustálým vývojem a tak valná většina z nich bez problémů splňovala požadavky norem a legislativy bez dodatečných úprav. Nyní však mají téměř všechny produkty problém s tím, že nové podmínky nesplňují.

Porovnání současných produktů

Hlavními hráči na Českém trhu jsou zřejmě společnosti Ytong, Hebel a Porfix. Tabulka 2 obsahuje výpis nejvíce používaných bloků zmíněných výrobců a jejich vlastností. Při bližším zkoumání můžeme zjistit, že bloky, které splňují podmínky pasivního standardu jsou Lambda YQ společnosti Ytong a blok PORFIX Premium P2 – 400, pokud by byla využita

největší tloušťka bloků (Ytong, 2019), (PORFIX, 2019). Dále můžeme vidět, že všechny zmiňované systémy jsou vyráběny pomocí technologie autoklávu. Výrobci tuto technologii s výhodou využívají pro zlepšení nosných a tepelně izolačních vlastností. Nevýhodou ale je velká energetická náročnost technologie.

Tabulka 2 Výčet současných nejpoužívanějších betonových bloků (Ytong, 2019), (Systém Hebel, 2019), (PORFIX, 2019)

Výrobce	Typ bloku	Rozměry [mm] D × V × Š	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/mK]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]
YTONG	Lambda YQ	375 × 249 × 549	0,083	300	1,25
	Standard	599 × 249 × 375	0,105	400	1,5
	Universal	599 × 249 × 375	0,116	450	2,32
	Statik	499 × 249 × 375	0,147	550	3,14
	Statik Plus	399 × 249 × 375	0,179	650	3,93
HEBEL	P2 - 450	499 × 199 × 375	0,110	450	2,6
PORFIX	P2 - 400	500 × 250 × 500	0,083	587	1,5

Nyní je tedy vyvíjen obrovský tlak na výzkumné týmy, jejichž zodpovědností je tento stav změnit. Při použití standardních bloků by totiž bylo zapotřebí využít dodatečné tepelné izolace. Což by znamenalo prodražení objektu nejen za materiál, ale hlavně i za nutnou práci. Lidská pracovní síla je totiž nyní jednou z nejdražších položek ve stavebnictví.

Jednou z dalších možností byl tepelně izolační blok společnosti H + H, který byl dostupný na Českém trhu. Poprvé byl systém představen na mezinárodním stavebním veletrhu ForArch v roce 2010. Bohužel pro výrobce se ale nový způsob neuchytil a jeho využití v praxi bylo velmi omezené. Obchodní název bloku byl H + H Thermoblock. Schéma bloku, které popisuje Obrázek 2, ukazuje na poměrně složitou konstrukci daného prvku. Vnitřní a rovněž hlavní z vrstev, která plní nosnou funkci, byla tvořena lehčeným blokem tloušťky 200 mm a střední vrstva byla tepelně izolační.



Obrázek 2 H + H Thermoblock (tzbinfo, 2010)

Výrobce se rozhodl použít fenolitickou tepelně izolační desku společnosti Kingspan, přesněji typ Kooltherm K5 s tloušťkou 100 mm (*Technický List K5 Kontaktní Fasádní Deska*, 2018). Poslední vnější vrstvu tvořil nenosný krycí blok široký 125 mm. Celková tloušťka bloku tedy byla 425 mm a dle tvrzení výrobce byl blok nastaven na hodnotu součinitele prostupu tepla $U = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bez problému by tak splnil podmínky nové legislativy pro pasivní standard. Oba krajní prvky se skládaly z pórobetonových tvárnic H + H P2 – 400 vytvářených opět pomocí technologie autoklávu a pro snadnější manipulaci byly k sobě všechny vrstvy pevně lepeny. Jak již ale bylo řečeno, tento systém se neuchytil a společnost H + H byla nucena jeho výrobu ukončit. Bohužel se nadá s jistotou říci, co bylo příčinou tak fatálního neúspěchu. Po uvedení na trh byla cena za blok poměrně značná, ale postupem času byl výrobce nucen cenu snížit a i přes nabídky výhod a slev se lidé rozhodli pro jiný systém (tzbinfo, 2010).

Dle mého názoru se jednalo o nedůvěru veřejnosti k novému systému. Případně další možností by mohly být potencionální problémy spojené s kondenzací vodní páry v konstrukci (ČSN EN ISO 13788, 2019).

2.2.2. Technologie autoklávu

V současné době je technologie autoklávu velmi hojně využívána. Jedná se o proces, při kterém jsou výsledné mechanické vlastnosti pórobetonových prvků vylepšovány na nejvyšší úroveň za pomoci vysoké teploty a tlaku. Obrázek 3 ukazuje sestavu a uložení prvků do

komory autoklávu. Celý přístroj funguje na principu tlakového hrnce. Díky extrémním podmínkám dojde k rychlejšímu a kvalitnějšímu vytváření chemických vazeb. Což znamená, že hydratační proces je nastartován a zdokonalen i díky vzniku nových materiálů. Zřejmě nejdůležitějším z nich je tobermorit, který tvoří listové krystalky. Vznikají tak nové pevnější vazby a výsledný prvek je pak pevnější a trvanlivější.



Obrázek 3 Sestava autoklávu (RFID and Autoclaves, 2009)

Celý proces má ale i jednu velkou nevýhodu, velká energetická a ekonomická náročnost. Existuje mnoho druhů a velikostí autoklávu, avšak všechny mají velkou komoru či kotel kam je potřeba upravované prvky umístit. Součástí je uzávěr nebo víko, které dokáže odolávat velkým tlakům a rozdílům teplot. Nastává pak ale problém, že je potřeba celý systém zahřát, natlakovat a udržovat vše po celou dobu úpravy.

Porovnání tepelných izolací pro exteriérové zateplení

Požadavky pasivního standardu můžeme splnit i pomocí tepelné izolace. V současné době je to nejvyužívanější způsob nastavení tepelně izolačních vlastností konstrukce. Systémy zateplení jsou velmi variabilní a bez ohledu na nosný materiál se skladba ani systém nemění. Stejně jako v případě bloků se na trhu objevuje obrovské množství různých variant a produktů. Hlavními zástupci jsou expandovaný polystyrén (EPS) a minerální vlna s různým zpracováním. Tabulka 3 popisuje různé druhy a výrobce tepelných izolací.

Tabulka 3 Výčet vybraných druhů tepelných izolací (*Technický List Isover EPS 100F*, 2019), (*Technický List Isover EPS GreyWall*, 2019), (*Technický List Isover TOPSIL*, 2019) (*Technický List Multimax*, 2017), (*FRONTROCK PLUS*, 2019), (*Technický List K5 Kontaktní Fasádní Deska*, 2018)

Výrobce	Typ izolace	Rozměry [mm] D × V	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/mK]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Faktor difuzního odporu μ [-]
ISOVER	EPS	1000 × 500	0,037	18-20	30-70
	EPS GreyWall	1000 × 500	0,032	13,5-15	20-40
	Čedičová vlna TOPSIL	1200 × 600	0,033	60	1
	Skelná vlna MULTIMAX 30	1200 × 600	0,030	40	1
ROCKWOOL	FRONTROCK PLUS	1000 × 600	0,035	80	1
KINGSPAN	Kooltherm K5	1200 × 400	0,021	35	35
	Vakuová izolace OPTIM-R	1200 × 600	0,007	180-210	neuveden

Téměř pro jakýkoliv obvodový plášť bychom dokázali vytipovat a vybrat vhodnou možnost zateplení. Pro použití ve zdicím bloku je ale pouze omezené množství možností. Nejlepší volbou by zde zřejmě byly expandovaný polystyren a minerální vlna. Je možné je nařezat na jakékoliv rozměry a není tak nutné použít specializovanou výrobu.

Zajímavou volbou by rovněž mohl být expandovaný perlit. Jedná se o ryolitovou vulkanickou sklovinu, která vzniká při rychlém ochlazení lávy ve vodě. Jelikož má perlit velmi dobré tepelně izolační a akustické vlastnosti, je často používán ve velkých provozech. Nespornou výhodou je také jeho nízká objemová hmotnost. Při zpracování perlitu metodou takzvaného pražení při teplotě 850 – 1150 °C dokáže totiž nabýt až pětinasobku původního objemu. Dalšími kladnými vlastnostmi jsou nehořlavost, odolnost proti mikroorganismům, plísním a vysoký obsah alkalických částic. Spojení s betonem tak tedy bude ještě výhodnější. Materiál je vyráběn ve třech různých třídách zrnitosti, a to EP 100 – 180 a jeho součinitel tepelné vodivosti je zhruba $\lambda = 0,040$ W/mK (Perlit s.r.o., 2017)

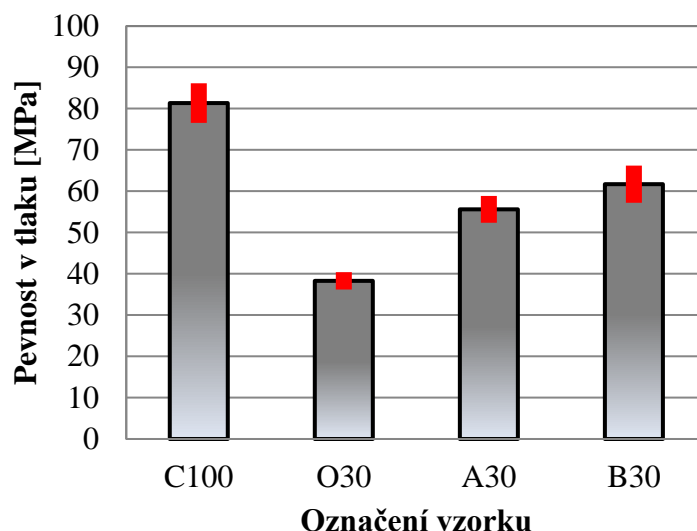
Studie Istanbulské univerzity zkoumala využití expandovaného perlitu v lehčených betonových blocích. Experimenty potvrdily výrazný pozitivní vliv na tepelně izolační vlastnosti bloku. Rovněž bylo prokázáno, že existuje velmi silný vztah mezi tepelnou vodivostí a objemovou hmotností výsledné směsi. Došlo ale k negativním účinkům na výslednou pevnost v tlaku a také došlo se navýšila nasákavost materiálu (Sengul a kol., 2011). Výzkum dvojice Topçu a Işıkdag se zabýval vlivem expandovaného perlitu na lehčený beton

s využitím různých druhů cementů. Testy byly prováděny s různými podíly kameniva z expandovaného perlitu na standardních testovacích krychlich o velikosti 150×150×150 mm. Dále byly použity válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm společně s trámci 100×100×500 mm. Finální experimenty byly prováděny po 28 dnech a u všech typů cementů bylo dosaženo pevnosti v tlaku 20 až 30 MPa s použitím 30 hm. % expandovaného perlitu i přes jeho negativní vliv na výsledné mechanické vlastnosti (Topçu & Işikdağ, 2008).

2.3. Výsledky předcházejících experimentů

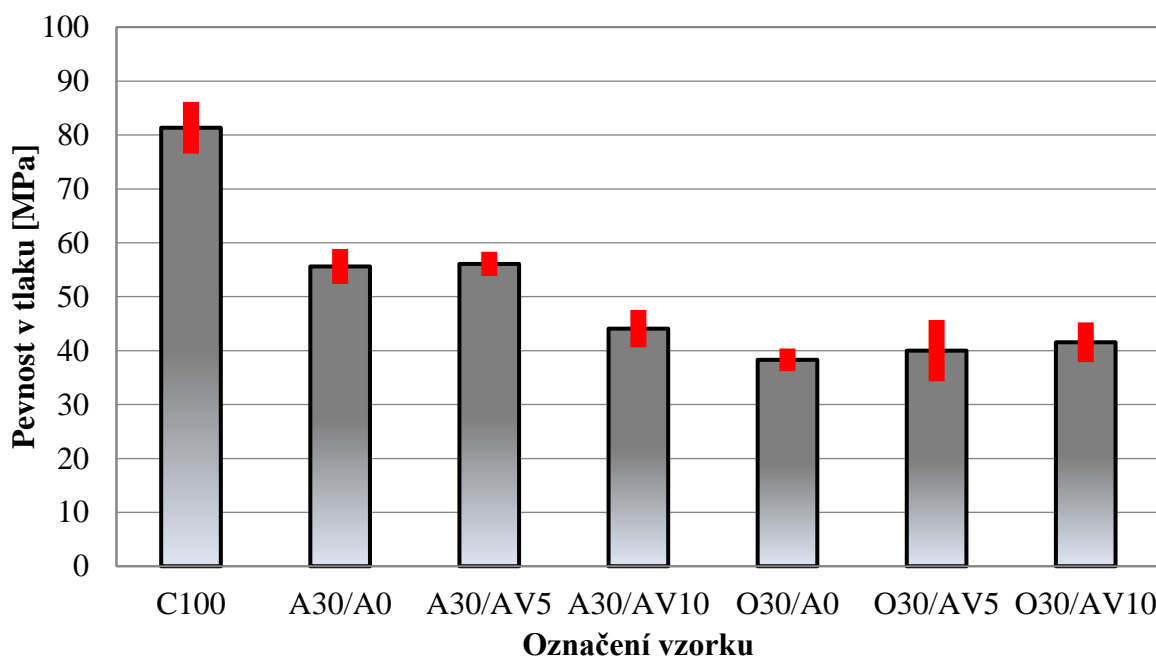
Materiály a podkladní informace pro tuto práci, vycházejí z výsledků zkoušek předchozích experimentů provedených na Fakultě stavební ČVUT v Praze (Horych, 2019), (Topič & Prošek, 2017), (Topič a kol., 2016). Pokládám tedy za vhodné, potřebné informace shrnout. Výzkum na sebe navazoval a zabýval se zejména využitím recyklovaných materiálů a jejich úpravě pro použití v praxi. Hlavními surovinami byly betonový recyklát, získaný ze směsi konstrukčního betonu demolovaného objektu v Praze na Waltrovce. A druhým materiálem byla vysokopecní struska z Kladenska, kde přibližně 100 let ležela na haldě. Jednalo se o odpadní materiál z výroby lehčeného struskového kameniva, a tudíž již neměla další možné využití. Bylo by nutné materiál skládkovat, což by bylo velmi drahé a v rozporu se současnou snahou skládkování co nejvíce omezit. V prvních fázích byla vždy využita náhrada cementu v množství 30 hm. % s doplněním o 0 až 10 hm. % potenciálního aktivátoru. Všechny sady vzorků byly vždy vytvářeny o rozměrech 40 × 40 × 160 mm a po dobu 28 dní byly skladovány ve vodní lázni.

První fáze experimentů byla zaměřena na zjištění nejvyššího potenciálu dostupných materiálů. Bylo totiž zjištěno, že je nutné nejdříve materiály aktivovat. Jednotlivé vzorky se lišily jemností mletí náhradních materiálů. Pro daný experiment byla využita mechanická aktivace pomocí vysokorychlostního mlýnu společnosti LAVARIS. Jemnost mletí se lišila místem odběru vzorků ze soustrojí mlýnu. Obrázek 4 popisuje výsledné pevnosti jednotlivých vzorků. Na první pohled bylo zřejmé, že nejvýraznější aktivací prošel vzorek s nejjemnějším mletím. Během experimentů byly rovněž sledovány a vyhodnocovány oba dynamické moduly, to znamená dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul pružnosti pomocí rezonanční metody. Již v průběhu nedestruktivních zkoušek byly sledovány rozdíly v pevnosti v tlaku a pomocí destruktivní zkoušky byly výsledky potvrzeny. Výhodou využití vysokopecní strusky byl výrazný nárůst hodnot pevnosti v tahu za ohybu, což je zřejmě následkem pomalejší a ne tak bouřlivé chemické reakce.



Obrázek 4 Výsledné pevnosti v tlaku s vyznačenou směrodatnou odchylkou (Horych, 2019)

Po dokončení testů byla započata druhá fáze, jejíž hlavní náplní byla chemická aktivace dostupných materiálů. Pro experiment byly využity materiály, které prošly menší mechanickou aktivací, to znamená odprašky s označením O a vzorky strusky s označením A. Jako aktivátor zde byl použit vápenný hydrát a následně i vodní sklo na bázi sodíku a draslíku.

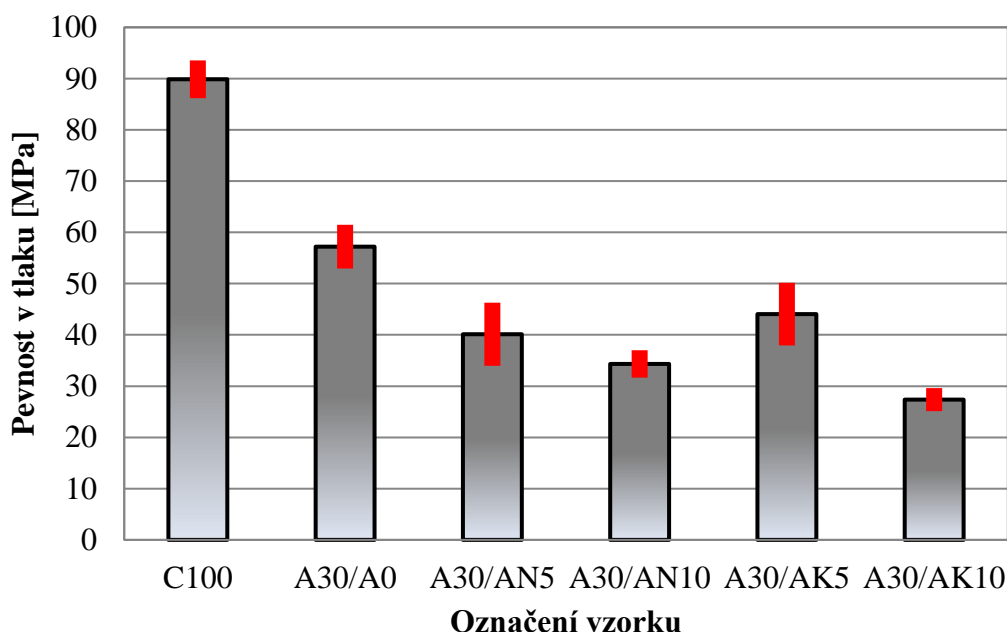


Obrázek 5 Výsledné pevnosti v tlaku s vyznačenou směrodatnou odchylkou za použití vápenného hydrátu (Horych, 2019)

Obrázek 5 ukazuje výsledné hodnoty pevností v tlaku za použití vápenného hydrátu. Zvýšené hodnoty pevnosti způsobila provedená mechanická aktivace společně s chemickým aktivátorem. Kladný vliv vápenného hydrátu byl však znatelný pouze s podílem 5 hm. %.

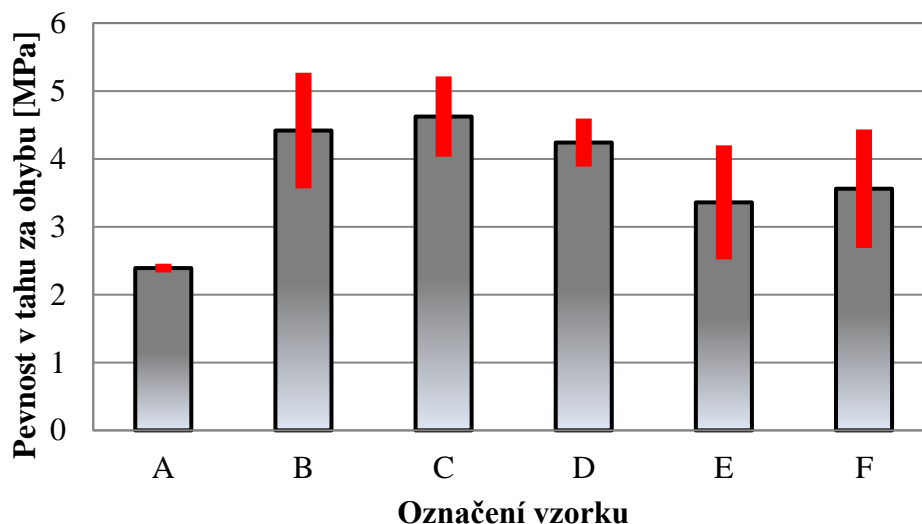
Účinek dalšího aktivátoru v podobě vodního skla na bázi sodíku a draslíku byl zkoumán následně. Pro vzorky byla použita pouze struska s označením A ve stejném množství, viz Obrázek 6. Na rozdíl od předchozího experimentu zde byl vidět výrazný propad hodnot se zvyšující se hodnotou podílu vodního skla. Negativní vliv byl rovněž zaznamenán na hodnotách pevnosti v tahu za ohybu, kde došlo ke zmenšení až na polovinu původní pevnosti. Potenciální aktivátor byl tedy prohlášen za neúčinný a nebyl dále využíván.

Třetí a finální fází experimentů byl návrh materiálové matrice. Na základě předchozích zkušeností bylo zvoleno složení jednotlivých vzorků. Byla využita struska B pro její nejlepší výsledky mechanické aktivace. Dále betonový recyklát a vápenný hydrát jako chemický aktivátor. V každém vzorku bylo použito 50 hm. % betonového recyklátu a dále podíl 0 až 10 hm. % vápenného hydrátu a vysokopecní strusky.



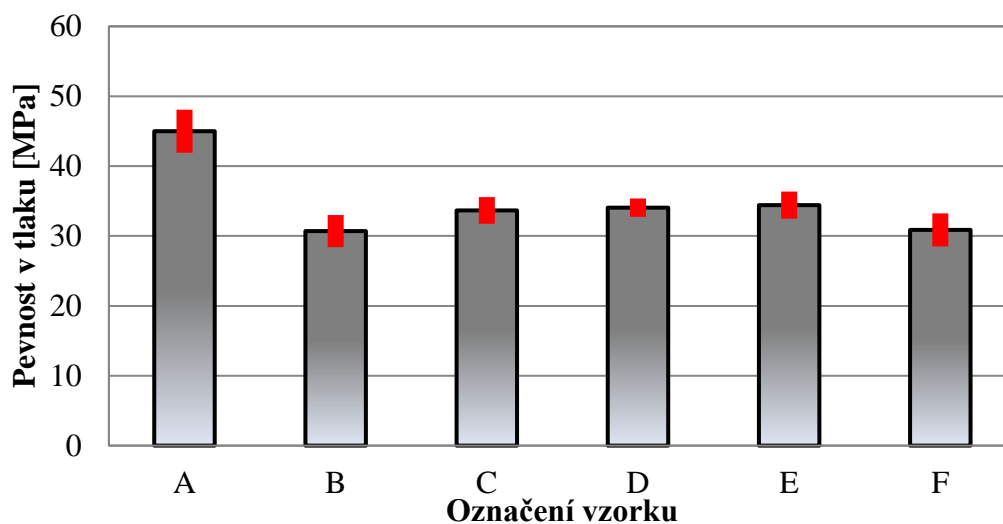
Obrázek 6 Výsledné pevnosti v tlaku s vyznačenou směrodatnou odchylkou za použití vodního skla (Horych, 2019)

Bylo dosaženo náhrady až 60 hm. % cementu. Výsledné hodnoty vzorků s podílem vysokopecní strusky v pevnosti v tahu za ohybu, které představuje Obrázek 7, byly dvojnásobné vůči referenčnímu vzorku, který obsahoval pouze cement a betonový recyklát.



Obrázek 7 Výsledné pevnosti v tahu za ohybu s vyznačenou směrodatnou odchylkou s využitím betonového recyklátu (Horych, 2019)

Pevnosti v tlaku, které popisuje Obrázek 8, byly také velmi pozitivně ovlivněny přidáními podíly betonového recyklátu a vysokopecní strusky. Dále z výsledků vzorku C, bylo usouzeno, že poměr vysokopecní strusky a vápenného hydrátu 3:1 je ideální a nejspíše bude dále využíván.



Obrázek 8 Výsledné pevnosti v tlaku s vyznačenou směrodatnou odchylkou s využitím betonového recyklátu (Horych, 2019)

Pro další experimenty byla tedy použita směs vzorku C, jež dosáhla pevnosti v tahu za ohybu téměř 4,5 MPa, a pevnosti v tlaku více než 34 MPa. Danou matici pak ale bylo

potřeba dále vylepšit. Byl tedy proveden návrh vylehčení směsi s využitím pěnотvorné přísady.

Experimentální bloky

Problematika náhrady cementu není ve světě novinkou a mnoho studií a výzkumů se na dané téma již zaměřilo. Některé z nich se dostaly do závěrečné fáze výroby a zkoušení experimentálních bloků a jiných výrobků.

Jedna studie se zabývala výrobou a mechanickými vlastnostmi lehčených bloků za použití odpadních dřevěných vláken, popela z rýžových slupek a vápencového prachu. Testovací vzorky byly vytvářeny s rozdílnými podíly všech materiálů jako náhrady za cement. Pevnost v tlaku bloků klesala s nárůstem podílů náhradních materiálů, avšak náhrada měla pozitivní vliv na absorpční kapacitu energie. Vzorky již nebyly porušeny náhlou křehkou trhlinou a použití náhrad mělo rovněž za výsledek dramatické snížení objemové hmotnosti bloku (Torkaman a kol., 2014). Další ze studií zkoumala vliv kameniva z kalcinovaného diatomitu. Diatomit je ve své surové formě jen málo reaktivní, avšak při použití kalcinace při 400 až 1000 °C se jeho reaktivita zvýší. Materiál byl namlet na různé frakce od jemného po hrubé kamenivo a upravováno po dobu 4 hodin. Výsledné mechanické vlastnosti po 28 dnech byly výrazně zlepšeny. Pevnost v tlaku byla naměřena v rozmezí 7,8 až 12,9 MPa, dále objemová hmotnost, která byla snížena na hodnotu 1000 až 1200 kg/m³. Bylo dosaženo porozity 58 až 61 obj. % a tepelná vodivost byla 0,15 až 0,19 W/mK. Hrubé kamenivo, které prošlo silnou kalcinací při teplotě 1000 °C posloužilo jako pevná kostra a jemně mletý diatomit kalcinovaný při 600 °C dosáhl dobré reaktivity (Posi a kol., 2013). Příspěvek z konference „Earth and Environmental Science“ se zaměřil na použití popílku, vápencového prachu, popela z rýžových slupek, odpadních vláken z cukrové třtiny a tropické traviny Vousatky draslavé (*Chrysopogon zizanioides*). Maximální náhrada Portlandského cementu a písku ve zkušebních vzorcích bylo 25 hm. %. Celkem bylo vyrobeno 56 krychlí 150×150×150 mm a 18 odlitků malých válců o průměru 100 mm a výšce 50 mm. Závěrečné experimenty prokázaly, že použité směsi popílku a Vousatky draslavé společně se směsí vápencového prachu a Vousatky draslavé vykazují větší pevnost, trvanlivost a sníženou objemovou hmotnost vzorků (Bhuvaneshwari a kol., 2017). Mezinárodní spoluprací univerzit vznikl článek používající obrazové metody na zkoumání vlastností betonových bloků při využití namletého expandovaného skla jako náhradního kameniva. Během experimentů byly použity elektronová mikroskopie, rentgenová počítačová tomografie a automatická analýza obrazu (RapidAir). Všechny mechanické vlastnosti byly určeny a porovnány mezi vytvořenými

vzorky. Celkem byly vytvořeny 2 sady vzorků, jedna z nich byla vytvořena za použití klasického přírodního písku a ta druhá skupina vzorků obsahovala drcené expandované sklo. Výsledné hodnoty podpořily využití drceného expandovaného skla jako jemného plniva do betonových kompozitů (Chung a kol., 2017). Nigerijská studie pak zkoumala možné využití starých novin a kancelářského papíru. U všech vzorků byly měřeny objemová hmotnost, absorpce vody, pevnost v tlaku a odolnost proti požáru. Výsledné vlastnosti vzorků s novinovým papírem se ukázaly být lepší než u vzorků s kancelářským papírem. Zároveň bylo zjištěno, že se zvyšujícím se podílem papírové příměsi narůstala nasákavost materiálu a odolnost proti požáru. Objemová hmotnost a pevnost v tlaku ale měly ve stejném trendu tendence klesat. Závěrem studie bylo použití takzvaného papírového betonu doporučeno zejména pro produkci dutých i plných zdicích bloků (Akinwumi a kol., 2014). Další z výzkumných týmů se zabýval objemovou hmotností a pevností v tlaku lehčeného geopolymerního betonu obsahujícího drcený lehčený beton jako kamenivo a popílek společně s Portlandským cementem. Vzorky s obsahem 85 až 100 hm. % popílku dosáhly objemových hmotností 1200 až 1500 kg/m³. Pevnost v tlaku při stáří 28 dnů byla v rozmezí 4,5 až 17,5 MPa. Vzorky s vyšším podílem cementu měly větší objemovou hmotnost a tím se také zvyšovala i pevnost v tlaku (Posi a kol., 2016). Experimenty dvojice Mahoutian a Shao využívají vysokopecní a další druhy strusky pro výrobu zdicích bloku bez cementu. Ocelová struska byla využívána jako pojivo a vysokopecní struska byla použita jako lehčené plnivo. Během experimentů byly sledovány objemová hmotnost, nasákavost, pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu. Výsledné mechanické vlastnosti vytvořených bloků byly lepší a dle průzkumů by byly bloky i levnější než současné průmyslově vyráběné výrobky (Mahoutian & Shao, 2016). Studie z Turecka se zaměřila na využití plastových granúl z rozřezaných pet (Poly-ethylene Terephthalate) lahví jako alternativní lehčené kamenivo do betonu. Dále zde byla využita náhrada 50 hm. % cementu vysokopecní struskou. Frakce plastových granúl, které byly použity by se dala shrnout jako frakce 0/4 mm. Výsledkem studie bylo zjištění, že použití granúl má velký potenciál. Výsledná směs se tak dostává do kategorie lehčeného betonu a díky využití vysokopecní strusky by produkce mohla mít pozitivní vliv na životní prostředí (Akçaözoglu a kol., 2010). Další z mnoha výzkumů využívá aktivovanou strusku a recyklovaný beton pro výrobu struskových zdicích bloků. Mechanické vlastnosti a veškeré změny v mikrostruktuře vzorků byly sledovány pomocí isothermální kalorimetrie, rentgenové difrakce a skenovacího elektronového mikroskopu. Při náhradě 75 hm. % písku za drcený recyklovaný beton, pevnost v tlaku stoupla až o 47 % díky nezhydratovaným cementovým

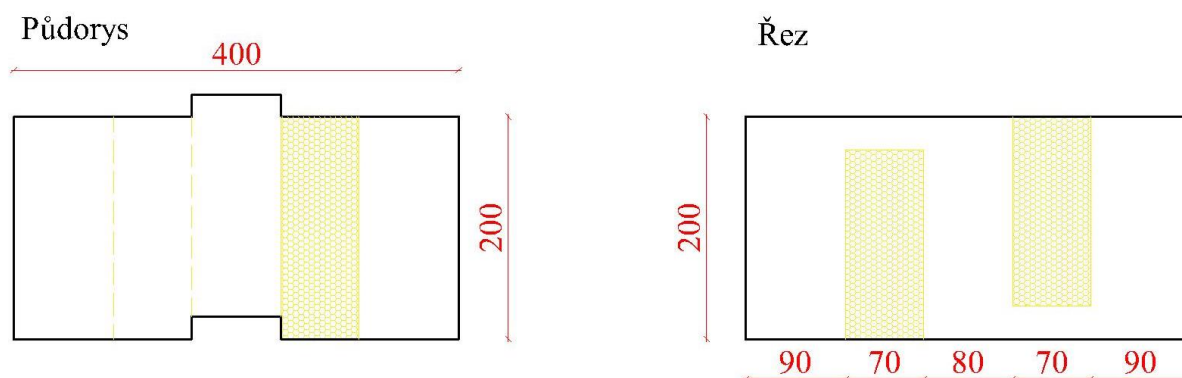
zrnům v recyklovaném betonu. Využití betonového recyklátu a strusky má ve stavebnictví velký potenciál (Ren a kol., 2020).

