



17. KONFERENCE TECHNOLOGIE A PROVÁDĚNÍ

ČESKÁ BETONÁŘSKÁ SPOLEČNOST ČSSI

SBORNÍK KE KONFERENCI

**ČESKOMORAVSKÝ
BETON**
HEIDELBERGCEMENT Group

edited by
KAROLINA JANDOVÁ, PETRA ŠVEJDA JOHOVÁ, JIŘÍ VÍCH

April 20, 2021

Contents

1	SEZNAM PŘÍSPĚVKŮ	2
1.1	SEKCE: APLIKACE BETONU V KONSTRUKCÍCH	4
1.2	SEKCE: BETON V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ	21
1.3	SEKCE: VÝZKUM A INOVACE	60
1.4	SEKCE: BETON V PRAXI	85

Chapter 1

SEZNAM PŘÍSPĚVKŮ

SEKCE: APLIKACE BETONU V KONSTRUKCÍCH

- | | | |
|---|---|----|
| 1 | Trh s transportbetonem v ČR, současnost možné směry vývoje, <i>Ing. Vladimír Veselý</i> | 5 |
| 2 | Beton a stavby ŘSD, <i>Ing. Martin Luňáček, Ph.D. MBA</i> | 16 |

SEKCE: BETON V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

- | | | |
|---|---|----|
| 1 | Vliv prostředí a jejich chemické mechanismy, <i>prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.</i> | 21 |
| 2 | Vliv kavitace a ohrusu na stavbách vodních děl, <i>Ing. Martin Tážký, prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.</i> | 32 |
| 3 | Beton v prostředí zemědělských staveb, <i>Ing. Adam Hubáček, Ph.D., prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.</i> | 39 |
| 4 | Co to znamená, když je při diagnostice požadováno stanovení mrazuvzdornosti betonu, <i>Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D., doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D., Ing. Martin Lišovský, Ing. Martin Alexa</i> | 49 |

SEKCE: VÝZKUM A INOVACE

- 1 Beton z recyklátu, *Ing. Bohuslav Slánský, Ph.D., Pavel Zelinka, Ing. Jan Čermák, Ph.D.* 61
- 2 Kontrola betonových konstrukcí metodou pulse-echo, *doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D., David Juráň, Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D., Ing. Jaroslav Šnédar* 71
- 3 Soudržnost výztuže s betonem za zvýšených teplot, *doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D., Ing. David Čítek, Ing. Jindřich Čech, Ph.D., Ing. Adam Čítek, Ing. Martin Kryštof* 79

SEKCE: BETON V PRAXI

- 1 Betonáže základových konstrukcí v moři most přes Åsfjord na silnici FV. 714 v Norsku, *Ing. Robert Brož, Ph.D., Ing. Petr Koukolík, Ing. Matěj Novotný, Ing. Jiří Lukeš, Vít Kavka, Ing. Dominik Hanus, Ing. Marek Klíma, Jakub Beneš* . . 86
- 2 Využití robotické fabrikace ve stavebnictví, *Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D., MgA. Federico Díaz, Ing. David Čítek, Ing. Karel Hurtig, Ing. Martin Kroc, Ph.D.* . . 101
- 3 Beton v různých klimatických podmínkách, *Ing. Robert Coufal, Ph.D.* 110
- 4 Betonáž v extrémních klimatických podmínkách, *Ing. Michal Števula, Ph.D.* . . 118

1.1 SEKCE: APLIKACE BETONU V KONSTRUKCÍCH

TRH S TRANSPORTBETONEM V ČR, SOUČASNOST A MOŽNÉ SMĚRY VÝVOJE

Vladimír Veselý

1 Úvod

Betonové stavitelství má na území nynější České republiky dlouhou, a bohatou tradici. Řadu let však byla výroba betonu spojena s místem stavby a byla realizována na staveništních betonárnách. Přes to, že z pohledu ekonomického (odpisy pořizovacích nákladů) je takovýto způsob výroby málo efektivní (využití cca 8-14% [1]), byla postavena řada velkých betonových konstrukcí. Byly zbudovány významné mosty, přehrady a je třeba připomenout i systém hraničního opevnění před 2. sv. válkou.

Na počátku 60 tých let minulého století však tento způsob výroby betonu přestával vyhovovat potřebám dalšího rozvoje stavebnictví, které muselo plnit stále rostoucí požadavky na objem bytové, industriální a dopravní výstavby. Tato doba je považována za start odvětví transportbetonu v Československu a návazně tedy i v ČR.

Prvními betonárnami, nesoucími všechny znaky dnešních výroben transportbetonu, byly betonárny v Ostravě – Vítkovicích a v Košicích - VSŽ, postaveny v roce 1962 [2] a betonárna v Praze na Rohanském Ostrově, postavená v roce 1967.

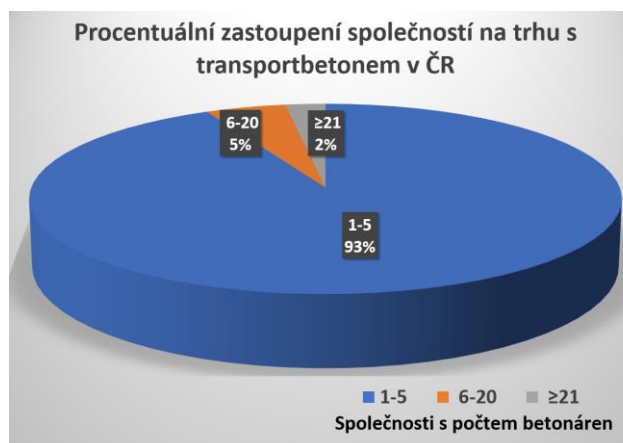
2 Současnost odvětví výroby transportbetonu v ČR

V současnosti působí v České republice na trhu 164 obchodních společností, které disponují 456 betonárnami [3]. Pro srovnání podle veřejně dostupných zdrojů [11], [12] na Slovensku provozuje výrobu transportbetonu 63 společností na 147 betonárnách.

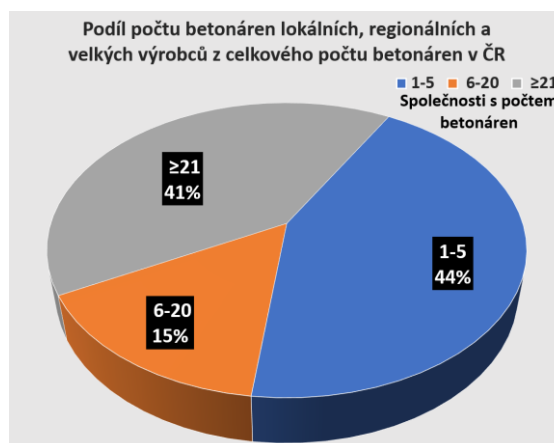
Zjednodušeně je možné zařadit výrobce v ČR do třech kategorií:

- lokální výrobci – působí na lokálních trzích, provozují 1 až 5 betonáren, trhy betonáren více méně navazují
- regionální výrobci – působí v rámci většího regionu (více okresů či vyšší správní územní celek), provozují 6-20 betonáren a trhy těchto betonáren nemusí vždy souviset
- velcí výrobci - dodávají na celém území a provozují více jak 21 betonáren

Lokální výrobci představují celkem 151 společností, provozujících 199 betonáren, regionálních výrobců je celkem 8 společností disponujících celkem 70 ti betonárnami. Mezi velké výrobce je možno zařadit 4 společnosti s celkem 187 betonárnami, viz **Obr. 1** a **Obr. 2**.



Obr. 1 Procentuální zastoupení společností na trhu s transportbetonem v ČR



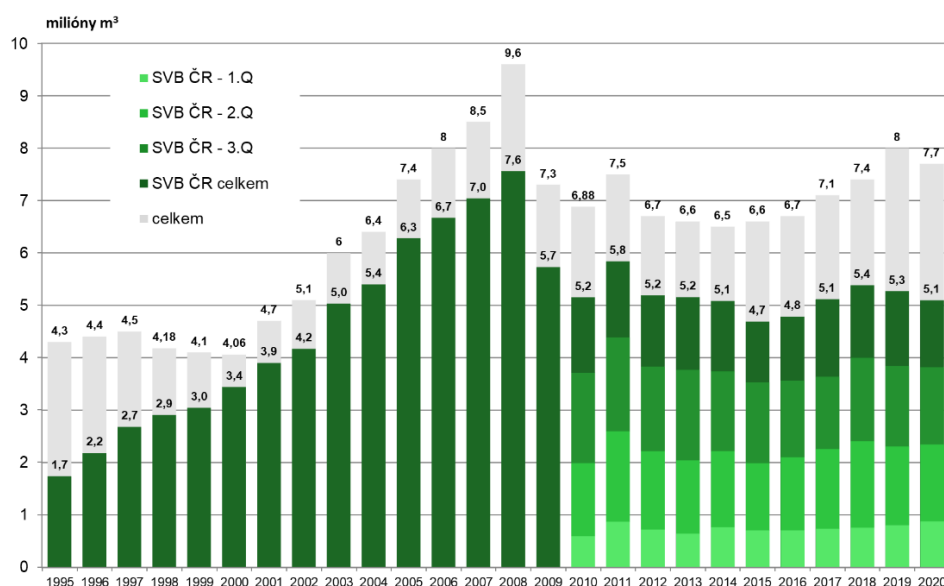
Obr. 2 Podíl počtu betonáren lokálních, regionálních a velkých výrobců z celkového počtu betonáren v ČR

Celková produkce transportbetonu v ČR je závislá na výkonu stavebnictví jako celku a na kolísání stavební produkce. Podíváme-li se na výrobu transportbetonu v časové řadě od roku 1995 do roku 2020, můžeme pozorovat jak tendence a objemy celkové výroby a tak i podíl členů svazu na této výrobě. Z grafu na **Obr. 3** je patrný prudký nárůst produkce transportbetonu po roce 2000 až do roku 2008, kdy bylo vyrobeno téměř 10 mil. m³ transportbetonu, téměř 1 m³ na obyvatele ČR. Tento nárůst byl spojen s pozitivním hospodářským vývojem a s velkým rozsahem realizace veřejných investic do infrastruktury. Po roce 2008 nastal s všeobecným hospodářským útlumem pokles výroby. V období 2014 -16 rostla produkce transportbetonu jen zvolna, větší akceleraci je možno zaznamenat počínaje rokem 2017. Do maxima roku 2008 však chybí 20%. Možnou příčinou je i to, že v důsledku hospodářského propadu došlo k přerušení přípravy nových investic, zejména v dopravní infrastruktuře. Z grafu je rovněž patrné, že podíl výrobců transportbetonu sdružených ve Svazu výrobců betonu ČR po roce 1995 narůstal s růstem členské základny a následně kolísal dle vývoje počtu členů SVB ČR. Graf nezahrnuje celkovou výrobu betonu v ČR, tedy například výrobu prefabrikátů.

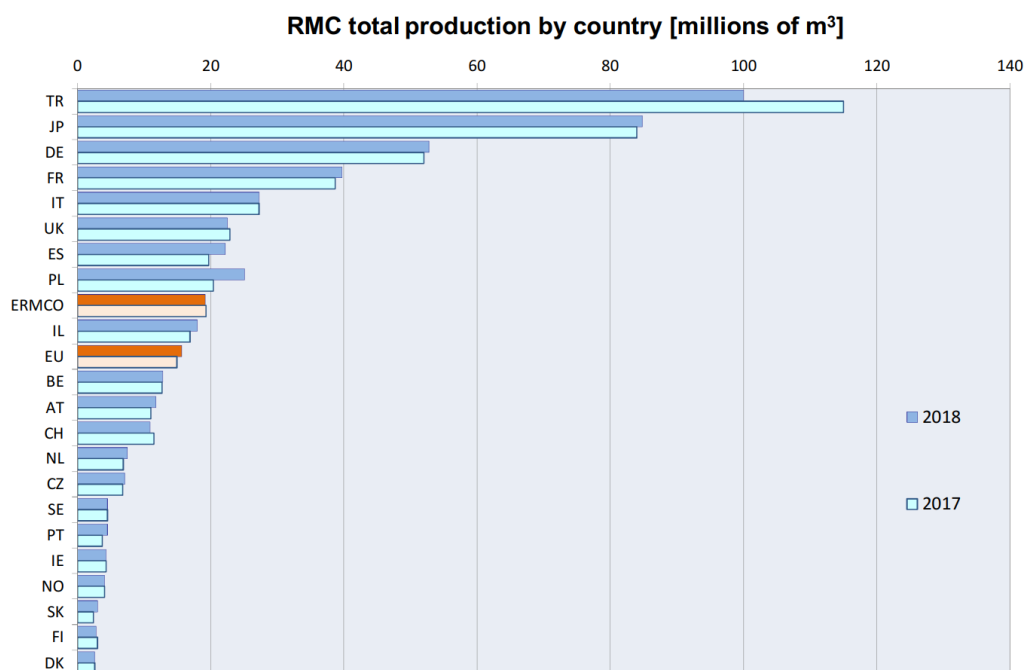
Z celkového počtu betonáren je možno odhadovat, že instalovaný teoretický výkon je více jak dvojnásobný, než je reálná roční výroba transportbetonu v ČR. Kapacita je dočasně zvyšována mobilními betonárnami, zřizovanými pro konkrétní projekty.

Vysoký počet betonáren, podíl lokálních výrobců činí 44% z celkového počtu betonáren a rovněž vysoká instalovaná kapacita, zajišťují silné konkurenční prostředí. To vede k poměrně malé profitabilitě a komfortní situaci pro odběratele betonu.

V kontextu Evropy, SVB je členem organizace ERMCO (European Ready Mixed Concrete Organization), se Česká republika objemem výroby transportbetonu řadí na na 11 místo z celkem 19 ti evropských členů včetně Turecka (**Obr. 4**). Produkce betonu na jednoho obyvatele v ČR činila v roce 2018 cca 0,7 m³ a byla lehce nad průměrem EU (0,6 m³/obyvatele).

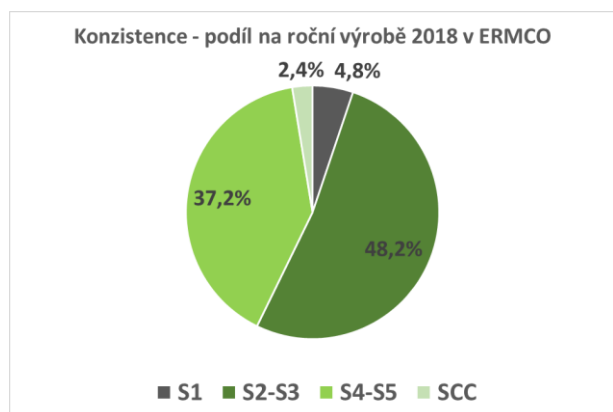


Obr. 3 Výroba transportbetonu v ČR v letech 1995 – 2020 [4]

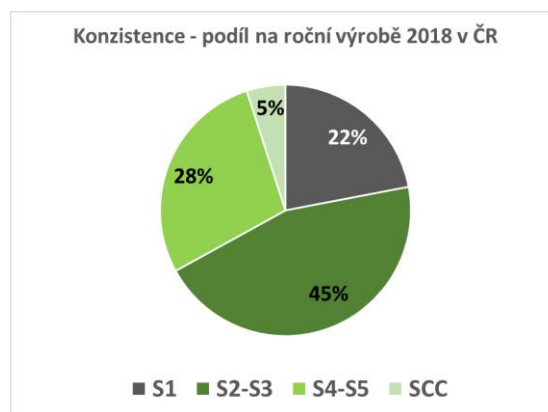


Obr. 4 Celková výroba transportbetonu v zemích ERMCO v mil. m³ v roce 2017 a 2018 (JP – Japonsko, IL – Izrael) [5]

Pokud se týká parametrů dodávaného čerstvého betonu v porovnání se zeměmi ERMCO, vyznačuje se trh v ČR tradičně vysokým podílem betonů s nízkou konzistencí (tzv. zavlhých betonů) 19% v ČR oproti 4,5% v ERMCO a podílem betonů v S3 57% v ČR, tradičně objednávaných pro zhotovení monolitů a průmyslových podlah. V konečném důsledku to často vede k nešvaru dodatečně přidávané vody na stavbě. Indicií k tomuto tvrzení může být i průměr produkce v rámci ERMCO s vysokým podílem betonů v konzistenci S4-S5 ve výši 40,6% viz **Obr. 5** a **Obr. 6** [5].

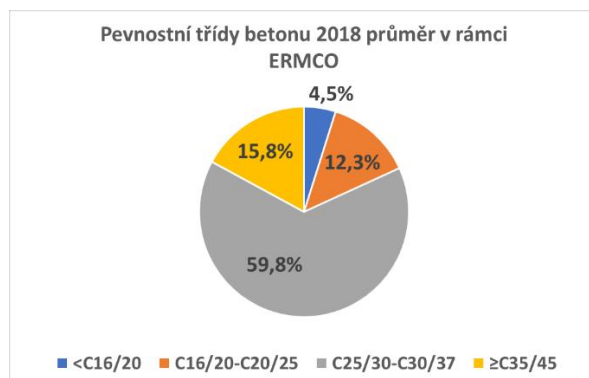


Obr. 5 Výroba betonu dle konzistence v roce 2018 průměr ERMCO

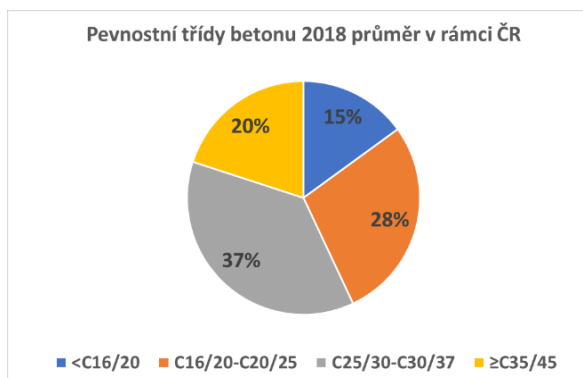


Obr. 6 Výroba betonu dle konzistence v roce 2018 průměr ČR

Parametry ztvrdlého betonu lze porovnávat jen podle podílu vyráběných pevnostních tříd. Další parametry, například odolnosti proti průsaku vody či ch. r .l. nejsou v rámci statistik sledovány, protože je to z důvodu odlišných používaných metod měření (s výjimkou hloubky průsaku tlakovou vodou) prakticky vyloučeno. Nejvíce se v rámci zemí ERMCO vyrábí beton v pevnostních třídách C25/30-C30/37, téměř 60%. V ČR je tradičně oproti ERMCO vysoký požadavek na pevnosti do C16/20 (ČR 15% oproti ERMCO 4,5%). Jde zejména o výrobu pro individuální stavebníky. Rozdělení výroby v dalších segmentech pevnostních tříd je v ČR poměrně rovnoměrné a oproti zemím ERMCO vykazuje výroba v ČR vyšší podíl pevností $\geq$ C35/45 (ČR 20%, ERMCO 15,8%), viz **Obr. 7** a **Obr. 8** [5].