2.4. Návrh geometrie prvku

V dnešní době je vyráběna spousta různých tvarů a variant zdících bloků. Základním požadavkem této kapitoly tedy bylo pokud možno vymyslet a přijít s novými tvary experimentálního bloku. Bylo ale nutné zachovat jisté standardy a tvary pro jednoduchou výstavbu spojenou s vyšší variabilitou výrobku. Možnosti tedy byly zúženy na 2 hlavní varianty. První variantou byla integrace tepelné izolace do konstrukce bloku, aby byly splněny požadavky pasivního standardu a zároveň byl ušetřen půdorysný prostor objektu. Nehledě na výhodu omezení nutnosti vnějšího zateplení. Druhou variantou byla vnější nosná skořápka s tepelně izolační vnitřní výplní. Splněny tak byly pevnostní nároky společně s vylepšením tepelně izolačních vlastností. Předběžně zpracováno bylo několik možných variant a při jejich tvorbě byl kladen důraz na použitelnost a snadnou výrobu.

2.4.1. Integrace tepelné izolace

Použití tepelné izolace je již ve stavebnictví dlouhodobě zažito. Znamená ale dodatečnou vrstvu, větší pracnost a větší cenu. I přes všechny nevýhody je však tento systém využíván pro svou variabilitu a dobré finální vlastnosti. S rostoucími nároky na energetickou náročnost budov však roste i tloušťka tepelně izolační vrstvy, což je pro mnohé investory již nepřijatelné, nehledě na velkou pracnost. Můžeme tedy použít nosnou vrstvu s lepšími tepelně izolačními vlastnostmi a přidat menší vrstvu izolantu, nebo se nabízí možnost tepelnou izolaci integrovat do konstrukce bloku. Obrázek 9 popisuje jednu z možností konstrukce bloku.



Obrázek 9 Schéma lehčeného bloku s tepelnou izolací

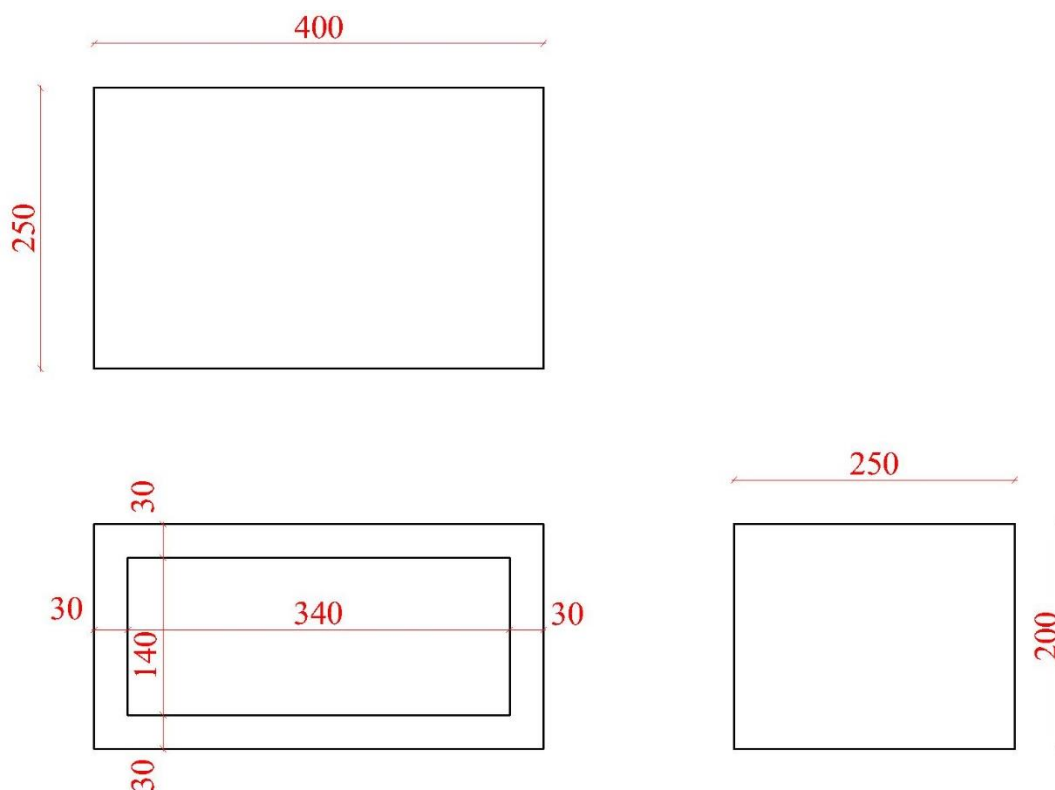
Nosná část by byla tvořena napěněnou betonovou směsí s pevností v tlaku zhruba 3 MPa. S využitím základních výpočtů byla zjištěna hodnota součinitele prostupu tepla $U = 0,175 \text{ W/m}^2\text{K}$, což splňuje požadavky legislativy.

Výzkumného týmu z Turecka vytvořil experimentální blok s integrovanou tepelnou izolací. Jednalo se o spojení lehčeného betonu s využitím pemzy jako lehkého kameniva a expandované polystyrenové pěny. Na vnějších stranách byly 30 až 50 mm tlusté betonové desky a mezi ně byla instalována tepelná izolace tloušťky 100 až 120 mm. Rozměry bloku byly $400 \times 200 \times 200 \text{ mm}$. Nejdříve byly vytvořeny panely s danými vlastnostmi a tyto panely byly následně rozřezány pomocí řezacího stroje s kotoučovou pilou na jednotlivé bloky. Po uplynutí 28 dní byly zkoumány veškeré mechanické vlastnosti pro posouzení možností jejich použití v praxi. Objemová hmotnost byla 562 kg/m^3 , pevnost v tlaku byla 2,99 MPa a součinitel tepelné vodivosti byl $0,33 \text{ w/mK}$. Posuzována byla rovněž rovinnost řezů a odchylky od řezné plochy, kde maximální naměřená odchylka byla 0,15 mm (Sariisik & Sariisik, 2012). Výzkum univerzity v Indii se zabýval použitím rozptýlených zrn expandovaného polystyrenu společně s popílkem a lomovým prachem. V rámci studie byly vyrobeny 2 sady vzorků, v první z nich bylo použito 50 hm. % cementu a 50 hm. % popílku. Později byl poměr změněn a bylo použito 70 hm. % cementu a 30 hm. % popílku. Výsledkem experimentů byla zjištění, že s obsahem polystyrenových zrn má beton lepší zpracovatelnost, je lehčí a má nízkou tepelnou vodivost. Avšak vzorky s větším podílem cementu dosáhly pevnosti v tlaku zhruba 15 MPa, což znamená použití při malých zatíženích a ne pro primárně nosné účely (Chandru a kol., 2017). Experiment Bilala Demirela byl zaměřen na použití expandovaného polystyrenu a pemzy. Pro účely vytvoření lehkého izolačního bloku s dostatečnou pevností v tlaku bylo nutné do značné míry složení optimalizovat. Pomocí metody konečných prvků zde byly zkoumány možnosti daných materiálů a optimalizovány pro maximální pevnost v tlaku a minimální tepelnou vodivost (Demirel, 2013). Studie týmu ve složení Chen a Liu vyšetřovala možnost kombinace expandovaného polystyrenu a pěny. Průměr bublin byl 25 až $100 \mu\text{m}$ a výsledné objemové hmotnosti se pohybovaly v rozmezí 400 až 800 kg/m^3 . Vyprodukované vzorky pak měly pevnost v tlaku 3 až 13 MPa a součinitel tepelné vodivosti 0,009 až $0,25 \text{ W/mK}$. Přidáním pěny se rovněž zlepšila zpracovatelnost (Chen & Liu, 2013).

2.4.2. Vnější nosná vrstva

Pokud není žádoucí používat tepelnou izolaci, další možností geometrie experimentálního bloku by mohla být vnější nosná vrstva a vnitřní tepelně izolační jádro. Nosnou skořápku bude tvořit beton s příměsí recyklovaných surovin určen předchozími experimenty. Vnitřní jádro bude tvořit do značné míry napěněná směs pro vytvoření izolační vrstvy. Pro účely samotného návrhu bylo uvažováno vylehčení směsi pomocí zamíchané pěny. Míra vylehčení byla uvažována 70 obj. % a objemová hmotnost napěněné směsi 600 kg/m^3 . Existuje spousta možností a tvarů jak daný blok vytvořit. Pro potřeby experimentu bylo vybráno a posouzeno několik konstrukcí bloku, ze kterých byl vybrán finální prvek pro měření.

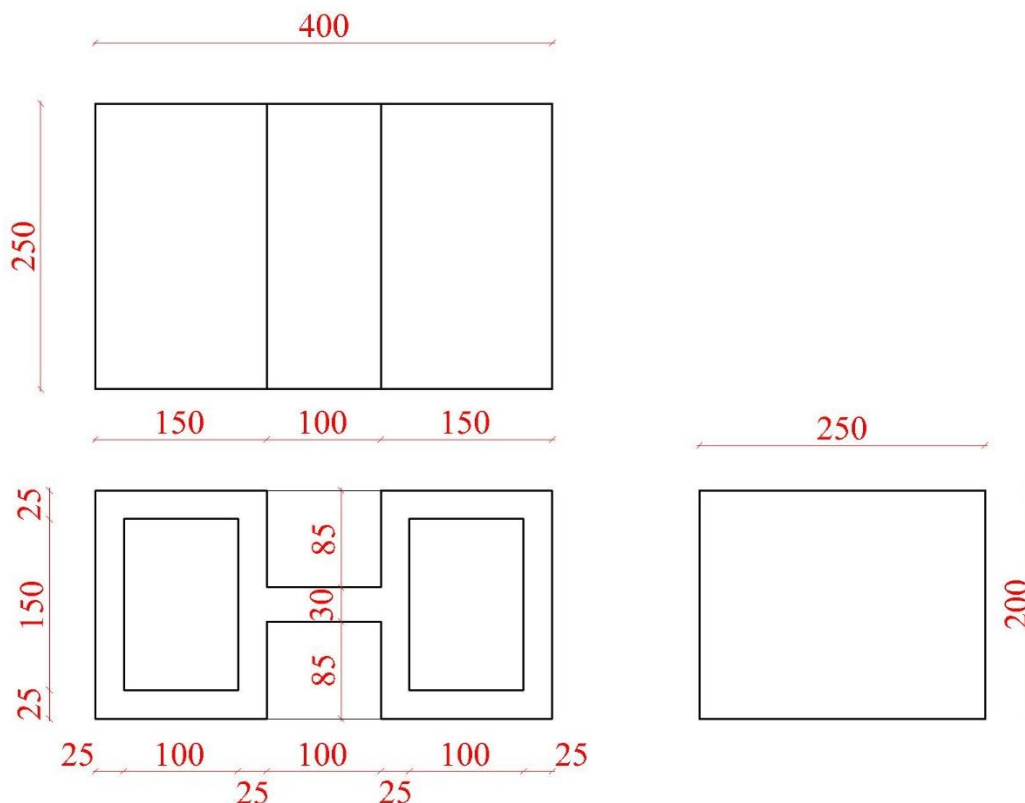
První z posuzovaných geometrií byl základní tvar ztraceného bednění, viz Obrázek 10. Výhodou by byl jednoduchý a snadno vyrobitelný tvar, který se dá jednoduše přizpůsobit.



Obrázek 10 Schéma bloku 1 – Základní tvar ztraceného bednění.

Nevýhodou by byly zabudované tepelné mosty tvořené nosnou vrstvou bloku. Celkové rozměry bloku byly uvažovány $400 \times 200 \times 250 \text{ mm}$ (Délka \times Šířka \times Výška). Při použití základních vzorců pro výpočet součinitele prostupu tepla bychom se dostali na hodnotu $U = 0,268 \text{ W/m}^2\text{K}$. Započteny byly rovněž součinitele přestupu tepla a to hodnotami $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ a $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. Celková hmotnost bloku včetně izolačního jádra by

byla zhruba 23,3 kg. Zde jsou započítány jak nosné stěny s objemovou hmotností 2000 kg/m^3 , tak i vnitřní tepelně izolační jádro vylehčené o 70 obj. % na hodnotu objemové hmotnosti 600 kg/m^3 . Další možností by bylo vytvořit vnitřní tepelně izolační jádro dodatečným vylitím směsi do konstrukce ztraceného bednění. Pokud by ale bylo potřeba využít bloky jinak, bude rovněž možné konstrukci bloků vyplnit klasickým konstrukčním betonem a využít tak tvar ztraceného bednění. Bez tepelně izolační výplně by byla hmotnost bloku snížena na 16,2 kg.

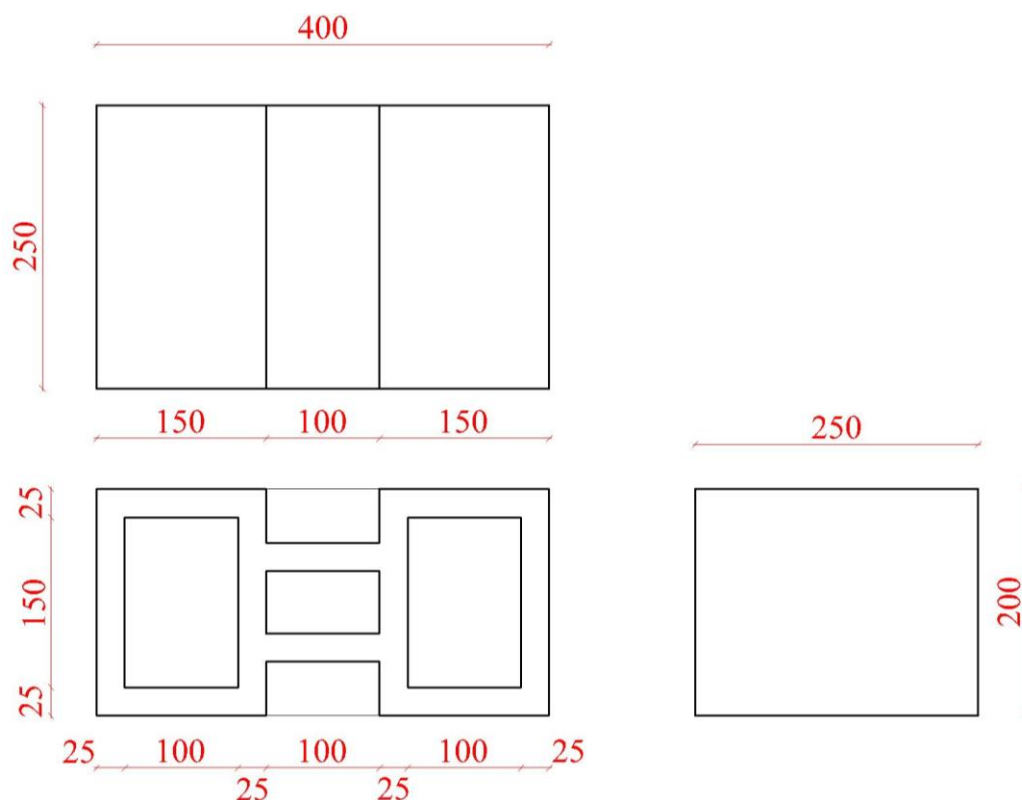


Obrázek 11 Schéma bloku 2 – Příklad s podélnou spojnici.

Obrázek 11 popisuje další možnou geometrii bloku. Samotný tvar bloku by zamezila přímým tepelným mostům a zatížení by bylo lépe distribuováno. Na první pohled je zřejmé, že konstrukce bloku by byla složitější než v předchozím případě. Benefit zamezení mostů by tedy musel být pečlivě posouzen. Přidáním příčných stěn bloku se ale rovněž omezí prostor pro tepelně izolační vložku, a tím by se případné izolační vlastnosti změnily. Opětovným použitím základních vzorců bychom zjistili hodnotu součinitele prostupu tepla $U = 0,292 \text{ W/m}^2\text{K}$. Díky širšímu využití nosných stěn bloku se navýší hmotnost bloku na hodnotu cca 23,6 kg, zmíněný dopad se ale zmírní zúžením nosných stěn na tloušťku 25 mm.

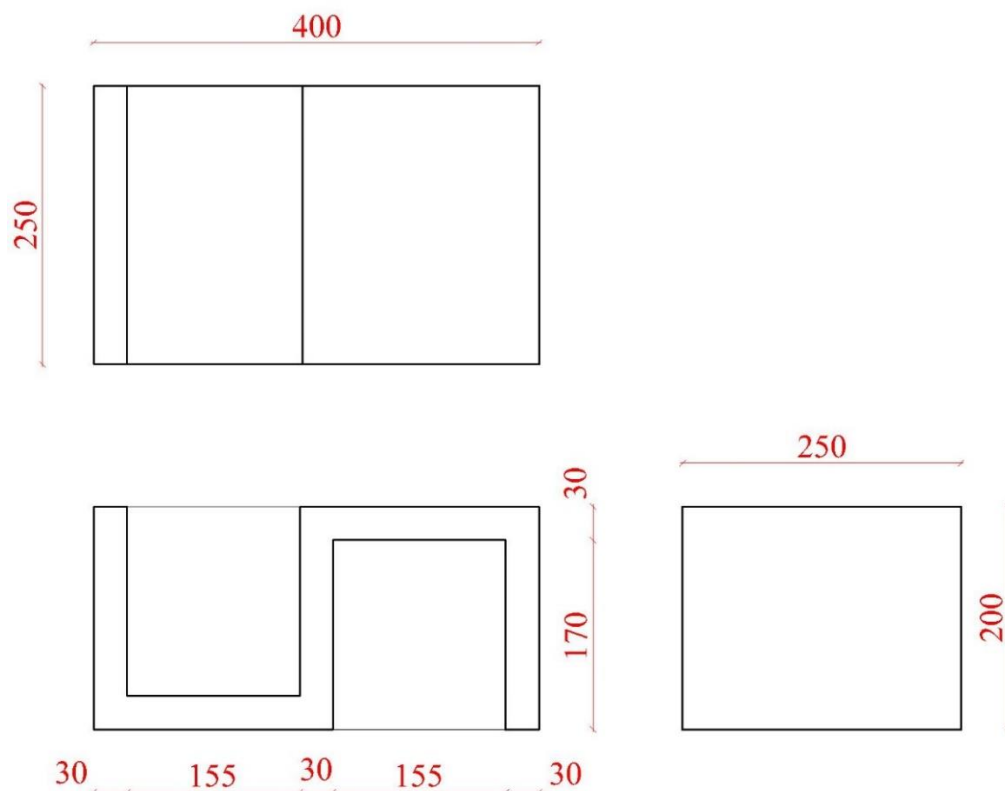
Pro větší stabilitu a variabilitu ale zůstala tloušťka podélné spojnice zachována na hodnotě 30 mm.

Obdobný tvar nabízí geometrie č. 3, viz Obrázek 12. Tvar je téměř stejný jako u bloku 2, avšak zde byla přidána dodatečná podélná spojnice pro zvýšení pevnosti a celkové ztužení skladby bloku. Stálo by tedy za zvážení i vylehčení bloku zúžením nosných stěn a vylepšit tak ještě finální tepelně izolační vlastnosti. Celkové rozměry zůstaly zachovány a hmotnost by se tedy pohybovala okolo 17,5 kg bez izolační vložky. Jejím přidáním se hodnota zvýšila o 6,8 kg na celkovou hmotnost 24,3 kg.



Obrázek 12 Schéma bloku 3 – Příčle se 2 podélnými spojnicemi.

Posledním zástupcem experimentálního bloku by mohla být geometrie číslo 4. Obrázek 13 znázorňuje schéma, přesněji tvaru písmene S. Tloušťka stěn bloku by byla 30 mm pro navýšení konečné tuhosti. Blok by rovněž zabraňoval přímým tepelným mostům a použití jedné příčle zajistí požadovanou tuhost a dostatečný prostor pro vložení tepelně izolačního jádra. Jednodušší geometrie bloku zajistí nižší hmotnost a lepší tepelně izolační vlastnosti. Součinitel prostupu tepla by byl $U = 0,286 \text{ W/m}^2\text{K}$ a hmotnost bloku by klesla na 21,6 kg.



Obrázek 13 Schéma bloku 4 – Písmeno S.

Z výše uvedených informací je zřejmé, že bloky s konstrukcí vnější skořápky by zcela nesplnily požadavky nové legislativy na pasivní standard. Avšak potřebných hodnot by se dalo dosáhnout pomocí přídavné vrstvy tepelně izolační omítky a případně tenkou vrstvou tepelné izolace na povrchu konstrukce. Dalším faktorem je skutečnost, že uvedená čísla nejsou konečná, ale jedná se o teoreticky vypočtené hodnoty pro orientaci v posouzení jednotlivých typů bloků. Přesné hodnoty a výsledky budou uvedeny v následující praktické části včetně výsledných posouzení.

3. Praktická část

Účelem praktické části je vyhodnotit a najít ideální řešení pro možnosti produkce ekologických zdicích bloků tak, aby splňovaly co nejvíce požadavků nové legislativy. Záměrem je rovněž maximální omezení potřeby cementu pro danou produkci a umožnit tak využití recyklovaných materiálů.

V rámci praktické části budou rovněž určeny a popsány veškeré materiály, postupy, myšlenkové pochody, rozhodnutí a metody použité během experimentů. Vyhodnocení studie bude popsáno na základě výsledků zkoušek, a všechny závěry budou objektivně posouzeny.

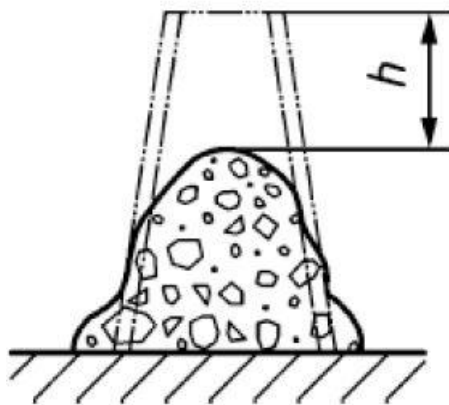
3.1. Experimentální metody

Během výzkumu bylo využito množství metod pro zjištění mechanických vlastností a charakteristik. Všechny metody popsány v této kapitole byly provedeny dle normových požadavků a pro zajištění spolehlivosti výsledků byly zkoušky provedeny vždy minimálně na 3 vzorcích. Většina zkoušek byla prováděna na vzorcích $40 \times 40 \times 160$ mm. Pevnost v tlaku byla měřena také na krychlích $150 \times 150 \times 150$ mm. Součinitel tepelné vodivosti, nasákavost vlivem kapilarity a pevnost bočnice bloku v tahu za ohybu však byly měřeny přímo na vyrobených blocích či vyřezaných segmentech bloků.

3.1.1. Zkouška sednutí kužele

V rámci výroby vzorků vznikl problém pro udržení konstantního vodního součinitele. Přesněji u vzorků s podíly popílku bylo nutné mírně navýšit objem vody, aby mohla být směs správně zpracována. Byl tedy definován alternativní předpis pro udržení přesné konzistence směsi. K určení konzistence směsi byla použita metoda sednutí kužele, jelikož bylo nutné vzorky udržet v přesně daných limitech.

Měření probíhalo pomocí normových pomůcek v podobě rozměrově přesného komolého kužele, ocelové tyče a podložky. Před zamícháním směsi se připraví podložka na rovný povrch a na ni se umístí měřicí kužel. Jeden z pracovníků zajistí kužel proti posunu tím, že si stoupne na připravené jistící plechy. Následně se forma postupně plní do jedné třetiny výšky kužele a pomocí vpichů ocelové tyče se směs uvnitř kužele hutní. Dle normy musí být vždy provedeno 25 vpichů pro správné zhutnění. Proces se pak dále opakuje s tím, že je nutné hutnit pouze novou vrstvu směsi, jinak by došlo k přehutnění spodní vrstvy.



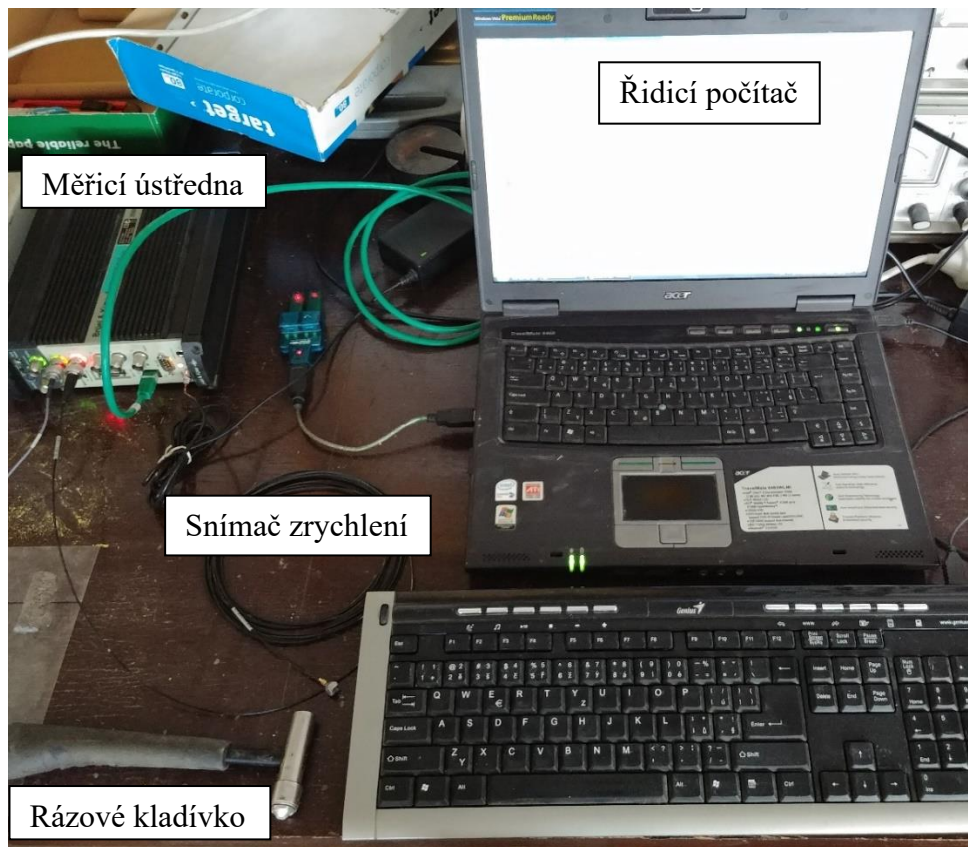
Obrázek 14 Měření hodnoty sednutí (ČSN EN 123 50-2, 2020)

Po dokončení celého procesu se pomalu forma vytáhne směrem vzhůru, položí se vedle měřeného prvku a ocelová tyč je umístěna na formu. Odměření vzdálenosti mezi spodní hranou ocelové tyče a směsí se pak určí sednutí kužele, pomocí kterého je pak konzistence směsi zařazena do jednotlivých kategorií. Vzorky byly navrhovány a míchány tak, aby bylo dosaženo kategorií S1 až S2. Přičemž kategorie S1 je charakterizována sednutím 10 až 40 mm a kategorie S2 se pohybuje v rozmezí od 50 do 90 mm (ČSN EN 123 50-2, 2020).

3.1.2. Rezonanční metoda

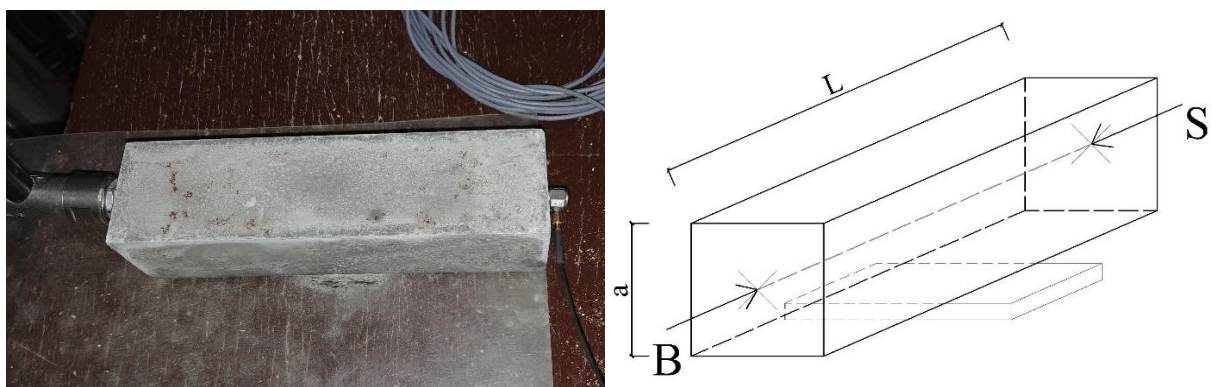
Jedná se o nedestruktivní metodu, pomocí níž můžeme rychle a efektivně určit dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul pružnosti. S výhodou se dají zmíněné skutečnosti využít pro postupné určování dynamických modulů vzorku během vyztváření směsi a snadněji tak vyšetřit náběh pevnosti prvku. Metoda je založena na využití jednotlivých naměřených frekvencí kmitání ve 3 směrech. Rezonanční frekvence kmitání se měří v podélném a příčném směru (ohyb), společně s torzními frekvencemi.

Měřicí sestava se skládala z rázového kladívka Brüel&Kjær 8206, pomocí kterého se vybudil počáteční impuls. Dalším prvkem byl snímač zrychlení Brüel&Kjær 4519-003 snímající rezonanční odezvu vzorku na vytvořený ráz. Obě zmíněné komponenty byly připojeny k měřicí ústředně rovněž společnosti Brüel&Kjær, přesněji typ 3560-B-X12, a ta následně převedla získané signály do frekvenční oblasti pomocí rychlé Fourierovy transformace. Ústředna byla dále propojena s řídicím počítačem a software PULSE LabShop pak určil přenosovou funkci jako podíl odezvy a budící síly.

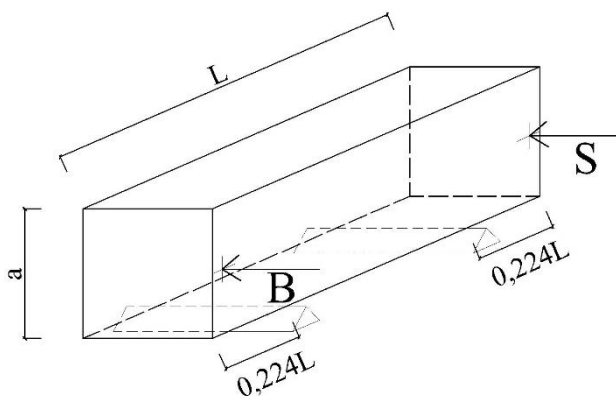


Obrázek 15 Měřicí sestava s popisem hlavních prvků (Horych, 2019)

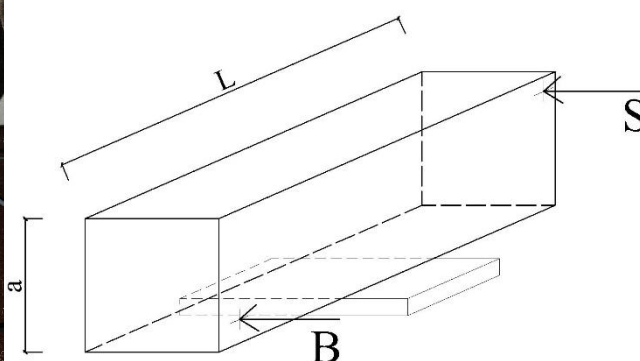
Obrázek 15 popisuje kompletní sestavu potřebnou pro správné aplikování rezonanční metody. Každá z frekvencí byla měřena specifickým způsobem na přesně definované podložce dle normy (ČSN 73 1372, 2012). Obrázek 16, Obrázek 17 a Obrázek 18 ukazují správné rozmístění měřicích prvků na vzorku při měření jednotlivých frekvencí.



Obrázek 16 Schéma měření podélného kmitání (Horych, 2019)



Obrázek 17 Schéma měření příčného kmitání (Horych, 2019)



Obrázek 18 Schéma měření kroutivého kmitání (Horych, 2019)

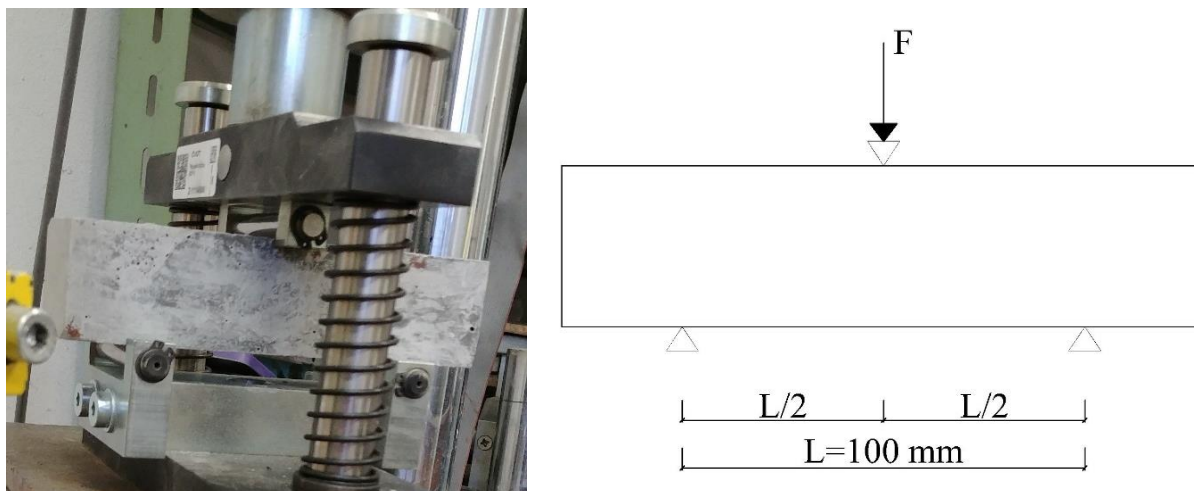
Pro výpočet hodnot dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu se zkombinovaly naměřené frekvence kmitání společně s hmotností a rozměry jednotlivých vzorků. S použitím výpočetního aparátu byly obdrženy finální hodnoty. Měření probíhalo vždy po 7 dnech až do stáří 28 dnů během kterých byly vzorky skladovány a uloženy ve stabilním prostředí a zabaleny ochrannou fólií.

3.1.3. Pevnost v tahu za ohybu

Po dovršení stáří 28 dnů byly započaty destruktivní testy všech vzorků. Prvním z nich byla metoda 3-bodového ohybu pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu.

Celá zkouška probíhala pomocí lisu Strassentest a speciálního nástavce pro vzorky $40 \times 40 \times 160$ mm. Během zkoušky byla sledována a zaznamenána největší zatěžovací síla, jež vyvolala kritické tahové napětí. Podpory v nástavci byly vždy umístěny přesně 100 mm od sebe a v poloviční vzdálenosti byla shora situována zatěžovací síla. Během celého

experimentu byla nastavena konstantní zatěžovací rychlost 1 mm/min. Po zjištění maximální zatěžovací síly byla dopočítána konečná pevnost v tahu za ohybu pomocí změřených rozměrů prvku. Zkoumány byly všechny směsi a každá sada vždy obsahovala 6 vzorků.

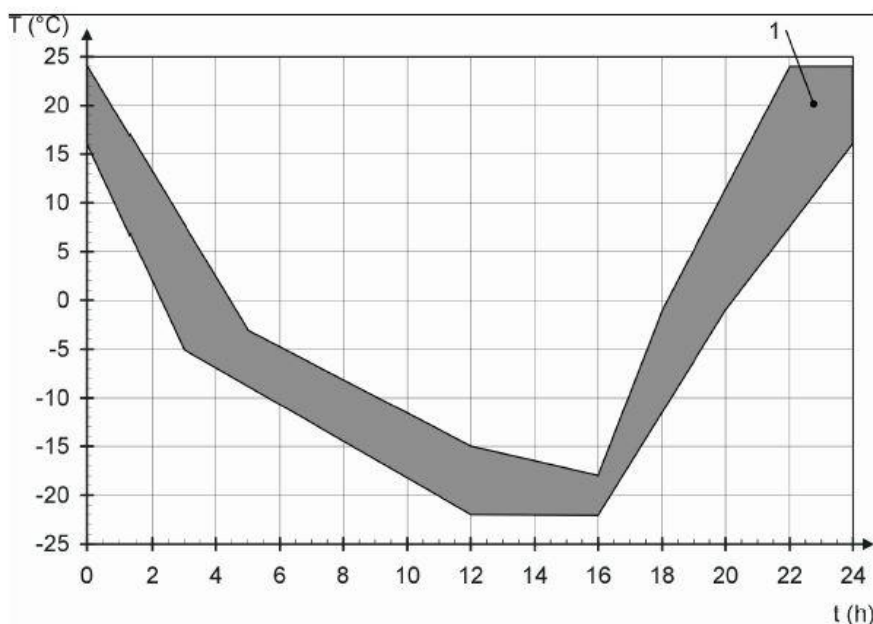


Obrázek 19 Schéma průběhu zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

Následně byly všechny hodnoty jedné sady zprůměrovány a byla dopočítána rovněž směrodatná odchylka. Samotný princip zkoušky zajistil, že se vzorky porušily vždy přibližně v polovině. Rozpůlené vzorky byly pak uschovány a dále skladovány pro další zkoušky. Celý průběh zkoušky probíhal dle normy (ČSN EN 123 90-5).

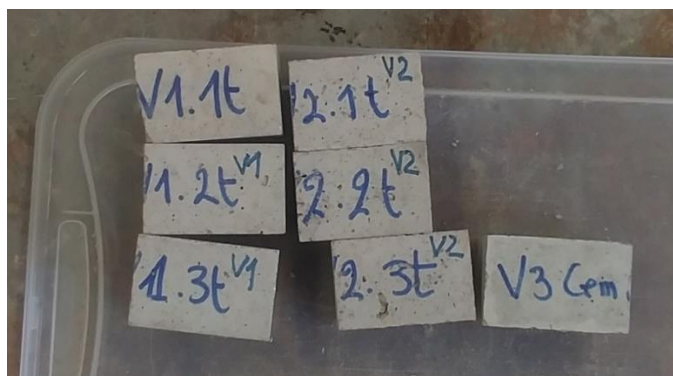
3.1.4. Odolnost proti zmrazování a rozmrazování

Princip zkoušky spočíval v tom, že opracované vzorky byly ponořeny do 3 mm 3 % roztoku chloridu sodného. Následně byly vzorky zatíženy 56 cykly zmrazování a rozmrazování ve zmrazovací komoře. Teplota v komoře byla neustále sledována teplota zmrazovacího roztoku a měřena byla také teplota na povrchu jednoho ze vzorků. Obrázek 20 popisuje rozmezí teploty, ve kterém bylo nutno dle normy vzorky udržovat po celou dobu zkoušky. Během každého cyklu bylo také kontrolováno, aby teplota přesahovala teplotu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 7 až 9 hodin a celková teplota ve zmrazovací komoře nikdy nepřesáhla teplotu $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ČSN EN 123 90-9).



Obrázek 20 Cyklus závislosti teploty (T) na čase (t) zmrazovacího roztoku uprostřed na zkoušeném povrchu (ČSN EN 123 90-9)

Vzorky, které se pro zkoušku použily, byly části přelomených prvků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. U získaných polovin vzorků byly upraveny povrchy pomocí elektrické diamantové pily a dále pak podrobně popsány pro zajištění korektního přiřazení konečných výsledků. Obrázek 21 ukazuje přesné popisky použité pro zařazení vzorků, jelikož byla testována vždy pouze jedna polovina daného trámečku.



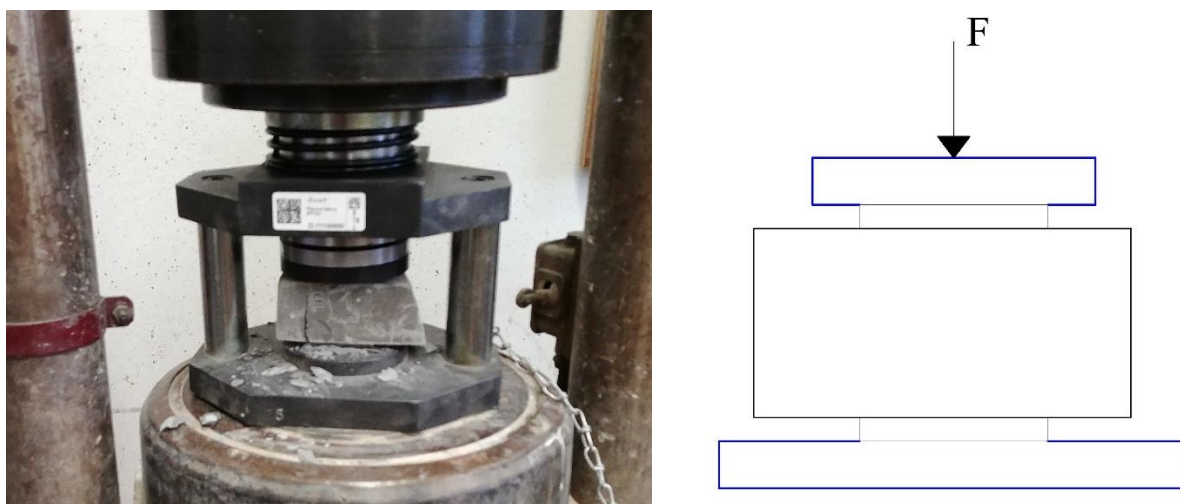
Obrázek 21 Část vzorků popsáných pro správné zařazení

Bylo tak docíleno kontroly ztráty hmotnosti vzorků i posouzení vlivu zmrazovacích cyklů na pevnost v tlaku. Posouzení bylo provedeno porovnáním hmotností daných vzorků před a po zkoušce. Následně byl proveden výpočet pro určení procentuálního úbytku hmotnosti při zkoušce díky postupnému odlupování úlomků vzorku.

3.1.5. Pevnost v tlaku

Metoda spočívá v jednoosém zatěžování vzorků do dosažení kritického napětí ve vzorku a způsobení jeho destrukce. Během celé zkoušky byla nastavena konstantní rychlost zatěžování 5 mm/min. Výsledkem testu byl zisk maximální tlakové síly, která působila na vzorek a způsobila jeho kolaps (ČSN EN 123 90-3).

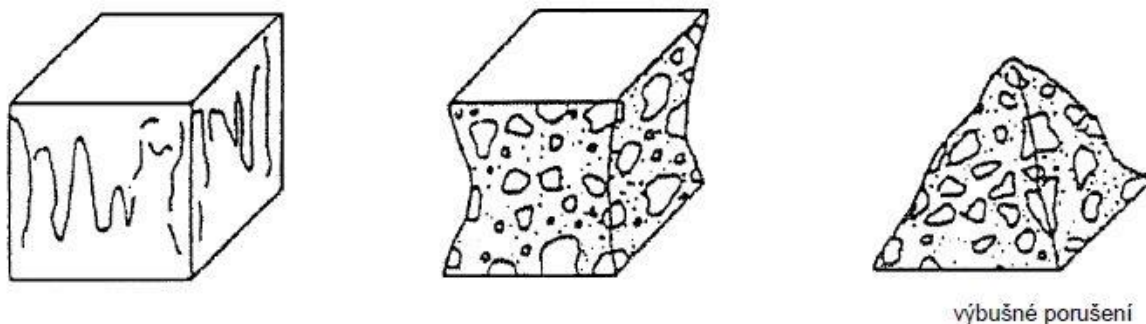
V rámci experimentů byly vyrobeny 2 sady vzorků. Byly vyrobeny zkušební krychle $150 \times 150 \times 150$ mm a trámečky o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm. Krychle byly testovány ve stáří 28 dní, zatímco trámečky byly testovány později kvůli zkouškám mrazuvzdornosti, tedy po 56 dnech od výroby.



Obrázek 22 Schéma zkoušky jednoosé pevnosti v tlaku

Obrázek 22 znázorňuje schéma zkoušky na trámečkách. Zatížení bylo na vzorek přenášeno pomocí ocelových roznášecích tělísek o rozměrech 40×40 mm. Celkový výsledek zkoušky pevnosti v tlaku byl určen použitím naměřené maximální síly společně s rozměry daného vzorku. Jednoduše pak byla zjištěna pevnost v tlaku jednotlivých vzorků a následně byly celé sady průměrovány. Zjištěna byla také směrodatná odchylka, která se dále promítla ve výsledcích zkoušky.

Testování zkušebních krychlí probíhalo obdobným způsobem, avšak bylo nutné použít větší lis EDB 400. Vzorky byly otestovány na plochách od otisku formy a stejně jako případě trámeček byla rychlost zatěžování nastavena na 5 mm/min. V průběhu zkoušky bylo rovněž dbáno na kontrolu způsobu porušení vzorků a byla tak zajištěna správnost výsledků, viz Obrázek 23.



Obrázek 23 Příklady vyhovujícího způsobu porušení krychle (ČSN EN 123 90-3)

Vyhodnocení zkoušky následně probíhalo rovněž pomocí podílu maximální zatěžovací síly a předem naměřených přesných rozměrů vzorku ve styku s ocelovými roznášecími deskami.

3.1.6. Součinitel tepelné vodivosti

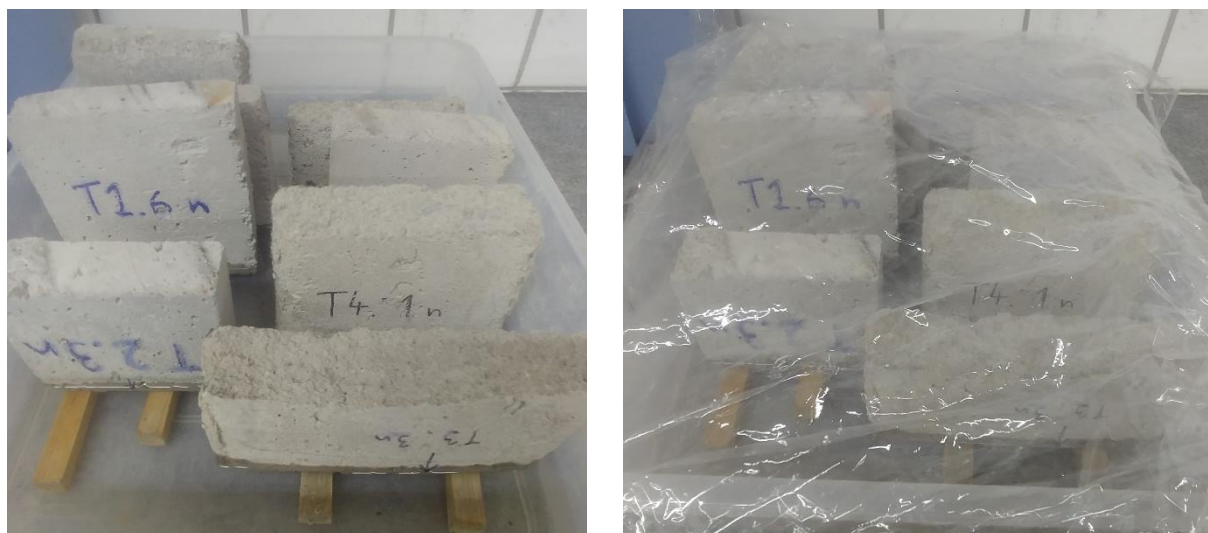
Potřebné hodnoty součinitele tepelné vodivosti byly měřeny pomocí přístroje ISOMET typ 2104. Jedná se o zařízení, které dokáže jednoduše, rychle a přesně určit součinitel tepelné vodivosti a tepelnou kapacitu materiálu. K měření je používána nestacionární měřicí metoda, díky čemuž se čas měření zredukoval na 10 až 16 minut. Sestava se skládá z měřicí centrály, ke které jsou připojeny vyměnitelné sondy dle měřeného materiálu. Měření pak probíhá pomocí tepelného toku, který je vytvářen rozptýleným elektrickým výkonem v rezistoru uvnitř sondy. Následně probíhá analýza průběhu teplotní odezvy závislé na čase. Teplota je měřena jako funkce času a ta je pak vyhodnocována polynomiální regresí. Získané koeficienty se následně využijí pro výpočet požadovaných hodnot. Měření probíhalo na vytvořených experimentálních zdicích blocích vždy minimálně na 3 místech bloku. Byl tak určován součinitel tepelné vodivosti potenciálních směsí, které byly pro tento výzkum navrženy a zhotoveny (Applied Precision Ltd., 2020).

3.1.7. Nasákavost

Nutnou zkouškou pro posouzení použitelnosti bloku byla rovněž nasákavost vlivem kapilarity prvku. Část vzorků v podobě bloků byly odebrány a nařezány na menší plošné kusy. Z každého bloku bylo vybráno 6 reprezentativních vzorků a ty byly důsledně popsány.

Dle normy (ČSN EN 722-11, 2011) bylo ale nejdříve nutné všechny vzorky řádně vysušit. Použita byla sušárna, která byla nastavena na konstantní teplotu 70 °C a hmotnost vzorků byla pravidelně měřena.

Po 5 dnech již byly vzorky vysušeny na konstantní hmotnost a byly odebrány se sušárny. Dále pak byly všechny vzorky rozloženy pro vychladnutí. Během chladnutí byly všechny vzorky zváženy a byla tak určena hmotnost $m_{dry,s}$ pro následný výpočet. Mezitím byla připravena plastová nádoba a naplněna vodou. Na dno byly připraveny podložky v podobě dřevěných latí a norma (ČSN EN 771-3, 2017) pak dále určila dobu ponoření $t_{so} = 10 \pm 0,2$ min. Po celou dobu měření byly vzorky překryty pro zabránění odpařování vody z vlhkých vzorků, viz Obrázek 24.



Obrázek 24 Průběh zkoušení nasákavosti vlivem kapilarity vzorků

Po skončení doby máčení byly vzorky co nejrychleji vytaženy, otřeny od přebytečné povrchové vody a zváženy. Společně s ostatními rozhodujícími hodnotami bylo dosazeno do rovnice:

$$c_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \cdot t_{so}} \times 10^6 \text{ [g/(m}^2\text{s)]}$$

- $m_{so,s}$ – hmotnost vzorků po skončení doby nasycování [g]
- $m_{dry,s}$ – hmotnost suchých vzorků [g]
- A_s – plocha vzorku ponořená ve vodě [m²]
- t_{so} – doba nasycování [s]

Výpočtem rovnice obdržíme hodnotu součinitele nasákavosti betonového zdicího prvku vlivem kapilarity $c_{w,s}$. Výsledek byl zaokrouhlen na celé číslo.

3.1.8. Pevnost bočnice bloku v tahu za ohybu

Důvodem zkoušky byla kontrola konečných možností vybraných bloků. Jelikož se jednalo o bloky s vnější nosnou vrstvou, bylo potřeba ověřit a posoudit napětí vyvolané nalitím čerstvé směsi do konstrukce bloku. Původně zamýšlená lehčená směs pro zlepšení tepelně izolačních vlastností by neměla výrazný vliv na integritu a rozložení napětí v nosné vrstvě. Díky tvarům a možnostem dalších aplikací bylo ale potřeba zajistit dostatečnou pevnost v tahu, pokud by se k vyplnění použil například standardní konstrukční beton. Zkouška probíhala obdobným způsobem, jako dříve zmíněná zkouška v tahu za ohybu. Využity byly menší, již nařezané prvky, na kterých byla měřena nasákavost vlivem kapilarity. Každý ze vzorků byl opětovně důkladně proměřen, popsán a přezkoušen pro ověření maximálního možného tahového napětí, které by mohlo na daný prvek působit. Rychlost zatěžování byla opět nastavena na 1 mm/min a schéma zkoušky naznačuje Obrázek 25.



Obrázek 25 Testování bočnice bloku v tahu za ohybu

Stejně jako v případě zkoušek na trámečcích byla zaznamenána největší síla, která způsobila překročení únosnosti a následnou destrukci vzorku. Za použití naměřených rozměrů a zmíněné síly se pak jednoduše určila pevnost v tahu za ohybu daných prvků.

3.2. Použité materiály

3.2.1. Portlandský cement

V případě provedených experimentů byl cement součástí materiálové matrice, avšak jeho podíl se podařilo výrazně zredukovat. Cement, který byl v průběhu studie používán, byl CEM I 42,5R z Radotínské výroby společnosti Českomoravský cement a. s. Důležité parametry a vlastnosti použitého cementu ukazují Tabulka 4 a Tabulka 5. Bylo vyrobeno více sad vzorků a jedna z nich byla pouze s cementem jako referenční. Jednalo se ale pouze o vzorky referenční pro porovnání mechanických vlastností uvažovaných směsí s původním materiálem.

Tabulka 4 Fyzikální a mechanické vlastnosti použitého cementu CEM I 42,5R

Fyzikální a mechanické vlastnosti

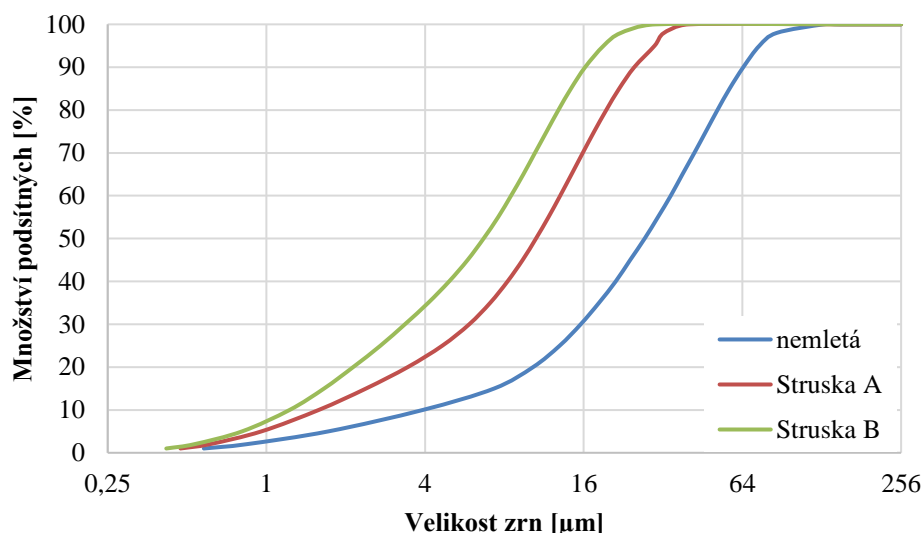
Parametr	Charakteristická hodnota		Metoda	Parametr	Charakteristická hodnota	Metoda	Poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	16,0	EN 196-1	Normální konzistence [%]	28,2	EN 196-3	
	2 dny	29,7	EN 196-1	Počátek tuhnutí [min]	199	EN 196-3	
	7 dní	50,0	EN 196-1	Konec tuhnutí [min]	280	EN 196-3	
	28 dní	59,8	EN 196-1	Objemová stálost [mm]	1,4	EN 196-3	Le Chatelier
	56 dní	64,0	EN 196-1	Měrný povrch [m ² /kg]	360	EN 196-6	Blaine
	90 dní	66,0	EN 196-1	Měrná hmotnost [kg/m ³]	3080	EN 196-6	
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4,0	EN 196-1	Sypná hmotnost [kg/m ³]	970		cisterna
	2 dny	5,5	EN 196-1	Sypná hmotnost [kg/m ³]	1200-1600		sílo
	7 dní	8,0	EN 196-1	Hydratační teplo [J/g] - 7 dní	335	EN 196-8	
	28 dní	9,2	EN 196-1				
	56 dní	9,3	EN 196-1				
	90 dní	9,4	EN 196-1				

Tabulka 5 Chemické složení použitého cementu CEM I 42,5R

Chemické vlastnosti			
Parametr	Charakteristická hodnota		Metoda
Obsah [%]	CaO	65,3	EN 196-2
	SiO ₂	19,9	EN 196-2
	Al ₂ O ₃	4,3	EN 196-2
	Fe ₂ O ₃	2,6	EN 196-2
	MgO	1,9	EN 196-2
	SO ₃	3,02	EN 196-2
	Cl ⁻	0,087	EN 196-2
	K ₂ O	0,75	EN 196-2
	Na ₂ O	0,12	EN 196-2
Na ₂ O ekvivalent [%]		0,61	EN 196-2
Nepropustný zbytek [%]		1,29	EN 196-2
Ztráta žíháním [%]		3,13	EN 196-2

3.2.2. Vysokopecní struska

Jedním z materiálů, který byl použit jako náhrada cementu byla vysokopecní struska. Přesněji se jednalo o odpadní materiál získaný z Kladna. Již více než 100 let byla tato struska skladována na haldě ve vnějším prostředí a bylo tedy jasné, že je velmi zvětralá. Neměla totiž další využití, jelikož to byl zároveň odpad z produkce lehčeného struskového kameniva. Pro potřeby výzkumu se ale jednalo o přidanou hodnotu, jelikož by všechn tento materiál musel být skládkován. Před zahájením zkoušek však bylo nutné strusku upravit. Provedena tedy byla mechanická aktivace pomocí vysokorychlostního mlýnu. K dispozici byly 3 různé zrnitosti. Obrázek 26 popisuje jednotlivé zrnitostní křivky před a po zpracování mlýnem, kde strusky A a B prošly mikromletím.



Obrázek 26 Zrnitostní křivky odpadní vysokopecní strusky

Struska B byla odebírána ze vzdálenějšího odběrného místa a to znamená, že měla větší podíl jemných a tudíž reaktivních zrn. Tabulka 6 přesněji popisuje chemické složení strusky získané pomocí XRF analýzy.

Tabulka 6 Chemické složení odpadní vysokopecní strusky (Prošek, 2018b)

Chemické složení	Struska A	Struska B
Na ₂ O	2.01	2.16
MgO	5.09	6.42
Al ₂ O ₃	11.27	12.23
SiO ₂	24.07	26.15
CaO	37.97	35.87
SO ₃	4.46	4.88
MnO	1.11	1.21
Fe ₂ O ₃	4.33	6.41
K ₂ O	0.96	1.38
TiO ₂	0.66	0.65
P ₂ O ₅	0.29	0.37
Ostatní prvky menší než 0.1 %	0.44	0.43
LOI	7.33	1.85

Po zpracování měla struska měrný povrch 305 m²/kg a měrnou hmotnost 2932 kg/m³. Ve srovnání s klasickým Portlandským cementem se jedná o příznivější hodnoty povrchu a další potvrzení efektivity metody vysokorychlostního mikromletí. Složení strusky se mletím téměř nezměnilo, důležité ale bylo, že struska B prokázala větší reaktivitu, a tudíž byla zvolena pro

využití v experimentech. Dodatečně pak byla struska aktivována chemicky připojením aktivátoru v podobě vápenného hydrátu do betonové směsi (Prošek, 2018a).

Struskové kamenivo

Nosná konstrukce bloku rovněž obsahovala lehčené struskové kamenivo ze stejného kladenského zdroje. Použité kamenivo bylo ve 2 hlavních frakcích, frakce 0 / 4 mm a dále pak frakce 2 / 8 mm. Jednotlivé poměry frakcí a přesné podíly budou specifikovány v následující kapitole, výsledky experimentů. Pro bližší specifikaci byly použity prohlášení o vlastnostech jednotlivých frakcí, viz Tabulka 7 a Tabulka 8.