Obr. 7 Poměr vyráběných skupin pevnostních tříd betonu na výrobě v rámci ERMCO



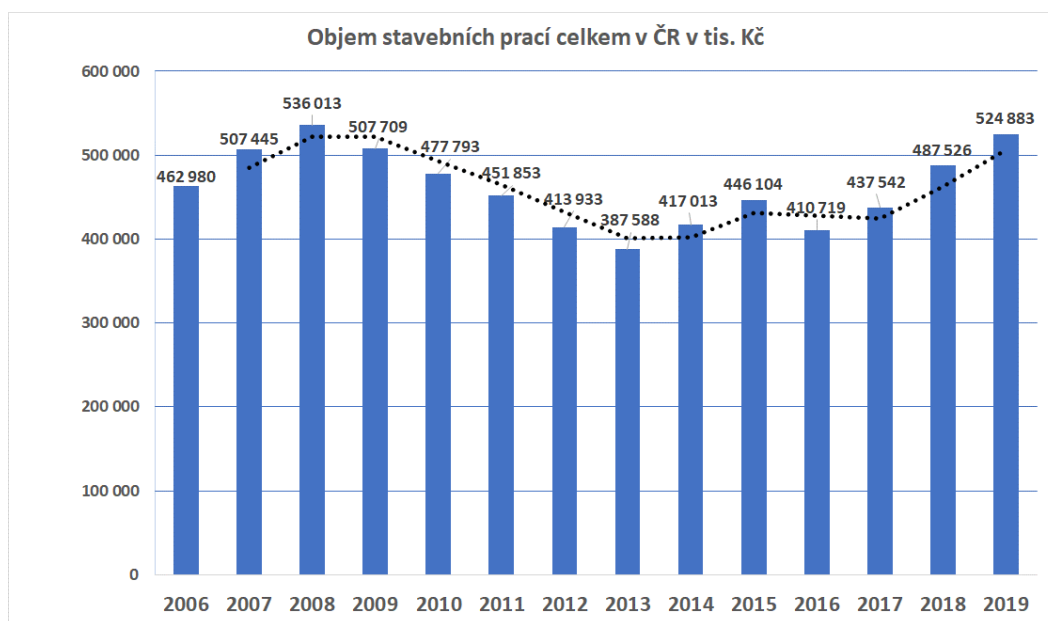
Obr. 8 Poměr vyráběných skupin pevnostních tříd betonu na výrobě v rámci ČR

3 Příležitosti a trendy

3.1 Situace ve stavebnictví

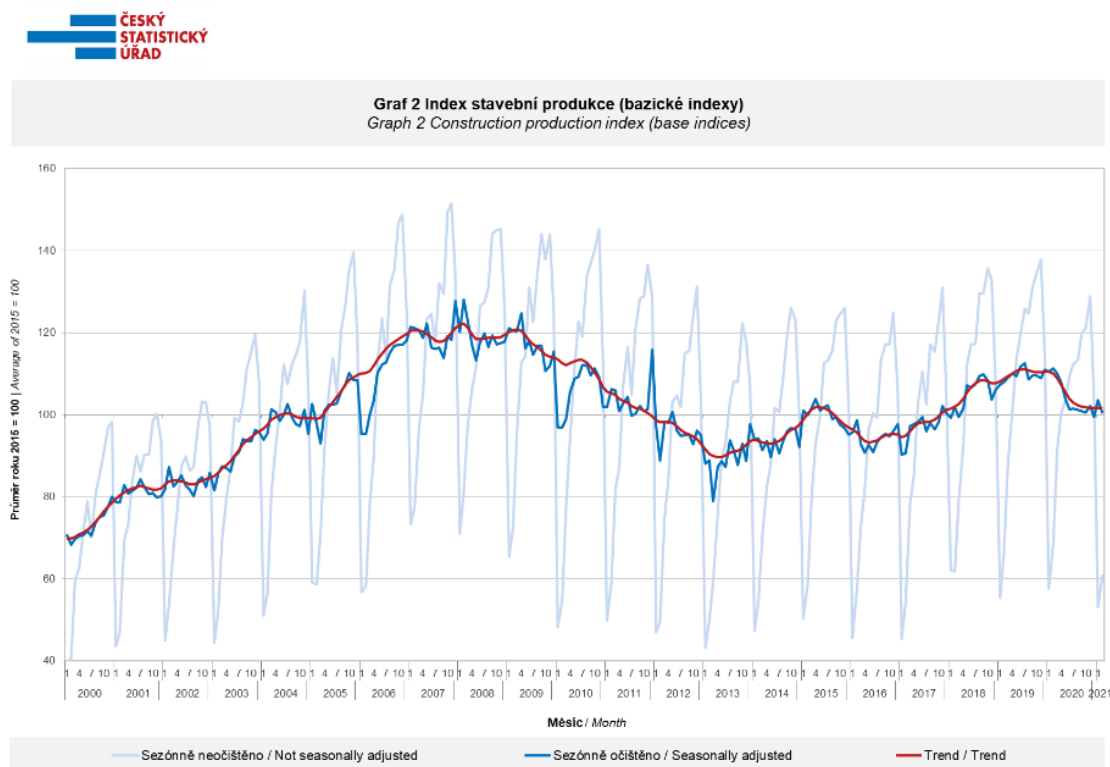
Výroba transportbetonu v ČR logicky přímo závisí na vývoji stavební výroby a na její struktuře. Podíváme-li se na objem stavebních prací v letech 2006 až 2019 v ČR (**Obr. 9**)

můžeme sledovat obdobný trend, jako v objemu výroby transportbetonu, což potvrzuje předchozí tezi.



Obr. 9 Objem stavebních prací v ČR [6]

Mimořádně úspěšné roky 2007 až 2009 se zatím podařilo napodobit jen roce 2019 a vzhledem k omezením souvisejícím s pandemií v roce 2020 lze očekávat pokles k hranici kolem 480 000 tis. Kč, viz **Obr. 10**.



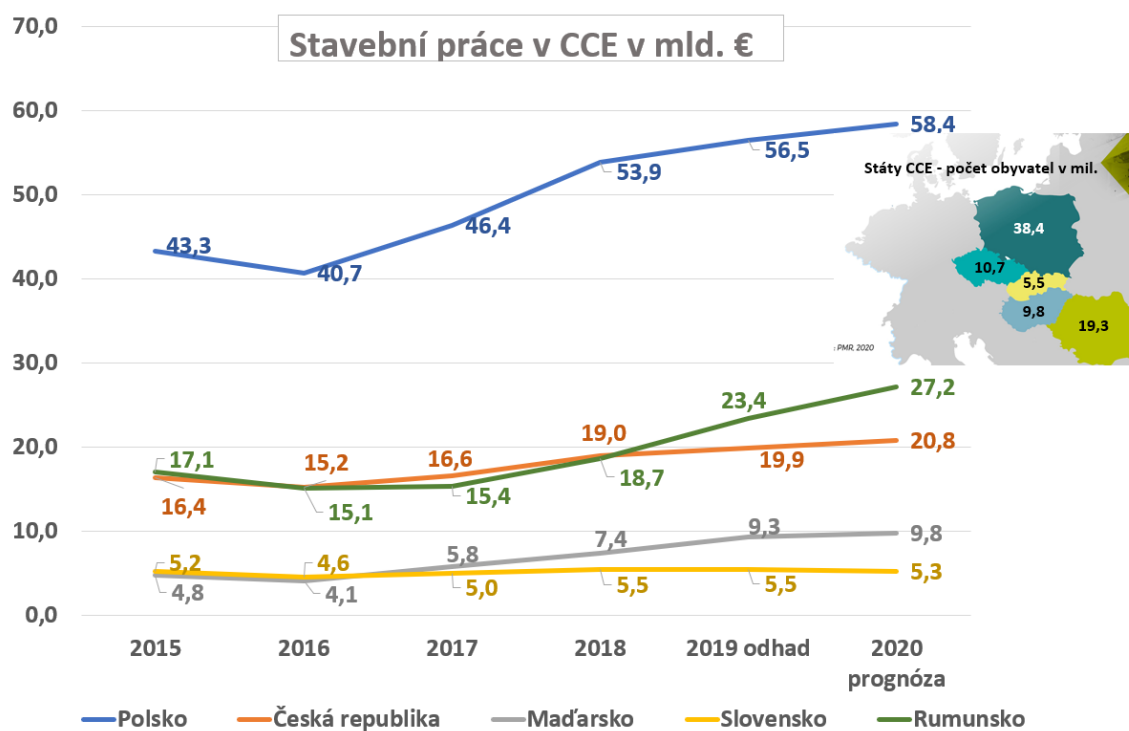
Obr. 10 Index stavební produkce 2000-2020 (bazické indexy) [16]

Ve srovnání s okolními státy CCE (střední Evropa – východ), mezi které můžeme počítat Polsko, ČR, Slovensko, Maďarsko a Rumunsko, patří Česká republika co do objemu stavební výroby v posledních letech na třetí místo viz **Obr. 11** [7] přičemž rok 2019 je kvalifikovaným odhadem a rok 2020 prognózou. I přes dojem, že by stavební produkce mohla být vyšší je třeba připomenout, že objem stavebních prací v přepočtu na obyvatele je v ČR z uvedených států nejvyšší o čemž vypovídá **Tab. 1**

Tab. 1 Roční objem stavebních prací ve státech CCE na jednoho obyvatele [7]

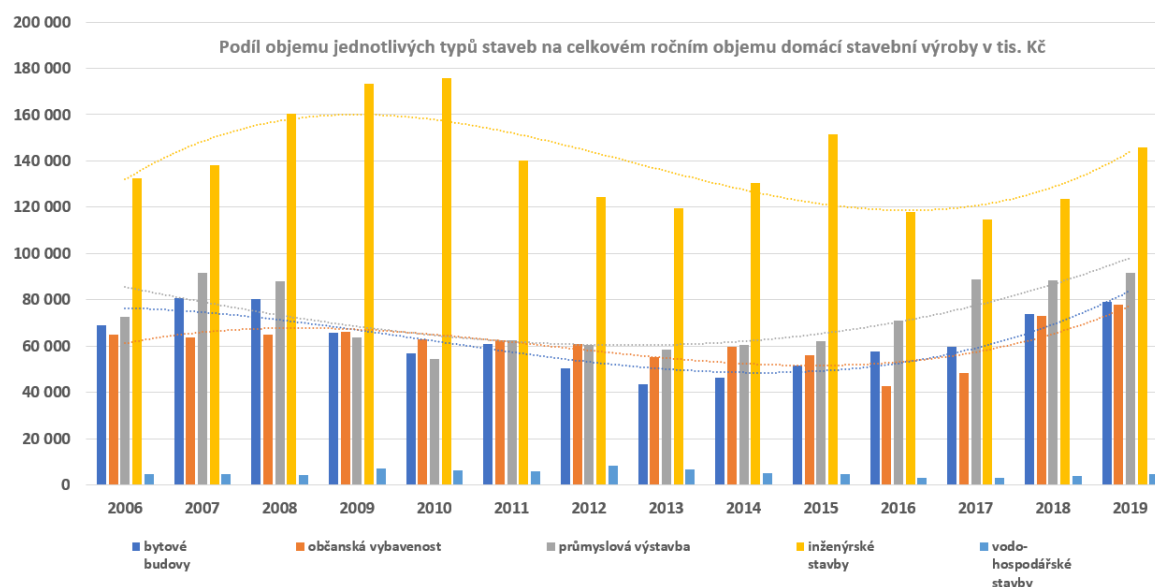
Země	Roční objem stavebních prací v tis € na 1 obyvatele v roce 2020 (prognóza)
Česko	1,94
Polsko	1,52
Rumunsko	1,44
Maďarsko	1,00
Slovensko	0,96

Zajímavá je rovněž struktura stavebních prací viz **Obr. 12**. Rozhodujícím tahounem stavební výroby jsou stavby inženýrské, hlavně dopravní infrastruktura, a tedy veřejné finanční prostředky. Zdlouhodobého hlediska je však zřetelný pokles celkových vynakládaných veřejných finančních zdrojů. Dalšími důležitými faktory je výstavba průmyslových objektů, občanské vybavenosti a bytová výstavba, financované ze soukromých prostředků rozvíjejících se firem.



Obr. 11 Objem stavebních prací ve státech CCE 2015 - 2020 [7]

Zde je pozorovatelný nárůst objemů po roce 2014, který může kompenzovat pokles veřejných investic. Marginální je vliv vodohospodářských staveb, rovněž z větší části financovaných z pom, roce prostředků i přes politiky deklarovanou potřebu přijmout opatření k eliminaci možných povodní (poldry, protipovodňové hráze a pod) či připravit se na nedostatek zdrojů vody (přehrady a další typy vodních nádrží).



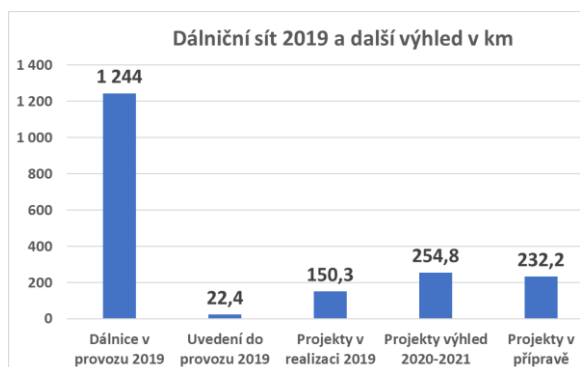
Obr. 12 Podíl objemu jednotlivých typů staveb na celkovém ročním objemu domácí stavební produkce [6]

3.2 Dopravní infrastruktura

Velkou a stále plně nevyužitou příležitostí pro stavebnictví a potažmo výrobu transportbetonu je rozvoj a modernizace dopravní infrastruktury, spočívající především ve výstavbě, modernizaci a údržbě dálnic a železnic.

Na začátku roku 2018 bylo v provozu na území ČR celkem 1 244 km dálnic. K tomu však přispělo rozhodnutí z roku 2016, kdy byly rychlostní silnice převedeny do kategorie dálnic. K dosavadním 776 km dálnic bylo připočteno 459,4 km rychlostních komunikací [8].

Dálniční síť viz **Obr. 13** má být i nadále rozšiřována a prioritou se stává napojení sítě na okolní státy, se kterými dosud dálniční spojení neexistuje (Polsko, Rakousko), nebo je ho třeba rozšířit (Slovensko). Jeho realizace naráží však na vazbu prostředků a kapacit na rekonstrukci stávající sítě (zejména D1) a legislativní nepřipravenost nových úseků. Nejbližší výhled je uveden na **Obr. 14**.

**Obr. 13** Dálniční síť ČR 2019 [9]**Obr. 14** Výhled budování dálniční sítě [9]

Proces modernizace železničních dopravních cest probíhá již delší dobu. V současnosti nejpopulárnější dokončenou stavbou jsou ejpovické tunely (délka jednoho tubusu 4 150 m), budované sice technologií prefabrikovaného ostění, avšak použití transportbetonu na tuto stavbu bylo potřebné a v celkovém objemu nezanedbatelné. Modernizace počítá se zvýšením průchodnosti všech 4 hlavních koridorů, viz **Obr. 15** na cílových 160 km/hod a jejich navázání na sousední státy EU. Pro transportbeton jsou zde příležitosti při budování mostů a tunelů a při modernizaci stanic a zastávek.

**Obr. 15** Železniční koridory [10]

3.3 Energetické stavby

Delší dobu probíhá v ČR i modernizace významných energetických zdrojů. V nedávné době byly dokončeny stavby na elektrárnách Ledvice a Dětmárovice. Ve střednědobém výhledu je stále konkrétněji skloňována dostavba, respektive výstavba nových bloků jaderných elektráren Temelín a Dukovany. Z pohledu objemu výroby betonu to nemusí znamenat výrazné roční navýšení. Navíc je zjevné, že pro takovou výstavbu bude třeba vybudovat dostatečnou kapacitu v místě stavby. Co je pro betonářské odvětví důležité, je skutečnost, že pro tyto stavby bude třeba betonu se špičkovými technickými parametry.

3.4 Inovace

Beton jako základní stavební materiál, od kterého je vyžadována pevnost a trvanlivost, však musí nabízet i další výhody pro projektanty, stavební firmy a uživatele, aby si udržel

svoji pozici. I když to možná není na první pohled patrné, probíhá nepřetržitý proces inovací v oboru betonu.