Tabulka 7 Bližší specifikace struskového kameniva Frakce 0/4 mm (Karas, 2020a)

Základní charakteristiky	Vlastnosti (vztahující se k použití podle)	
	EN 12620	EN 13242
Tvar zrn, frakce a objemová hmotn.		
- Frakce kameniva	0/4	
- Zrnitost	$G_F 85$	$G_F 85$
- Kategorie tolerance pro typickou zrnitost drobného kameniva	NPD	$GT_F 10$
- Typická zrnitost DK	Síto 4 = 92 % hm. \pm 5 %	Síto 4 = 92 % hm. \pm 5 %
	Síto 1 = 40 % hm. \pm 20 %	Síto 2 = 55 % hm. \pm 10 %
	Síto 0,250 = 15 % hm. \pm 10 %	-
	Síto 0,063 = 7 % hm. \pm 3 %	Síto 0,063 = 7 % hm. \pm 3 %
- Objemová hmotnost	2,460 Mg/m ³	

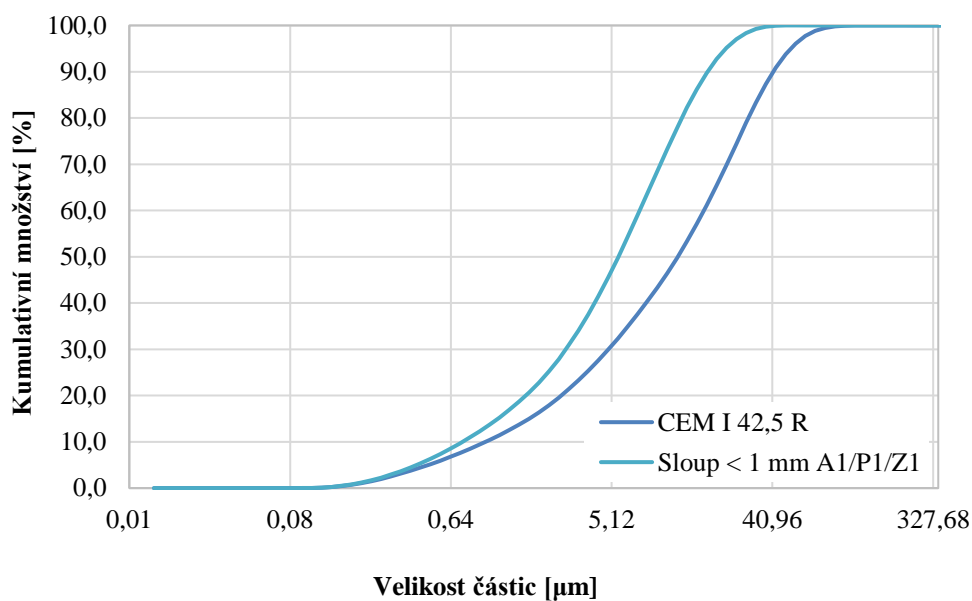
Tabulka 8 Bližší specifikace struskového kameniva Frakce 2/8 mm (Karas, 2020b)

Základní charakteristiky	Vlastnosti (vztahující se k použití podle)	
	EN 12620	EN 13242
Tvar zrn, frakce a objemová hmotnost		
- Frakce kameniva	2/8	
- Zrnitost	$G_C 85/20$	$G_C 85-15$
- Kategorie pro toleranci zrnitosti HK	-	$GT_C 20/17,5$
- Propad na středním síti HK s $D/d \geq 2$	-	37,5 % hm. \pm 17,5 %
- Tvar zrn HK – tvarový index	Sl_{20}	Sl_{20}
- Procentní podíl drcených a lámaných zrn	-	$C_{90/3}$
- Objemová hmotnost	2,400 Mg/m ³	

3.2.3. Betonový recyklát

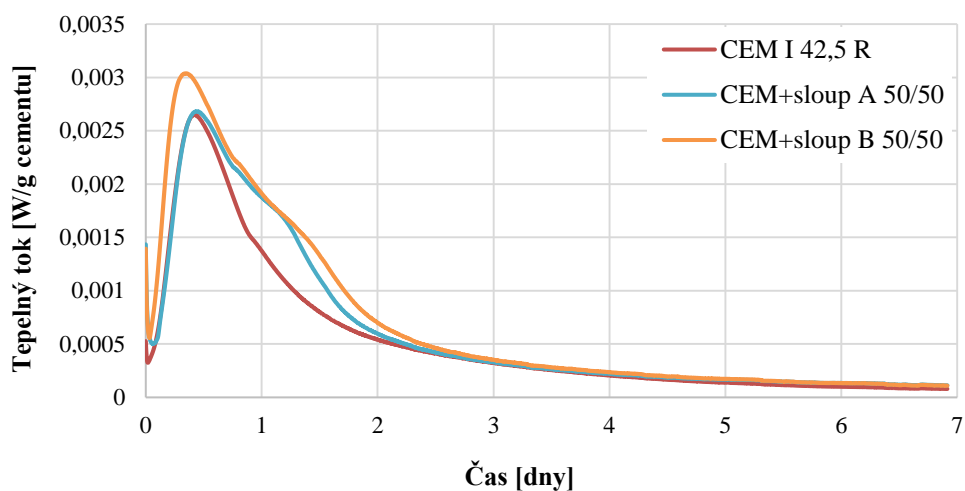
Během experimentů byl dále využit recyklovaný beton. Zdroj materiálu byla přibližně 100 let stará budova, která byla demolována v Praze na Waltrovce. V rámci demolice bylo odebráno více vzorků, avšak použita byla směs konstrukčních betonů různých prvků objektu.

Materiál jako takový byl také před použitím zpracován pomocí vysokorychlostního mlýnu. Dosažení obdobné zrnitostní křivky jako cement mělo za následek aktivaci obsažených minerálů a obnažení nezhydratovaných cementových zrn. Obrázek 27 ukazuje zrnitostní křivky zpracovaného betnového recyklátu v porovnání se standardním Portlandským cementem.



Obrázek 27 Zrnitostní křivka zpracovaného betonového recyklátu (Tesárek a kol., 2017)

Dále byla provedena analýza vývoje hydratačního tepla za použití izotermální kalorimetrie. Pro měření byl použit izotermální kalorimetr TamAIR a výsledky měření naznačuje Obrázek 28.



Obrázek 28 Vývoj tepelného toku za použití betnového recyklátu (Tesárek a kol., 2017)

Byly zde porovnávány křivky standardního Portlandského cementu a směsi cementu s recyklátem z konstrukčního betonu 2 sloupů výše zmíněné budovy v poměru 1 : 1. Kinetika hydratačního tepla byla obdobná jako u cementu, avšak došlo k mírnému poklesu. Prokázalo se tedy, že použití předmětného recyklátu je vhodné pro použití jako cementové pojivo (Tesárek a kol., 2017).

3.2.4. Popílek

Součástí skupiny alternativních pojiv byl i fluidní popílek získaný rovněž z Kladna. Zdrojem materiálu je Teplárna Kladno, s.r.o. Na použitém popílku byla provedena XRF analýza pro zjištění chemického složení. Tabulka 9 popisuje přesněji chemické složení nejvíce zastoupených látek.

Tabulka 9 Chemické složení použitého fluidního popílku

Chemické složení	Obsah [%]
Na ₂ O	0,12
MgO	2,00
Al ₂ O ₃	24,87
SiO ₂	42,38
P ₂ O ₅	0,38
SO ₃	5,99
K ₂ O	1,04
CaO	17,78
TiO ₂	1,92
Fe ₂ O ₃	5,34

Jelikož byly navrženy směsi za použití popílku a strusky, bylo nutné použít fluidní popílek rovněž zpracovat pomocí vysokorychlostního mlýnu. Měrný povrch materiálu před úpravou byl 776 m²/kg a měrná hmotnost byla naměřena 2061 kg/m³. Mechanickou aktivací bylo dosaženo měrného povrchu 905 m²/kg (Ecocal, ČVUT, FF Servis, 2020).

3.2.5. Vápenný hydrát

Hašené vápno bylo na základě předchozích experimentů použito pro chemickou aktivaci zejména odpadní vysokopecní strusky (Horych, 2019). V každém ze vzorků bylo použito

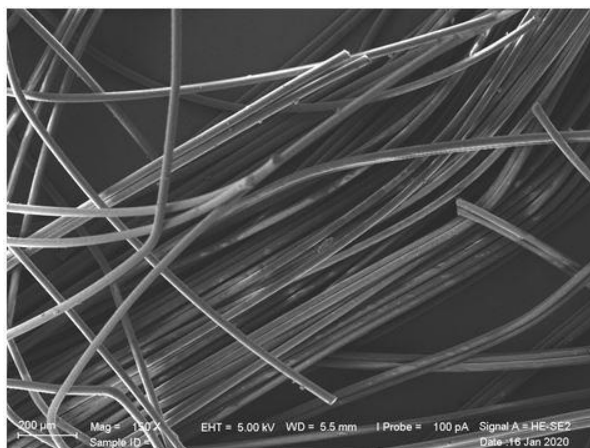
pouze minimální množství, avšak pro podporu tvorby chemických vazeb je potřeba malý podíl. Specifikaci a charakteristiky pro využitý vápenný hydrát ukazuje Tabulka 10.

Tabulka 10 Základní charakteristiky použitého vápenného hydrátu dle (ČSN EN 459-1, 2015)

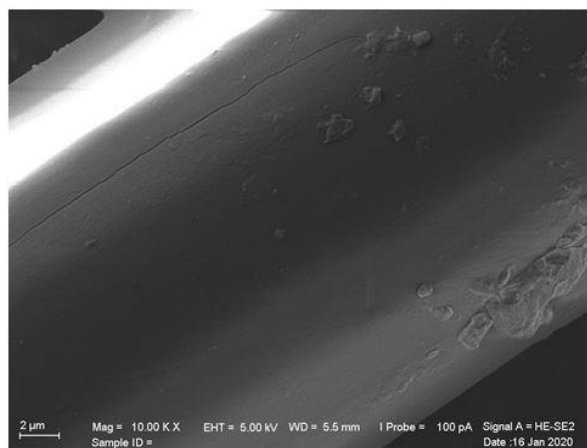
Základní charakteristiky	Hodnota
CaO + MgO	≥ 90 %
MgO	≤ 5 %
CO ₂	≤ 4 %
SO ₃	≤ 2 %
Volné vápno	≥ 80 %
Jemnost, zbytek hmotnosti	0,2 mm ≤ 2 %
Jemnost, zbytek hmotnosti	0,090 ≤ 7 %
Obsah volné vody	≤ 2 %
Objemová stálost (referenční m.)	≤ 2 mm
Penetrace	> 10 mm - < 50 mm
Obsah vzduchu	≤ 12 %
Trvanlivost	4.4.6. - EN 459 - 1

3.2.6. Polypropylenová vlákna

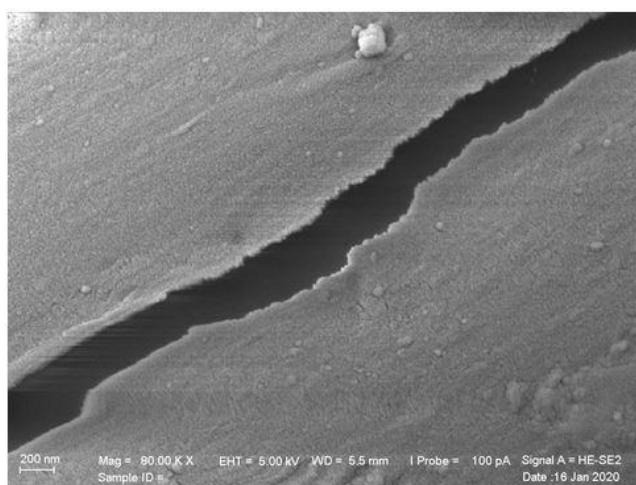
Součástí navrhovaných materiálových matic jsou i polypropylenová vlákna. Materiál jako takový byl poskytnut společností Trevos s. r. o. sídlící v Košťálově. Délka použitých vláken byla 4 mm a jejich výroba probíhala pro výzkumné účely fakulty stavební ze 100 obj. % recyklovaného granulátu. Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu Merlin ZEISS byl zkoumán povrch vláken. Vlákna byla opatřena vodivou vrstvou o tloušťce přibližně 3 nm. Následně byly pořízeny snímky při zvětšení 150×, 10 000×, a 80 000×. Jednotlivé snímky zobrazuje Obrázek 29. Vlákna z recyklovaného granulátu dosáhly vyšších průměrů, než vlákna z primárního granulátu, přesněji 26,0 μm, zatímco u klasických vláken je průměr zhruba 16,1 μm. Dále pak na snímcích vyššího zvětšení byla patrná podélná trhlinka, u které výzkum prokázal, že její přítomnost není u recyklovaných vláken nahodilá.



a) Zvětšení 150×



b) Zvětšení 10 000×



c) Zvětšení 80 000×

Obrázek 29 Pořízené snímky polypropylénových vláken (Prošek & Trejbal, 2019)

Nespornou výhodou pro účely této diplomové práce ale bylo, že se jedná o vlákna z recyklovaného granulátu. Jejich použití ani není zdokumentováno, jelikož nejde o standardní výrobu a vlákna nejsou komerčně dostupná. Nikdo jiný v současné době v České republice recyklovaná vlákna nevyrobí a proto jsou pro experiment jedinečná.

3.3. Výsledky experimentů

V rámci výzkumu proběhlo velké množství důležitých rozhodnutí, která ovlivnila celkový návrh bloků. Zřejmě nejdůležitějším z nich bylo rozhodnutí, která z navržených konfigurací bloku se zdá být nejvíce perspektivní. Pro závěrečné posouzení totiž mohla být vybrána pouze jedna z možností. Díky jednoduchosti výroby a celkové konstrukce bylo zvoleno schéma

číslo 1, tedy tvar ztraceného bednění. Forma na blok se dala jednoduše zkonstruovat a použít. Dalším pozitivem byla, krom jiných věcí, variabilita možných aplikací, například jako obvodové zdivo. Vnitřní prostor by zde byl vyplněn lehkou napěněnou směsí, která zajistí tepelně izolační vlastnosti. Pokud bylo nutné, vše by mohlo být doplněno o tepelnou izolaci, která by ovšem již nebyla hlavním izolantem, ale pouze doplněním pro zajištění požadavků pasivního standardu. Vnitřní prostor bude možné vyplnit jakoukoliv směsí, která bude pro danou aplikaci zapotřebí. Nutnou únosnost bude rovněž možné zajistit vyplněním prostoru pomocí betonové směsi s konstrukčními charakteristikami, například pro opěrné stěny, zděné oplocení, popřípadě i náročnější aplikace.

Jelikož se jednalo o komplexní posouzení vlastností, bylo potřeba vyrobit velké množství rozličných vzorků, které byly následně postupně podrobeny všem výše zmíněným zkouškám. Výroba vzorků probíhala v laboratoři K210, Experimentálního centra na půdě Fakulty stavební ČVUT v Praze.



Obrázek 30 Výroba vzorků v laboratoři

3.3.1. Specifikace výroby

Všechny vzorky byly vyrobeny pomocí stejného postupu pro maximální udržení konstantních vlastností vzorků se stejným složením, avšak jiného tvaru. Celkem byly vyrobeny od každé směsi 2 bloky, 3 standardní krychle $150 \times 150 \times 150$ mm a následně

6 trámečků $40 \times 40 \times 160$ mm. Směs byla postupně nanášena do připravené formy opatřené odbedňovacím nátěrem a hutněna pomocí vibračního stolu. Současně s vibrací byl na vzorky vyvíjen značný tlak pro přiblížení výroby vibrolisovaným prvkům. Po odbednění vzorků byly všechny zabaleny do fólie a ponechány v konstantních podmínkách po dobu 28 dní.



Obrázek 31 Zabalené vzorky během zrání betonu

Před zahájením testování byly vzorky rozřazeny a popsány tak, aby bylo možné provést všechny plánované experimenty a zkoušky. S omezeným počtem vzorků bylo potřeba pečlivě uvážit postup prací, aby nedošlo k částečnému ovlivnění vzorků zkouškami a následnému zkreslení výsledných hodnot.

3.3.2. Specifikace vzorků a vyhodnocení zkoušek

V rámci studie byly zkoumány a uvažovány 2 hlavní druhy směsí, přesněji směsi z označením **T**, jejichž složení odpovídá výsledkům předchozích experimentů (Horych, 2019), a následně směsi s označením **V**, kde je využit i popílek.

U vzorků **T** se jednalo o pojivo s podíly 50 hm. % betonového recyklátu, dále pak 40 hm. % Portlandského cementu, 7,5 hm. % mikromleté zvětralé vysokopecní strusky a 2,5 hm. % vápenného hydrátu jako aktivátoru. Složení směsí **T** ukazuje Tabulka 11, kde můžeme vidět, že bylo použito malé množství pojiva. Například ve směsích **T3** a **T4** bylo obsaženo pouze 10 hm. % pojiva se stejnými podíly složek, což znamená, že zastoupení cementu bylo sníženo na 4 hm. % z celkové hmotnosti bloku. Dále pak z tabulky vyplývá, že

u směsi T4 byly použity polypropylénová vlákna pro zjištění, zda vlákna pomohou zajistit integritu a dostatečnou soudržnost. Zvláště když bylo použito tak malé množství pojiva.

Druhá skupina vzorků měla označení V. Byly to vzorky s nastavenými podíly pojiva a kameniva, avšak za využití jiného pojiva. Stále zde byly obsaženy cement a vysokopecní struska a dále i popílek. Pojivo bylo složeno ze 46 hm. % cementu. Následně se složení dělilo u vzorků V1 a V2. Směs V1 byla doplněna o 54 hm. % vysokopecní strusky a popílku smíchané v poměru 1 : 1. Ve směsi V2 bylo stejné množství strusky a popílku, avšak v poměru 1 : 3. Poslední směs byla nazvána V3 Cem, jelikož se jednalo o referenční vzorek pouze s Portlandským cementem. Tabulka 12 dále popisuje procentuální složení vzorků V.

Tabulka 11 Složení vzorků s označením T – Betonový recyklát a struska (Horych, 2019)

Složka	T1	T2	T3	T4
Pojivo [hm. %]	20	30	10	10
- CEM I 42,5R [hm. %]	40	40	40	40
- Recyklovaný beton [hm. %]	50	50	50	50
- Vysokopecní struska [hm. %]	7,5	7,5	7,5	7,5
- Vápenný hydrát [hm. %]	2,5	2,5	2,5	2,5
Kamenivo [hm. %]	80	70	90	90
- Kamenivo 0/4 [hm. %]	87,5	87,5	87,5	87,5
- Kamenivo 4/8 [hm. %]	12,5	12,5	12,5	12,5
Vlákna [g]	0	0	0	93
Vodní součinitel	0,6	0,6	0,6	0,6
Provzdušňovací přísada [g]	37,2	55,8	18,6	18,6

Tabulka 12 Složení směsí s označením V – Popílek a struska

Složka	V1	V2	V3 Cem
Pojivo [hm. %]	13	13	13
- CEM I 42,5R [hm. %]	46	46	100
- Struska : Popílek 1 : 1 [hm. %]	54	0	0
- Struska : Popílek 1 : 3 [hm. %]	0	54	0
Kamenivo [hm. %]	87	87	87
- Kamenivo 0/4 [hm. %]	87,5	87,5	87,5
- Kamenivo 4/8 [hm. %]	12,5	12,5	12,5
Vlákna [g]	0	0	0
Vodní součinitel	0,6	0,6	0,6
Provzdušňovací přísada [g]	26,0	26,0	26,0

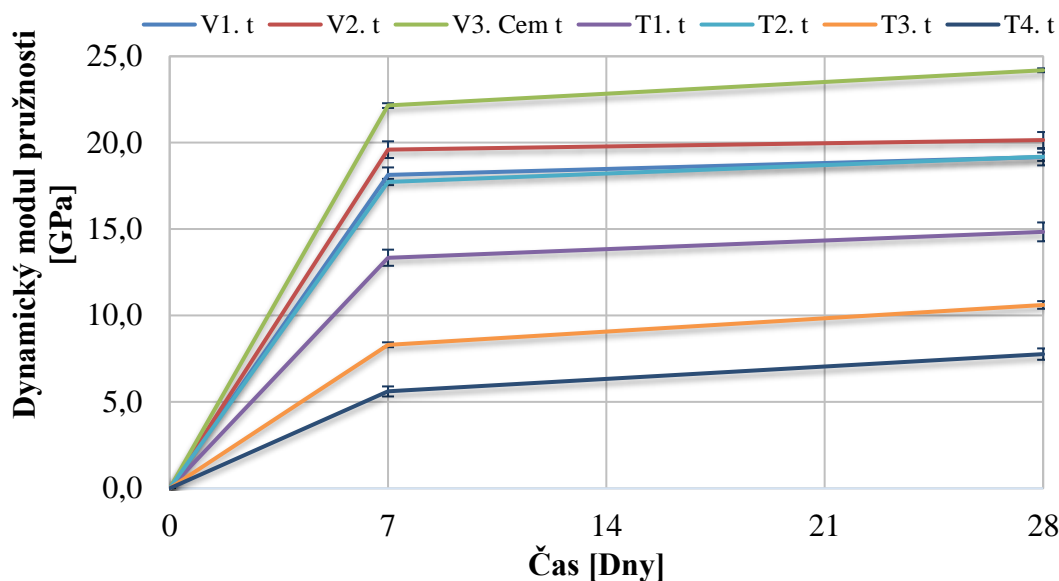
Nutno je rovněž zdůraznit, že struska použitá ve vzorcích V byla stejně zvětralá, jako v předchozím případě. Použitý popílek chemickou reakcí ještě více podpořil a malý nárůst podílu Portlandského cementu jistě také sehrál svou roli.

Součástí informací v tabulkách nebyly přesně specifikovány použité podíly vody. Z důvodu použití rozdílných pojiv o rozdílných vlastnostech, nebylo možné udržet přesný vodní součinitel. Ve specifikacích vlastností jednotlivých pojivových materiálů je zřejmé, že vysokorychlostním mlýnem zpracované materiály mají větší podíl jemných částic než Portlandský cement. Bylo tedy potřeba drobně upravit podíl vody ke správnému obalení všech zrn a tvorbě chemických vazeb. Velký důraz byl ale kladen na dodržení stejné konzistence betonové směsi před uložením do bednění i přes skutečnost, že se vodní součinitel drobně posouval. Pokud by byl vodní součinitel dodržován, některé ze směsí by nebylo možné potřebně zpracovat a směs by byla přespříliš suchá. Cílem bylo udržet výsledné hodnoty sednutí na pomezí kategorií S1 a S2, to znamená ideální sednutí kužele mezi 40 a 50 mm. Poslední složkou každé ze směsí byla provzdušňovací přísada pro jemnou úpravu směsi. Jednalo se přesněji o provzdušňovací přísadu Soudal soudapor (Soudal, 2017) a její podíl byl vždy 1 hm. % celkového z podílu pojiva.

Po dokončení procesu hutnění byly vzorky ponechány v daných formách a odbedněny další den. Avšak co se týče samotných bloků, všechny bloky byly odbedněny do 15 minut od betonáže.

Rezonanční metoda

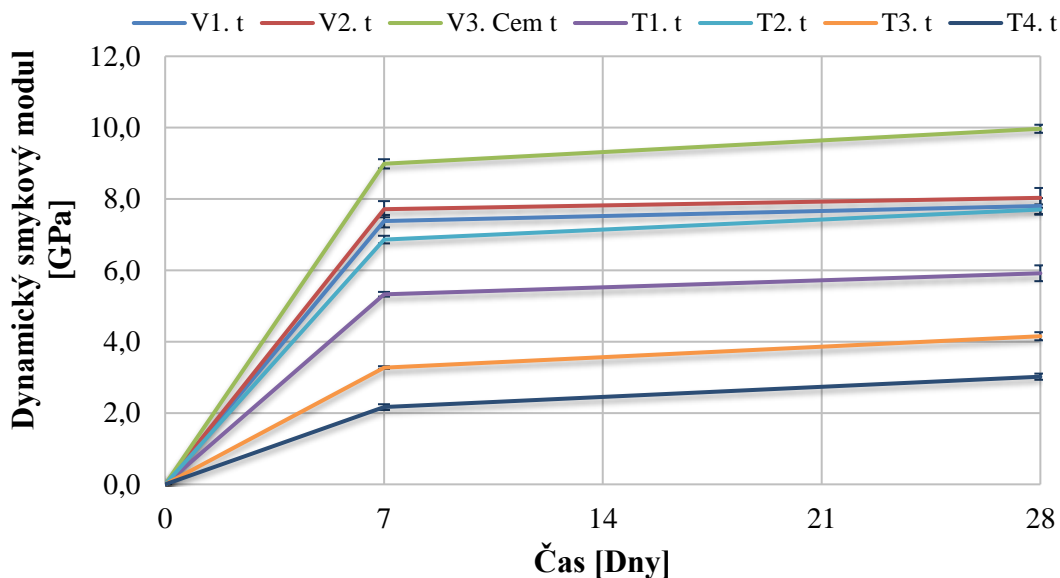
Po 7 dnech od výroby bylo zahájeno nedestruktivní testování pomocí rezonanční metody. Jelikož byl vývoj dynamického a dynamického smykového modulu znám z dříve provedených experimentů, byly hodnoty modulů měřeny a určovány pouze ve stáří 7 a 28 dnů na trámečcích $40 \times 40 \times 160$ mm. Po celou dobu zrání však byly vzorky uchovávány ve stabilním prostředí a zabaleny do ochranné fólie. Vývoj dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu ukazují Obrázek 32 a Obrázek 33. V obou schématech je zřejmý trend nejvyššího nárůstu hodnot v prvních sedmi dnech od vytvoření vzorků. Následně od 7 do 28 dne hodnoty stoupají již pouze mírně a také v obdobném vzoru. Výsledné hodnoty ukázaly, že nejlepšího výsledku dosáhl referenční vzorek V3. Cem bez náhrad. S rozdílem zhruba 5 GPa byly konečné hodnoty modulů u vzorků V2. t, V1. t a T2. t. Zmíněné vzorky dosáhly výsledků okolo 20 GPa, což naznačuje velmi slibný průběh. Vzorek T2. t obsahuje 12 hm. % Portlandského cementu a v případě vzorků V1. t a V2. t se dokonce jedná o podíl pouze necelých 6 hm. % z celkové hmotnosti surovin ve směsi.



Obrázek 32 Vývoj dynamického modulu pružnosti s vyznačenou směrodatnou odchylkou

Konečné hodnoty zhruba 15 GPa dosáhl vzorek T1. t, kde se již začal projevovat zmenšující se podíl pojiva ve směsi. Nejnižších výsledků dosáhly vzorky T3. t a T4. t, přesněji 11 a 7,5 GPa. Mohlo by se zdát, že se jedná o velmi nízké hodnoty a špatné výsledky, avšak faktem zůstává, že v těchto vzorcích byl podíl pouze 10 hm. % pojiva a tím pádem 4 hm. % Portlandského cementu. Tak nízké podíly by měly za příčinu naprostou nefunkčnost téměř jakéhokoliv prvku či konstrukce. Ačkoliv je složení posledních vzorků téměř identické, rozdíl mezi nimi byl poměrně značný. Vzorek T4. t totiž obsahuje navíc podíl recyklovaných polypropylénových vláken. Původní idea byla taková, že vlákna pomohou prvku překonávat působící napětí a budou napomáhat k udržení integrity bloku. Zdá se ale, že podíl pojiva byl pro jejich použití příliš malý. Pojivový materiál totiž musel obalit nejen nosnou kostru prvku v podobě struskového kameniva, ale i přidaná vlákna. Nedošlo tedy k řádnému propojení všech složek ve směsi, což mělo za následek tak dramatický pokles hodnoty dynamického modulu pružnosti.

Výsledky zkoušek dynamického smykového modulu ukázaly stejný trend jako dynamický modul pružnosti. Referenční vzorek dosáhl hodnoty cca 10 GPa a dále pak došlo k poměrově stejným redukcím jednotlivých hodnot. Vzorky V1. t, V2. t a T2. t opět mají téměř stejný výsledek a nejhorší výsledky měly vzorky T3. t a T4. t.



Obrázek 33 Vývoj dynamického smykového modulu s vyznačenou směrodatnou odchylkou

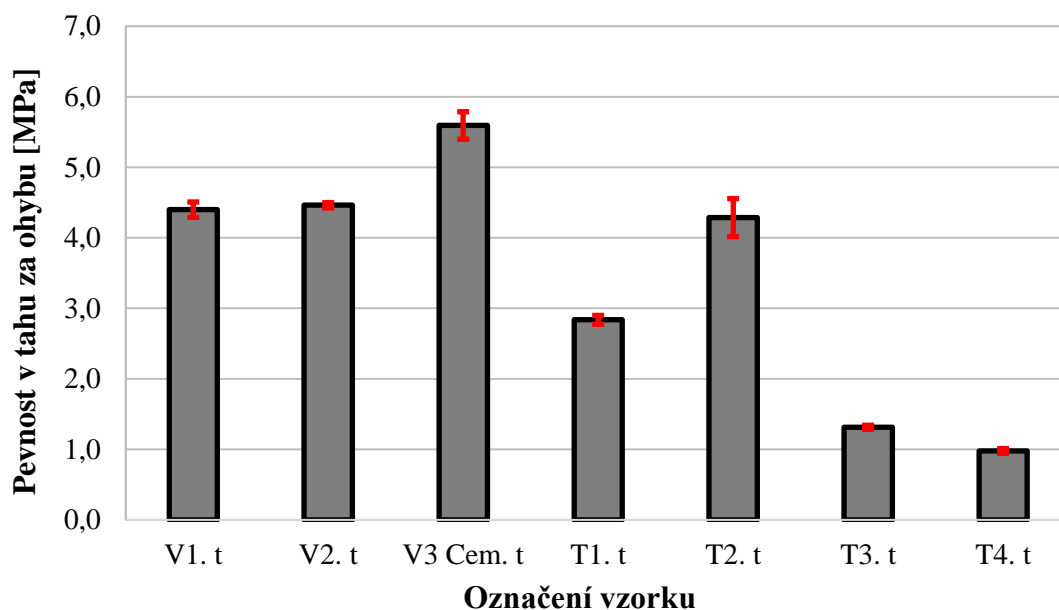
Vývoj dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu probíhal u všech vzorků v téměř stejném vzoru. Výsledky vzorků T4. t byly nižší, než bylo očekáváno, avšak výsledky ostatních vzorků byly velmi slibné.

Pevnost v tahu za ohybu

Uplynutím časového intervalu 28 dní byly ukončeny testy dynamických modulů a destruktivní testy začaly zkouškou pevnosti v tahu za ohybu klasickým 3-bodovým ohybem. Zkouška probíhala opět na trámečcích o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm a pomocí jednoduchého výpočtu bylo specifikováno maximální tahové napětí, které byl vzorek schopen přenést. Konečné hodnoty ukazuje Obrázek 34 a můžeme si zde hned všimnout, že referenční vzorek V3 Cem. t dosáhl pevnosti 5,6 MPa. Následně pak s rozdílem 1 MPa, přesněji hodnoty cca 4,5 MPa dosáhly vzorky V1. t, V2. t a T2. t. Je zde tedy zřejmý obdobný trend jako u výsledků dynamických modulů pružnosti. Zmenšující se podíl pojiva ve směsi se pak projevil i na výsledcích ostatních vzorků. Například vzorek T1. t měl pevnost v tahu za ohybu necelé 3 MPa a vzorky s podílem 10 hm. % pojiva dokonce dosáhly hodnot pouze okolo 1 MPa.