Počátkem 90. let minulého století se objevily nové typy plastifikačních přísad, jejich používání umožnilo následně výrobu samozhutnitelných betonů SCC. První realizací konstrukce ze samozhutnitelného betonu v ČR byl v roce 2000 Zlíhovský železniční most. Následně se SCC stal neodmyslitelnou součástí “betonařiny” a to jak v oboru transportbetonu, tak i v prefabrikaci a na základě této technologie byla rozšířena nabídka o další tzv. lehce zpracovatelné betony. Následoval vývoj vysoce pevnostních resp. vysoce odolných betonů kombinujících vysokou hutnost s vlákny. Bylo dosaženo pevností v některých případech i přes 200 MPa. Že se nejednalo o “vývoj pro vývoj” svědčí již konkrétní realizace. Nejznámější je bezesporu lávka pro pěší a cyklisty v Čelákovících (rozpon 156 m), která se již dočkala několika významných ocenění na mezinárodním poli viz **Obr. 16**.



Obr. 16 Lávka pro pěší a cyklisty z UHPC v Čelákovících [13]

Dalšími inovačními trendy jsou tzv. “betony na míru”, určené svým složením a garantovanými vlastnostmi (zpracovatelnost, odolnost, omezené smrštění, mezerovitost a pod), pro budování konkrétních konstrukcí, například bílých van, komunikací a parkovacích ploch, konstrukcí z pohledového či barevného architektonického betonu.

4 Další vývoj

I přes to, že moderní beton a betonové konstrukce prošly dlouhou cestu vývoje, jeho inovační potenciál není zdaleka vyčerpán. Vlastní inovační proces je iniciován jak přirozeně, snahou rozšířit možnosti použití betonu, tak vynuceně, změnou předpisové základny nebo dostupností základních materiálů.

4.1 Předpisy

Změna předpisové základny je očekávána v následujícím roce, kdy má vyjít připravovaným dokumentem *fib Model Code 2020*, jenž by měl nahradit dosud platný *fib Model Code 2010* [14]. Z MC2020 pak budou vycházet nové verze evropských betonářských norem aplikovaných následně v ČR do standardů ČSN EN 1992 a ČSN EN 206. Nový MC2020 přinese nové obecné postupy, umožňující sjednotit posuzování stávajících i nově navrhovaných betonových konstrukcí.

4.2 Materiály

Základní materiály pro výrobu betonu se v dohledné době zásadně měnit nebudou, čeká je však nezbytná modifikace. V publikaci [14] je například uvedeno, cituji: *Tlak na snižování emisí CO₂ při výrobě cementu přinese v blízké době změnu v EN 197 ve smyslu rozšíření portfolia směsných cementů, snižování množství obsahu slinku a rozšíření pevnostních tříd cementu směrem dolů. To je logický trend, který však může narazit na požadavek zajištění trvanlivosti betonu (odolnosti proti působení vlivu prostředí) a rychlosti výstavby.*

Problém kameniva v blízké budoucnosti tkví v postupném vyčerpání dostupných zdrojů, zejména kameniva těženého. Možným řešením je vyšší využití kameniva recyklovaného a nahrazování drobného kameniva těženého kamenivem drceným. Konec citátu.

Postupně se mění a budou měnit zdroje příměsí. Zdroje jemně mleté vysokopecní strusky jsou omezené a budou využívány především pro výrobu směsných cementů. Zdrojů elektrárenských popílků bude ubývat v souvislosti s útlumem výroby tepla a el. energie na základě spalování fosilních paliv a jejich použití rovněž znevýhodňuje kontaminace amonnými ionty a změna tvaru zrn během procesu denoxinace. Řešení se nabízí větším využíváním metakaolínu, nízkoteplotně pálených jíílů, velmi jemně mletého vápence či odprašků z výroby drceného kameniva. Logickou cestou je i snižování spotřeby betonu subtilnějšími konstrukcemi s využitím UHPC nebo tvarováním konstrukčních prvků podle průběhu vnitřních sil. Na **Obr. 17** a **Obr. 18** jsou příklady takovýchto řešení. Na **Obr. 17** je optimalizace vnější geometrie i vnitřní struktury prvku – stropní desky, **Obr. 18** je topologicky optimalizovaná konstrukce z UHPC, sestavená z prefabrikátů odlitých do bednění z obráběného polystyrenu [15].



Obr. 17 Topologická optimalizace stropní desky



Obr. 18 Topologicky optimalizovaná konstrukce z UHPC Arhuská škola. Dánsko

Další příležitostí jak optimalizovat spotřebu materiálů je metoda navrhování na užité vlastnosti (zkr. PBD, tj. Performance-Based Design) spočívající v návrhu zohledňujícím vlastnosti stavebního materiálu, prvku a konstrukce stanovené projektem. K takovým vlastnostem patří mj. únosnost, spolehlivost, trvanlivost (kvantifikovaná životností), ekonomická efektivita, nízká energetická náročnost a další vlastnosti, požadované různými předpisy a klientem [14].

Zde je třeba si uvědomit, že výše uvedené cesty, vedoucí k optimalizaci spotřeby materiálů (nové materiály, návrhové postupy a progresivní způsoby provádění), jistě vyvolají tlak na zásadní inovaci výrobní základny transportbetonu, která bude logicky spojena s vydáním nemalých finančních prostředků

5 Závěr

Transportbeton, jako obor činnosti v rámci stavebnictví, má v ČR za sebou více než 55 letou historii. Během ní prošel a v současnosti prochází kontinuálně vývojem a inovacemi. To je důkazem jeho potenciálu a svědčí o tom, že beton je pevnou součástí procesu výstavby a pevnou oporou konstrukcí všech druhů staveb a typů konstrukcí.

Literatura

- [1] PADESÁT LET TRANSPORBETONU V ČESKOSLOVENSKU A POZDĚJI V ČESKU, Jaroslav Bezděk, BETON TKS 2/2013
- [2] Betonárna v Ostravě oslavila 12. června pětapadesáté narozeniny, <http://www.transportbeton.cz/betonarna-v-ostrave-oslavila-12-cervna-petapadesate-narozeniny.html>
- [3] <https://www.betonserver.cz/beton-a-cerpani/beton-betonarny-v-cr>
- [4] <http://www.svb.cz/vyroba.html>
- [5] Ready-mixed concrete industry statistics Year 2018, ERMCO, August 2019
- [6] Český statistický úřad: <https://www.czso.cz/csu/czso/stavebnictvi>
- [7] Konference „Perspective for the construction industry in Central Europe, Varšava, 2020
- [8] Ročenka dopravy 2017, Ministerstvo dopravy, Praha 2017
- [9] <https://www.rsd.cz/wps/portal/web/Silnice-a-dalnice/mapy>
- [10] <https://www.szdc.cz/modernizace-drahy/plan-inv.vystavby.html>
- [11] <http://www.savt.sk/index.php/sk/clenovia>
- [12] <https://www.betonserver.sk/>
- [13] <https://www.celakovice.cz/cs/mesto/rozvoj-mesta/projekty/lavka-pres-labe/>
- [14] Budoucnost navrhování betonových konstrukcí, V. Veselý, B. Teplý, P. Rovnaníková, Mimořádné číslo časopisu BETON TKS #4, Praha, srpen 2019
- [15] POTENCIÁL VÝVOJE BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ V DOBĚ STAVEBNICTVÍ 4.0, Michal Kovářík, Petr Štemberk, Pavel Svoboda, Mimořádné číslo časopisu
- [16] Stavebnictví - časové řady ČSÚ (czso.cz)

Ing. Vladimír Veselý

- ✉ Svaz výrobců betonu ČR
Na Zámecké 9, Praha 4 Nusle
- ☎ +420 602 281 066
- 😊 vladimir.vesely@svb.cz

CENTRÁLNÍ EVIDENČNÍ SYSTÉM NA STAVBÁCH ŘSD ČR

Martin Luňáček

1 Úvod

Na všech stavbách ŘSD ČR je povinnost použití pouze výrobků, stavebních materiálů a směsí, které jsou schváleny Objednatelem/Správcem stavby pro jednotlivé stavby, není tedy vedena žádná všeobecná databáze schválených materiálů pro použití při výstavbě pozemních komunikací. ŘSD ČR není oprávněno doporučovat ani obecně schvalovat materiály pro použití na svých stavbách. Do skupiny materiálů jsou zahrnuty stavební materiály, stavební směsi, stavební dílce, prvky a výrobky. Schvalovací proces je veden za účelem prokázání splnění požadavků a parametrů dané zadávací dokumentace stavby, ZTKP, TKP a navazujících předpisů. Materiál lze zabudovat do stavby až po úspěšně dokončeném schvalovacím procesu.

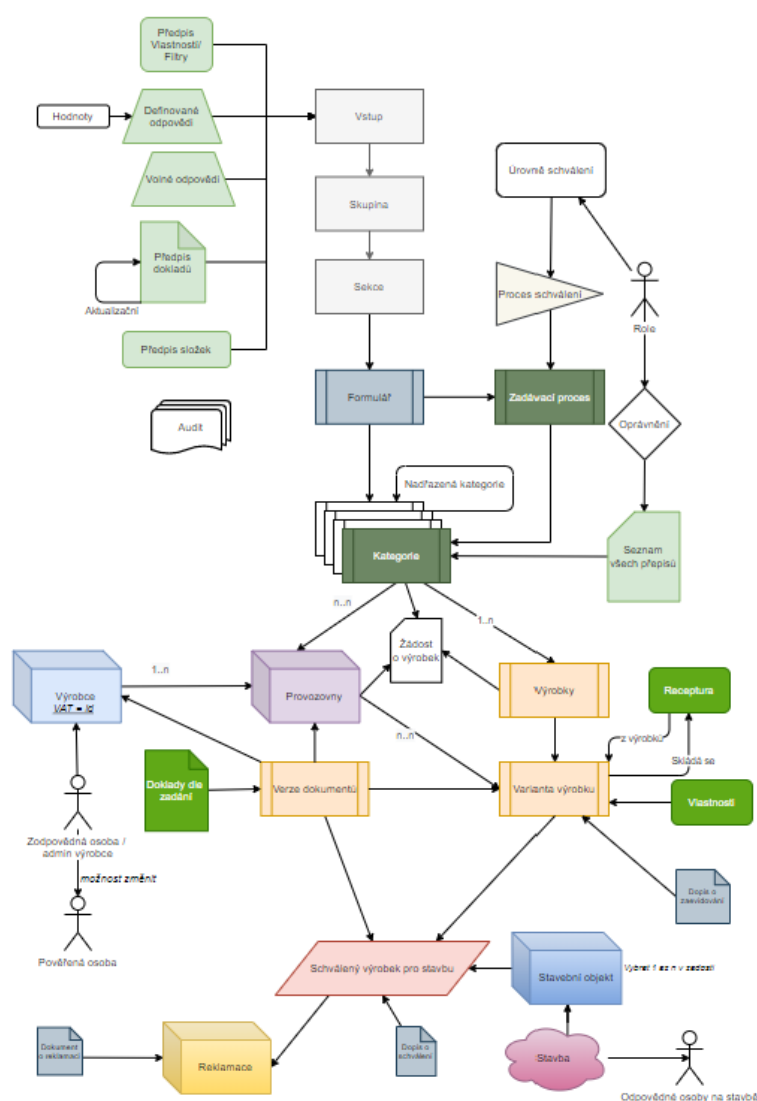
Jelikož v současné době je sice schvalovací proces zakotven do smlouvy o dílo (SoD) ve formě Zvláštních obchodních podmínek, kdy proces vychází z podmínek FIDIC (Red book), probíhá na každé stavbě samostatně. Bohužel provedené kontroly v posledních letech prokázaly, že obsahují chyby, případně nejsou nastaveny srovnatelné podmínky úrovně požadavků ze strany jednotlivých TDS. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k přípravě a naprogramování interaktivní aplikace, která by uživatele provedla celým procesem schvalování příslušného materiálu a zároveň by sjednotila požadavky na všech stavbách ŘSD ČR. Zde je nutné ještě jednou připomenout, že schválení a povolení k zabudování je plně v kompetenci a povinnostech Správce stavby, resp. jím jmenované Odpovědné osoby v rámci Týmu správce stavby.

2 Webová aplikace CES

2.1 Obecný popis

Cílem aplikace CES je schválení výrobků, stavebních materiálů a směsí, včetně případných výrobců, ze strany Správce stavby pro konkrétní stavbu, a to se zajištěním jednotného schvalovacího procesu na všech stavbách pozemních komunikací ŘSD ČR a následně zaevidování těchto výrobků a materiálů, včetně případných výrobců, do jednotné centrální evidence již použitých výrobků na stavbách pozemních komunikací ŘSD ČR.

Hlavním cílem je zjednodušení a objektivně i srovnání požadavků celého procesu schválení materiálu. Správce stavby bude nově povinen zaevidovat materiál pro svoji stavbu. Zároveň hlavní zjednodušení je, že pokud již byl materiál použit na jiné stavbě v rámci ŘSD ČR, je možné si převzít všechny podklady z této stavby, což odstraní posílání mnoha dokumentů a zároveň značně zrychlí proces schvalování.



Obr. 1 Schéma systému CES

2.2 Popis činnosti CES

V současné době probíhá nastavování ostré verze systému a jeho příprava na plné spuštění a zpřístupnění uživatelům. Uživatelé budou rozděleni do několika rovin a jejich podúrovní. Hlavní dělení je na Správce CES, Správce stavby, Tým Správce stavby, Zhotovitel a Výrobce.

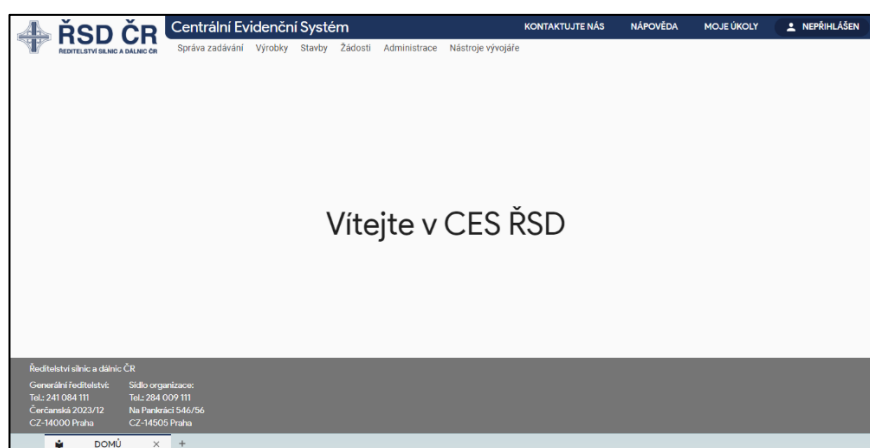
Správce CES je uživatel, který bude kontrolovat proces schvalování materiálu a jedná se o interního zaměstnance ŘSD ČR, který především dohlíží na fakt, aby v systému byly zaevidovány pouze materiály splňující všechny požadavky smluvních dokumentů.

Správce stavby a Tým správce stavby jsou kontrolní orgány provádějící kontrolu a schválení žádostí o zaevidování schválení materiálu pro použití na konkrétní stavbě.

Zhotovitel je oprávněn k vytvoření žádosti o zaevidování a schválení výrobku pro konkrétní stavbu, kde může využít již předebrané dokumenty od Výrobce. Kromě předvyplnění dokumentů do vedlejší databáze má Výrobce i možnost udržovat své doklady platné. Zde je nutné opětovně upozornit, že předebrané doklady k materiálům, ani

zaevidované materiály nejsou stále materiály pro obecné použití na stavbách ŘSD ČR. Vše je pouze urychlení procesu schvalování a ŘSD ČR pouze poskytuje prostředí CES pro zrychlení a zjednodušení procesu schvalování.

Samotný proces může být zahájen tím, že Výrobce uloží doklady ke svému materiálu do systému CES. Zhotovitel, hledající vhodný materiál splňující jeho zadávací dokumentaci, si může vybrat předebraný materiál, nebo může vložit vlastní. Poté vyplní žádost včetně všech požadovaných údajů a tím spustí předdefinovaný proces schvalování pro konkrétní stavbu. Aplikace je uzpůsobena tak, že pro každou stavbu může být proces upraven dle specifik té dané stavby, jako je například úprava jednotlivých úrovní schválení a jiné. Po řádném ukončení procesu schvalování materiálu jde vždy první zaevidování materiálu na přezkoumání Správci CES, který pokud jsou procesy a všechny požadované doklady správně vloženy, nechá výrobek uvést v databázi zaevidovaných výrobků, v opačném případě je vrácen k dopracování. Tento kontrolní úkon je pouze při prvním zaevidování výrobku a pak až při změně jakékoliv části v jeho dokumentaci.



Obr. 2 Přihlašovací obrazovka aplikace CES

2.3 Schvalování směsí

Jak již bylo zmíněno, systém je naprogramován tak, aby jednotlivé procesy schválení, případně jednotlivé kategorie výrobků mohly být upraveny dle specifických požadavků. Takovým specifickým procesem schvalování budou žádosti o zaevidování asfaltových a betonových směsí.

Krok 1 - Údaje o výrobku

Krok 2 - Vlastnosti a možnosti

Krok 3 - Doklady

Centrální Evidenční Systém

MARIAN ČAMÁK

Žádost o zaevidování výrobku Ukončit Reset Podat

Údaje o výrobku

Stavba	Dělnice D1 úsek Větrný Jeníkov
Kategorie výrobku	Betonová směs
Systém zadávání / posouzení	NePaR System 4
Název výrobku	
Popis výrobku	
Použití výrobku	
Dovoz	

Vlastnosti a možnosti

Vlastnosti

Označení betonu

Doklady

Doklady k posouzení prvku

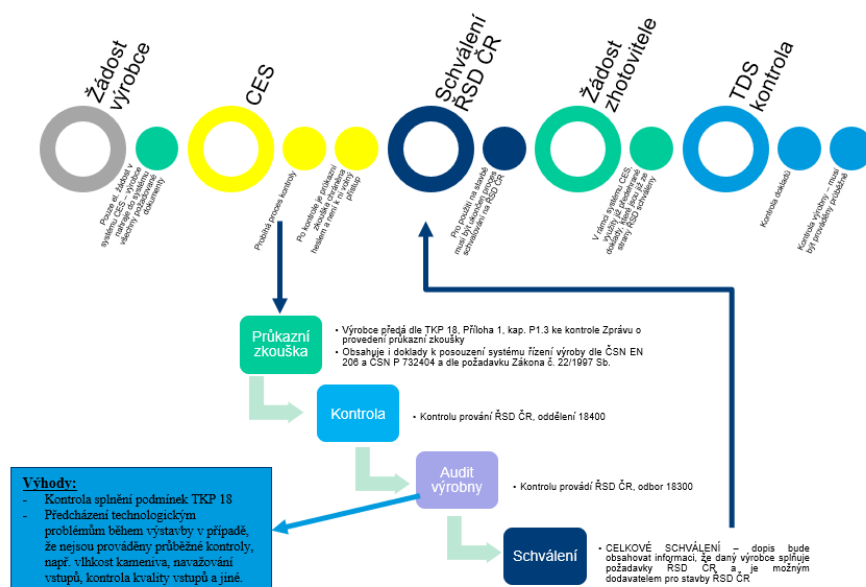
Prohlášení o vlastnostech

Vložit soubor Výběr

Datum vydání

Obr. 3 Úvodní strana žádost o zaevidování výrobku

Kontrola průkazných zkoušek se přesune do prostředí CES, kde v případě kladného vyhodnocení bude i vložen schvalovací dopis dané průkazní zkoušky. Jelikož bylo v poslední době zjištěno, hlavně u výroben čerstvého betonu, že neprobíhají kontrolní prohlídky a audity ze strany TDS plně v souladu s požadavky TKP a smluvních dokumentů, bude nově nutné k dané směsi doložit schválení o kontrole výroby ze strany ŘSD ČR, kterou bude provádět Úsek kontroly kvality staveb. Tedy Zhotovitel bude mít možnost požádat o danou směs, až v okamžiku, kdy budou vloženy záznamy o kontrole průkazní zkoušky a zároveň o fyzické kontrole dané výroby. Kontrola výroby ze strany ÚKKS nenahrazuje činnost TDS a povinnost jejich kontrol je zachována, bude zakotvena do procesu schvalování.



Obr. 4 Navržený model kontroly výroben čerstvého betonu (zdroj: ŘSD ČR)

3 Závěr

Centrální evidenční systém bude nástrojem, který má za cíl zjednodušení a zrychlení schvalování materiálů pro konkrétní stavbu, ale ze strany ŘSD ČR je zde i snaha o maximální zvýšení kontroly zabudovávaných materiálů do jejich staveb. Tím, že bude nastaven systém kontroly jednotlivých fází schvalovacího procesu, je možné se vyvarovat chyb při schvalování a k eliminaci nevhodných materiálů, které zcela nesplňují požadavky smluvních podmínek, případně zadávací dokumentace.

V neposlední řadě CES v krátké budoucnosti zcela nahradí v současné době vedené Knihy materiálů. V revizi metodického předpisu pro tvorbu závěrečných zpráv hodnotících jakost provedených prací zhotovitelem bude již povinnost využívat aplikaci CES a do závěrečných zpráv bude vložena pouze přehledná tabulka obsahující schválené materiály a jejich údaje, což značně sníží objem předkládaných zpráv. Revize tohoto metodického pokynu je již v interním připomínkovacím řízení.

Do budoucna by měl být CES propojen s Centrální evidencí vad, kdy je snaha uživatelům přinést všeobecné informace o daném materiálu i s pohledu vedených vad na jednotlivých stavbách, případně s ohledem na množství reklamací a další. Například CES zjednoduší orientaci při prohlídkách a diagnostikách stavebních objektů, jelikož velmi rychlým způsobem se uživatel dostane ke konkrétnímu použitému materiálu.

Ing. Martin Luňáček, Ph.D., MBA

✉ Ředitelství silnic a dálnic ČR
Čerčanská 2023/12
CZ-14000 PRAHA
☎ +420 702 216 602
😊 martin.lunacek@rsd.cz
URL www.rsd.cz

1.2 SEKCE: BETON V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

VLIVY PROSTŘEDÍ NA DEGRADACI (KOROZI) BETONU

Pavla Rovnaníková

1 Úvod

Beton je kompozitní materiál připravený smísením cementu, kameniva a vody. Hydratovaný cement ve ztvrdlém betonu je složen z hydratovaných slínkových minerálů a hydroxidu vápenatého, který je velmi důležitou součástí betonu z hlediska vytvoření příznivého prostředí pro ochranu ocelové výztuže před korozi. Složky cementového tmelu jsou sloučeniny zásaditého charakteru, ty jsou náchylné k reakci s kyselinotvornými plyny a kyselinami. Kromě toho hydroxid vápenatý reaguje s řadou sloučenin, se kterými vytváří rozpustné nebo málo rozpustné vápenaté soli. Je tedy zřejmé, že působí-li na beton agresivní složky z okolního prostředí, dochází k poruchám, daným výše uvedenými reakcemi.

Korozi cementového tmelu v betonu lze rozdělit do tří skupin podle druhu působení na:

- korozi fyzikální – mechanické vlivy, krystalizační tlaky solí, teplota
- korozi chemickou – plynné agresivní látky z ovzduší, roztoky kyselin, zásad a solí, organické látky
- korozi biologickou – mechanické působení kořenů rostlin, chemické působení produktů životních pochodů živočichů, působení mikroorganismů.

Uvedené procesy jsou vzájemně propojeny. Vlivy prostředí na degradaci betonu se zabývá norma ČSN EN 206 [1] a doplňující předběžná norma ČSN P 73 2404 [2].

Na průběh reakcí, které mohou způsobit degradaci betonu má vliv složení betonu, tj. množství cementu, poměr cementu ke kamenivu, granulometrická skladba kameniva a porozita cementového tmelu v betonu. Významný je druh použitého cementu, který je definován v normě ČSN EN 197-1 [3].

Základní druh cementu je portlandský, označovaný jako jednosložkový (CEM I), s obsahem slínku 95–100 %. Ostatní druhy cementů (CEM II až V) jsou od portlandského cementu odvozeny, obsahují 20–94 % slínku, zbytek jsou reaktivní nebo nereaktivní příměsi. V normě uvedené příměsi jsou vysokopecní struska, křemičitý úlet, pucolány, popílky, kalcinovaná břidlice a vápenec. Kamenivo se používá hutné těžené nebo drcené, pórovité, v poslední době se pozornost obrací k drcenému recyklovanému betonu. Záměsová voda musí vyhovovat ČSN EN 1008 [4].

Beton je ve většině případů vyztužen ocelovými pruty, používá se také rozptýlená výztuž ve formě vláken z různých materiálů (ocelová, alkalivzdorná skleněná, polymerní, rostlinná).

Pevná struktura betonu se vytváří spojením produktů hydratace cementu se zrny kameniva, resp. s vlákny. Při hydrataci cementu vznikají hydratované křemičitany a hlinitany vápenaté (CSH a CAH), nedílnou složkou hydratovaného cementu je hydroxid vápenatý, Ca(OH)_2 , který je příčinou vysoké zásaditosti cementového tmelu v betonu ($\text{pH} \sim 12$). Použitím směsných cementů, nebo přidavek reaktivních příměsí do směsi pro výrobu betonu se obsah hydroxidu vápenatého, vzniklého při hydrataci cementu snižuje [5]. Z pohledu koroze betonu je nižší obsah hydroxidu výhodný, protože není k dispozici

sloučenina, která je nejvíce napadána korozi způsobujícími látkami z okolního prostředí, beton je více chráněn před degradací, než v případě použití portlandského cementu. Snížení obsahu hydroxidu vápenatého je však negativní z pohledu koroze ocelové výztuže. Snížením obsahu hydroxidových iontů v betonu pod hodnotu $\text{pH} \sim 9,5$ se vytváří prostředí pro její korozi.

Velmi důležitým faktorem v odolnosti betonu proti působení korozních látek je jeho pórová struktura, která se odvíjí od složení čerstvého betonu. Póry obsažené v cementovém tmelu ztvrdlého betonu umožňují transport korozních látek do jeho struktury. Množství a velikost pórů jsou závislé na množství záměsové vody, použité pro přípravu směsi. Teoretické množství vody, potřebné pro hydrataci příslušného množství cementu, lze přibližně vypočítat na základě jeho mineralogického složení. Obvyklá teoretická hodnota odpovídá vodnímu součiniteli 0,20 až 0,25. Pro zpracování cementu je nutno použít větší množství vody, odpovídající vodnímu součiniteli v rozmezí cca 0,35 až 0,60 podle toho, k jakému účelu se beton vyrábí a zda jsou použity přísady snižující množství záměsové vody při zachování reologických vlastností.

Článek je zaměřen na chemické procesy probíhající při korozi betonu v souvislosti s vlivy prostředí uvedené v normě ČSN EN 206 [1].

2 Specifikace druhů koroze

2.1 Fyzikální vlivy

Mezi fyzikální vlivy, podílející se na degradaci betonu, lze zařadit mechanické namáhání (nárazy, tření, kavitace, abraze jemnými částicemi apod.), dále teplotní vlivy (vysoké nebo nízké teploty), působení sloučenin, vyvíjejících krystalizační tlaky buď změnou skupenství, nebo krystalizací solí.

Uvedené mechanické vlivy mají za následek postupné porušení cementového tmelu a jeho odstraňování, což dále vede k obnažení kameniva a k jeho uvolnění.

Vliv teploty na degradaci betonu lze zaznamenat již od cca $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy se rozkládá ettringit a začínají se rozkládat hydratované křemičitany a později hlinitany vápenaté. Po zahřátí betonu na $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ je zbytková pevnost asi 10 %, vztaženo k 28denním pevnostem. Dochází až k úplné destrukci betonu, kdy se k porušení cementového tmelu přidá porušení méně stabilních druhů kameniva. Při nízkých teplotách beton nasycený vodou čelí krystalizačnímu tlaku ledu, který vznikne zmrznutím přítomné vody v pórech. Nárůst objemu o cca 9 % vyvolá krystalizační tlak, který dosahuje hodnoty až 200 MPa.

Krystalizační tlak na stěny pórů v cementovém tmelu může být vyvolán krystalizací solí z roztoků. Nejčastějším případem porušení betonu vlivem krystalizace solí je použití rozmrazovacích prostředků, které obsahují převážně NaCl. Při vhodných teplotně-vlhkostních podmínkách NaCl vykristalizuje a na stěny pórů vyvine tlak okolo 55 MPa, který může vést až k rozpadu betonu.

2.2 Chemické vlivy

Chemické vlivy způsobující degradaci betonu lze rozdělit na působení agresivních plynů z atmosféry, pak se probíhající korozní děje zařazují do atmosférické koroze a na vlivy způsobené kapalným agresivním prostředím probíhající u podzemních konstrukcí a u vodních staveb. Agresivní látky obsažené v okolním prostředí reagují se složkami

cementového tmelu a způsobují nevratné změny v jeho struktuře, které vedou ke zhoršení mechanických vlastností betonu.

Při některých reakcích může přechodně dojít ke zvýšení pevností a zpomalení transportu korozních látek do hmoty betonu vlivem zaplnění pórů reakčními produkty, ale posléze vlivem fyzikálně chemických dějů (např. rekrystalizací korozních produktů) dochází k porušení betonu a zrychlení transportu korozních látek do betonu. Všechny druhy chemické koroze souvisejí se snižováním obsahu hydroxidu vápenatého v betonu, čímž se vytvářejí podmínky pro korozi ocelové výztuže v betonu.

2.2.1 Atmosférická koroze

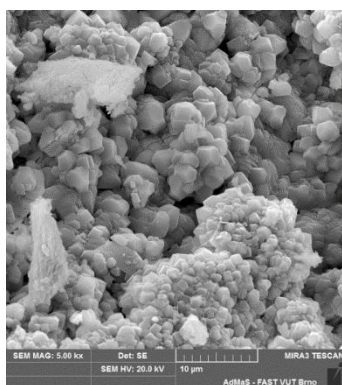
Nejvíce prostudovaným typem atmosférické koroze je tzv. karbonatace, tj. reakce s oxidem uhličitým (CO_2) obsaženým v běžné atmosféře (uvádí se průměrná hodnota 0,038 obj. %). Limity dalších kyselých plynů, které se mohou vyskytovat v atmosféře (např. SO_2 , NO_x), jsou uvedeny v zákonu o ochraně ovzduší [6].

Kyselé plyny reagují v přítomnosti vody přednostně s hydroxidem vápenatým, tím dochází ke snížení koncentrace OH^- iontů v cementovém tmelu a vytváří se podmínky pro korozi ocelové výztuže.

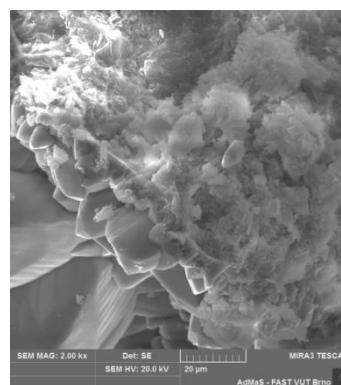
Karbonatace betonu probíhá v několika krocích. Matoušek a Drochytka [7, 8] vytvořily schéma průběhu karbonatace ve 4 krocích. V prvním stádiu reaguje CO_2 s hydroxidem vápenatým



Vzniklý jemnozrnný produkt částečně zaplňuje póry, cementový tmel je hutnější, zlepší se i mechanické vlastnosti. Ve druhém stádiu reaguje CO_2 s hydratovanými slínkovými minerály, vznikají různé modifikace CaCO_3 (kalcit, vaterit, aragonit), ve velmi jemné formě zůstávají v pseudomorfózách po hydratačních produktech cementu, **Obr. 1**. Hrubozrnné krystaly CaCO_3 se vyskytují jen ojediněle, mechanické vlastnosti betonu se nemění.



Obr. 1 Krystaly portlanditu a hydratační produkty potažené kalcitem. Foto P. Bayer



Obr. 2 Velké krystaly kalcitu prostupující hydratačními produkty. Foto P. Bayer

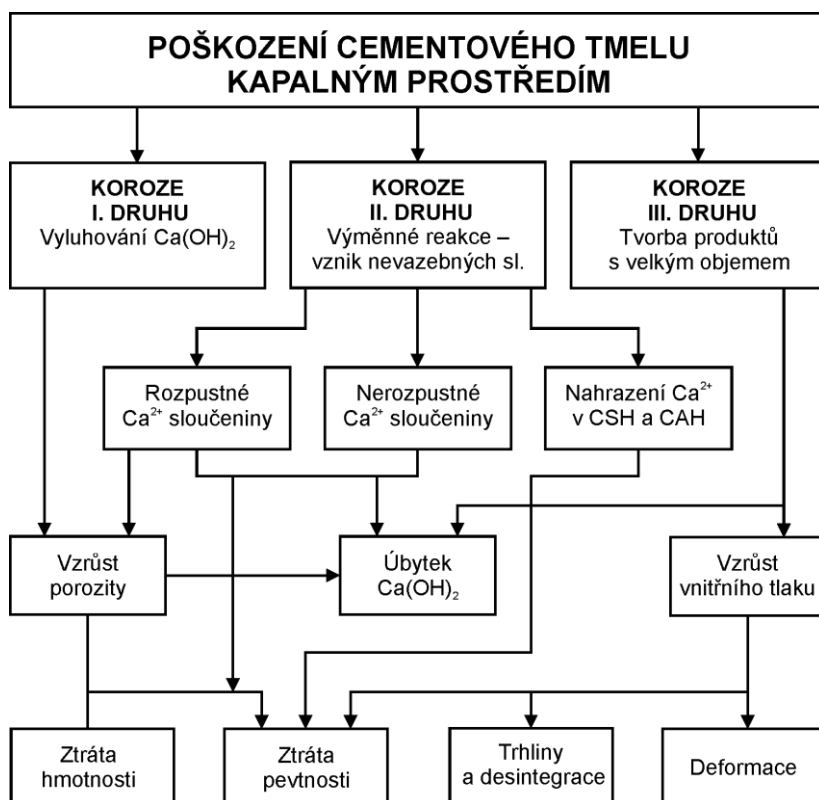
Ve třetím stádiu dochází k rekrystalizaci již vzniklého CaCO_3 vlivem působení CO_2 a vlhkosti. Tímto procesem vznikají velké krystaly kalcitu a aragonitu, které ve čtvrtém stádiu prostupují cementový tmel, výrazně se zhoršují mechanické vlastnosti a může dojít až ke ztrátě soudržnosti betonu, **Obr. 2**.

Reakcí CO_2 s hydroxidem vápenatým se snižuje koncentrace OH^- iontů v cementovém tmelu, a tím je korozi ohrožena ocelová výztuž. Proto je karbonatace již od 70. let 20. století intenzivně studována, byla vytvořena řada softwarových nástrojů pro modelování tohoto procesu v betonu [9-12, 17].

Pozornost je věnována také atmosférické korozi betonu oxidem siřičitým [8], kdy vzniká jako konečný produkt $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

2.2.2 Koroze kapalným agresivním prostředím

Korozi kapalným agresivním prostředím popsal Moskvín [13], který rozdělil korozní pochody v betonu do 3 skupin. Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím je uvedeno na **Obr. 3** [14].