Na výsledcích se projevil očividně nízký podíl pojiva ve všech směsích. Podíl cementu měl stále vliv na výsledné pevnosti, avšak s přidavkem alternativních pojivových materiálů se podařilo propad stabilizovat a nedošlo tak k dramatickému poklesu měřených hodnot. Vysokopecní struska i popílek totiž mají velmi pozitivní vliv na pevnost v tahu za ohybu.

Dalo by se tedy předpokládat, že větší zastoupení těchto materiálů by pomohlo pevnost v tahu za ohybu více stabilizovat, či dokonce zvýšit.

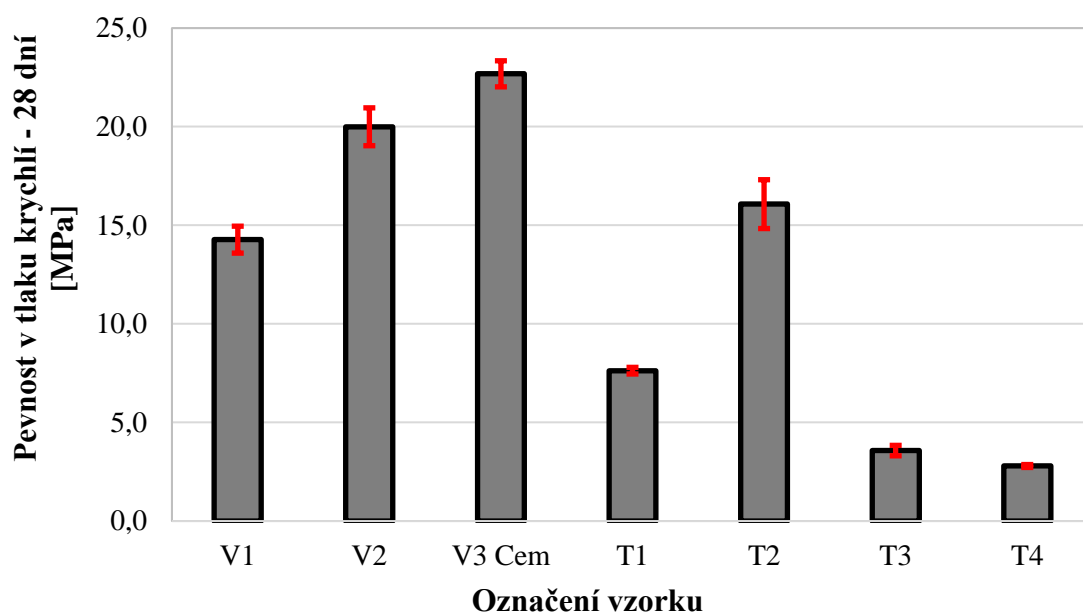


Obrázek 34 Výsledné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu s vyznačenou směrodatnou odchylkou

Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu byly mírně nižší, než bylo předpokládáno, jelikož vzorky obsahovaly vysokopecní strusku a popílek. Pozitivní vliv těchto materiálů byl zřejmě omezen množstvím pojiva ve směsích, avšak pozitivní efekt byl stále znatelný.

Pevnost v tlaku – 28 dní

V daném čase 28 dní od výroby vzorků však bylo potřeba provést další zkoušky, a to jednoosou pevnost v tlaku vyrobených krychlí o rozměrech 150 × 150 × 150 mm. Testy probíhaly na větším lisu EDB 400 a sledována byla maximální vnášená tlaková síla způsobující destrukci prvku. Obrázek 35 popisuje naměřené pevnosti v tlaku na krychlích. Stejně jako v předchozích případech nabyli nejvyšších hodnot referenční vzorek pouze s cementem, tedy zhruba 22,6 MPa. S hodnotami kolem 20 MPa byly výsledky vzorku V2 hodnoceny velmi kladně. Vzorky V1 a T2 opět získaly velmi podobné výsledky. Vzorek T2 měl pevnost v tlaku 16 MPa a vzorek V1 14,2 MPa. Dle očekávání zde rovněž hrál velkou roli podíl pojiva u dané směsi. Výsledné hodnoty vzorků T1 byly cca 7,5 MPa a výsledky posledních směsí se pohybovaly kolem 3 MPa. Stejně jako v předchozích zkouškách, vzorky T3 a T4 měly nejhorší výsledek.



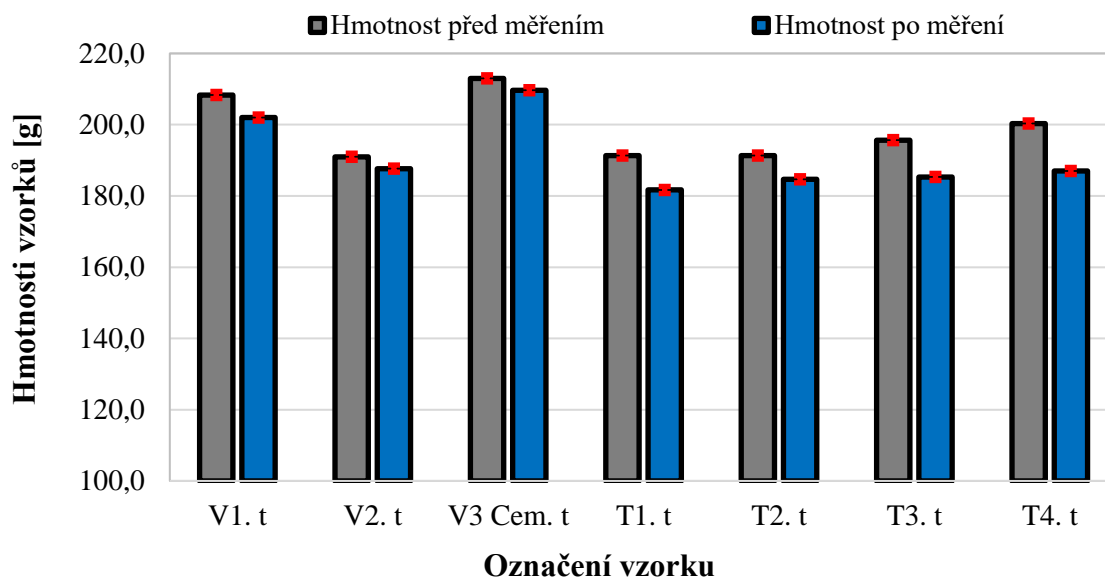
Obrázek 35 Výsledné hodnoty pevnosti v tlaku krychlí s vyznačenou směrodatnou odchylkou

Naměřené koncové hodnoty pevností v tlaku byly téměř u všech vzorků s označením T lehkým zklamáním. Předpoklad byl u těchto vzorků vyšší, avšak menší pevnost lze zdůvodnit pomaleji reaktivními materiály. Dané výsledky tedy nebyly považovány za konečné a bylo očekáváno další zlepšení hodnot. Naopak Vzorek V2 dosáhl na velmi vysoké hodnoty i s menším objemem pojiva a podílem fluidního popílku.

Odolnost proti zmrazování a rozmrazování

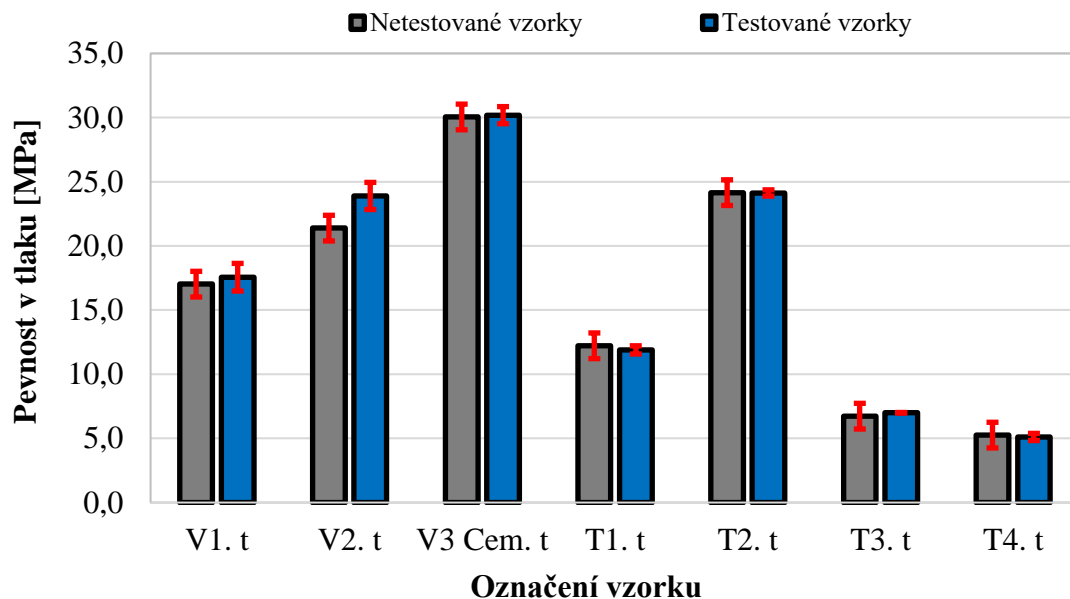
Vzorky, které byly použity na zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byly po dokončení zkoušek odebrány, aby mohly být využity na pozdější určení pevnosti v tlaku. Část z nich byla rovněž upravena a podrobena zkoušce zmrazování a rozmrazování. Jednalo se totiž o další zkoušku nutnou pro ověření posuzovaných vzorků. Byly posuzovány zejména 2 hlavní charakteristiky, a to hmotnost a pevnost v tlaku. Vlivem mrazu totiž může dojít k narušení prvku a postupnému odlupování vnějších vrstev. Hlavním zájmem tedy bylo zjistit efekt zmrazovacích cyklů na integritu prvku. První z vyšetřovaných vlastností, kterou je hmotnost neboli objem odlupovaného materiálu blíže specifikuje Obrázek 36. Ihned si můžeme všimnout, že zmrazovací cykly měly efekt na všechny posuzované vzorky, avšak k žádnému dramatickému propadu nedošlo. Nejméně byly ovlivněny vzorky V3 Cem, t, tedy referenční. Dále pak vzorky V1, t, V2, t a T2, t a u ostatních vzorků došlo k výraznější ztrátě hmotnosti.

Zdá se tedy, že vzorky, které prokázaly vyšší pevnosti tahu za ohybu i pevnosti v tlaku jsou méně náchylné na vystavení mrazu. I když byly vzorky vystaveny stejnému tlaku, pevnostní charakteristiky zde rovněž rozhodují. K největší ztrátě hmotnosti došlo u vzorku T4. t, ale ani zde nebyl zaznamenán velký úbytek. Vzorky tedy nebyly výrazně ovlivněny zmrazovacími cykly.



Obrázek 36 Porovnání hmotnosti vzorků před a po zkoušce odolnosti proti zmrazování a rozmrazování s vyznačenou směrodatnou odchylkou

Dalším sledovaným atributem byla pevnost v tlaku a vliv zmrazovacích cyklů na ni. I když nedošlo k výrazné ztrátě hmoty, mohlo dojít k vnitřnímu poškození a tím pádem ovlivnění pevnosti v tlaku. Výsledky měření ukazuje Obrázek 37. Nehledě na hodnoty, výsledky jasně naznačují, že zkouška odolnosti proti zmrazování a rozmrazování neměla na vzorky žádný vliv. Vzorky dosáhly téměř přesně stejných výsledků. U vzorků V1. t, V2. t a V3 Cem t. jsou dokonce hodnoty testovaných vzorků mírně vyšší než u vzorků, které zmrazováním neprošly. Jev by se ale dal vysvětlit malou odchylkou měření, či drobnými nedokonalostmi v kostře netestovaných vzorků, což společně s nulovým vlivem zkoušky zapříčinilo tento neobvyklý výsledek. Drobný pokles hodnot pevnosti v tlaku nastal pouze u vzorků T1. t, T2. t a T4. t. Jednalo se ale pouze o nízké jednotky %, a tudíž nebyla těmto poklesům přikládána žádná váha.

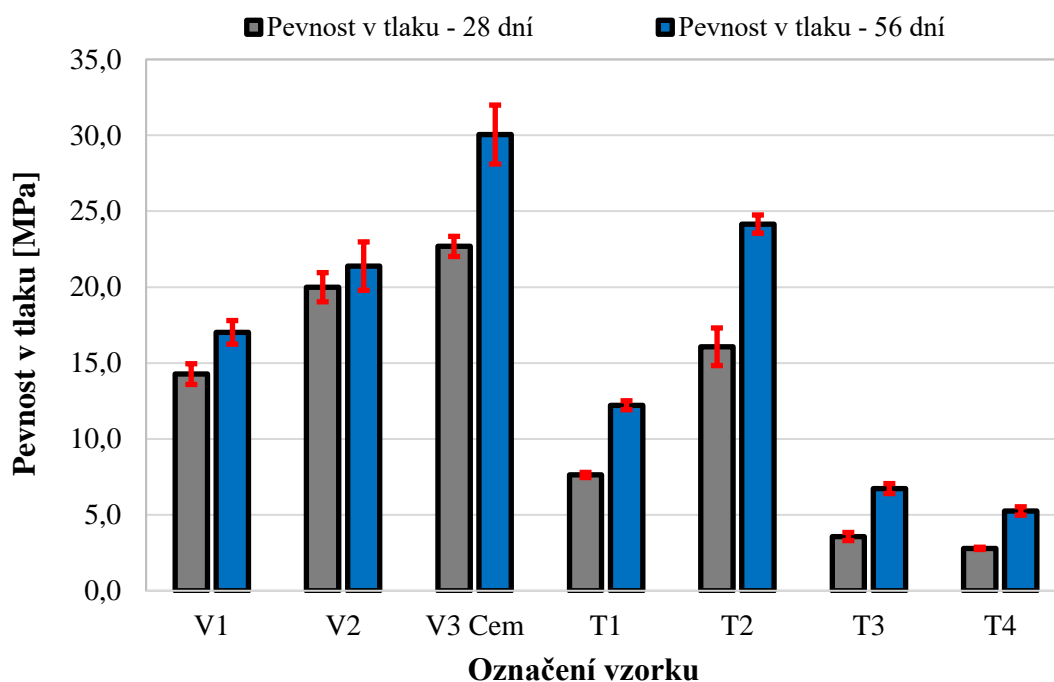


Obrázek 37 Porovnání pevnosti v tlaku testovaných a netestovaných vzorků s vyznačenou směrodatnou odchylkou

Celkově zkouška proběhla velmi hladce a s velmi příznivými výsledky. Jelikož zatím neproběhlo žádné obdobné testování, nedal se předpokládat žádný odhad. Všechny vzorky ale prošly zkouškou a posunuly se tak dále k potenciálnímu využití v praxi.

Pevnost v tlaku – 56 dní

Pevnost v tlaku již byla ověřována ve stáří 28 dnů, avšak v rámci studie byla potřeba vyšetření dlouhodobého vývoje. Zkouška byly prováděna na vzorcích $40 \times 40 \times \sim 80$ mm, tedy vzorky ze zkoušení pevnosti v tahu za ohybu a jejich část byla vystavena zmrazovacím cyklům. Zde se jednalo o vzorky, které nebyly testovány. Porovnání výsledných hodnot popisuje Obrázek 38 je zde velmi dobře znatelný vliv času na výsledné pevnosti. U všech vzorků došlo až k dramatickému zvýšení hodnot. Svou roli zde hrál jistě i takzvaný „Sizeeffect“, který zapříčiňuje mírně rozdílný výsledek pevnosti v tlaku pro vzorky jiného tvaru a velikosti. Rozhodně ale nebyly posuny způsobeny pouze tímto jevem. S jistotou můžeme říci, že zde zapracovaly i použité náhradní pojivové materiály s pomalejší a méně bouřlivou reakcí. U vzorků V1 a V2 došlo již pouze k mírnému zvýšení, což znamená, že téměř všechna reaktivní zrna se aktivovala v prvních 28 dnech. Naopak vzorky T1, T3 a T4 po 56 dnech nabyly až dvojnásobné pevnosti, což je bez pochyby práce podílu betonového recyklátu a vysokopecní strusky obsažených v daných směsích. Vzorek T3 se posunul na hodnotu téměř 7 MPa a tato hodnota ve více než dostačující na použití pro obvodové bloky.



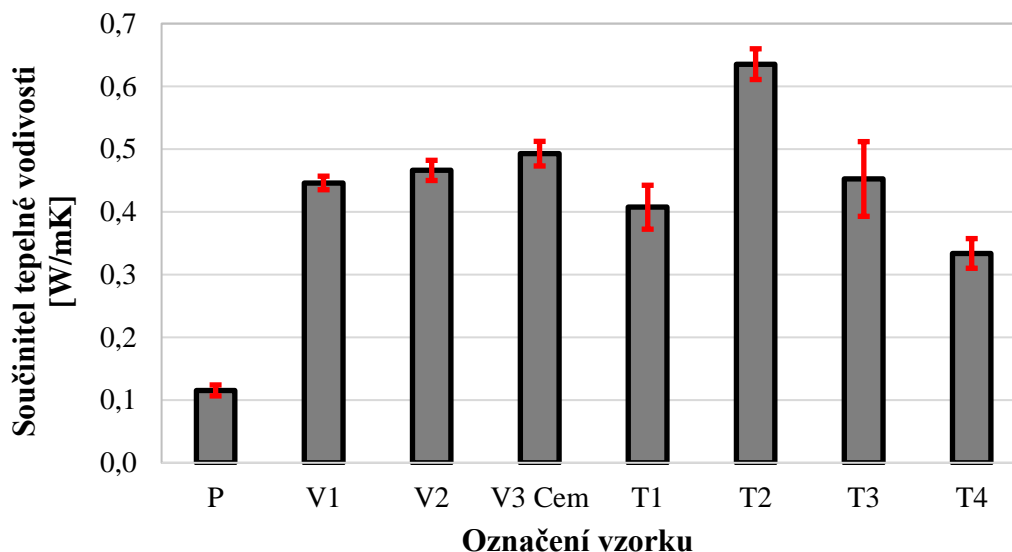
Obrázek 38 Porovnání pevnosti v tlaku ve stáří 28 a 56 dnů od výroby s vyznačenou směrodatnou odchylkou

Dle očekávání došlo k dalšímu nárůstu výsledných hodnot pevnosti v tlaku. Zmíněný posun byl téměř u všech vzorků velmi výrazný a pevnost v tlaku byla následně vyhodnocena jako slibná a perspektivní.

Součinitel tepelné vodivosti

I přes plánovanou tepelně izolační výplň bylo měření součinitele tepelné vodivosti velmi důležitým milníkem v rámci studie. Pro zajištění co možná nejlepších tepelně izolačních vlastností bloku je potřeba vyšetřit i nosnou skořápku. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti byly měřeny na vyrobených blocích, u kterých byly měřeny vždy 3 hodnoty. Následně byly naměřené hodnoty zprůměrovány pro danou směs. Konečné naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ ukazuje Obrázek 39. Nejvyšší hodnoty dosáhl jednoznačně vzorek T2. Dalo by se předpokládat, že tak vysokého výsledku bylo dosaženo díky vyššímu podílu pojiva vůči ostatním vzorkům. Došlo ke komplexnějšímu vzniku chemických vazeb, v důsledku čehož materiál lépe vede teplo. V rozmezí hodnot 0,4 až 0,5 W/mK pak skončily téměř všechny ostatní vzorky, přesněji vzorky V1, V2, V3 Cem, T1 a T3. Díky nízkým pevnostním charakteristikám měl z původní sady vzorků nejpříznivější výsledek vzorek T4 s hodnotou 0,33 w/mK. Rovněž si můžeme všimnout, že se na obrázku vyskytuje vzorek

s označením P mimo posuzované směsi. Jedná se o napěněný materiál, který by byl potenciálně využit jako tepelně izolační vložka uvnitř konstrukce prvku bez nosné funkce. Průměrný součinitel tepelné vodivosti této pěny byl přesněji 0,11 W/mK. Přesněji jde o směs sádrového recyklátu, recyklovaných polypropylénových vláken a pěnotvorné přísady Mapei Air LP800. Neobsahuje žádný přírodní materiál a po napěnění má velký potenciál pro využití v navrhovaném prvku jako tepelně izolační výplň (Prošek, 2019).



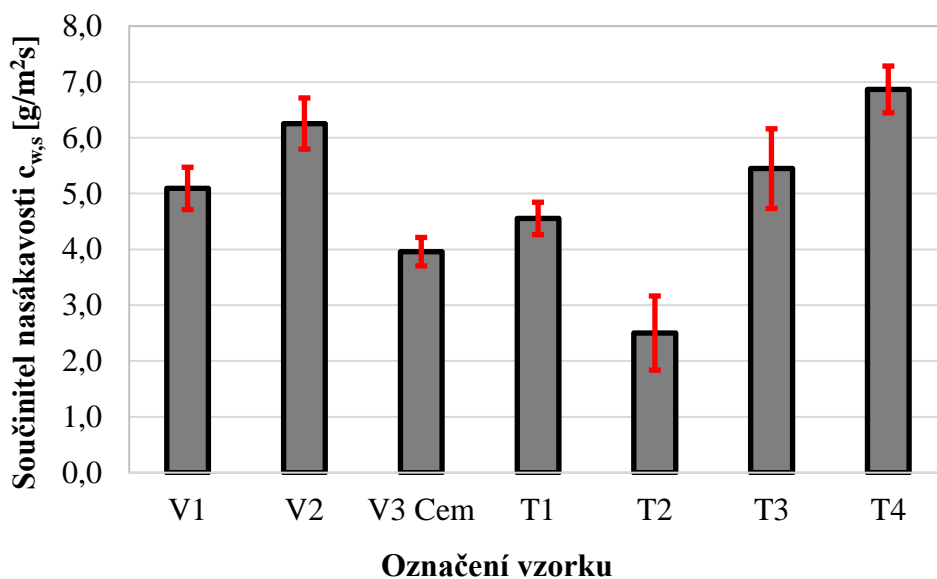
Obrázek 39 Výsledné hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ s vyznačenou směrodatnou odchylkou

V rámci posuzovaných směsí nedošlo k výraznému překvapení. Rozdíl mezi vzorky s největší pravděpodobností tvořil podíl pojiva v dané směsi. Ve všech směsích byla použita provzdušňovací přísada, avšak sama o sobě by nezpůsobila takovou změnu hodnot. Svou roli zde rozhodně sehrálo i použité struskové kamenivo. Pokud se podíváme na hodnoty standardního betonu, hodnota součinitele tepelné vodivosti se pohybuje okolo hodnot 1,2 až 1,3 W/mK. Za použití struskového kameniva se dostaneme na hodnotu cca 0,6 až 0,7 W/mK. Zohledníme-li vliv provzdušňovací přísady, přiblížíme se hodnotám naměřeným v experimentu.

Nasákavost vlivem kapilarity

Další z prováděných zkoušek byla nasákavost vlivem kapilarity prvku. Na experiment byly použity stejné vzorky jako v předchozím případě testování tepelné vodivosti. Příprava vzorků ale bylo poněkud složitější, protože bylo potřeba vzorky řádně vysušit v sušárně. Po

dokončení příprav byla nasákavost změřena dle příslušné normy. Výsledkem celé zkoušky bylo určení součinitele nasákavosti vlivem kapilarity $c_{w,s}$ pro každý vzorek. Měřeno bylo vždy celkem 6 vzorků od každé směsi a na konci byly hodnoty součinitele nasákavosti zprůměrovány pro danou směs. Sledovány byly rovněž procentuální přírůstky hmotnosti vzorků, avšak norma určuje výsledek zmíněným součinitelem. Konečné hodnoty představuje Obrázek 40 a výsledky odpovídají předcházejícím experimentům. Nejnižších a tedy nejprůzračnějších výsledků dosáhl vzorek T2, kde množství pojiva opět rozhodlo ve prospěch směsi. Struktura vzorku je méně pórovitá a tudíž absorbuje i méně vody. Hodnota součinitele nasákavosti se pohybovala okolo $2,5 \text{ g/m}^2\text{s}$. Dále byly vzorky V3 Cem a T1 s hodnotami 4 a $4,5 \text{ g/m}^2\text{s}$. Vzorek T1 měl sice větší podíl pojiva, avšak větší objem Portlandského cementu ve směsi zajistil vzorku V3 Cem mírně nižší výsledek. Nejhůře potom dopadly směsi V2 a T4, které měly součinitel nasákavosti větší než $6 \text{ g/m}^2\text{s}$. Póry ve vzorcích byly z velké části propojeny a pojmuly tak do sebe větší množství vody.

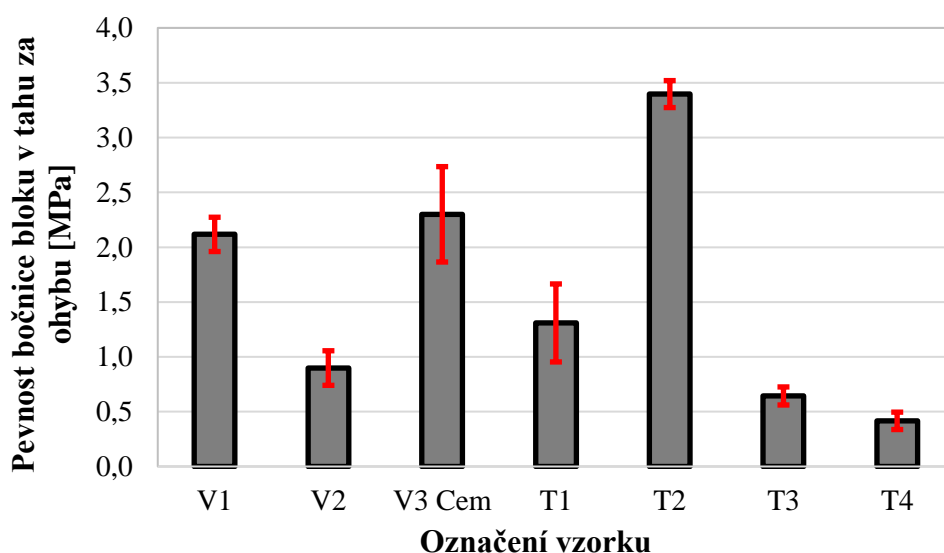


Obrázek 40 Průměrné hodnoty součinitele nasákavosti $c_{w,s}$ s vyznačenou směrodatnou odchylkou

Nasákavost vlivem kapilarity ještě nebyla v rámci studie prováděna, tudíž nešlo výsledky předvídat či odhadovat. Celkově ale výsledky korespondují se všemi předchozími zkouškami. Norma rovněž ani neurčuje limitní hodnotu i když je jasné, že je dobré mít výsledky co nejprůzračnější. Zkouška mrazuvzdornosti, která by mohla případně působit problémy ve spojitosti s vodou ale dopadla velmi pozitivně. Rozhodující ale budou další zkoušky.

Pevnost bočnice v tahu za ohybu

Alternativní aplikace navrhovaných prvků by mohlo být ztraceno bednění a zde není tak důležitá únosnost prvku. Hlavní nosnou a propojovací funkci přebírá výplňový beton vylévaný do vnitřních prostor. Je ale velmi důležité, aby nebyla integrita bloku narušena v době vylití výplňové směsi a prvek byl schopen přenést dočasná zatížení na vnitřní stranu stěn. Primární funkce počítá s velmi lehkou tepelně izolační sádrovou výplní, která nebude vyvozovat téměř žádné zatížení, avšak tlak výplňové betonové směsi na stěny bude výrazně vyšší. Pevnosti stěn v tahu za ohybu daných prvků popisuje Obrázek 41. Pro zkoušku byly využity vzorky dříve nařezané z jednotlivých bloků neovlivněné předešlymi experimenty. Jednoznačně nejvyšší pevnost v tahu za ohybu měly vzorky s označením T2, což odpovídá většímu podílu pojivových materiálů a rovněž použití vysokopecní strusky, která tuto charakteristiku velmi pozitivně ovlivňuje. Vzorky V1 a V3 Cem dosáhly obdobných výsledků s hodnotami okolo 2,3 MPa. U ostatních vzorků se bohužel opět projevil malé objemy pojiva ve směsích. Vzorek T1 měl pevnost v tahu za ohybu zhruba 1,3 MPa a zbytek hodnot byl nižší než 1,0 MPa. Výsledné hodnoty vzorku V2 byly výrazně redukovány oproti zkoušce v tahu za ohybu. Jev byl zřejmě zapříčiněn nehomogenitami ve zkoušeném prvku, nebo při výrobě došlo k nedokonalému zhutnění vyráběného prvku. Hodnota tedy byla považována za neprůkaznou, jelikož ve zkoušce v tahu za ohybu na trámečcích byly výsledky srovnatelné se vzorky V1 a V3.

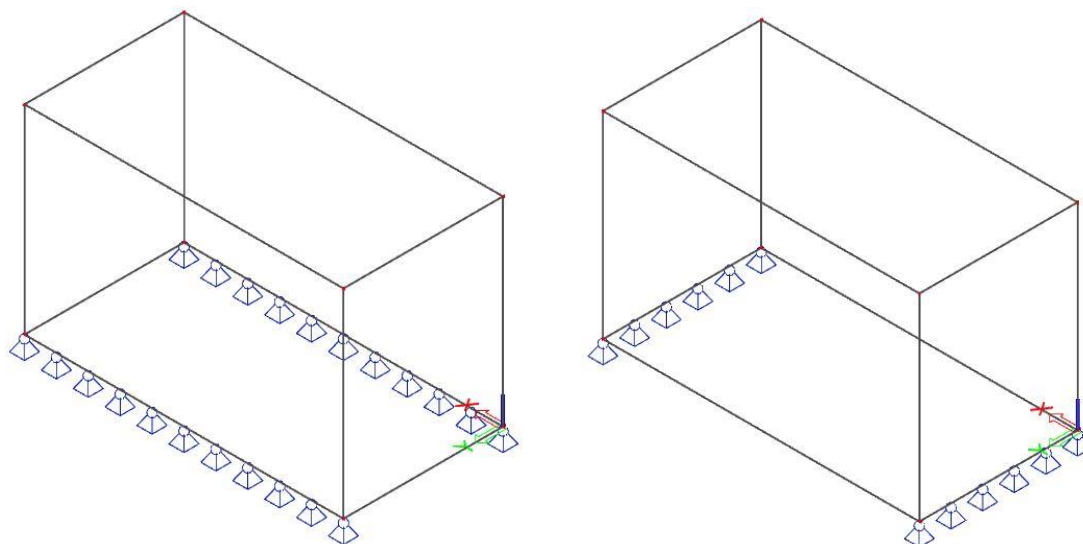


Obrázek 41 Výsledné pevnosti bočních stěn v tahu za ohybu s vyznačenou směrodatnou odchylkou

Výsledné hodnoty zkoušky bočních stěn nedopadly zcela dle očekávání, u vzorků T3 a T4 byla představa poněkud vyšší a výsledek vzorku V2 byl prohlášen za neprůkazný. Ve skutečnosti by byl výsledek výrazně vyšší. Avšak výplňový beton se do vnitřních prostor přidává postupně po menších vrstvách, které jsou potřeba po částech hutnit a prokládat ocelovou výztuží. Dané vrstvy se následně nechají zatvrdnout 24 hodin.

3.3.3. Rozložení napětí v bloku

Během zpracování studie byl zaujat postoj prvky popsat a posoudit co možná nejlépe. Pro detailnější vyšetření bylo tedy rozhodnuto, že bude prozkoumáno i rozložení napětí na prvku. Jednoduchá konstrukce bloku se zdála po celou dobu velmi výhodnou, avšak co se týče roznášení zatížení by tomu tak být nemuselo. K účelům vyšetření byl použit software SCIA Engineer, ve kterém byl prvek vymodelován a zatížen. Zároveň byly během tvorby modelu zahrnuty dříve naměřené mechanické vlastnosti jako moduly pružnosti a pevnostní charakteristiky. Vzorek, který byl vybrán pro toto posouzení, byl vzorek T3, jelikož se jednalo o nejméně příznivou možnost. V téměř všech zkouškách měl horší charakteristiky než ostatní vzorky, avšak pro účely stavebních bloků není požadavek na pevnost v tlaku příliš dramatický. Prvek byl tedy vymodelován jednoduše jako stěnový systém s přesnými rozměry bloku. Uvažovány byly 2 základní varianty uložení bloků. První z nich byla varianta podélného podepření, viz Obrázek 42 (vlevo), a dále pak příčné podepření na obrázku vpravo.

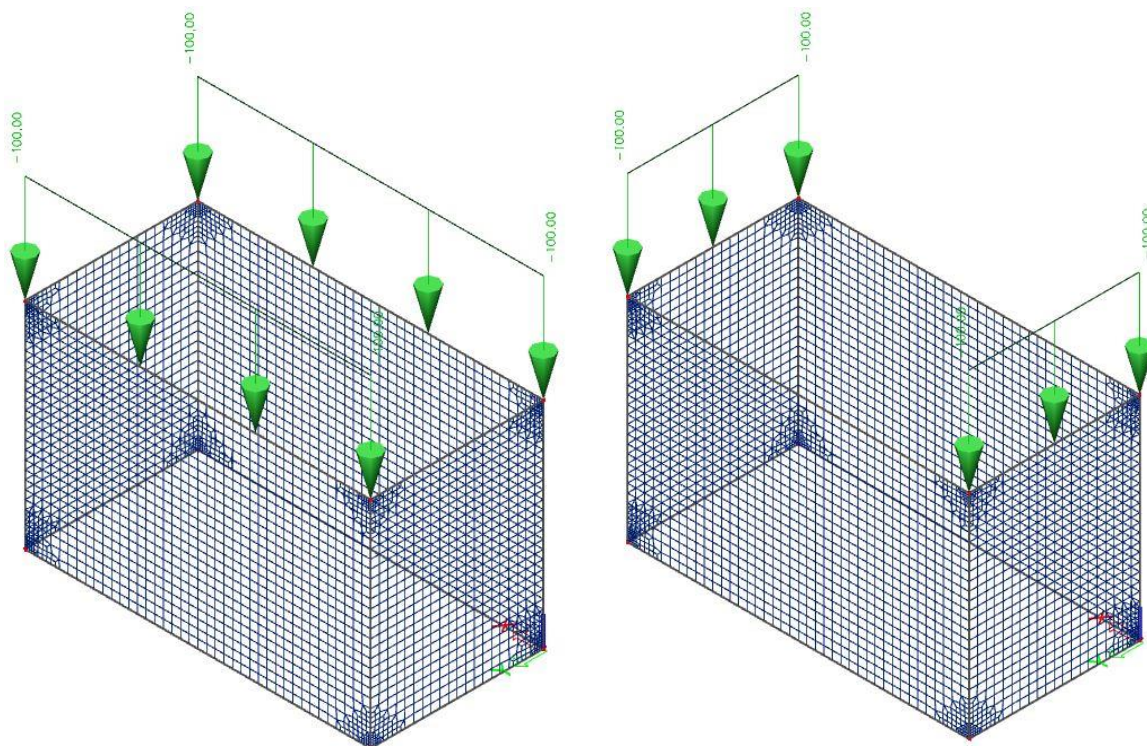


Obrázek 42 Schémata uvažovaných variant uložení bloku

Varianty byly vytvořeny na základě rozdílného roznášení zatížení, jelikož se tím i kompletně mění rozložení napětí v bloku. Z valné většiny prvek nebude podpírán po celém

obvodu, avšak dle uvedených schémat. Pokud by bylo uvažováno toto podepření, blok by byl více stabilizován, což by opět mělo velký vliv na rozložení napětí. Je tedy velmi důležité, zda bude stěna vyzděna s bloky kladenými podélně (běhounový systém) či příčně (vazákový systém).

Dle předchozího schématu byly jednotlivé varianty zatěžovány. Zatížení na prvek bude předáváno pomocí bloků, které budou se skladbě nad ním. Byly tudíž zatěžovány jen ty dané stěny prvku, které jsou i podpírány. Obrázek 43 zobrazuje schéma zatížení dle jednotlivých variant. Podélné zatížení je popsáno na obrázku vlevo a příčné zatížení vpravo. Uvažované zatížení bylo nastaveno na liniové o hodnotě 100 kN/m. Pro výpočet vnitřních sil a napětí bylo následně potřeba navrhnout síť na jejímž základě bude probíhat výpočet metodou konečných prvků. Daná síť je rovněž zřejmá ze zobrazených schémat a u obou variant byla navržena stejně. Základní velikost jednoho prvku sítě byla 10×10 mm, přičemž v každém rohu prvku byla síť dále zhuštěna. Poloměr zahuštění byl uvažován 30 mm od rohu, tak aby byly co nejvíce omezeny špičky vypočteného napětí.

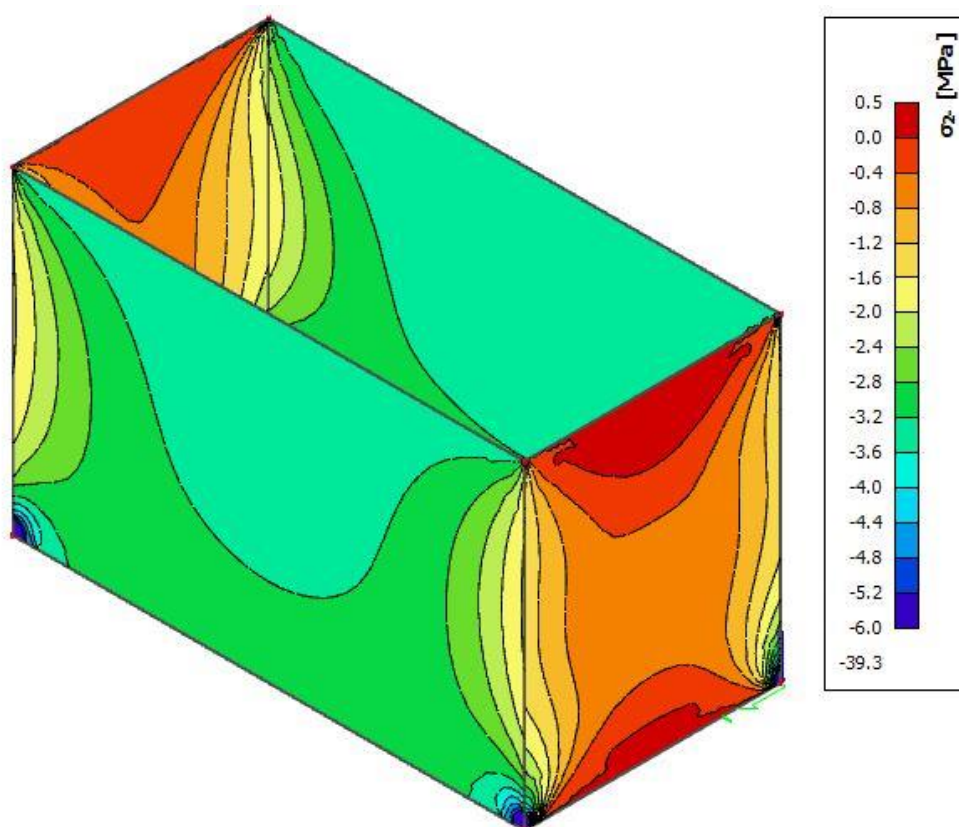


Obrázek 43 Schémata zatížení a rozložení sítě na modelu

Jak již bylo zmíněno, výpočet probíhal pomocí metody konečných prvků. Pro každý prvek sítě tedy bylo posouzeno zatížení, na základě čehož byla vypočítána napětí v prvku.

Výsledné napětí bylo vykresleno a rozděleno do barevného spektra pro vyšší názornost. První ze schémat zobrazující Obrázek 44 ukazuje jak by bylo napětí rozloženo po prvku,

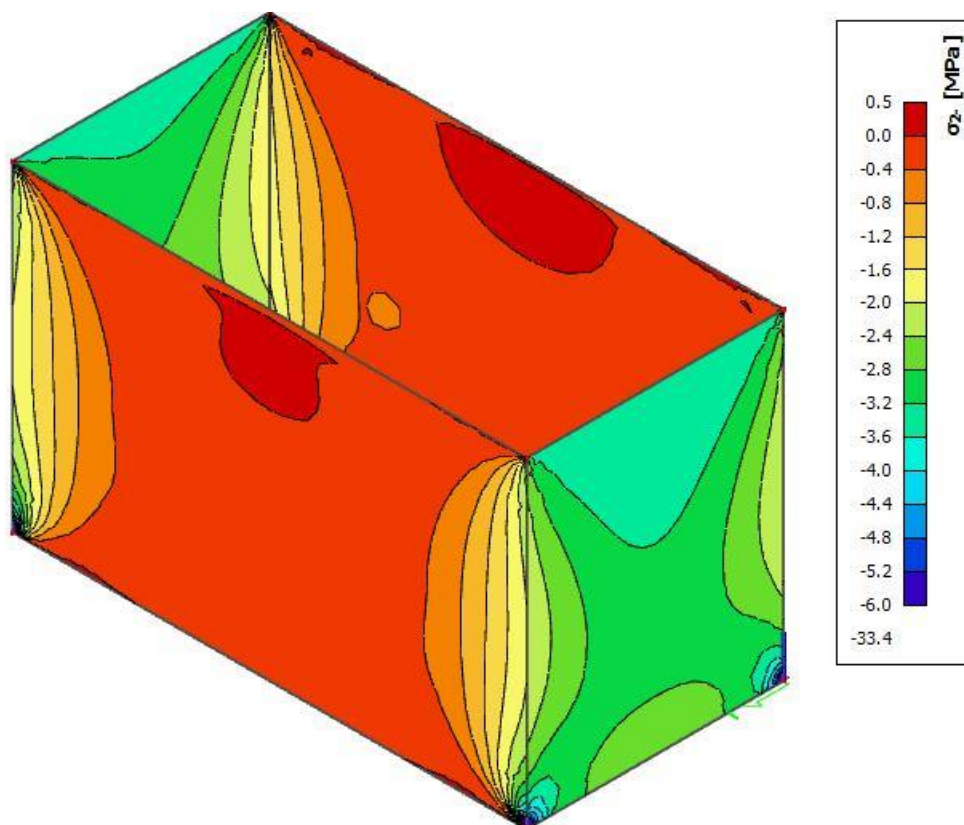
pokud by bylo použito podélné uložení bloku. Povšimněme si, že dle očekávání, jsou podélné stěny tlačeny s různými hodnotami od 2 do 4 MPa. Vyšší hodnoty napětí byly situovány pouze ve spodních rozích bloku, kde bylo koncentrováno napětí. Výpočetní program SCIA Engineer se tímto dopouští drobné nepřesnosti, kdy ve zmíněných rozích je více koncentrováno zatížení, které je přenášeno na malou plochu daného prvku sítě. Dochází tak k vzniku velkých píků (špiček) vypočteného napětí. Problém je ale možné vyřešit omezením maximálních vykreslovaných hodnot. Na hranice únosnosti dané provedenými experimenty se prvek dostává právě a pouze v těchto koncentrovaných rozích. Izolinie napětí na zatížených stěnách připomíná průběh ohybového momentu na prostém nosníku, což odpovídá konstantnímu liniovému zatížení. Naopak na příčných stěnách prvku se tlakové napětí blíží k 0 a zbytky zatížení jsou roznášeny skrze stěnu diagonálně do protějšího rohu. Tvoří tedy tvar písmene X, kde na bočních hranách je napětí tlakové a na místech horní a spodní hrany prvku se dokonce objevuje drobné tahové napětí o hodnotách 0 až 0,5 MPa. Vše je ale v mezích naměřené únosnosti bloku.



Obrázek 44 Rozložení napětí na podélném schématu bloku T3

Blok zatížený popsáním způsobem by obstál. Nehledě na fakt, že se jedná o směs, která obsahuje pouze 10 hm. % pojiva. Nejedná se ale o jediné rozložení, jednotlivé prvky by na sebe mohly být kladeny i příčně. Napětí na příčném schématu popisuje Obrázek 45, kde stejně jako v předchozím případě bylo použito konstantní liniové zatížení 100 kN/m. Izolinie na tlačných stěnách připomínají průběh momentu na prostém nosníku a ve spodních rozích dochází opět ke koncentraci tlakového napětí, avšak na velmi malé ploše. Změna nastává u podélných stěn, kde se na okrajích objevují oblasti s tlakovým napětím přenášeným z příčných stěn. Blíže středu se ale tlakové napětí vyrovnává a na středu se znaménko napětí u horní hrany změní. Dochází k mírnému tahovému namáhání, ačkoliv v mezích únosnosti.

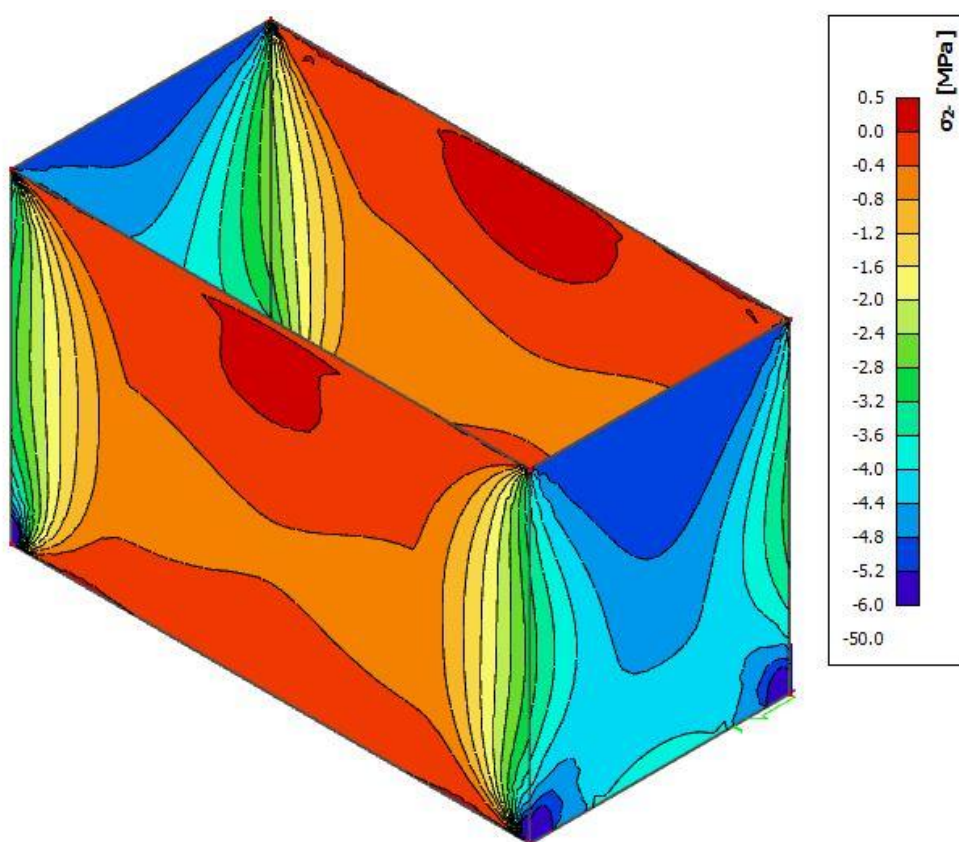
V obou případech vykreslení je zobrazeno hlavní napětí σ , ve kterém jsou započteny oba směry. Jedná se tedy o výsledné hodnoty vznikajícího napětí v prvku.



Obrázek 45 Rozložení napětí na příčném schématu bloku T3

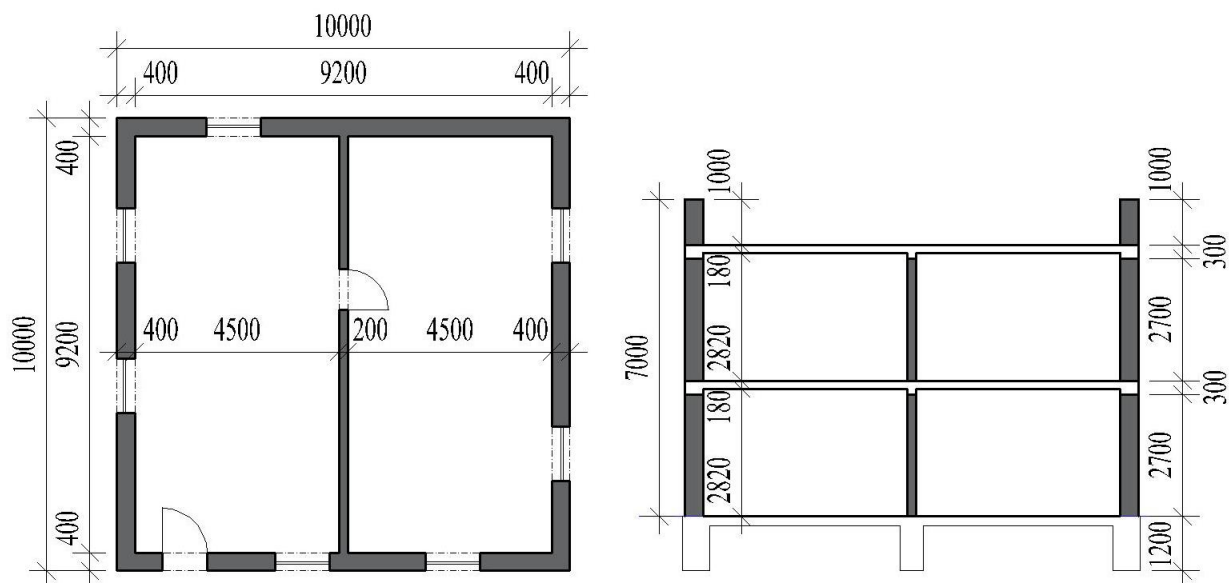
Posouzení prvků proběhlo pozitivně a zvlášť pokud uvážíme fakt, že prvky budou kladeny na sraz vedle sebe a dojde k drobné stabilizaci konstrukce jako celku. Proběhl tedy pokus zatížení navýšit na hodnotu 150 kN/m. Jelikož hodnoty napětí byly příznivější na příčném schématu, bylo na další posouzení zvoleno toto rozložení. Obrázek 46 ukazuje výsledné

hodnoty hlavního napětí. Hned si můžeme všimnout, že by se prvek byl již na hranici kolapsu. Tahové napětí zůstalo téměř beze změny, avšak tlakové napětí se posunulo na hodnotu 5 MPa již při horní hraně v kontaktu se zatížením. Pokud bychom se dostali ke spodním rohům zatěžované stěny. Kritické namáhání se rozšířilo na mnohem větší plochu mimo koncentrovaný prvek sítě. Na hranách by tedy došlo k překročení maximálního napětí a prvek by se začal drtit. Na řadu by opět mohla přijít mírná stabilizace prvků v již hotové stěně společně s dalšími vrstvami stěny. Není ale pravděpodobné, že by se tento jev projevil až do takové míry, že by se napětí v prvku snížilo. Prvek T3 by při vyšším zatížení tedy na základě analýzy neobstál. Zatížení 150 kN/m by bylo příliš velké.



Obrázek 46 Rozložení napětí na příčném schématu bloku T3 při zatížení 150 kN/m

Pokud by bylo vztaženo dané maximální zatížení na použití v praxi, můžeme napočítat zatížení, které by na blok působilo například u standardního rodinného domu. Uvažovaný objekt byl navržen o rozměrech 10×10 m s dvoupodlažní dispozicí a rovnou střechou. Obrázek 47 ukazuje zjednodušené schéma navrhovaného objektu. Obvodové nosné stěny jsou tvořeny a vyskládány posuzovanými prvky dle příčného schématu. Dále by v objektu byla jedna vnitřní nosná stěna rovněž tvořena předmětnými bloky kladenými podélně.


Obrázek 47 Schématický půdorys a řez uvažovaného objektu

Konstrukční výška byla navržena na hodnotu 3,0 m a tloušťka stropních desek 180 mm. Na stěnách by byl vytvořen menší ztužující věnec s výškou 300 mm, tudíž výška zdiva jednoho podlaží byla 2,7 m. Navržen a započítán byl pak rovněž SDK podhled v celé ploše objektu. V rámci posouzení bylo jednoduše napočítáno zatížení, které by na prvky působilo. Snaha byla vždy uvažovat či použít horší možnost, což znamená 2 nadzemní podlaží, 2 stropní desky namísto krovu a těžkou keramickou dlažbu jako podlahu. Dále byla navržena skladba střechy s větší vrstvou kačírku a co týče sněhu, byl objekt umístěn ve sněhové oblasti IV. Zatížení sněhem tedy bylo započítáno s hodnotou $s_k = 2,0$ kPa. Zatížení bylo určováno pro obvodové stěny i střední nosnou stěnu. Obvodovou stěnu specifikuje Tabulka 13 a pro vnitřní stěnu popisuje použité zatížení Tabulka 14.

Tabulka 13 Návrhové hodnoty zatížení napočítané na obvodovou stěnu

Zatížení	Konstrukce	Návrhová hodnota zatížení [kN/m]
Stálé	ŽB desky	30,38
	Stěny	16,77
	Střešní plášť	6,08
	Podlahy	5,91
	SDK podhled	0,81
Proměnné	Užitné	5,63
	Sníh	6,00
Celkem		71,56

Tabulka 14 Návrhové hodnoty zatížení napočítané na vnitřní nosnou stěnu

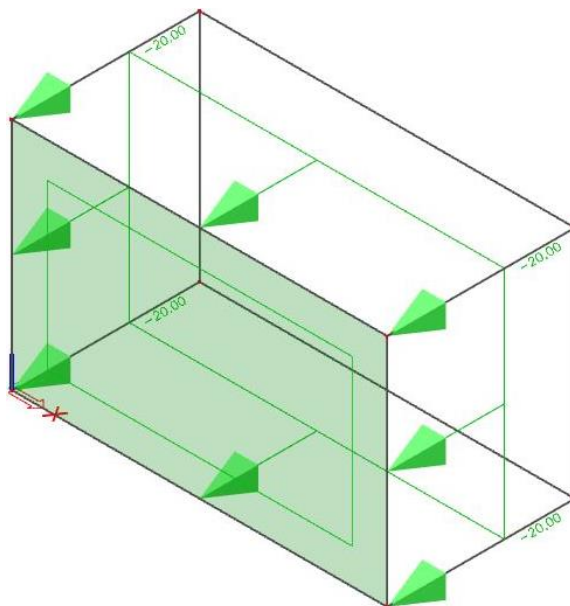
Zatížení	Konstrukce	Návrhová hodnota zatížení [kN/m]
Stálé	ŽB desky	60,75
	Stěny	16,77
	Střešní plášť	12,15
	Podlahy	11,81
	SDK podhled	1,62
Proměnné	Užitné	11,25
	Sníh	12,00
Celkem		126,35

V obou tabulkách je zvýrazněna výsledná hodnota zatížení na stěnu. Všechny zatížení byly pro jednoduchost uvažovány v celé ploše objektu. Pro účely zpracování působícího zatížení se jedná o horší případ pro maximální navýšení namáhání prvků.

Pokud se podíváme na konečné hodnoty zatížení v tabulkách, je samozřejmé, že vyšší zatížení bude působit na vnitřní stěnu díky dvojnásobné zatěžovací šířce. Hodnota 126,35 kN/m. Dané zatížení se bude přerozdělovat na 2 hlavní nosné stěny prvku. I když se jedná o horší podélné schéma, zatížení se podělí a vznikne tak zatížení pouze 63,18 kN/m. Dostaneme se tedy na hodnotu výrazně pod limitem, který byl nastaven výpočtem v softwaru. Vypočtené zatížení na obvodovou stěnu je ještě výrazně menší, než u středové stěny. Stejně jako v případě vnitřní stěny zde byl použit ztužující železobetonový věnec, který zaručí alespoň částečné přenesení zatížení do obou stěn prvku. Ačkoliv i kdyby se tak nestalo, zatížení by dokázala přenést i jen jedna ze stěn prvku. Zatížení by se totiž pohybovalo stále hluboko pod limitem.

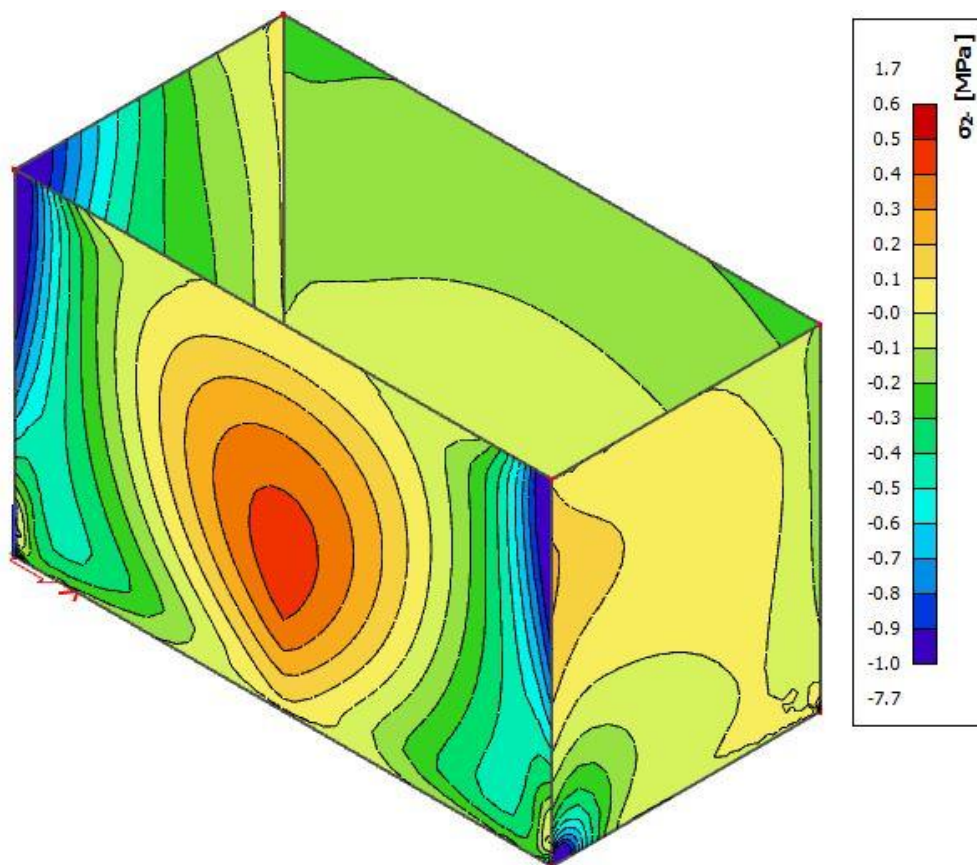
Během experimentů byla posouzena i možnost zatížení pouze jedné ze stěn, avšak k žádné výrazné změně nedošlo. Na nezatížené stěně vznikaly tahová napětí pouze na hranách a nikdy nepřesáhlo limitní hodnotu 0,5 MPa. Spíše se pohybovaly v rozmezí 0,1 až 0,3 MPa. Prvek tedy dosáhl pozitivních výsledků i v tomto podrobnějším posouzení. Pro danou aplikaci by byl prvek více než dostačující avšak má i své limity. Pokud by bylo potřeba blok využít pro výrazně větší objekt, bylo by nutné zvolit únosnější variantu směsi nebo nastavit nosný systém tak, aby stěny nepřenášely veškeré zatížení.

Vyšetřena byla i alternativní aplikace jako ztracené bednění, kde není problémem pevnost v tlaku, ale pevnost bočnice bloku v tahu za ohybu. Prvek musí být schopen přenést tlak čerstvé výplňové betonové směsi než dojde k jejímu vytvrdnutí. Použito tedy bylo schéma ukládání bloků podélně, jelikož dlouhá boční stěna bude v tomto smyslu nejvíce náchylná na porušení. Namáhání bylo navrženo tak, že na plochu boční stěny prvku působilo zevnitř zatížení 20 kN/m^2 , viz Obrázek 48.



Obrázek 48 Schéma zatížení bočnice bloku vnitřní výplní

Kontrolováno následně bylo napětí vyvozované na boční stěnu. Přesněji rozložení napětí ukazuje na prvku Obrázek 49. Vypočítaná napětí jasně naznačují chování prvku při daném zatížení. Na okrajích stěny dochází k velmi mírnému tlakovému namáhání a směrem ke středu se hodnoty napětí mění na tahové namáhání. Hodnoty jsou však v limitech, které by prvek dokázal vydržet. Zvláště pokud započítáme přitížení prvků od bloků umístěných v konstrukci nad ním. Prvek by tedy zatížení vydržel i po zakomponování charakteristik směsi T3.



Obrázek 49 Rozložení napětí na boční stěně bloku T3 při zatížení 20 kN/m^2

3.3.4. Srovnání s dostupnými betonovými bloky

Součástí posouzení bylo i srovnání navrhovaného prvku s dostupnými bloky a jinými experimentálně vyrobenými bloky. Cíl je vyspecifikovat jednotlivé prvky co nejlépe a každý aspekt objektivně porovnat a posoudit. Případně využít příležitosti k návrhu úpravy a nejlepších možných řešení. Jak již bylo zmíněno dříve, na trhu je tolik možností výběru, že nebude možné zde postihnout všechny, avšak ty nejpodobnější a také nejrozšířenější byly jistě v rámci kapitoly vyšetřeny.

U pevnosti v tlaku prvku byla změřena průměrná hodnota určená ze 6 vzorků. Nelze tedy výsledek okamžitě porovnat s ostatními prvky, jejichž pevnosti v tlaku byly určeny z většího souboru vzorků. Hodnota pevnosti v tlaku byla snížena ze $6,7 \text{ MPa}$ na hodnotu $4,7 \text{ MPa}$. Přesněji tedy byla pevnost v tlaku snížena na 70 % původní hodnoty.