Obr. 3 Schéma koroze betonu kapalným agresivním prostředím

Principem koroze I. druhu je vyluhování hydroxidu vápenatého z betonu. Rychlost vyluhování hydroxidu vápenatého (rozpuštěnost Ca(OH)_2 je 160 mg/100 g vody při 20 °C) závisí na propustnosti betonu pro vodu, u náporové vody navíc na jejím hydrostatickém tlaku. Vyloužením hydroxidu se snižuje koncentrace hydroxidových iontů, tedy snižuje se hodnota pH pórového roztoku. Při vyluhování jsou účinné vody s nízkým obsahem vápenatých a hořečnatých iontů. Jedná se o vody srážkové, říční a rybníční. Vyloužený hydroxid vápenatý reaguje s CO_2 ze vzduchu za vzniku CaCO_3 , na povrchu betonu se tvoří výluhy, na podhledech krápníky, **Obr. 4** a **Obr. 5**.

Koroze II. druhu spočívá v tvorbě nerozpuštěných nebo rozpustných vápenatých sloučenin, které vznikají reakcí kyselin, $\text{CO}_{2\text{agr}}$ a některých solí s hydroxidem vápenatým. Vzniklé produkty nemají vazebné vlastnosti a obvykle nejsou expanzivní. Kyseliny, a také koncentrované alkalické hydroxidy, reagují s hydratovanými produkty slínkových minerálů. Reakci kyselin s Ca(OH)_2 lze zapsat obecnou rovnicí



Obr. 4 Výluh na povrchu betonu



Obr. 5 Výluh (krápníky) na podhledu

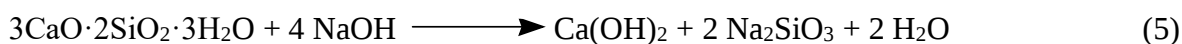
kdy výsledkem jsou více nebo méně rozpustné soli. Při $\text{pH} < 4$ dochází k reakci silných kyselin s hydratovanými produkty cementu za vzniku $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ gelu a železitých a hlinitých solí, může dojít až k úplnému rozkladu cementového tmelu.

Agresivita kyselin se posuzuje podle jejich síly (disociace ve vodném prostředí), jejich koncentrace, a také podle povahy reakčních produktů. Vznikají-li rozpustné sloučeniny, je umožněna reakce dalších podílů hydroxidu vápenatého s agresivními látkami. Jsou-li produkty nerozpustné, vytvářejí přirozenou bariéru na povrchu hydratačních produktů a zpomalují tak další reakci.

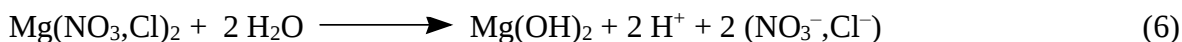
Ve vodě rozpuštěný oxid uhličitý se označuje za agresivní, $\text{CO}_{2\text{agr}}$. Po karbonataci hydroxidu vápenatého, se působením $\text{CO}_{2\text{agr}}$ rozpouští vzniklý produkt, CaCO_3 , za vzniku rozpustného hydrogenuhličitanu vápenatého, který je z cementového tmelu odplavován.



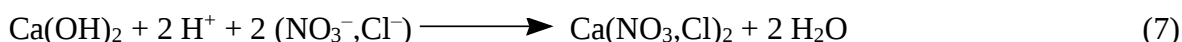
Roztoky alkalických hydroxidů (KOH , NaOH) ve vyšších koncentracích reagují s hydratovanými slínkovými minerály za vzniku rozpustných křemičitanů a hlinitanů, dochází tak k úplnému rozkladu pojivové složky betonu



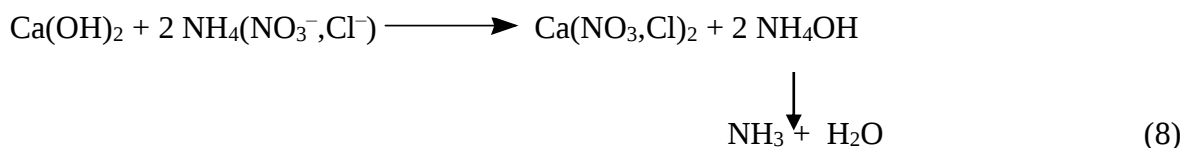
Hořečnaté soli (dusičnany, chloridy) ve vodných roztocích hydrolyzují (dochází k reakci s ionty vody) za vzniku nerozpustného Mg(OH)_2 (brucit), který v tomto případě nemá funkci pojiva.



Uvolněné H^+ ionty pak neutralizují hydroxid vápenatý za vzniku rozpustných vápenatých solí

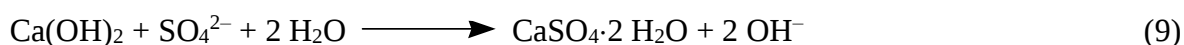


Amonné soli v zásaditém prostředí uvolňují amoniak a současně vznikají rozpustné vápenaté soli podle rovnice

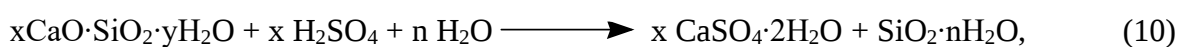


V případě síranu hořečnatého a amonného vzniká síran vápenatý dihydrát, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, který je agresivním činitelem pro síranovou korozi.

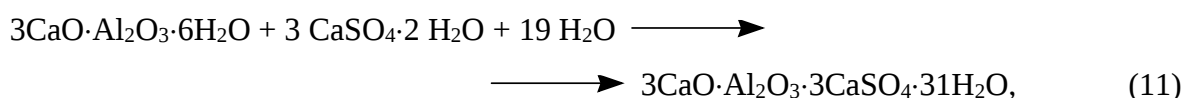
Koroze III. druhu zahrnuje především reakci síranových iontů s cementovým tmelem v betonu. Tento typ koroze je spojen s tvorbou sloučenin s velkým molárním objemem. Reakcí síranů s hydroxidem vápenatým vzniká sádrovec (sádrovcová koroze)



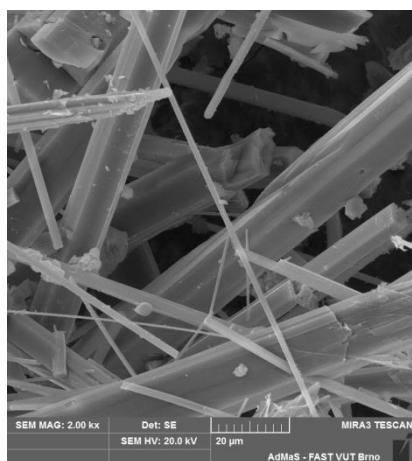
Sádrovec se tvoří také při působení kyseliny sírové na cementový tmel [16] podle rovnice



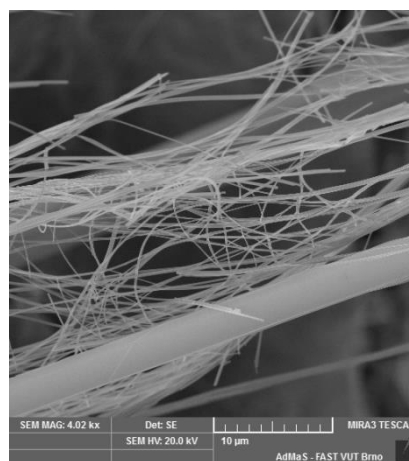
současně dochází k úplnému rozkladu hydratovaných slínkových minerálů. Přítomná vlhkost způsobuje rekrystalizaci sádrovce a vznik větších krystalů. Kromě toho je sádrovec korozním činitelem pro hydratované i nehydratované aluminátové složky cementu, výsledným produktem je pak sekundární ettringit (sulfoaluminátová koroze) [15]



který tvoří dlouhé jehlicovité krystaly, mnohdy velmi masívní, **Obr. 6**. Vznik sekundárního ettringitu je spojen s nárůstem molárního objemu více než 2,6 krát, což může vést až k rozpadu betonu.

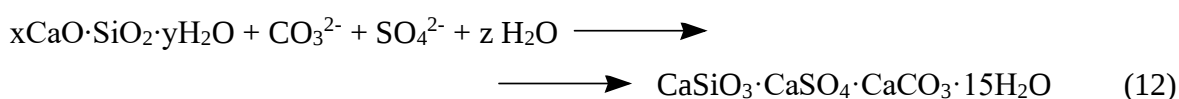


Obr. 6 Sekundární ettringit. Foto P. Bayer



Obr. 7 Thaumazit. Foto P. Bayer

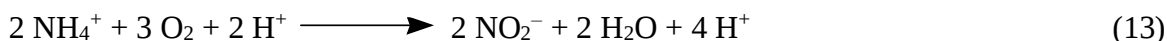
Působením síranů a uhličitánů při $\text{pH} > 10,5$ při teplotách pod 15°C může vznikat thaumazit, **Obr. 7**, který je nebezpečný tím, že rozkládá hydratované silikátové fáze



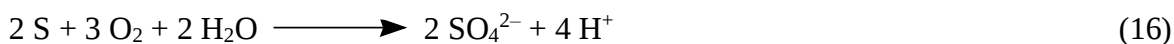
které vstupují do struktury thaumazitu.

2.3 Biologické vlivy

Biologické působení, spojené s poškozením betonu je spojeno se vznikem napětí v důsledku růstu kořenů rostlin, a dále s chemickým působením produktů metabolických procesů rostlin a živočichů. Významné místo v tomto směru zaujímá poškození kanalizačních stok a jejich příslušenství působením bakterií, oxidujících siřné a dusíkaté sloučeniny, které pocházejí z rozkladu látek bílkovinného charakteru. Látky amoniakálního charakteru oxidují nitrifikační bakterie až na kyselinu dusičnou [18]



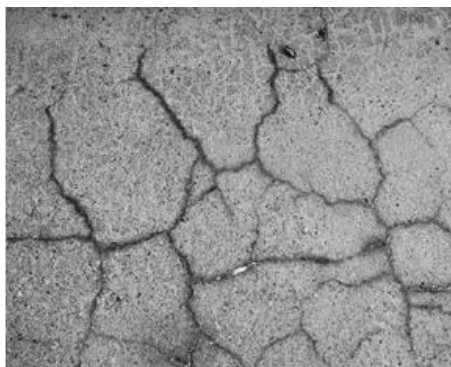
Jiné bakterie oxidují sulfidickou síru na síranovou, vzniká kyselina sírová.



Tyto procesy se pak uplatňují principy koroze II. nebo III. druhu.

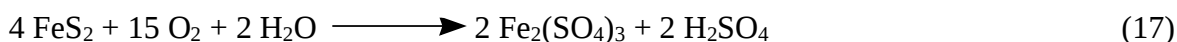
3 Degradace kameniva v betonu

Nejzávažnější poškození kameniva lze spatřovat v alkáliovém rozpínání amorfních forem oxidu křemičitého (opály, chalcedony, silicity). V přítomnosti alkálií vzniká objemný alkalicko-silikátový gel, který způsobuje vznik trhlin prokreslujících se do povrchu betonu, **Obr. 8.**

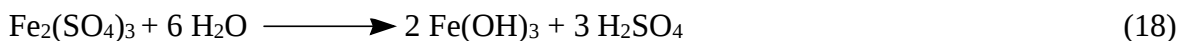


Obr. 8 Projev alkáliového rozpínání kameniva v povrchu betonu

Jiným problémem degradace kameniva je přítomnost pyritu (FeS_2), který se v zásaditém prostředí oxidační vzdušným kyslíkem za vzniku síranu železitého a kyseliny sírové podle rovnice



Kyselina sírová reaguje se složkami cementového tmelu podle rovnic (9) a (10). Navíc, síran železitý hydrolyzuje za vzniku $\text{Fe}(\text{OH})_3$ a H_2SO_4 . Hydroxid železitý pak vytváří v místě zrn rezavé skvrny



Malá zrna pyritu (do 1 mm) způsobují spíše estetické vady, větší zrna pak mohou způsobit porušení struktury betonu.

4 Vliv prostředí na korozi betonu podle ČSN EN 206 a ČSN P 73 2404

Normy ČSN EN 206 [1] a doplňující ČSN P 73 2404 [2] se zabývají stupni vlivu prostředí na degradaci betonu. Vlivy jsou rozděleny do 6 kategorií (XC, XD, XS, XF a XA) v normě [1], norma [2] rozšiřuje stupně vlivu prostředí o kategorii, týkající se poškození vlivem mechanického působení (XM), **Tab. 1**. Prostředí je specifikováno ve vztahu k vlhkosti a kapalně vodě, u kategorie XA koncentrací agresivních látek, **Tab. 2**

Tab. 1 Popis a označení prostředí

Označení stupně	Tloušťka podlahy h_{UZ} [mm] (pomocí UZ metody)
X0	Bez nebezpečí koroze nebo narušení
XC 1 až 4	Koroze vlivem karbonatace
XD 1 až 3	Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody
XS 1 až 3	Koroze vlivem chloridů z mořské vody
XF 1 až 4	Působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich
XA 1 až 3	Chemické působení
XM 1 až 3	Koroze vlivem mechanického působení (obrus)

Chemické působení je definováno pro kapalně korozní prostředí, které představuje podzemní voda a vlhkost v rostlé zemině. V **Tab. 2** jsou uvedeny mezní hodnoty koncentrací iontů, způsobujících korozi betonu a hodnota pH, odpovídající koncentraci H^+ iontů. Korozní látky CO_{2agr} , NH_4^+ , Mg^{2+} , H^+ uvedené v tabulce poškozují beton mechanismem koroze II. druhu, SO_4^{2-} ionty reagují za vzniku objemných sloučenin (koroze III. druhu) porušující beton krystalizačními tlaky.

V normě není specifikováno korozní působení srážkových a povrchových vod s nízkou přechodnou tvrdostí, které mohou způsobovat zejména korozi I. druhu, tj. vyluhování hydroxidu vápenatého z cementového tmelu. Výsledek poškození tímto působením může být v závislosti na složení betonu významný, zvláště u tekoucích vod (snížení koncentrace OH^- iontů), a tím vytvoření podmínek pro korozi ocelové výztuže.

Mechanické vlivy mohou vést k porušení betonu v makro či mikro měřítku, což následně vede ovlivnění odolnosti betonu proti korozi.

5 Závěr

Koroze betonu je významnou oblastí, kterou nelze pominout při návrhu složení betonu pro výrobu betonových konstrukcí. Je nutno zohlednit prostředí, ve kterém bude probíhat životní cyklus konstrukce. Vhodnou skladbou směsi, zejména z hlediska druhu a obsahu cementu a vodního součinitele, lze významně ovlivnit odolnost betonu proti působení agresivních látek z okolního prostředí.

Je nutno mít na paměti, že z hlediska ochrany ocelové výztuže před korozi hraje významnou roli hydroxid vápenatý, který vzniká při hydrataci cementu. Hydroxid

vápenatý vytváří prostředí s vysokou koncentrací hydroxidových iontů, které stabilizují sloučeniny na povrchu ocelové výztuže a brání tak průběhu korozních procesů. Znamená to, že částečná náhrada portlandského slínku, resp. cementu příměsmi má svoje limity, které musí zabezpečit dostatečnou kapacitu hydroxidových iontů s ohledem na možné neutralizační reakce při napadení betonu agresivními látkami.

Tab. 2 Mezní hodnoty pro stupně chemického působení zeminy a podzemní vody [1]

Chemická charakteristika	XA1	XA1	XA3
Podzemní voda			
SO ₄ ²⁻ [mg·l ⁻¹]	200 ≤ c ≤ 600	600 < c ≤ 3000	3 000 < c ≤ 6 000
pH	5,5 ≤ pH ≤ 6,5	4,5 ≤ pH < 5,5	4,0 ≤ pH < 4,5
CO _{2agr} [mg·l ⁻¹]	15 ≤ c ≤ 40	40 < c ≤ 100	c > 100 – do nasycení
NH ₄ ⁺ [mg·l ⁻¹]	15 ≤ c ≤ 30	30 < c ≤ 60	60 < c ≤ 100
Mg ²⁺ [mg·l ⁻¹]	300 ≤ c ≤ 1 000	1 000 < c ≤ 3 000	c > 3 000 – do nasycení
Rostlá zemina			
SO ₄ ²⁻ [mg·kg ⁻¹] ^{a)}	2 000 ≤ c ≤ 3 000 ^{c)}	3 000 ^{c)} < c ≤ 12 000	12 000 < c ≤ 24 000
Kyselost [ml·l ⁻¹]	c > 200	v praxi se nepoužívá	

^{a)} Jílovité zeminy s propustností menší než 10⁻⁵ m·s⁻¹ se přiřadí do nižšího stupně.

^{b)} Zkušební metoda předepisuje vyluhování SO₄²⁻ kyselinou solnou. Jestliže jsou k dispozici zkušenosti v místě užití betonu, lze alternativně použít vyluhování vodou – zkušební metody nejsou v tabulce uvedeny.

^{c)} Mezní hodnota 3 000 mg·kg⁻¹ se musí zmenšit na 2 000 mg·kg⁻¹ v případě nebezpečí hromadění síranových iontů v betonu při střídavém vysoušení a zvlhčování nebo v důsledku kapilárního sání.

V článku je uveden přehled chemických procesů, které probíhají při reakcích agresivních látek se složkami hydratovaného cementového tmelu a kameniva. Uvedené informace vysvětlují třídění korozního působení agresivních látek v normě ČSN EN 206 a měly by sloužit k lepšímu pochopení nutnosti zohlednit složení směsí pro výrobu betonu, ukládaného do popisovaných korozních prostředí.