První porovnání bylo zaměřeno na současné betonové prvky. Nejrozšířenější jsou zřejmě bloky od výrobců Ytong, Hebel a Porfix a od každé z těchto značek byly porovnány 1 až 2 prvky, dle jejich nabídky.

Tabulka 15 Klíčové parametry posouzení vybraných betonových prvků (BEST, 2020; PORFIX, 2019; Systém Hebel, 2019; Ytong, 2019)

Výrobce	Typ bloku	Rozměry [mm] D × V × Š	Součinitel prostupe tepla U [W/m ² K]	Hmotnost prvku [kg]	Pevnost v tlaku [MPa]
YTONG	Lambda YQ	375 × 249 × 549	0,147	15,38	2,20
	Universal	599 × 249 × 375	0,294	25,17	3,50
HEBEL	P2 - 450	499 × 199 × 375	0,280	23,80	2,60
PORFIX	P2 - 400	500 × 250 × 500	0,165	35,60	2,00
	P2 - 440	500 × 250 × 375	0,250	30,50	2,00
BEST	LUNETETA I	400 × 200 × 200	neuveđeno	18,50	neuveđeno
Studie	T3	200 × 250 × 400	0,268	21,16 (16,20)	4,70

Tabulka 15 byla pro větší názornost upravena tak, aby bylo možno data přímo porovnávat. Dále tabulka určuje hlavní 4 parametry, na které se bude srovnání zaměřovat. Uvedené pevnosti v tlaku jsou vždy průměrné hodnoty výsledků zkoušek provedených na daných prvcích. Pouze pevnosti v tlaku bloků od společnosti Ytong jsou normalizované hodnoty, jelikož jiné hodnoty výrobce neuvádí. V tabulce jsou vždy uvedeny nejvíce 2 prvky vybrané pro reprezentaci daného výrobce. Tvarovka LUNETETA I od společnosti BEST byla přidána z důvodu tvarové podobnosti prvku a také kvůli možnosti alternativní aplikace navrhovaných bloků jako ztracené bednění. Jelikož se jedná o rozdílnou kategorii, bylo toto porovnání vždy řešeno separátně od ostatních.

Rozměry bloků

Prvním srovnávaným parametrem jsou velikost a rozměry daných prvků. V tabulce je najdeme ve třetím sloupci zleva, kde vždy poslední z uvedených čísel představuje zamýšlenou tloušťku stěny. Nejedná se sice o nejdůležitější vlastnost, avšak pro potenciálního investora možná klíčová. Kolik prostoru bude investor ochotný obětovat pro lepší tepelně technické parametry. Hned si totiž můžeme povšimnout nápadně vysokých hodnot u prvků Ytong Lambda YQ a Porfix P2 – 400. Tloušťka stěny 500 nebo dokonce 550 mm je již velmi vysoká, a tudíž velkou část půdorysné plochy objektu budou tvořit jen obvodové zdi. U menších objektů, na rozměrově malých stavebních parcelách to je velký problém. Zvlášť pokud uvážíme současný trend zmenšování staveních pozemků pro jejich větší počet na jedné ploše. Ostatní porovnávané bloky mají tento parametr stejný, tedy 375 mm, což je ve shodě i s navrhovaným rozměrem prvku v této práci. V současné době je daný rozměr nejvíce

rozšířený. Jedná se totiž zřejmě o ideální poměr zabraného prostoru vůči tepelným charakteristikám. Vše se ale může s nástupem nové legislativy změnit.

Tvarovka LUNETETA I má téměř stejné rozměry jako zde navrhovaný prvek. Výška je 200 mm a blok vytvořený v rámci této studie má výšku 250 mm. Výška prvku ale není nejdůležitějším rozměrem. Šířku tedy oba prvky sdílejí a zachovávají si srovnatelné vlastnosti co se týče výplňového betonu. Vytváří obdobný vnitřní prostor, a tudíž betonáž výplně nebude problémem.

Součinitel prostupu tepla U

Dalším ze srovnávaných parametrů byly tepelné charakteristiky daných prvků. Jednoznačně nejpříznivějších hodnot dosahují bloky Ytong Lambda YQ a Porfix P2 – 400. Oba zmíněné prvky s hodnotami 0,147 W/m²K a 0,165 W/m²K splňují požadavky pasivního standardu bez dalších přídavných vrstev či konstrukcí. Ačkoliv, jak již bylo řečeno výše, výborné tepelně izolační vlastnosti byly docíleny na úkor prostoru daného objektu. Dále se již hodnoty posunuly mimo nové legislativní limity. Aby mohly být podmínky splněny, bylo by potřeba využít přídavné vrstvy izolantu či tepelně izolační omítky. Nejlépe je na tom blok Porfix P2 – 440 s hodnotou 0,25 W/m²K. Dále by byl navrhovaný blok se započítanou tepelně izolační sádrovou výplní. Přesnější hodnota by byla zhruba 0,268 W/m²K. Obdobně jsou na tom zbývající prvky Ytong Universal a Hebel P2 - 450 u nichž se hodnota součinitele prostupu tepla přibližuje k 0,30 W/m²K. Dle výsledků studie by byl v této práci navrhovaný blok srovnatelný s ostatními prvky na trhu. K posunutí součinitele prostupu tepla na požadavky tepelného standardu by bylo potřeba doplnit cca 6 cm tepelné izolace. Dodatečné náklady by byly nepříjemné, avšak kondenzace vodních par by se výrazným způsobem omezila a dále bychom se přiblížili současné praxi dodatečného zateplení. Při kontrole v softwaru Teplo 2017 byla provedena kontrola kondenzace vodních par. Při zadání prvku T3 nedocházelo ke kondenzaci vodní páry v konstrukci. Pokud byl ale zadán například prvek YTONG Lambda YQ, došlo by ke kondenzaci s hodnotou 0,0162 kg/m²rok. Nejedná se o výraznou kondenzaci a došlo by k jejímu vypaření. Kondenzace vody v konstrukci je ale nepříjemným problémem, kterého se snažíme vyvarovat.

Prvek BEST LUNETETA I nebyl do této kategorie zahrnut, jelikož se nejedná o obvodový prvek, nýbrž blok pro použití do ztraceného bednění nebo na opěrné stěny. Požadavky na součinitel prostupu tepla U se na prvek tedy nevztahují a není potřeba jej v tomto směru posuzovat.

Hmotnost prvků

Třetí z hlavních charakteristik byla hmotnost daných posuzovaných prvků. Možná by se mohla tato kategorie zdát jako zbytečná, avšak při realizaci objektu je hmotnost prvků velmi důležitým parametrem. Je velký rozdíl pokud prvek váží 16,00 kg a nebo pokud je hmotnost 35,00 kg, zvláště pokud je například potřeba prvek zvedat do výšky. Dalším důvodem by mohla být manipulace s prvkem. Pro pracovníka je výrazně snazší pracovat s menšími prvky než s velkými a těžkými objekty, nehledě na fakt, že na manipulaci s takovými bloky by museli být pracovníci dva. Díky velmi malé objemové hmotnosti je na tom nejlépe prvek YTONG Lambda YQ, který má hmotnost jednoho prvku pouze 15,38 kg. Hmotnost vyvíjeného bloku se bude měnit podle použité směsi, ale u směsi T3 by hmotnost byla 16,20 kg. Pokud bychom započítali i tepelně izolační výplň v prvku, váha by se zvýšila o necelých 5,00 kg na hodnotu 21,16 kg. I se započítanou výplní se ale hmotnost bloku pohybuje ve standardních hodnotách hmotnosti. Prvky Ytong Universal a Hebel P2 – 450 jsou na tam obdobně, ačkoliv váha 25,17 kg je již velmi značná. Nejtěžší prvky jsou očividně bloky výrobce Porfix, kde oba posuzované prvky mají hmotnost nad 30kg, přesněji 30,50 kg v případě prvku P2 – 440 a absolutně nejtěžší je prvek P2 – 400 s hmotností 35,60 kg. Je jasné, že tato kategorie je svázána s rozměry daných prvků, ačkoliv prvek Lambda YQ má velmi nízkou hmotnost i přes velké rozměry. Společně s vyvíjeným prvkem se tedy projevují velmi příznivě z hlediska variability.

Co se týče prvků ztraceného bednění, je lehčí zde navrhovaný blok. Jelikož se jedná čistě o konstrukci vnější nosné vrstvy a vnitřní prostor bude následně vyplněn betonem, nebyla zde uvažována vnitřní izolační výplň. Hmotnost tvarovky BEST LUNETTA I je 18,50 kg, což je stále velmi přijatelná hodnota.

Pevnost v tlaku

Poslední z posuzovaných parametrů je pevnost v tlaku. Pokud prvek selže, následky by mohly být drastické. Proto se také jedná o nejvíce zkoušenou a kontrolovanou kategorii. Pevnosti v tlaku jsou nízké, ale pro potřeby rodinné výstavby či výplňového zdiva nemusí být pevnosti nijak velké. Nejvyšší pevnosti v tlaku dosahuje studií navrhovaný prvek, avšak nosná část prvku má výrazně menší plochu. Ostatní bloky jsou plné kvádry a plocha pro rozdělení zatížení je tedy mnohem větší. Porovnáním hodnot si můžeme všimnout obdobných hodnot prvků Porfix, YTONG Lambda YQ a Hebel P2 – 450 v rozmezí od 2,00 do 2,60 MPa. Nejmenší pevnost mají prvky společnosti Porfix, tedy 2,00 MPa. Zmíněné hodnoty vycházejí z obecné charakteristiky prvku, aby byly co nejlehší, co nejlépe izolovaly, avšak pevnost v tlaku je následně nižší. Rovněž je nutné dodat, že všechny posuzované prvky jsou vyráběny

a upravovány pomocí autoklávu, který právě takové charakteristiky zajišťuje. Bezpochyby je to pak pro výrobce velká výhoda, jelikož by za normálních okolností takový beton nemohl vzniknout. Další nevýhodou je výrazná spotřeba energie

Pevnost v tlaku je důležitým parametrem i pro ztracené bednění, bohužel se ale považuje za hlavní nosnou složku výplňový beton a proto není tento údaj dostupný a nikde se neuvádí. Není tedy možné přesně kategorii porovnat.

Další možnosti porovnání bohužel nejsou zcela dostupné, jelikož výrobci zmíněných prvků nezveřejňují k tomu potřebné informace. I přes známé parametry například nasákavosti a mrazuvzdornosti navržených směsí tedy nelze informace porovnat.

Navrhované prvky si ve zkouškách vedly velmi dobře a jsou srovnatelné s posuzovanými betonovými bloky. Dalšími neznámými, které je nutné vyšetřit, jsou větší produkce daných prvků a pracnost při výstavbě. Plánovaná sádrová výplň nejspíše nebude možné ihned integrovat do konstrukce bloku a bude doplňována dodatečně, jelikož pevnost a přídržnost výplně není dostatečná. Zmíněné problémy jsou ale nad rámec možností této diplomové práce.

3.3.5. Srovnání s dostupnými keramickými bloky

Ačkoliv se jedná o jiný materiál, keramické prvky jsou v České republice rovněž velmi oblíbeným a hojně využívaným materiálem. Bylo tedy pokládáno za vhodné porovnat navrhované prvky s vlastnostmi a charakteristikami těchto produktů. Pro porovnání byli vybráni zástupci z výrobních palet společností Porotherm a Heluz, které jsou zde nejvíce využívány. Blíže posuzované bloky specifikuje Tabulka 16.

Tabulka 16 Klíčové parametry posouzení vybraných keramických prvků (HELUZ, 2020; Porotherm, 2020)

Výrobce	Typ bloku	Rozměry [mm] D × V × Š	Součinitel prostupu tepla U [W/m ² K]	Hmotnost prvku [kg]	Pevnost v tlaku [MPa]
Porotherm	44 T Profi	248 × 249 × 440	0,150	18,4	8,00
	50 Eko+ Profi	248 × 249 × 500	0,170	21,0	8,00
Heluz	Family 44 2in1	247 × 249 × 440	0,130	17,9	10,00
	Family 50	247 × 249 × 500	0,140	19,7	8,00
Studie	T3	200 × 250 × 400	0,268	21,16 (16,20)	4,70

Kategorie pro porovnávání zůstaly zachovány stejné jako v porovnání betonových bloků. Hned si ale můžeme všimnout, že parametry popsané v tabulce jsou mírně příznivější než u betonových bloků. Rozdíl je způsoben jiným materiálem prvku. I přes lepší vlastnosti bylo ale potřeba prvky upravit tak, aby odpovídaly požadavkům nové legislativy.

Rozměry bloků

Vybraní výrobci produkují hlavní 2 typy produktů. Aby byl dodržen pasivní standard, výrobky menších rozměrů mají ve vytvořených dutinách umístěnou přídavnou tepelnou izolaci. Podpoří tak tepelné charakteristiky a udrží menší rozměry. V případě produktů Porotherm je to minerální vlna a prvky Heluz používají zrna expandovaného polystyrenu. Bloky Porotherm T 44 Profi a Heluz Family 44 2in1 mají jen mírně vyšší tloušťku, ale je třeba počítat s přídavnou izolací. Pokud se ale jedná o produkty bez izolace, rozměry musely být opět navýšeny na hodnotu 500 mm, což znamená větší omezení prostoru v objektu. V porovnání s navrhovanými prvky se jedná o narůst rozměrů.

Součinitel prostupu tepla U

V kategorii tepelně izolačních vlastností již dochází k výraznějším změnám. Hodnoty se pohybují pohodlně v limitu pasivního standardu. Jak ale bylo zmíněno dříve, příznivé hodnoty jsou způsobeny přídavnou tepelnou izolací integrovanou v prvku a nebo velkým prvkem s dutinami. Dle tabulky jsou hodnoty součinitelů prostupu tepla velmi obdobné, ačkoliv nejlépe vychází blok Heluz Family 44 2in1 s hodnotou $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$. Téměř stejné hodnoty součinitele prostupu tepla pak mají prvky Heluz Family 50 a Porotherm T 44 Profi. Na hranici limitů se již pohybuje blok Porotherm 50 Eko+ Profi, který má hodnotu $U = 0,170 \text{ W/m}^2\text{K}$. Navrhovaný prvek měl v tomto směru mezeru plynoucí z horších vlastností materiálů a menších rozměrů. Problém se ale vyřeší rovněž přídavnou vrstvou tepelné izolace.

Hmotnost prvků

Hmotnost bloků opět umístěna tabulce ve druhém sloupci zprava je, dalo by se říci srovnatelná. Díky své tvarové koncepci jsou mírně lehčí keramické prvky, ale rozdíly jsou pouze minimální. Mezi výrobci jsou mírně příznivější produkty Heluz. Hmotnost 17,9 kg tvarovky Heluz vůči hodnotě 18,4 kg prvku Porotherm u rozměrově menších prvků. Mezi většími prvky je ale již rozdíl citelnější a váhově se k nim přibližuje i zde vyvíjený blok T3. Navíc ve hmotnosti 21,16 kg je již zahrnuta i tepelně izolační sádrová vložka. Samotný prvek by se pak dostal výrazně pod ostatní porovnávané bloky.

Pevnost v tlaku

Vlastnost, ve které budou největší rozdíly je pevnost v tlaku. Posuzované keramické prvky mají totiž pevnost výrazně vyšší než výše popsané betonové bloky. Dále je nutné dodat, že hodnoty uvedené v tabulce jsou rovněž průměrné pevnosti v tlaku samotného keramického bloku. Nejvyšší pevnost v tlaku má produkt Heluz Family 44 2in1, a to 10 MPa. Ostatní keramické bloky mají pevnost střepu nastavenou na hodnotu 8 MPa. Pevnost v tlaku vytvořené stěny pak klesá na hodnotu cca 2 MPa u všech vybraných typů keramických výrobků. Svou velkou roli zde totiž hraje použité lepidlo či malta, které nakonec pevnost výsledné konstrukce výrazně snižují. Navrhovaný blok T3 tak v této kategorii mírně zaostává.

Popisované keramické prvky jsou ale vyráběny pouze z přírodních zdrojů. Vlastnosti zde vyvíjených bloků jsou drobně sráženy použitými materiály, avšak ve výsledku se jedná o přidanou hodnotu. Téměř celý objem použitých materiálů pocházel z recyklovaných nebo odpadních surovin bez možnosti dalšího využití. I přesto však měly prvky srovnatelné výsledky ve všech posuzovaných kategoriích. Jedinou nevýhodou jsou srovnatelné tepelně izolační vlastnosti s betonovými bloky a je tedy nutné použít zhruba 60 mm dodatečné tepelné izolace. Celkově se tedy srovnání a vyhodnocení jevílo příznivě.

3.3.6. Cenová kalkulace

Cena materiálu je tím nejsilnějším a nejdůležitějším kritériem výběru. V rámci kapitoly byla předběžně napočítána cena výroby navrhovaných bloků. Uvažovány byly ceny jednotlivých materiálů na základě standardních dostupných ceníků a podílů jednotlivých složek ve směsích. Dalšími důležitými položkami byla doprava materiálu na místo zpracování a mletí odpadních materiálů obsažených v prvcích. Jelikož se jedná o vysokorychlostní mletí, energetická náročnost je tak potřeba uvážit. Celkově tedy bylo v rámci mletí uvažována cena energie, pořizovací cena mlýnu, produktivita zařízení a opotřebení mlecích elementů. Cena byla kalkulována na použití mlecí linky společnosti LAVARIS, přesněji typ SKD 800. Životnost linky je 60 tis. hodin provozu s produktivitou 5 t za hodinu. Pořizovací cena soustrojí je 10 mil. Kč s tím, že výměna mlecích elementů stojí 2 tis. Kč vždy po 250 tunách pomletého materiálu. Velmi ale záleží na zpracovávaném materiálu. Započítán pak musel být i příkon linky s hodnotou 70 kW. Doprava je obecně trochu neznámá jelikož nebylo řečeno odkud a kam by se materiál měl vozit (Prošek, 2020). Tabulka 17, Tabulka 18, Tabulka 19 určují přesnější ceny za jednotku materiálu, které byly uvažovány a následně byla provedena informativní kalkulace ceny za materiál prvků V1, T2 a T3.

Tabulka 17 Předběžný výpočet ceny prvku V1

Surovina/činnost	Jednotka	Cena za jednotku [Kč]	Množství v prvku [kg]	Cena [Kč]
Cement	t	3436,0	1,200	4,12
Struskové kamenivo 0/4	t	188,0	14,000	2,63
Struskové kamenivo 2/8	t	387,0	2,000	0,77
Provzdušňovací přísada	l	187,6	0,026	4,88
Voda	m ³	89,0	2,100	0,19
Mletí	Kč/t	400	1,400	0,56
Doprava materiálu	t/km	5		8,10
Celkem				21,25

Tabulka 18 Předběžný výpočet ceny prvku T2

Surovina/činnost	Jednotka	Cena za jednotku [Kč]	Množství v prvku [kg]	Cena [Kč]
Cement	t	3436,0	2,232	7,67
Vápenný hydrát	t	4820,0	0,140	0,67
Struskové kamenivo 0/4	t	188,0	11,393	2,14
Struskové kamenivo 2/8	t	387,0	1,628	0,63
Provzdušňovací přísada	l	187,6	0,056	10,51
Voda	m ³	89,0	3,348	0,30
Mletí	Kč/t	400	3,209	1,28
Doprava materiálu	t/km	5		8,10
Celkem				31,30

Tabulka 19 Předběžný výpočet ceny prvku T3

Surovina/činnost	Jednotka	Cena za jednotku [Kč]	Množství v prvku [kg]	Cena [Kč]
Cement	t	3436,0	0,744	2,56
Vápenný hydrát	t	4820,0	0,047	0,23
Struskové kamenivo 0/4	t	188,0	14,648	2,75
Struskové kamenivo 2/8	t	387,0	2,093	0,81
Provzdušňovací přísada	l	187,6	0,019	3,56
Voda	m ³	89,0	1,516	0,13
Mletí	Kč/t	400	1,07	0,43
Doprava materiálu	t/km	5		8,10
Celkem				18,57

Vzorek V1 obsahuje podíly popílku, strusky a cementu s zhruba středním podílem pojiva. Směs T2 obsahuje největší množství pojiva a s ním spojených materiálů, které jsou poměrně nákladné a prvek T3 byl specifikován pro své nejmenší podíly pojivových materiálů a tím pádem nízké náklady. Hned lze říci, že množství pojiva má vliv i na přídatnou provzdušňovací příměs, která tak může být velmi podstatná. V rámci výpočtů nebyla uvažována pořizovací cena recyklovaných materiálů, jelikož se většinou jedná o odpad a producenti se snaží tohoto odpadu co nejvíce zbavit. Uvažována ale byla cena úpravy mikromletím těchto materiálů, kde vše bylo přepočítáno na jeden prvek. Obdobně pak byla napočítána doprava bloků, kde byla uvažována vzdálenost 100 km. Uvedená cena je ale přibližná. Dále by bylo nutné započítat náklady na pořízení výrobní linky, technologie, výrobu prvků spojenou s režií a potřebnou energii. Určitou roli pak bude hrát i doprava potřebných materiálů na výrobu prvků, ale nejdůležitější součástí výsledné ceny je zisk. Každý producent si tuto částku určuje samostatně a může se jednat i o velký prvek výsledné pořizovací ceny. Výpočet přesných nákladů na výrobu je ale bohužel mimo možnosti této práce, ačkoliv vzhledem k cenám v současné době vyráběných prvků je z tabulek zřejmé, že na zmíněné náklady je dostatečně velká rezerva. Ceny za jeden kus porovnávaných prvků uvádí Tabulka 20.

Tabulka 20 Ceny za 1 kus porovnávaných prvků včetně DPH

Materiál	Výrobce	Prvek	Cena za kus
Beton	YTONG	Lambda YQ	244,67 Kč
		Universal	244,63 Kč
	Hebel	P2 - 450	142,75 Kč
	Porfix	P2 - 400	221,20 Kč
		P2 - 440	153,70 Kč
BEST	LUNETAI	117,40 Kč	
Keramika	Porotherm	44 T Profi	207,25 Kč
		50 Eko+ Profi	174,25 Kč
	Heluz	Family 44 2in1	285,08 Kč
		Family 50	194,08 Kč
Studie		V1	21,25 Kč
		T2	31,30 Kč
		T3	18,57 Kč

V porovnání můžeme vidět, že ceny jednotlivých výrobců se příliš nemění a odpovídají daným rozměrům či použitým materiálům. Nejvýše zřejmě šplhají ceny prvek u společnosti Heluz, kde prvek Family 44 2in1 s přidanou tepelnou izolací stojí 285,08 Kč a větší blok bez izolace Family 50 stojí 194,08 Kč. Nejnižší cenu z porovnávaných produktů má pak tvarovka společnosti Hebel, P2 – 450 s cenou 142,75 Kč. Pouze společnost YTONG však používá v ceníku hodnotu ceny za 1 m². Dle uvedených informací byla cena následně přepočítána na jeden kus, tudíž uvedené hodnoty nemusí být zcela přesné. Jak již bylo řečeno výše, ceny zde navrhovaných bloků by byly ještě navýšeny, avšak celkově se dané hodnoty zdají velmi slibně. Zvláště pokud budeme brát v potaz ekologický přínos vyvíjených bloků.

3.3.7. Srovnání s experimentálními prvky

Za poslední dobu se tématem využití odpadních materiálů a náhrady cementu zabývalo větší množství studií. V mnoha případech by reálné využití těchto materiálů zatím zdaleka nebylo možné, avšak pro účely srovnání experimentálních prvků byly vybrány vhodné možnosti. Vlastnosti vybraných prvků či tvarovek blíže specifikuje Tabulka 21.

Tabulka 21 Vlastnosti vybraných experimentálně vyrobených prvků s využitím recyklovaných materiálů

Autoři (rok)	Použité materiály	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Součinitel tepelné vodivosti [W/mK]
Wongkvanklom A. a kol. (2019)	Popílek Recyklovaná plastová zrna	1000 - 2100	15,1 - 35,8	0,210 - 0,520
Xie J. a kol. (2019)	Kalový keramzit Recyklované kamenivo Vysokopecní struska	1200	12,0	0,290
Chindaprasirt P. a kol. (2014)	Popílek Kamenivo z betonových bloků	775 - 900	1,9 - 4,1	0,150 - 0,270
Poon C. a kol. (2005)	Popílek Recyklovaný beton Drcené hliněné cihly	2070 - 2294	24,6 - 74,3	neuveďeno
Posi P. a kol. (2013)	Popílek Drcený lehčený blok	860 - 1400	1,0 - 16,0	neuveďeno
Batayneh M. a kol. (2006)	Recyklovaný beton, sklo a plast	2270 - 2300	10,0 - 43,0	neuveďeno
Yang K. a kol. (2014)	Vysokopecní struska Popílek	325 - 492	0,5 - 1,9	0,088 - 0,129

Bohužel ale nebylo možné vždy porovnat veškeré zde získané údaje, jelikož většina těchto studií se zaměřila jen na pár daných charakteristik. Téměř vždy byla ve zveřejněných studiích popisována objemová hmotnost nebo pevnost v tlaku. Avšak vlastnosti, jako například nasákavost a mrazuvzdornost zůstaly opomíjeny pro zisk základního povědomí a následnou úpravu materiálové matrice.

První ze studií byla z Thajska a zabývala se využitím plastových zrn z recyklovaného plastu jako částečnou náhradu za kamenivo. Společně s nahrazením cementu za popílek, který pocházel z elektrárny v severním Thajsku. Během experimentů bylo vytvořeno několik sad vzorků s odlišnými podíly popílku, plastových zrn a různými pokusnými aktivátory. Celkově se ale směsi odvíjely od náhrady klasického říčního písku plastovými zrny. Přesněji pak v hodnotách náhrady 0, 25, 50, 75 a 100 hm. %. Jako aktivátory zde byly používány hydroxid sodný (NaOH) a křemičitan sodný (Na_2SiO_3). Na vyrobených vzorcích byla provedena celá řada experimentů. Podrobně například byly zkoumány pevnosti daných prvků, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v příčném tahu, odolnost proti povrchové abrazi. Pro účely srovnání jsou velmi zajímavé pevnosti v tlaku s hodnotami 15,1 až 38,5 MPa a pevnosti v tahu za ohybu, které se pohybovaly v rozmezí 1,2 až 4,3 MPa. S vyšším podílem plastových zrn se pevnosti snižovaly, avšak vzorky s 25 a 50 hm. % zrn stále dosáhly velmi příznivých výsledků. Tedy 35,76 MPa a 27,04 MPa v pevnosti v tlaku a hodnoty 4,25 MPa a 3,26 MPa pro pevnost v tahu za ohybu. Vzorek s úplnou náhradou písku pak dokonce dosáhl pevností 15,08 MPa v tlaku a 1,23 MPa v tahu za ohybu, což by se dalo považovat v odvětví obvodových prvků jako velmi slibné. Stejný trend pak zaujalo i měření součinitele tepelné vodivosti, který s vyšším obsahem plastových zrn klesal (Wongkvanklom a kol., 2019).

Následující příspěvek využíval pro svůj výzkum kalový keramzit. Jako náhrada za kamenivo z říčního písku zde byla používána směs jemně mletého stavebního odpadu a cement byl částečně nahrazen vysokopecní struskou. Vzorky byly navrženy a vyrobeny tak, aby byl prozkoumán vliv náhradních materiálů na výslednou směs. Následně byla provedena sada zkoušek pro vyšetření konzistence čerstvé směsi, objemové hmotnosti, mechanických vlastností a tepelné vodivosti. Veškeré testy byly zkoumány i skenovací elektronickou mikroskopií. Ve výsledku bylo určeno, že konzistence, objemová hmotnost, pevnost v tlaku i součinitel tepelné vodivosti klesaly se zvyšujícím se podílem recyklovaného kameniva ve vzorcích. S přidavkem vysokopecní strusky by ale mohlo být docíleno příznivých výsledků. Po optimalizaci podílů ve vzorcích bylo dosaženo hodnot uvedených v tabulce, přesněji tedy objemové hmotnosti 1200 kg/m^3 , pevnosti v tlaku 12 MPa a součinitele tepelné vodivosti

0,29 W/mK. V závěru pak bylo nastaveno zastoupení 30 hm. % strusky a 40 hm. % recyklovaného kameniva s tím, že mechanické vlastnosti byly slibné a prvek by byl ekologicky příznivější, než beton se standardním Portlandským cementem (Xie a kol., 2019).

Další ze studií se zaměřovala na využití alternativního lehčeného kameniva v podobě předrcených autoklávovaných betonových bloků. Nahrazoval se tak jemný přírodní písek. Další příměsí byl popílek pro podporu mechanických vlastností. V rámci zkoušek byly vyhodnocovány hodnoty pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, pevnosti v tahu za ohybu, odolnost proti povrchové abrazi a dále pak například tepelná vodivost. Ukázalo se, že všechny vzorky měly nízkou objemovou hmotnost a nízký součinitel tepelné vodivosti. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti 0,15 až 0,27 W/mK se vskutku zdají jako velmi příznivé. S vyšším podílem přírodního písku a popílku se pevnosti materiálu zvyšují, tepelná vodivost se naopak zvyšovala (Chindaprasirt a kol., 2014).

Výzkum univerzity v Hong Kongu popsal použití betonového recyklátu a drcených cihel jako náhradní kamenivo do betonu. Jako pojivo byl používán cement společně s popílkem. Hlavním úkolem experimentu bylo určit specifické vlastnosti drcených recyklovaných materiálů a následně zjistit jejich ideální poměr pro zajištění maximálních mechanických vlastností. Obě suroviny byly nadrceny na 2 různé velikosti zrn, kdy první a větší velikost zrna měla průměr cca 10 mm a menší zrna byla menší než 5 mm. Jelikož se nejednalo o prvek obvodového pláště, byly zde kontrolovány pouze objemové hmotnosti a nasákavosti těchto surovin. Po vyhodnocení výsledků byly vyrobeny 2 hlavní série vzorků. Série I obsahovala 4 vzorky, kde byl jako pojivo použit pouze cement. Jeden vzorek s kamenivem čistě z betonového recyklátu a v dalších se postupně navyšoval podíl drcených cihel na 25, 50 a 75 hm. %. V sérii II pak byla část plniva nahrazena podílem přídatného pojivového materiálu v podobě popílku. Výsledná měření ukázala, že přidávkem drcených cihel se snižuje objemová hmotnost. Rozdíl mezi sériemi byl zhruba 10 %. Pevnost v tlaku se ale výrazně snižuje. Hodnoty pevnosti v tlaku vzorků s podílem 75 hm. % drcených cihel klesly až na polovinu hodnot referenčních. Z výsledků je rovněž vidět pozitivní vliv popílku na pevnosti v tlaku. Nástup hodnot byl sice pomalejší, avšak ve stáří 28 dnů došlo k nárůstu o zhruba 12 až 18 %. Podařilo se tedy získat perspektivní hodnoty vzorků a jejich použití bylo doporučeno pro další výzkum (Poon & Chan, 2005).

Další experiment z Thajska se snažil vytvořit ekologický geopolymerní lehčený prvek. Jako kamenivo zde byl používán drcený odpadní lehčený blok. Prvek byl předrcen a následně bylo vzniklé kamenivo rozděleno na jemné, střední a hrubé. Úkolem bylo zjistit pevnost v tlaku a objemovou hmotnost směsí s různými podíly aktivátorů. Vzorky byly vytvořeny

s rozdílnými poměry aktivátorů vůči popílku nebo kameniva vůči pojivu. Jako aktivátory byly používány hydroxid sodný a vodní sklo na bázi sodíku. Pro účely výzkumu byl rovněž sledován i vývoj hydratačního tepla jednotlivých směsí. Výsledky nakonec prokázaly, že geopolymerní blok s alternativním kamenivem dokáže dosáhnout uspokojivých hodnot pevnosti v tlaku a s ní spojené objemové hmotnosti. Bohužel v rámci měření nebylo zkoumána tepelná vodivost, ačkoliv porozita vzorků činila 12 až 34 %. Blok by se tedy dle studie dal využít jako zdicí prvek (Posi, Teerachanwit, a kol., 2013).

Studie výzkumného týmu z Jordánska využívá pro své experimenty stavební odpad v podobě betonového recyklátu, skla a plastů. Drcené plasty a sklo zde nahradily až 20 hm. % jemného kameniva a betonový recyklát zaujal až 20 hm. % hrubého kameniva. Pro určení charakteristik vyrobených směsí byla provedena celá řada zkoušek. Hlavními z nich byly zkoušky zpracovatelnosti, pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, pevnosti v tahu za ohybu a neposlední řadě objemová hmotnost. Původní materiály použité jako plnivo byly drcený vápenec jako hrubé kamenivo a přírodní písek jako jemné kamenivo. Celkem byly provedeny 3 fáze, ve kterých bylo vyrobeno vždy 5 sad vzorků. V první fázi bylo jemné kamenivo nahrazeno drceným plastem. Nejdříve byl vyroben referenční vzorek pouze s přírodním kamenivem a následně bylo kamenivo nahrazeno zvyšujícím se podílem plastových částic vždy po 5 hm. %. Zkoušky nakonec ukázaly, že podíl plastových zrn dramaticky snižuje nejen pevnost v tlaku, ale i pevnost v tahu za ohybu a pevnost v příčném tahu. Druhá fáze probíhala obdobně, až na použití drceného skla místo plastových částic. Výrazný rozdíl byl nakonec i ve výsledcích, jelikož zvyšující se podíl drceného skla měl výrazně pozitivní efekt na hodnoty pevnosti a vzorky dokonce dosáhly i nižší objemové hmotnosti. Ve třetí fázi bylo nahrazováno hrubé kamenivo pomocí betonového recyklátu se stejnými podíly jako v předchozích případech. Zde měla náhrada pouze mírný negativní vliv na zkoumané veličiny. K poklesu pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v příčném tahu došlo vždy pouze v rámci 1 až 2 % původní hodnoty. Bylo tedy doporučeno další využití zkoumaných materiálů, avšak v případě plastových zrn by se muselo jednat o aplikaci bez potřeby vyšších pevností (Batayneh a kol., 2006).

Poslední z vybraných studií byla z Koreje a popisovala charakteristiky a mechanické vlastnosti napěněného betonu s aktivovanými podíly vysokopecní strusky a popílku. Suroviny používané pro aktivaci pojiva byly stejně jako v předchozích případech hydroxid sodný a křemičitan sodný, a aby byla vytvořena co nejlehčí směs, nebylo využito žádné kamenivo ani plnivo. Byly pak vytvořeny hlavní 3 skupiny vzorků po 5 sadách. Jednalo se zejména o jiné poměry použitých pojiv a různých aktivátorů, které byly v jedné skupině stejné. Měnil

se však podíl pojiva ve směsi v hodnotách od 325 až do 515 kg/m³. Společně s pojivem se pak mírně měnil i objem přidávané předem připravené pěny. Dle jednotlivých sad pěna zaujímal 62 až 76 % objemu. Jelikož bylo v rámci experimentů využito velké množství pojivových materiálů bez žádného kameniva, podařilo se vytvořit stabilní a velmi lehké prvky. Zároveň byla využita velmi kvalitní vysokopecní struska s vysokými podíly CaO a obdobným poměrem SiO₂ a Al₂O₃ jako má standardní Portlandský cement. Celkově pak finální mechanické a fyzikální vlastnosti záležely hlavně na objemu pěny ve vzorku. Objem pojiva ovšem rovněž hrál svou roli, avšak podíl pěny dokázal charakteristiky ovlivnit daleko razantněji. Povedlo se tedy vytvořit velmi lehký, tepelně izolační materiál, který dosahuje aspoň základních pevností v tlaku. Závěrem byla vytvořena i ekonomická a ekologická analýza použitých materiálů a konečných vzorků, kde byl zjištěn daleko menší dopad na životní prostředí, než kdyby byly vzorky vyrobeny z cementu (Yang a kol., 2014).

V porovnání s touto prací bylo u jednotlivých materiálů a prvků ve studiích využíváno výrazně vyšších podílů pojiva či přírodních zdrojů. Ve studiích se podařilo vytvořit směsi, které měly příznivější hodnoty pevnosti v tlaku a tepelné vodivosti. V případě materiálůvé matrice navrhovaných prvků bylo naopak využito větší množství odpadních materiálů. Krom velmi malých podílů Portlandského cementu a vápenného hydrátu jsou veškeré další materiály vedlejšími produkty, odpady a nebo nemají další využití. I přes zmíněné skutečnosti se ale podařilo vytvořit prvky, které jsou srovnatelné s výsledky daných experimentů. Bohužel ale nebylo možné srovnání jednotlivých materiálů více prohloubit, jelikož většina publikací byla dostupná pouze v omezené formě bez přístupu k daným postupům či přesnějším informacím. Případně nebyly vzorky testovány natolik komplexně, aby bylo možné porovnat veškeré zde získané výsledky.

3.3.8. Zhodnocení výsledků

V rámci celé studie byla snaha co nejvěrněji zapracovat veškeré zkoušky a výsledky, aby bylo možné je komplexně zhodnotit a posoudit. Téměř ve všech testech bylo dosaženo předpokládaných hodnot a pokud došlo k poklesu hodnot vůči očekávání, dal se jednoduše vysvětlit okolnostmi výroby či použitými materiály a v porovnáním s reálně vyráběnými prvky se dostaneme na obdobné hodnoty.

Hodnoty například v tahu za ohybu byly nižší, ale pro účely použití prvků jako obvodové zdivo není pevnost v tahu nijak důležitá. Pevnosti v tlaku ale byly příznivé. I přes minimální podíly pojiva a hlavně také cementu se hodnoty pevností pohybovaly ve stejných nebo

srovnatelných hodnotách. Bylo vyrobeno 7 sad vzorků, z nichž jedna sada byla referenční bez náhrad s podílem 13 hm. % pojiva. Ostatní vyrobené vzorky s rozdílnými poměry pojiva vůči plnivu a různými surovinami. Množství pojiva bylo zkoumáno v rozmezí 10 až 30 hm. %. Výsledné prvky pak dosáhly uspokojivých pevností v tahu za ohybu a příznivých pevností v tlaku, přesněji od 6 do 25 MPa.

Nevýhodou prvků je, že nesplnily požadavky pasivního standardu a musí být použita přídatná vrstva zhruba 60 mm tepelné izolace. Prvky se podařilo vylepšit pomocí vnitřní tepelně izolační vložky, která byla tvořena ze sádrového recyklátu, recyklovaných polypropylénových vláken a pěnotvorné přísady. Součinitel prostupu tepla U tak byl zhruba $0,268 \text{ W/m}^2\text{K}$. Přídavkem dodatečné vrstvy se ale zabránilo kondenzaci vodní páry v konstrukci.

V závěrečném porovnání vyrobených prvků s nejvyužívanějšími komerčně produkovánými bloky a dalšími experimentálně vyrobenými prvky byla potvrzena možnost případného reálného využití prvků. Dosažené pevnosti v tlaku splnily požadavky a součinitel prostupu tepla byl stejný jako u komerčně vyráběných bloků. Zvláště pokud zvážíme fakt, že bylo použito minimální množství pojiva a podíl cementu byl velmi omezen.

4. Závěr

Práce byla zaměřena na návrh a posouzení kompozitních obvodových zdicích bloků s maximálním obsahem recyklovaných materiálů. V rámci textu byly popsány všechny úvahy a postupy, které byly během experimentů použity. Byla navržena konstrukce prvku a několik materiálových řešení kompozitních směsí, které byly podrobeny celé řadě zkoušek. Výsledky následně byly objektivně posouzeny a zhodnoceny.

V navržených prvcích byly téměř všechny použité složky vedlejším produktem průmyslové výroby, recyklovanou surovinou a nebo odpadním materiálem bez dalšího možného použití. Jedinými výjimkami byly malé podíly Portlandské cementu a vápenného hydrátu, který byl použit jako chemický aktivátor. Podařilo se vyrobit tvarovky pouze s podílem 10 hm. % pojivových materiálů tak, aby splňovala požadavky pro použití jako obvodový zdicí blok. V rámci prvku tedy bylo použito jen 4 hm. % Portlandské cementu. Výrazně by se tak mohla omezit potřeba cementu, který je vyroben z přírodních zdrojů a velmi náročný na zpracování.

Jedním z náhradních pojivových materiálů byla vysokopecní struska. Přesněji více než 100 let stará a velmi zvětralá struska, která byla skladována na haldě ve vnějším prostředí. Vysokopecní struska byla využita rovněž jako plnivo v podobě 2 frakcí struskového kameniva. Dalšími alternativními materiály byly popílek se zdrojem ze stejné oblasti jako vysokopecní struska a betonový recyklát získaný ze směsi konstrukčních betonů demolovaného objektu v Praze na Waltrovce. Byl potvrzen velmi pozitivní vliv zmíněných náhradních materiálů na mechanické vlastnosti výsledných prvků.

Pro veškeré porovnávání byl použit prvek T3, což byl co se týče pevností nejhorší možný případ. Pevnost v tlaku až 25 MPa vzorků V2 a T2 je však více než dostačující pro případné další aplikace. Dále je potřeba zmínit, že vyvíjené směsi prokázaly vysokou odolnost proti zmrazování a rozmrazování. Bez ohledu na vzorky a jejich pevnosti nedošlo k žádnému ovlivnění charakteristik, a k téměř nulové ztrátě hmoty. Pokud se podíváme na tepelnou vodivost, vlastnosti nosné skořápky nebyly tolik důležité jako spíše vnitřní sádrová vložka, která posouvá prvek ke stejným hodnotám jako komerčně vyráběné bloky. Je samozřejmé, že s prvky Ytong Lambda YQ nebo Porfix P2 – 400 se hodnoty přesně nedají srovnávat, avšak volba materiálu či prvku bude již na každém potenciálním investorovi. Můžeme ale říci, že se podařilo vyrobit ekologické, stabilní a perspektivní prvky s potenciálem využití v praxi. Přesná cenová relace by byla otázkou dané aplikace a zařízení výroby, avšak i přes to se dané prvky jeví příznivě i předběžnou cenou.

5. Seznam použité literatury

- Akçaözöglu, S., Atiş, C. D., & Akçaözöglu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2), 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Akinwumi, I. I., Olatunbosun, O. M., Olofinnade, O. M., & Awoyera, P. O. (2014). *Structural Evaluation of Lightweight Concrete Produced Using Waste Newspaper and Office Paper*. 6(7), 160–168.
- Applied Precision Ltd. (2020). ISOMET 2104. *Volně Přístupné: <https://www.appliedp.com/>*.
- Atiş, C. D. (2003). *High-Volume Fly Ash Concrete with High Strength and Low Drying Shrinkage*.
- Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2006). *Use of selected waste materials in concrete mixes*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>
- BEST. (2020). *Katalog produktů BEST*.
- Bhuvaneshwari, P., Priyadharshini, U., Gurucharan, S., & Mithunram, B. (2017). Strength characteristics of light weight concrete blocks using mineral admixtures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 80(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/80/1/012003>
- Bushi, L., & Meil, J. (2014). An Environmental Life Cycle Assessment of Portland-Limestone and Ordinary Portland Cements in Concrete. *Journal of Cleaner Production*.
- Chandru, G., Vijay, N., Vignesh, V., & Sachin Kumar, V. (2017). Study on Behaviour of Concrete Blocks with EPS and Partial Replacement of Fly ash and Quarry Dust. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(1), 236–239. <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.1.38>
- Chen, B., & Liu, N. (2013). A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 44, 691–698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.091>
- Chindaprasirt, P., Nuaklong, P., Zaetang, Y., & Sujumnongtokul, Purimpat Sata, V. (2014). Mechanical and Thermal Properties of Recycling Lightweight Pervious Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- Chung, S. Y., Elrahman, M. A., Sikora, P., Rucinska, T., Horszczaruk, E., & Stephan, D. (2017). Evaluation of the effects of crushed and expanded waste glass aggregates on the material properties of lightweight concrete using image-based approaches. *Materials*, 10(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma10121354>

- ČSN 73 1372. (2012). *Nedestruktivní Zkoušení Betonu - Rezonanční Metoda Zkoušení Betonu*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví.
- ČSN EN 123 50-2. (2020). *Zkoušení Čerstvého Betonu - Část 2: Zkouška Sednutím*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví.
- ČSN EN 123 90-3. (2020). *Zkoušení Ztvrdlého Betonu - Část 3: Pevnost v Tlaku Zkušebních Těles*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví.
- ČSN EN 123 90-5. (2020). *Zkoušení Ztvrdlého Betonu - Část 5: Pevnost v Tahu Ohybem Zkušebních Těles*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví.
- ČSN EN 123 90-9. (2007). *Zkoušení Ztvrdlého Betonu - Část 9: Odolnost Proti Zmrazování a Rozmrazování - Odlupování*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví.
- ČSN EN 197-1 ed. 2. (2012). *Složení, Specifikace a Kritéria Shody Cementů pro Obecné Použití*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví,.
- ČSN EN 450-1. (2013). *Popílek Do Betonu - Část 1: Definice, Specifikace a Kritéria Shody*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví.
- ČSN EN 459-1. (2015). *Stavební Vápno - Část 1: Definice, Specifikace a Kritéria Shody*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví,.
- ČSN EN 722-11. (2011). *Zkušební Metody pro Zdicí Prvky - Část 11: Stanovení Nasákavosti Betonových Tvárníc a Zdicích Prvků z Umělého a Přírodního Kamene Vlivem Kapilarity a Počáteční Rychlosti Nasákavosti Pálených Zdicích Prvků*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státního Zkušebnictví.
- ČSN EN 73 0540-2. (2002). *Tepelná Ochrana Budov – Část 2: Požadavky*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví,.
- ČSN EN 771-3. (2017). *Specifikace Zdicích Prvků-Část 3: Betonové Tvárnice s Hutným Nebo Pórovitým Kamenivem*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví,.
- ČSN EN ISO 13788. (2019). *Tepelně-Vlhkostní Chování Stavebních Konstrukcí a Stavebních Prvků – Vnitřní Povrchová Teplota pro Vyloučení Kritické Povrchové Vlhkosti a Kondenzace Uvnitř Konstrukce – Výpočtové Metody*, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví.
- Demirdag, S., & Gunduz, L. (2008). Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units. *Construction and Building Materials*, 22(3), 135–142. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.10.002>

- Demirel, B. (2013). Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks. *Construction and Building Materials*, 40, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.008>
- Ecocal, ČVUT, FF Servis. (2020). *Inovativní Technologie Využití Anorganických Průmyslových Odpadů Nebo Vedlejších Produktů*, Euroslag.
- EPBD II. (2010). Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov. *Úřední Věstník Evropské Unie*, L153/13, 23. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:CS:PDF>
- FRONTROCK PLUS. (2019). *Technický list FRONTROCK PLUS*. 2019.
- Guo, Z., Tu, A., Chen, C., & Lehman, D. E. (2018). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 199, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.069>
- HELUZ. (2020). *Katalog produktů HELUZ* (pp. 1–52).
- Horych, J. (2019). *Obvodové zdivo na bázi cementu, betonového recyklátu a strusky*.
- Karas, M. (2020a). *Prohlášení o vlastnostech struskového kameniva frakce 0/4 mm*.
- Karas, M. (2020b). *Prohlášení o vlastnostech struskového kameniva frakce 2/8 mm*.
- Mahoutian, M., & Shao, Y. (2016). Production of cement-free construction blocks from industry wastes. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1339–1346. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.012>
- Nguyen, T. T., Bui, H. H., Ngo, T. D., & Nguyen, G. D. (2017). Experimental and numerical investigation of influence of air-voids on the compressive behaviour of foamed concrete. *Materials & Design*, 130, 103–119. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.05.054>
- Oner, A., Akyuz, S., & Yildiz, R. (2005). An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1165–1171. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.031>
- Perlit s.r.o. (2017). Expandovaný perlit. *Volně Přístupné: <Http://Www.Perlit.Cz/Expandovany-Perlit/>*
- Poon, C. S., & Chan, D. (2005). *Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044>
- Poon, C. S., & Chan, D. (2007). Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 21(1), 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.031>

- PORFIX. (2019). *Katalog produktů Porfix*.
- Porotherm. (2020). *Ceník produktů Porotherm*.
- Posi, P., Lertnimoolchai, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2013). Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. *Construction and Building Materials*, 47, 896–901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.094>
- Posi, P., Teerachanwit, C., Tanutong, C., Limkamoltip, S., Lertnimoolchai, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2013). Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block. *Materials and Design*, 52, 580–586. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.001>
- Posi, P., Thongjapo, P., Thamultree, N., Boontee, P., Kasemsiri, P., & Chindaprasirt, P. (2016). Pressed lightweight fly ash-OPC geopolymer concrete containing recycled lightweight concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 127, 450–456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.105>
- Prošek. (2018a). *Průběžná zpráva - Výzkum a ověření stavebních aplikací s vyšší přidanou hodnotou při využití ocelářské strusky*.
- Prošek. (2018b). *Sborník konference Recycling 2018*.
- Prošek, Z. (2019). *Sborník konference Recycling 2019*.
- Prošek, Z. (2020). *Využití odpadního mramoru na bázi odprašků ve stavebnictví*.
- Prošek, Z., & Trejbal, J. (2019). *PP mikrovlákná Trevos*.
- Ren, P., Li, B., Yu, J.-G., & Ling, T.-C. (2020). Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali-activated slag concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122115>
- RFID and Autoclaves*. (2009). <https://www.turck.de/en/rfid-and-autoclaves-585.php>
- Sariisik, A., & Sariisik, G. (2012). New production process for insulation blocks composed of EPS and lightweight concrete containing pumice aggregate. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 45(9), 1345–1357. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9836-z>
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., & Tasdemir, M. A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2–3), 671–676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>
- SOULDAL. (2017). *Technický list Soudapor*. 2017.
- Sun, J., Feng, J., & Chen, Z. (2019). Effect of ferronickel slag as fine aggregate on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 206, 201–209. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.187>

- Systém Hebel. (2019). Systém Hebel. *Hebel, Stavební Systém*, volně dostupné: www.hebel.cz.
- Technický list Isover EPS 100F*. (2019). 10, 50001.
- Technický list Isover EPS GreyWall*. (2019). 8–9.
- Technický list Isover TOPSIL*. (2019). 1–2.
- Technický list K5 Kontaktní fasádní deska*. (2018).
- Technický list Multimax*. (2017). 3796.
- Teng, S., Lim, T. Y. D., & Sabet Divsholi, B. (2013). Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 40, 875–881. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.052>
- Tesárek, P., Prošek, Z., Zobal, O., Fládr, J., & Semerák, P. (2017). *Věcná zpráva MPO Trio LAVARIS*.
- Topçu, I. B., & Işikdağ, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1–3), 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.052>
- Topič, J., Prošek, Z., Trejbal, J., Fládr, J., & Plachý, T. (2016). Fine recycled concrete powder used as filler and cement replacement in new concrete. In *CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future*.
- Topič, Jaroslav, & Prošek, Z. (2017). Properties and microstructure of cement paste including recycled concrete powder. *Acta Polytechnica*, 57(1), 49–57. <https://doi.org/10.14311/AP.2017.57.0049>
- Torkaman, J., Ashori, A., & Sadr Momtazi, A. (2014). Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 50, 432–436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.044>
- tzbinfo. (2010). H+H Thermoblock. *Volně Přístupné: <https://www.tzb-info.cz/106702-h-h-Thermoblock-Ekonomicke-Reseni-pro-Pasivni-Stavby>*.
- Vinith Kumar, N., Arunkumar, C., & Srinivasa Senthil, S. (2018). Experimental Study on Mechanical and Thermal Behavior of Foamed Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 8753–8760. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.12.302>
- Vyhláška 230/2015 Sb. (2015). *Vyhláška o Enegetické Nároročnosti Budov, Ministerstvo Průmyslu a Obchodu*.
- Vyhláška 264/2020 Sb. (2020). *Vyhláška o Enegetické Nároročnosti Budov, Ministerstvo Průmyslu a Obchodu*.

- Vyhláška 387/2016 Sb. (2018). *Vyhláška o Podmínkách Ukládání Odpadů Na Skládky a Jejich Využívání Na Povrchu Terénu, Ministerstvo Životního Prostředí.*
- Vyhláška 78/2013 Sb. (2013). *Vyhláška o Enegetické Náročnosti Budov, Ministerstvo Průmyslu a Obchodu.*
- Wang, Q., Yan, P., Yang, J., & Zhang, B. (2013). Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1414–1420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.044>
- Wongkvanklom, A., Posi, P., Homwuttiwong, S., Sata, V., Wongsas, A., Tanangteerapong, D., & Chindaprasirt, P. (2019). Lightweight geopolymer concrete containing recycled plastic beads. *Key Engineering Materials*, 801 KEM, 377–384. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.801.377>
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Carbon*, 26, 303–329. <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Xie, J., Liu, J., Liu, F., Wang, J., & Huang, P. (2019). Investigation of a new lightweight green concrete containing sludge ceramsite and recycled fine aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1240–1254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.012>
- Yang, K.-H., Lee, K.-H., Song, J.-K., & Gong, M.-H. (2014). Properties and sustainability of alkali-activated slag foamed concrete. *Journal of Cleaner Production*, 68, 226–233. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.12.068>
- Ytong. (2019). *PŘEHLED MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ A PRODUKTŮ 2019.*
- ZHAO, Z., COURARD, L., GROSLAMBERT, S., JEHIN, T., LÉONARD, A., & XIAO, J. (2020). Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104786. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104786>
- Zhu, L., Dai, J., Bai, G., & Zhang, F. (2015). Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 94, 620–628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.058>

6. Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma druhů a složení cementů (ČSN EN 197-1 Ed. 2, 2012)	11
Obrázek 2 H + H Thermoblock (tzbinfo, 2010)	21
Obrázek 3 Sestava autoklávu (RFID and Autoclaves, 2009)	22
Obrázek 4 Výsledné pevnosti v tlaku s vyznačenou směrodatnou odchylkou (Horych, 2019).....	25
Obrázek 5 Výsledné pevnosti v tlaku s vyznačenou směrodatnou odchylkou za použití vápenného hydrátu (Horych, 2019).....	25
Obrázek 6 Výsledné pevnosti v tlaku s vyznačenou směrodatnou odchylkou za použití vodního skla (Horych, 2019).....	26
Obrázek 7 Výsledné pevnosti v tahu za ohybu s vyznačenou směrodatnou odchylkou s využitím betonového recyklátu (Horych, 2019).....	27
Obrázek 8 Výsledné pevnosti v tlaku s vyznačenou směrodatnou odchylkou s využitím betonového recyklátu (Horych, 2019).....	27
Obrázek 9 Schéma lehčeného bloku s tepelnou izolací.....	30
Obrázek 10 Schéma bloku 1 – Základní tvar ztraceného bednění.....	32
Obrázek 11 Schéma bloku 2 – Příčle s podélnou spojnící.	33
Obrázek 12 Schéma bloku 3 – Příčle se 2 podélnými spojnícemi.....	34
Obrázek 13 Schéma bloku 4 – Písmeno S.....	35
Obrázek 14 Měření hodnoty sednutí (ČSN EN 123 50-2, 2020)	37
Obrázek 15 Měřicí sestava s popisem hlavních prvků (Horych, 2019).....	38
Obrázek 16 Schéma měření podélného kmitání (Horych, 2019)	38
Obrázek 17 Schéma měření příčného kmitání (Horych, 2019)	39
Obrázek 18 Schéma měření kroutivého kmitání (Horych, 2019).....	39
Obrázek 19 Schéma průběhu zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.....	40
Obrázek 20 Cyklus závislosti teploty (T) na čase (t) zmrazovacího roztoku uprostřed na zkoušeném povrchu (ČSN EN 123 90-9).....	41
Obrázek 21 Část vzorků popsaných pro správné zařazení	41
Obrázek 22 Schéma zkoušky jednoosé pevnosti v tlaku	42
Obrázek 23 Příklady vyhovujícího způsobu porušení krychle (ČSN EN 123 90-3).....	43
Obrázek 24 Průběh zkoušení nasákavosti vlivem kapilarity vzorků	44
Obrázek 25 Testování bočnice bloku v tahu za ohybu	45
Obrázek 26 Zrnitostní křivky odpadní vysokopecní strusky	48

Obrázek 27 Zrnitostní křivka zpracovaného betonového recyklátu (Tesárek a kol., 2017)	50
Obrázek 28 Vývoje tepelného toku za použití betonového recyklátu (Tesárek a kol., 2017)	50
Obrázek 29 Pořízené snímky polypropylénových vláken (Prošek & Trejbal, 2019)	53
Obrázek 30 Výroba vzorků v laboratoři	54
Obrázek 31 Zabalené vzorky během zrání betonu	55
Obrázek 32 Vývoj dynamického modulu pružnosti s vyznačenou směrodatnou odchylkou	58
Obrázek 33 Vývoj dynamického smykového modulu s vyznačenou směrodatnou odchylkou	59
Obrázek 34 Výsledné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu s vyznačenou směrodatnou odchylkou	60
Obrázek 35 Výsledné hodnoty pevnosti v tlaku krychlí s vyznačenou směrodatnou odchylkou	61
Obrázek 36 Porovnání hmotnosti vzorků před a po zkoušce odolnosti proti zmrazování a rozmrazování s vyznačenou směrodatnou odchylkou	62
Obrázek 37 Porovnání pevnosti v tlaku testovaných a netestovaných vzorků s vyznačenou směrodatnou odchylkou	63
Obrázek 38 Porovnání pevnosti v tlaku ve stáří 28 a 56 dnů od výroby s vyznačenou směrodatnou odchylkou	64
Obrázek 39 Výsledné hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ s vyznačenou směrodatnou odchylkou	65
Obrázek 40 Průměrné hodnoty součinitele nasákavosti $c_{w,s}$ s vyznačenou směrodatnou odchylkou	66
Obrázek 41 Výsledné pevnosti bočních stěn v tahu za ohybu s vyznačenou směrodatnou odchylkou	67
Obrázek 42 Schémata uvažovaných variant uložení bloku	68
Obrázek 43 Schémata zatížení a rozložení sítě na modelu	69
Obrázek 44 Rozložení napětí na podélném schématu bloku T3	70
Obrázek 45 Rozložení napětí na příčném schématu bloku T3	71
Obrázek 46 Rozložení napětí na příčném schématu bloku T3 při zatížení 150 kN/m	72
Obrázek 47 Schématický půdorys a řez uvažovaného objektu	73
Obrázek 48 Schéma zatížení bočnice bloku vnitřní výplní	75
Obrázek 49 Rozložení napětí na boční stěně bloku T3 při zatížení 20 kN/m ²	76

7. Seznam tabulek

Tabulka 1 Výňatek z normy s požadavky pasivního standardu (ČSN EN 73 0540-2, 2002)	18
Tabulka 2 Výčet současných nejpoužívanějších betonových bloků (Ytong, 2019), (Systém Hebel, 2019), (PORFIX, 2019)	20
Tabulka 3 Výčet vybraných druhů tepelných izolací (<i>Technický List Isover EPS 100F</i> , 2019), (<i>Technický List Isover EPS GreyWall</i> , 2019), (<i>Technický List Isover TOPSIL</i> , 2019) (<i>Technický List Multimax</i> , 2017), (FRONTROCK PLUS, 2019), (<i>Technický List K5 Kontaktní Fasádní Deska</i> , 2018)	23
Tabulka 4 Fyzikální a mechanické vlastnosti použitého cementu CEM I 42,5R	46
Tabulka 5 Chemické složení použitého cementu CEM I 42,5R	47
Tabulka 6 Chemické složení odpadní vysokopecní strusky (Prošek, 2018b)	48
Tabulka 7 Bližší specifikace struskového kameniva Frakce 0/4 mm (Karas, 2020a)	49
Tabulka 8 Bližší specifikace struskového kameniva Frakce 2/8 mm (Karas, 2020b)	49
Tabulka 9 Chemické složení použitého fluidního popílku	51
Tabulka 10 Základní charakteristiky použitého vápenného hydrátu dle (ČSN EN 459-1, 2015)	52
Tabulka 11 Složení vzorků s označením T – Betonový recyklát a struska (Horych, 2019)	56
Tabulka 12 Složení směsí s označením V – Popílek a struska	56
Tabulka 13 Návrhové hodnoty zatížení napočítané na obvodovou stěnu	73
Tabulka 14 Návrhové hodnoty zatížení napočítané na vnitřní nosnou stěnu	74
Tabulka 15 Klíčové parametry posouzení vybraných betonových prvků (BEST, 2020; PORFIX, 2019; Systém Hebel, 2019; Ytong, 2019)	77
Tabulka 16 Klíčové parametry posouzení vybraných keramických prvků (HELUZ, 2020; Porotherm, 2020)	80
Tabulka 17 Předběžný výpočet ceny prvku V1	83
Tabulka 18 Předběžný výpočet ceny prvku T2	83
Tabulka 19 Předběžný výpočet ceny prvku T3	83
Tabulka 20 Ceny za 1 kus porovnávaných prvků včetně DPH	84
Tabulka 21 Vlastnosti vybraných experimentálně vyrobených prvků s využitím recyklovaných materiálů	85