Literatura

- [1] ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Platnost od června 2014
- [2] ČSN P 73 2404 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace
- [3] ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití, ed. 2. Platnost od dubna 2012
- [4] ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Platnost od května 2003
- [5] ROVNANÍKOVÁ, P.; TEPLÝ, B. Obsah hydroxidu vápenatého v betonech se silikátovými příměsmi - důležitý faktor při posuzování životnosti betonových konstrukcí
- [6] Zákon 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší. Platnost od 2. 5. 2012
- [7] MATOUŠEK, M. Působení vybraných atmosférických činitelů na stavební konstrukce. Doktorská disertační práce, Fakulta stavební, VUT v Brně, 1977

- [8] MATOUŠEK, M., DROCHYTKA, R. Atmosférická koroze betonu. Praha: IKAS, 1998, 171 s. ISBN 80-902558-0-9
- [9] PAPADAKIS, V. G., VAYENAS, C. G., FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. ACI Materials Journal, 1991, 363-373
- [10] VAN-LOC TAA, BONNETB, S., KIESSEA, T. S., VENTURAA, A. A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. Construction and Building Materials, 2016, 129, 172-181.
- [11] MARQUESA, P. F., CHASTREB, C., NUNESC, Â. Carbonation service life modelling of RC structures for concrete with Portland and blended cements. Cement & Concrete Composites, 2013, 37, 171-184
- [12] TEPLÝ, B., CHROMÁ, M., ROVNANÍK, P. Durability assessment of concrete structures: reinforcement depassivation due to carbonation. Structure and Infrastructure Engineering, 2010, 6, 317-327
- [13] MOSKVIN, V., M. Korozijska betona. Moskva: Gosudarstvennoje izdatel'stvo literatury po strojitel'stvu i architekture, 1952, 342 s
- [14] ROVNANÍKOVÁ, P. Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí. Beton TKS, č. 2, 2017, 10-15
- [15] SKALNY, J., MARCHAND, J., ODLER, I. Sulfate attack on concrete. London and New York: Spon Press, 2002, 217 s. ISBN 0-419-24550-2
- [16] SKALNY, J., BOYD, A. Environmental deterioration of concrete. In: Environmental deterioration of materials. Moncmannová, A. (ed.), 1st ed., Series: Advances in Architecture, Vol 21, Southampton UK: WIT Press, 2007, 336 s. ISBN: 978-1-84564-032-3
- [17] TEPLÝ, B., NOVÁK, D. Predikce degradace betonových konstrukcí výpočetním modelováním. Beton TKS, 2014, 2, 56-57
- [18] WASSERBAUER, R. Biologické znehodnocení staveb. Praha: ABF, a. s., Nakladatelství ARCH, 2000, 280 s. ISBN 80-86165-30-2.

prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.

✉ Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Veveří 331/95

602 00 Brno

☎ +420 541 147 633

😊 rovnanikova.p@fce.vutbr.cz

VLIV KAVITACE A OBRUSU NA STAVBÁCH VODNÍCH DĚL

Martin Ťažký, Rudolf Hela

1 Úvod k problematice abraze betonu

Abraze, je jeden z nejběžnějších způsobů mechanického poškození betonových prvků. Jedná se o dlouhodobý proces a často mu není věnována přílišná pozornost, což může mít z dlouhodobého hlediska až fatální důsledky pro celou konstrukci. Obecně lze abrazi klasifikovat jako fyzické opotřebení povrchu v důsledku cyklicky se opakujících dynamických sil a posunů. Odolnost proti abrazi lze tedy definovat, jako schopnost odolávat opotřebení vlivem tření. Při obrušování daného povrchu dochází ke ztrátě materiálu z povrchu betonu [1].

U betonových konstrukcí je důležité odolnost materiálu proti abrazi řešit zejména tam, kde dochází například k dlouhodobému styku s tekoucím médiem, ať už kapalného nebo pevného skupenství, nebo tam, kde jsou povrchové vrstvy betonu namáhané pojižděním. Jako příklady obou jmenovaných lze uvést potrubní systémy, prvky betonových hrází vodních děl nebo pozemní komunikace. U všech jmenovaných konstrukcí je důležité, aby nedocházelo k narušování povrchu a struktury kompozitu, protože musí tyto prvky často odolávat navíc působení dalších agresivních médií nebo okolnímu prostředí. Pokud by u takových konstrukcí docházelo k narušení jinak prakticky uzavřeného povrchu abrazi, bylo by tak pro tyto agresivní látky mnohem jednodušší dostávat se do vnitřní struktury kompozitu, což může mít za důsledek až jeho celkovou degradaci nebo degradaci ocelové výztuže, je-li v prvku umístěna, a tím až ztrátu statické funkce konstrukce.

Návrh betonů s vysokou odolností proti abrazi musí často respektovat odlišné zásady, než je tomu u klasických betonových konstrukcí. Obecně jsou podle normy ČSN EN 206+A1 [2] tyto betony navrhovány pro prostředí XM.

Ačkoliv zmíněná norma předepisuje například minimální dávky cementu, maximální vodní součinitel a jiné, návrh betonu, který má vysokou životnost i v náročných abrazivních podmínkách, se často opírá o dnes ne zcela probádané obecné úsudky.

V rámci tohoto příspěvku je proto zásadním úkolem posoudit dopad různých druhů kameniva na odolnost betonu proti abrazi a vliv nejběžněji používaných příměsí. Poznatky z tohoto experimentu budou poté dále prohloubeny v rámci dalších studií se snahou optimalizovat složení betonové směsi tak, aby jeho odolnost a životnost byla co nejvyšší.

Obecně lze říci, že odolnost betonu proti abrazi je dána všemi jeho vstupními složkami. Největší část betonového kompozitu zaujímá kamenivo, jehož vliv bude v rámci experimentu dále zkoumán. Nelze však opomenout ani vliv samotného cementového kamene, jehož vlastnosti předurčuje zejména množství a druh požitého cementu, popřípadě příměsí, vodní součinitel a taktéž využití různých druhů chemických přísad [3].

Jak vychází z výše psaného, betony odolné proti abrazi jsou často betony masivních konstrukcí (konstrukce vodních přehrad), kde je navíc třeba brát vysoký zřetel na regulaci vývinu hydratačního tepla. V tomto případě se často používá různých druhů aktivních nebo pasivních příměsí. Má-li betonový povrch kvalitně odolávat abrazivnímu chování musí

vykazovat minimum defektů například v podobě mikrotrhlin. Každý takový defekt je místem snadnějšího rozrušení a obnažení vnitřní struktury kompozitu [3].

Vztáhneme-li tento experiment na vývoj vysokohodnotných betonů odolných proti abrazi masivních konstrukcí vodních přehrad, je zřejmé, že abrazivní chování v tomto případě zajišťuje zejména proudící médium (voda), popřípadě pevné částice ní unášené. Samotné opotřebení povrchu betonové konstrukce souvisí s tím, jaká je rychlost proudící vody, velikosti, tvar a tvrdosti částic, úhel jejich nárazu na povrch a hustota těchto částic. V rámci dlouhodobého výzkumu se podařilo tento typ opotřebení nasimulovat pomocí vodního paprsku, kde je možné nastavit všechny psané parametry. V rámci předešlých experimentů se vědeckému týmu pana Foldyna s naší součinností podařilo například prokázat pozitivní vliv modifikace cementové matrice uhlíkovými nanotrubičkami při zvýšené odolnosti proti působení vodního paprsku [4], [5]. Předpokladem pro další pokračování výzkumu a vývoj vysoceodolných betonů proti abrazi je proto objasnění vlivu základních složek betonu a následná optimalizace jeho složení pro zajištění tzv. pancéřového povrchu a odolnosti proti abrazi.

2 Metodika experimentu a složení zkušebních směsí

Cílem experimentu bylo ověření odolnosti povrchových vrstev betonu vůči mechanickému poškozování vlivem abraze pevných částic. Abraze byla simulována podle současně platných norem zabývajících se obrusností betonu nebo obrusností potěrových materiálů, případně betonových prefabrikovaných výrobků.

V rámci experimentu bylo snahou objasnit dopad použitého typu kameniva (z hlediska mineralogie), potažmo použití příměsí. Pro účely tohoto experimentu byly vybrány 3 rozdílné druhy kameniva, přičemž se jednalo o běžné používané druhy kameniva do betonu. Kamenivo v betonu tvoří pevnou kostru a je nositelem pevností. Při zajištění správného poměru mísení jednotlivých frakcí je zabezpečena minimální mezerovitost, čím se materiál stává kompaktnějším. Každé kamenivo má však jiné vlastnosti, se kterými je nutno při návrhu betonových směsí uvažovat. Při návrhu jednotlivých receptur bylo vycházeno z koncepce zachování stejné výsledné křivky zrnitosti jednotlivých směsí kameniva, díky čemuž došlo k eliminaci vlivu samotné skladby křivky zrnitosti. Volba použitých příměsí vycházela z praxe, kdy byla vybrána nejčastěji využívaná příměs typu I, tedy příměs inertní a příměs typu II, tedy příměs s pucolánovou nebo latentně hydraulickou schopností. U volby obou příměsí byl brán současně zřetel na jejich bezproblémovou použitelnost při výrobě pohledových konstrukcí a provzdušněných betonů. Z tohoto důvodu byl vynechán pro experiment vysokoteplotní úletový popílek.

Zásadním pro experiment bylo sledování odolnosti betonů vůči obrusu dle norem ČSN 73 1324 [6], ČSN EN 13892-3 [7] a ČSN EN 1338, 1339 a 1340 pomocí širokého brusného kola [8] ve stáří 28 a 90 dní normového zrání. V prvních dvou případech se jedná o zkoušku prováděnou pomocí Böhmova přístroje, za použití brusného kotouče a brusného materiálu – korundu. Rozdíl mezi těmito zkušebními postupy je dán počtem provedených zkušebních cyklů a samotným vyhodnocením sledovaného parametru. Způsob přípravy a rozměr zkušebního tělesa je v rámci obou normových zkoušek identický. Použité zkušební zařízení zachycuje následující **Obr. 1**.



Obr. 1 Zařízení pro stanovení ohrusnosti podle Böhma

Zkušební postup stanovení odolnosti proti abrazi pomocí širokého brusného kola byl zvolen z důvodu ověření nového metodického postupu, který není pro stanovení betonu běžně využíván, ačkoliv se jedná o jeden ze základních zkušebních postupů pro stanovení odolnosti proti abrazi drobných betonových prefabrikátů jako jsou zámkové dlažby, plochá dlažba nebo betonové obrubníky. Použité zkušební zařízení zachycuje následující **Obr. 2**.



Obr. 2 Zařízení pro stanovení ohrusnosti pomocí širokého brusného kola

V rámci prováděného experimentu byl u zkušebních těles sledován vývoj jejich pevností v čase. U všech zkušebních receptur byla stanovena pevnost v tlaku ve stáří 7, 28 a 90 dní dle ČSN EN 12390-3 [9].

2.1 Suroviny a výroba zkušebních těles

Pro analýzu vlivu druhu kameniva a příměsí v betonu na jeho odolnost proti abrazi bylo vyrobeno celkem 6 zkušebních směsí. Tyto směsi lze rozdělit do dvou souborů, přičemž každý soubor tvoří 3 receptury které se od sebe liší použitým druhem kameniva, avšak pro jejichž výrobu bylo užito stejného druhu příměsí. V prvním případě se jednalo o použití velmi jemně mletého vápence, který byl klasifikován jako příměs typu I a ve druhém případě se jednalo o jemně mletou vysokopecní granulovanou strusku, která je klasifikována jako příměs typu II.

V každém souboru betonů se poté od sebe jednotlivé receptury lišily použitým druhem kameniva. Pro jejich výrobu byly vybrány následující 3 druhy kameniva:

- drcené kamenivo z lokality Želešice – amfibolitická hornina
- drcené kamenivo z lokality Olbramovice – granodioritická hornina
- těžené kamenivo z lokality Žabčice – sedimentární psamitická hornina

Jednotlivá skladba kameniva obsahovala vždy 3 frakce – 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm, přičemž jejich vzájemné mísení vycházelo z výpočtu optimální křivky zrnitosti této směsi, která zajistí její minimální mezerovitost. Výsledné křivky zrnitosti všech směsí kameniv si vzájemně odpovídaly, což bylo zajištěno důkladnou analýzou použitých kameniv výpočtem jejich vzájemného poměru mísení. Do experimentu tak nevstupoval další neznámý parametr, který lze klasifikovat jako závislost odolnosti betonu proti abrazi na skladbě kameniva.

Všechny receptury byly navrženy na konzistenci S4 cca 180 mm sednutí kužele dle normy ČSN EN 12350-2 [10] a jednotlivá skladba byla volena s ohledem na dosažení požadované třídy betonu minimálně C 35/45, což je minimální pevnostní třída betonu pro prostředí XM3 dle ČSN EN 206+A1. Přesné složení jednotlivých zkušebních směsí je uvedeno v následující tabulce, **Tab. 1**.

Tab. 1 Složení betonových směsí

	ZEL_V	OLB_V	ZAB_V	ZEL_S	OBL_S	ZAB_S
CEM I 42,5 R [kg]	320			290		
Vápenec [kg]	70			-		
Struska [kg]	-			90		
0-4 mm Žabčice [%]	24	47	46	24	47	46
0-4 mm Želešice [%]	24	-	-	24	-	-
4-8 mm Želešice [%]	13	-	-	13	-	-
4-8 mm Žabčice [%]	-	-	14	-	-	14
4-8 mm Olbramovice [%]	-	11	-	-	11	-
8-16 mm Želešice [%]	39	-	-	39	-	-
8-16 mm Žabčice [%]	-	-	40	-	-	40
8-16 mm Olbramovice [%]	-	42	-	-	42	-
Voda [kg]	175	170	170	175	170	170
MC Powerflow 2695 [%] z m _p	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

3 Výsledky experimentu

Zejména u receptur, které obsahovaly aktivní příměs ve formě jemně mleté vysokopecní granulované strusky byl očekáván nárůst pevnosti v čase. Výsledky stanovení pevnosti v tlaku ve stáří 7, 28 a 90 dní jsou shrnuty v následující tabulce, **Tab. 2**.

Tab. 2 Výsledky pevnosti v tlaku

	ZEL_V	OLB_V	ZAB_V	ZEL_S	OBL_S	ZAB_S
tlak 7 [MPa]	35,4	41,3	34,7	33,3	34,1	36,9
tlak 28 [MPa]	55,5	56,7	49,3	56,5	54,8	55,3
tlak 90 [MPa]	67,0	58,0	56,7	71,0	66,7	60,5

Výsledky pevností v tlaku po 28 dnech normového zrání prokazují, že byla naplněna požadovaná pevnostní třída betonu a prakticky výsledky pevnosti všech zkušebních směsí si v tomto stáří odpovídají. Z tohoto hlediska lze říci, že samotná obrusnost betonu by neměla být ovlivněna jeho pevností. Dle předpokladu lze pozorovat aktivitu strusky, která zabezpečuje další nárůst pevnosti při stáří 90 dnů. Prakticky obdobný trend lze však pozorovat taktéž u směsí s přídavkem velmi jemně mletého vápence, který je klasifikován jako neaktivní (inertní) příměs. Tyto výsledky se shodují s celou řadou již provedených

výzkumů, které zkoumají skrytou aktivitu velmi jemně mletého vápence. Tato skrytá aktivita je poté připisována jeho funkci v podobě krystalizačních zárodků. [11]

Z hlediska druhu kameniva poté vykazují dle očekávání mírně vyšší pevnosti směsi s amfibolitickým kamenivem mající největší pevnost (Želešice). U tohoto kameniva jsou obecně očekávány i nejvyšší odolnosti proti abrazi z důvodu jeho vysoké tvrdosti.

Cílem experimentu bylo zkoumání odolnosti povrchu vůči mechanickému poškození. Stanovení obrusnosti probíhalo pomocí tří normových postupů, kdy dva používají zařízení dle Böhma. V prvním případě se jedná o starou normu ČSN 73 1324, která předepisuje stanovení obrusnosti betonu a počet zkušebních cyklů je stanoven na 20. Vyhodnocením je poté procentuální úbytek váhy vzorku ve vztahu k původní hmotnosti zkušební vzorku. Ve druhém případě se jedná o normu ČSN EN 13892-3, která stanovuje obrusnost potěrových materiálů a v některých evropských zemích je přímo používána jako normativní dokument pro stanovení obrusnosti betonu. Podstatou této zkoušky je 16 zkušebních cyklů a výsledkem zkoušky je zmenšení objemu zkušební tělesa udávaného v $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^3$. Jedná se tedy prakticky o stejný zkušební postup s výjimkou počtu zkušebních cyklů, ale s odlišným vyhodnocením. V obou případech je jako brusný materiál používán korund o zrnitosti F80. Poslední použitá zkušební metoda využívá přístroje s názvem široké brusné kolo. Tento zkušební postup je předepsán normou jako jeden ze dvou možných pro stanovení obrusnosti drobného betonového prefabrikovaného zboží. Podstatou zkoušky je stanovení šířky rýhy vybroušené brusným kolem s průtokem korundu. Šíře rýhy je přímo závislá na tvrdosti zkoušeného materiálu a v rámci provedeného experimentu byla zkouška provedena na řezné ploše vzorku betonu i na neupravené ploše pocházející z formy.

Zkoušení obrusnosti bylo prováděno ve stáří 28 a 90 dní a výsledky jsou uvedeny v následující tabulce, **Tab. 3**.

Tab. 3 Výsledky stanovení odolnosti betonu vůči obrusu

		ZEL_V	OLB_V	ZAB_V	ZEL_S	OBL_S	ZAB_S
ČSN 73 1324	28 dní [%]	5,6	5,7	6,1	5,5	5,7	6,3
	90 dní [%]	4,1	4,6	4,5	3,9	4,3	4,4
ČSN EN 13892-3	28 dní [$\text{cm}^3/50 \text{ cm}^3$]	12,7	13,3	14,1	12,8	12,8	14,4
	90 dní [$\text{cm}^3/50 \text{ cm}^3$]	12,3	13,5	13,3	11,2	13,0	13,2
ČSN EN 1338-1340	28 dní [mm] – řez	18,7	20,9	21,1	19,8	19,8	22,9
	90 dní [mm] – řez	18,3	20,6	20,9	18,8	19,3	19,8
	28 dní [mm]	21,1	22,0	21,8	20,3	20,3	23,4
	90 dní [mm]	20,9	21,5	21,7	20,2	20,1	21,0

Z výsledků provedených zkoušek je patrné, že odolnost proti abrazi obrusem u jednotlivých vzorků byla prakticky nezávislá na použitém zkušebním postupu. Tedy nejvyšší odolnost proti abrazi vykazují v rámci všech zkušebních metod vzorky vyrobené za použití amfibolitického kameniva. Naopak nejnižší odolnost proti obrusu stanovenou při normových 28 dnech vykazují vzorky vyrobené ze sedimentární horniny, která vykazuje nejnižší hodnoty tvrdosti.

Vzorky s kamenivem Želešice amfibolitického typu byly vyrobeny ze směsi drceného amfibolitického písku a klasického těžného sedimentárního písku, což se dle výsledků jeví jako vhodný postup pro výrobu betonů s vysokou odolností proti abrazi. Výsledky rovněž prokazují, že použití drceného písku v kombinaci s pískem klasickým není problémem ani pro výrobu betonů vyššího stupně konzistence.

Jako velice pozitivní lze hodnotit výrazné zvýšení odolnosti proti ohrusu metodou ČSN 73 1324 při stáří 90 dnů oproti 28 dnům, přičemž je patrné, že s rostoucí dobou zrání výrazně stoupá odolnost proti ohrusu při použití aktivních, v našem případě taktéž inertní příměsí v podobě velmi jemně mletého vápence, a dochází ke smazávání výrazného rozdílu použitého druhu kameniva. Velmi výrazné rozdíly lze rovněž spatřovat v odolnosti proti ohrusu řezné strany s odhaleným kamenivem oproti výrobní ploše. U vzorků s kamenivem Želešice lze spatřit nejvýraznější rozdíl tohoto druhu, což může být dáno výrazným vytvrzením matrice díky použití kombinace drceného a těžného písku. Tento trend je prakticky shodný po 28 i 90 dnech zkouškou širokým brusným kolem. Díky těmto výsledkům lze jednoznačně potvrdit, že hlavním nositelem odolnosti betonu proti abrazi je použité kamenivo. Na základě provedeného experimentu lze navíc říci, že druh použitého kameniva hraje nejvýznamnější roli zejména v kratším období zrání betonu, kdy je zřejmě hlavním nositelem pevnosti a odolnosti proti abrazi.

Ačkoliv vykazují vzorky obsahující strusku mírně lepší hodnoty odolnosti proti abrazi ve srovnání se vzorky obsahujícími velmi jemně mletý vápenec, lze říci, že nebyl prokázán nikterak výrazný dopad latentně hydraulické schopnosti strusky na sledovaný parametr. Betony vysoce odolné proti abrazi lze vyrobit rovněž za pomoci inertních příměsí.

4 Diskuze výsledků

V rámci experimentu byl ověřen vliv druhu použitého kameniva na odolnost vůči mechanickému poškození povrchu. Na základě výsledků provedených zkoušek je zřejmé, že druh kameniva má výrazný dopad na odolnost betonu proti abrazi zejména při kratším úseku zrání. Experiment prokázal, že pro výrobu betonů odolných proti abrazi je možné využít kombinace drceného a těžného písku, přičemž tato kombinace může být nápomocna pro zvýšení odolnosti. Na základě získaných výsledků lze soudit, že druh použité příměsí nemá příliš výrazný dopad na odolnost betonu vůči mechanickému opotřebení. Pro výrobu betonů do expoziční třídy XM lze využít aktivních i pasivních příměsí. Ačkoliv byl prokázán pozitivní dopad použití kvalitního drceného kameniva amfibolitického druhu na ohrusnost betonu, výsledky prokazují, že díky postupnému vytvrzování cementového kamene a vytvrzování tranzitní zóny mezi zrny kameniva a cementovým kamenem mohou být rovněž betony vyrobené z méně kvalitního těžného kameniva sedimentárního druhu dobře odolné proti mechanickému ohrusu.

Dalším postupem v tomto obsáhlém a stále probíhajícím výzkumu bude zhodnocení všech nabytých výsledků, podrobení stejných vzorků zkoušce vysokotlakým vodním paprskem (viz. Úvod příspěvku) a optimalizace výsledných receptur pro výrobu vysokohodnotných betonů s důrazem na výrazné zvýšení odolnosti betonu proti abrazi. Výsledky budou navíc dále rozšířeny o hodnoty nasákavosti jednotlivých betonů, přičemž tento parametr může mít velmi výrazný dopad při stanovení mechanického opotřebení při nasycení vodou.

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. MPO TRIO FV30325 „Aplikace laserových a radarových měření vozovek do diagnostiky cementobetonových krytů dálnic, uplatnění mikroskopických a chemických analýz betonů pro omezení degradačních procesů betonu snižujících dobu životnosti dálničních vozovek“.

Literatura

- [1] SCOTT, D., Benjamin, SAFIDDIN, Md., Abrasion Resistance of Concrete – Design, Construction and Case Study. School of Architectural Studies and Angelo del Zotto School of Construction. Vol. 6, September 2015
- [2] ČSN EN 206+A1 Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2017
- [3] HASAN, Sabbir Mohammad. Abrasion on Concrete Surfaces Caused by Hydraulic Loading with Water Borne Sands. Canada, 2015. A Thesis In The Department Of Building, Civil and Environmental Engineering
- [4] FOLDYNA, V.; FOLDYNA, J.; KLICH, J.; HLAVACEK, P.; BODNÁROVÁ, L.; JAROLÍM, T. Effects of Continuous and Pulsating Water Jet on CNT/Concrete Composite. STROJNISKI VESTNIK-JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, 2017, roč. 63, č. 10, s. 583-589. ISSN: 0039-2480.
- [5] LABAJ, M.; VÁLEK, J.; JAROLÍM, T.; OSUSKÁ, L. Nanoadditives – Future of High Performance Concrete. In Materials Science Forum. Materials Science Forum. Switzerland: Trans Tech Publications, 2017. s. 83-87. ISBN: 978-3-0357-1157-8. ISSN: 0255-5476
- [6] ČSN 73 1324 Stanovení ohrusnosti betonu. 1971
- [7] ČSN EN 13892-3 Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Stanovení odolnosti proti ohrusu metodou Böhme. 2015
- [8] ČSN EN 1338 Betonové dlažební bloky – Požadavky a zkušební metody. Příloha G: Měření odolnosti proti ohrusu. 2004.
- [9] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 2009
- [10] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. 2009
- [11] WENDIMU, G.; DINKU, A. The use of limestone powder as an alternative cement replacement material: an experimental study. Addis Ababa University, 2010, 2010(Vol 27).

Ing. Martin Ťažký

✉ Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební.
Veveří 331/95, 602 00 Brno
☎ +420 54114 8064
😊 tazky.m@fce.vutbr.cz
URL www.fce.vutbr.cz

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

✉ Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební.
Veveří 331/95, 602 00 Brno
☎ +420 54114 7508
😊 hela.r@fce.vutbr.cz
URL www.fce.vutbr.cz

BETON V PROSTŘEDÍ ZEMĚDĚLSKÝCH STAVEB

Adam Hubáček, Rudolf Hela

1 Úvod

V současné zemědělské produkci se významně rozvíjí budování bioplynových stanic, silážních žlabů a budov pro ustájení dobytka. Při výstavbě nových či sanaci současných hospodářských staveb je nutné brát zřetel na vysokou odolnost použitého betonu vystavenému vysoce agresivnímu chemickému prostředí.

Technologie betonů odolných vůči vysoce agresivnímu prostředí, zejména prostředí typu XA3 je v současnosti v oblasti speciálních zemědělských staveb velmi aktuální téma. Většina těchto staveb, jako jsou bioplynové stanice, silážní žlaby, sklady kejdy a další vykazují oproti ostatním betonovým konstrukcím výrazně nižší životnost, často je třeba během exploatace provádět opravy a aplikace sekundární ochrany. Tyto opravy ovšem špatně odolávají mechanickému namáhání např. od lžice nakladačů a zvyšují náklady na provoz. V současné době se životnost betonů řeší v projektech požadavkem na stupeň prostředí XA3 podle ČSN EN 206+A1 (případně dle doplňkové normy ČSN P 73 2404) a to požadavkem na min. pevnostní třídu a dávku cementu, max. vodní součinitel či hloubku průsaku.

2 Degradace betonu

Degradace a koroze betonu je efekt, postupného a trvalého narušování ztvrdlého betonu působením agresivních látek a vlhkosti ovlivňující vlastnosti betonu. Příčiny vzniku koroze a degradace betonu jsou vyvolané vlivem prostředí, technologií výstavby a nevhodným užíváním konstrukce. Porušení betonu vlivem prostředí se projevuje vyluhováním cementového tmele nebo krystalickou modifikací, což vede k expanzi látky a následnému vnitřnímu pnutí. [8]

Degradací ztvrdlého betonu vzniklé technologií výstavby je myšleno chybné provádění nebo absolutní nedodržování technologických a technických zásad při návrhu a při provádění výstavby.

Mezi tyto faktory patří:

- Nevhodně zvolené vstupní suroviny do betonu,
- Nevhodná kvalita vstupních surovin do betonu,
- Nevhodný poměr vstupních složek,
- Špatně provedené hutnění betonu,
- Špatné skladování vstupní surovin a výrobků z betonu,
- chyba v projektové dokumentaci,
- špatně provedený nebo vůbec neprovedený geologický průzkum.

Koroze betonu nevhodným užíváním je způsobena namáháním větším zatížením, než na které byl beton navržen, nedostatečně řešená hydroizolace nebo nevhodné ošetřování betonu [8].

3 Chemicky agresivní prostředí v zemědělství

Jedná se o nejvíce chemicky a mikrostrukturně agresivní prostředí působící na beton. Je vyvoláno působením silných průmyslových i organických kyselin, snižujících alkalitu betonu nebo působením rozpustných solí, které vymývají cementový tmel a vytvářejí nerozpustné nebo málo rozpustné soli expandující v cementové matici, čímž snižující trvanlivost betonu.

1.1 Nízké pH

Je vyvoláno především působením silných kyselin, kdy pH roztoků je okolo 3,5. Tato prostředí snižují alkalitu betonu a působením rozpustných solí, které vymývají cementový tmel a vytvářejí nerozpustné nebo málo rozpustné soli expandující v cementové matici, čímž snižující trvanlivost betonu. Stupeň agresivity prostředí závisí na koncentraci jednotlivých iontů, většinou se jedná o stupeň XA3. Mezní hodnoty jsou popsány v ČSN EN 206+A1 [1]

1.2 Působení dusičnanů

Toto agresivní prostředí je způsobeno účinkem průmyslových hnojiv. Působení dusičnanů na cementovou matici se řídí dle tzv. koroze III. druhu. Dusičnany vytváří málo rozpustné soli, které se pomocí přenosného média – vody, dostávají do pórové struktury betonu. V nezaplňených pórech začnou tyto soli krystalizovat a expanduje jejich původní objem. Vytvoření větších krystalů doprovází vnitřní tlaky dosahující hodnot desítek MPa. Betony i relativně vysokých pevností tento vnitřní tlak nevydrží a začne se tak vytvářet síť mikrotrhlín na povrchu betonu. Tento jev může nastat například u sil pro ukládání hnojiv, betonových skruží nebo trub v kanalizačních systémech. Dalším působením dusičnanů může být detekováno v kyselých deštích. [2]

3.1 Mikrobiobní degradace betonu

Jedná se o zvláštní druh chemické koroze betonu, která je vyvolána živými organismy, působícími v chemických, potravinářských a zemědělských objektech.

Tyto organismy jako jsou bakterie, řasy, lišejníky a houby, které se vyskytují ve vlhkém prostředí, způsobují korozi betonu II. a III. druhu. Vliv těchto organismů se dělí dále dle charakteru působení na kyselinovou a síranovou korozi.

Kyselinová koroze

Tento druh koroze (koroze II. druhu) způsobují chemoorganotrofní a chemoautotrofní bakterie. Během svého života vylučují řadu organických kyselin jako kyselina octová, mravenčí a citrónová. Tyto kyseliny reagují s Ca(OH)_2 , hydrosilikáty a hydroalumináty. Vytváří rozpustné vápenné soli, které se při působení zkondenzované vodní páry a vody vymývají. Rychlost koroze betonu závisí na rozpustnosti těchto vápenných solí, pórovitosti betonové matrice a množství vody, které tyto rozpustné soli vymývá. Dalším agresivním organickým médiem se stejným principem působení mohou být mikroskopické vláknité houby, které jsou schopny růst na malých částech prachu nebo v pórech betonu větších než 30 μm . Tyto houby můžeme nalézt v zemědělských a potravinářských závodech (masný a mlékárny), kde mají dostatek živin. Jsou zaznamenány i případy, kdy chemoorganotrofní bakterie zvládali přežít v pórové struktuře betonu o pH 11,5 až 12,5. [3]

Síranová koroze

Tuto korozi (koroze III. druhu) způsobují sírné bakterie, které se vyskytují v půdě, vodě a místech s dostatečnou vlhkostí a přítomností sloučenin síry. Tyto bakterie vytváří síranové sloučeniny, které se zachytávají v pórech a reagují s portlanditem. Následuje vznik dihydrátu síranu vápenatého, který reaguje s C_3A za vzniku ettringitu, který zvětšuje svůj objem a zvyšuje vnitřní pnutí. Tento typ koroze vede k degradaci betonových skruží, kanalizačních kolektorů a betonu přehradních nádrží. [3]

3.2 Působení minerálních tuků a olejů

Jedná se o působení výrobků z ropného průmyslu nebo živočišných a rostlinných tuků, které se mohou objevovat v objektech zpracovávající olejné rostliny

Tyto látky mohou obsahovat fenolové sloučeniny, které vyvolávají slabší korozi II. druhu. a vznik rozpustných vápenatých fenolátů. Živočišné a rostlinné tuky obsahující mastné kyseliny nezpůsobují vážnější degradaci betonu, ale snadno protékají přes betonové krytí výztuže a mohou způsobovat prokluzování výztuže. [4]

4 Objekty vystavené působení agresivního prostředí**4.1 Zemědělské objekty pro ustájení a chov dobytka**

Krmivo, výměšky a podestýlka, v závislosti na čase a zanedbané údržbě podlahy vytváří organické kyseliny, které napadají konstrukce těchto objektů Nejvíce postiženými oblastmi jsou podlahy, na které přímo působí exkrementy, zbytky krmiva a dobytek samotný. Dalším zatíženým prvkem v těchto objektech jsou stropní konstrukce odolávající plyným agresivním vlivům jako je zvýšený obsah CO_2 ve vzduchu.

Na základové konstrukce působí znečištěné zeminy, do kterých se po delší dobu vpíjí tělesné tekutiny a jiné kapaliny zvyšující degradaci betonu. [5]

Je prokázáno, že v těchto objektech se vyskytují velmi silné degradační procesy. Potrava pro dobytek po 2 až 4 dnech dosahuje velmi nízkých hodnot pH asi 3,8 až 4,5, způsobené kyselinou mléčnou, a částečně také kyselinou octovou. Směs těchto kyselin s takto nízkým pH vyvolává u betonu korozi II. druhu.

Beton pro využití podlah a roštů by měl být navržen na stupeň vlivu prostředí XA3 a odolný proti mechanickému poškození, způsobeného kopyty hospodářských zvířat.

4.2 Bioplynové stanice

Jedná se o zařízení, kde probíhá kontrolovaná fermentace biomasy za účelem vzniku bioplynu, který má velký obsah methanu. Výsledný plyn se následně používá pro výrobu elektrické nebo tepelné energie.

Jako biomasa se využívají exkrementy hospodářských zvířat, zemědělské produkty a zemědělskoprámyslové odpady nazývané souhrnně biomasa. Velké využití má například silážová kukuřice, která je bohatá na energii a má velké každoroční výnosy. Substrát je, v podobě travin, kukuřičné plodiny a dalších druhů rostlinného původu, uskladněn v betonových otevřených ohrádkách nebo haldován na betonové náslapné vrstvě a může při působící teplotě a vlhkosti řízeně hnít. Hnijící procesy degenerují organickou buňku plodin a vytváří kyselinu mléčnou, a hlavně kyselinu octovou s hodnotou pH 4,5 a nižší. Směs těchto kyselin může vyvolávat u betonu korozi II. druhu.

S dalším agresivním působením na betonovou matici se můžeme setkat u zdí a podlahy fermentoru. Zde na betonovou matici působí značně se rozkládající substrát v kapalném stavu při vyšších teplotách. Působení methanu, siřičitanu i oxidu uhličitého vytváří korozi betonu II. i III. druhu. [6]

4.3 Silážní žlaby

Jedná se o zemědělské otevřené objekty, určené k uskladnění a rozvoji mléčných bakterií v silážních rostlinách jako jsou kukuřice, píce atd. nazývané také silážní hmota.

Tato silážní hmota je následně použita jako krmivo pro hospodářský dobytek v zimních obdobích. Siláž je sklizena v určitém vegetačním období a převezena do otevřené betonové kóje. [7] Tato betonová kóje se většinou skládá ze spádované betonové základové desky a betonových stěn lehce zkosených ve tvaru obráceného V nebo obráceného T s výška cca 3 m. Spádování základové desky je často směřováno do systému a kanalizace vytvořený právě pro odběr silážních šťáv. Při fermentaci silážních hmot dochází k uvolňování CO_2 a kyseliny mléčné a octové. Tyto kyseliny mají nízké pH a to 3,2 až 4,5. Velmi negativně působí na betonové části, a to korozi betonu II. druhu. Kyseliny reagují se slabě chemicky odolným portlanditem a vznikají velmi rozpustné vápenné soli. Tyto soli se následně lehce vymyjí a zvětší pórovitost betonového materiálu.

Beton v tomto prostředí by měl být odolný proti působení kyselin s nízkým pH, působení intenzivního CO_2 agr (vytvořeného během fermentace), vlivu prostředí působení mrazu a mechanického poškození způsobeného manipulací se siláží těžkou technikou. [2]

5 Experimentální část

Cílem experimentu bylo navrhnout a následně namíchat a odzkoušet receptury betonu pro zemědělské stavby. Výsledkem měly být receptury betonů se speciálními užitnými vlastnostmi, zejména se zvýšenou odolností vůči agresivnímu prostředí XA3. V rámci experimentálních prací bylo navrženo 8 receptur betonů, přičemž všechny betony byly navrženy na pevnostní třídu C 30/37. U jednotlivých receptur betonu byly použity různé kombinace portlandského cementu, případně vysokopecního cementu CEM III/A a aktivních přísad ve formě elektrárenského popílku a vysokopecní jemně mleté strusky. U betonů byly sledovány vlastnosti čerstvého betonu, jako je zpracovatelnost sednutím kužele a objemová hmotnost čerstvého betonu. Po 28 dnech zrání byly stanoveny pevnosti betonu v tlaku. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v tabulce **Tab. 1**

Následně byly betony uloženy do různých typů kapalného agresivního prostředí, které reprezentují modelové prostředí zejména zemědělských betonových konstrukcí. Jednalo se o tato chemicky agresivní prostředí:

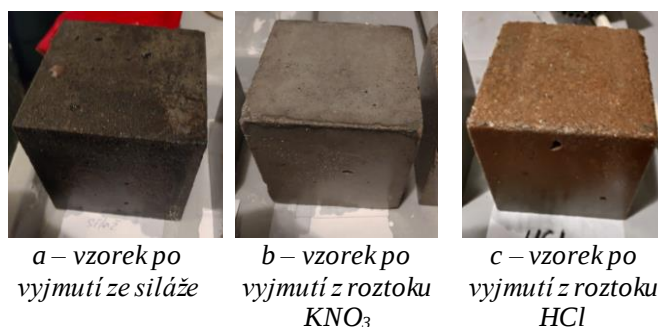
- Roztok KNO_3 v koncentraci 180 mg/l
- Roztok s pH 3,5 tvořený slabě koncentrovanou HCl
- Silážní šťávy odebrané z kvašení kukuřičné siláže s pH 3,6

Tab. 1 Výsledky zkoušek čerstvých a ztvrdlých betonů

Sledovaný parametr	Receptura							
	1 - CEMI	2 - CEMI + STR 30	3 - CEMI + STR 50	4 - CEMI + POP 20	5 - CEMI + POP 40	6 - CEMI + STR 15 + POP 15	7 - CEMI III/A + POP 15 %	8 - CEMI III/A + POP 25 %
Sednutí [mm]	140	140	110	120	130	90	120	110
Objemová hmotnost ČB [kg/m ³]	2340	2330	2340	2330	2320	2320	2330	2320
Pevnost betonu v tlaku 28-denní [N/mm ²]	63,5	47,5	46,4	60,3	50,8	61,5	59,6	54,5
Objemová hmotnost ZB 28-denní [kg/m ³]	2320	2320	2330	2310	2280	2320	2320	2300

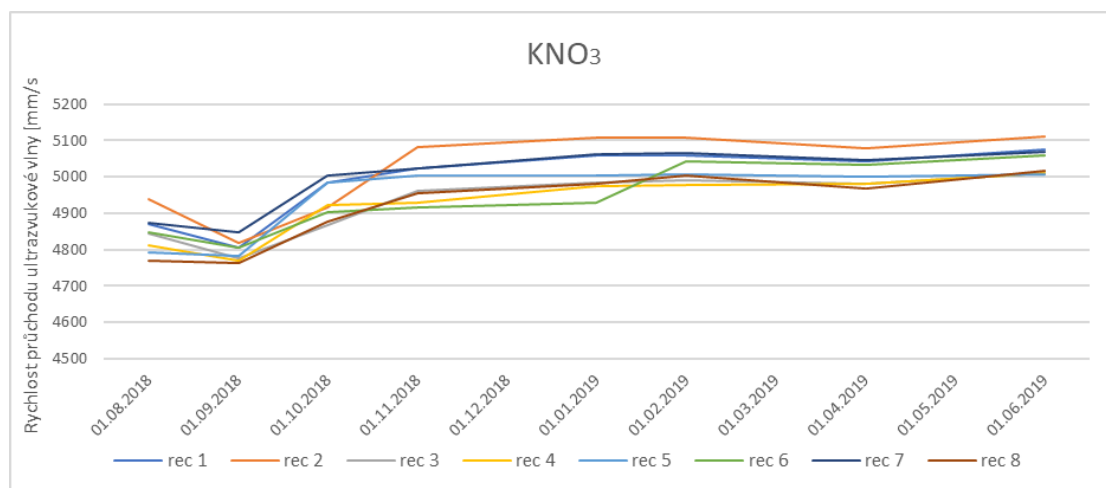
Zkušební tělesa byla v roztocích uložena po dobu cca 12 měsíců. Pro zjištění vlivu působení jednotlivých agresivních prostředí byla zkušební tělesa průběžně testována pomocí ultrazvuku a vizuálního posouzení a stanovení pevností v příčném tahu.

Z hlediska vizuálního posouzení nedošlo u vzorků uložených v roztoku KNO₃ k žádné výrazné změně barvy zkušebních betonů. Vzorky uložené v prostředí KNO₃ vykazovaly mírné poškození hran kostek s viditelně se odlupujícím cementovým tmelen s jemným kamenivem. V případě uložení v silážních šťávách z kukuřičného kvašení došlo k viditelné změně barvy z šedé na temně šedou až černou. Nejvíce viditelná změna nastala u všech vzorků uložených v roztoku HCl, kdy došlo ke změně barvy ze šedé na cihlovou barvu. V tomto případě bylo taktéž viditelné povrchové poškození v podobě odprýskávání jemných částic z hran zkušební tělesa, viz. obrázek **Obr. 1**.

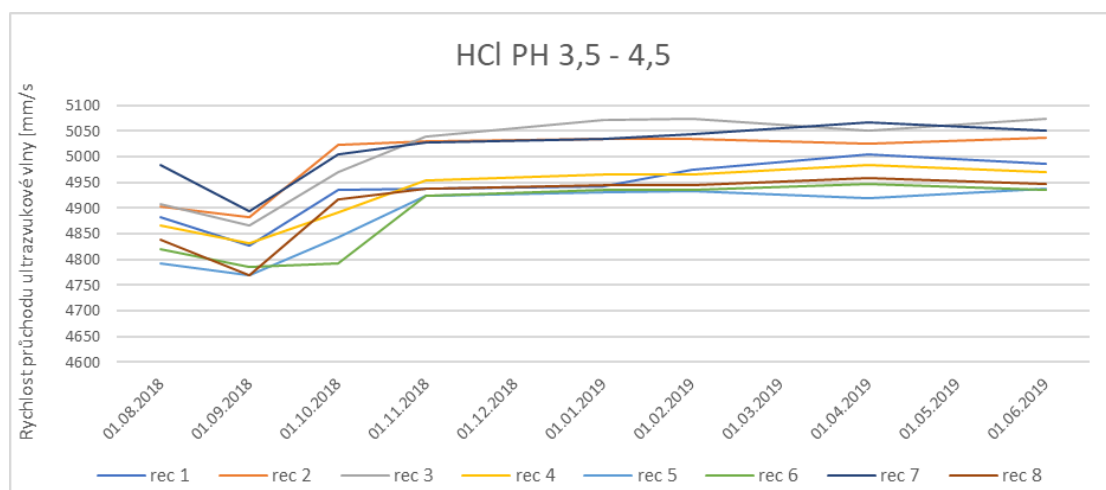
**Obr. 1** Vizuální hodnocení zkušebních těles

5.1 Využití nedestruktivní ultrazvukové metody

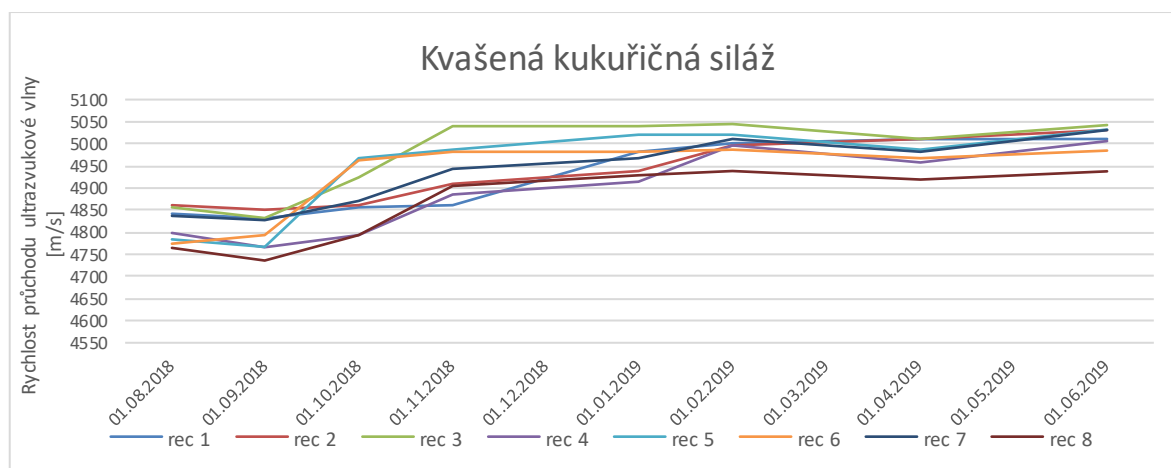
Nedestruktivní metoda ultrazvukového zkoušení betonu je založena na průchodu impulsu podélného vlnění vyvolaného elektrostatickým budičem a přenesen na měřicí sondy. Po průchodu impulsu vlnění vzorkem o známé délce je impuls přeměněn snímačem na elektrický signál a elektronický časový okruh umožňuje změřit dobu průchodu impulsu a vypočítat tak rychlost průchodu ultrazvukové vlny vzorkem. Rychlost průchodu impulsu na vzorcích uložených v agresivním prostředí je zobrazen v následujících grafech, pro každé prostředí samostatně. Výsledky zkoušek jsou na následujících obrázcích č. 2 až 4.



Obr. 2 Grafické porovnání rychlosti šíření ultrazvukové vlny pro vzorky uložené v roztoku KNO₃



Obr. 3 Grafické porovnání rychlosti šíření ultrazvukové vlny pro vzorky uložené v roztoku HCl



Obr. 4 Grafické porovnání rychlosti šíření ultrazvukové vlny pro vzorky uložené v roztoku kukuřičné siláže

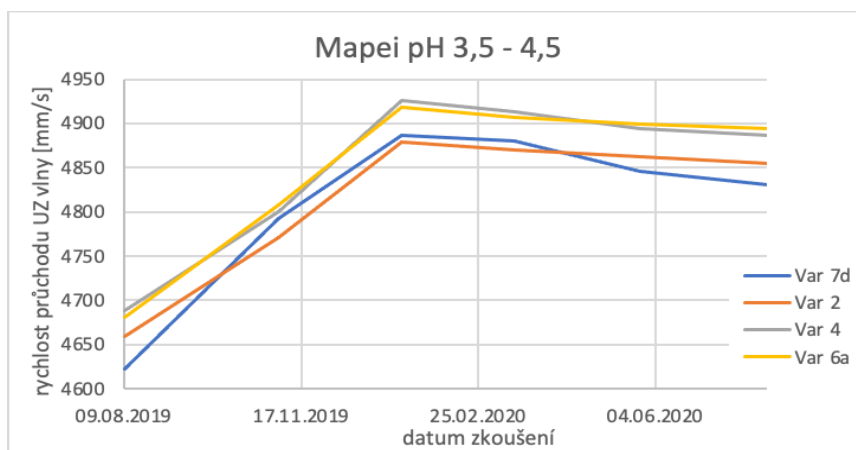
5.2 Parametry vybraných receptur s ochrannými nátěry

Na základě dosažených výsledků a zároveň z pohledu a ekonomičnosti jednotlivých receptur betonů byly vybrány receptury 2, 4, 6 a 7 pro účely dalšího testování. Tyto receptury byly v podstatě identické se složením betonů v předchozím textu. Po 90-ti dnech zrání byla zkušební tělesa ve formě krychlí o hraně 150 mm opatřena nátěry na bázi silanů a lithného vodního skla ve dvou koncentracích. Po jejich vytvrdnutí byly tato tělesa uložena na dobu 365 dní do roztoků nízkého pH (3,5-4,5) a do roztoku silážní šťávy odebrané z kvašení kukuřičné siláže, s pH 3,6. V těchto roztocích byly uloženy po dobu 12 měsíců s tím, že vždy po 2 měsících působení jednotlivých agresivních prostředí byla zkušební tělesa průběžně testována pomocí ultrazvuku, dále byla podrobena vizuálnímu posouzení a úbytku hmotnosti. Veškeré výsledky byly následně porovnány s recepturami betonů, které nebyly opatřeny žádným ochranným nátěrem, ale byly podrobeny stejnému souboru zkoušek.

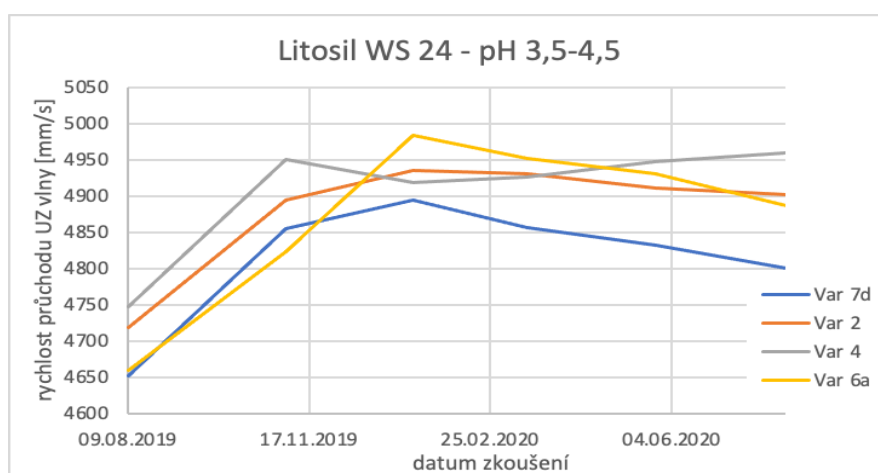
Co se výsledků zkoušek po uložení v jednotlivých roztocích, po dobu jednoho roku týče, byly zjištěny následující závěry:

Z hlediska vizuálního posouzení nedošlo u vzorků uložených v roztoku nízkého pH k žádné výrazné změně barvy zkušebních betonů. Vzorky vykazovaly pouze mírné poškození hran kostek s viditelně se odlupujícím cementovým tmelen s jemným kamenivem. V případě uložení v silážních šťávách z kukuřičného kvašení došlo k viditelné změně barvy z šedé na temně šedou až černou. Nejvíce viditelná změna nastala u všech vzorků uložených v roztoku HCl, kdy došlo ke změně barvy ze šedé na téměř černou barvu, v tomto případě bylo taktéž viditelné, stejně jako u měření, která probíhala v předchozích letech, povrchové poškození v podobě odprýskávání jemných částic z hran zkušebního tělesa. Výsledky stanovení rozdílu hmotnosti se po jednotlivých měřeních měnili pouze do cca 0,6 %.

Dalším sledovaným parametrem bylo posouzení vývinu rychlosti průchodu vysílaného impulsu v čase. Obecně lze tvrdit, že nejvyšší rychlost průchodu tohoto impulsu vypovídá o dobré homogenitě zkoumaného cementového kompozitu. V případě uložení v prostředí nízkého pH byla po 1 roce rychlost průchodu vysílaného impulsu v rozmezí 4800 – 4960 m/s. Z toho nejkratší dobu průchodu vykazovala nejčastěji receptura 6, případně receptura č. 2. Na následujících obrázcích číslo 5 až 8 jsou uvedeny výsledky některých variant receptur.

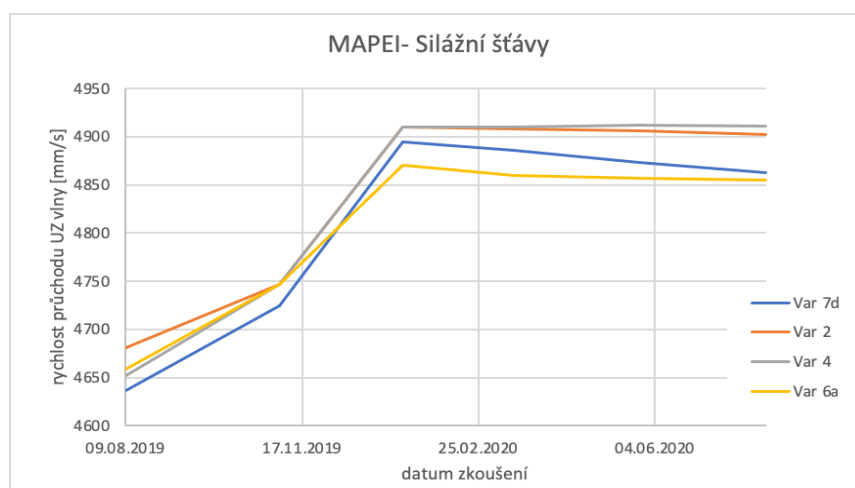


Obr. 5 Grafické porovnání rychlosti šíření ultrazvukové vlny pro vzorky uložené v roztoku nízkého pH, nátěr MAPEI

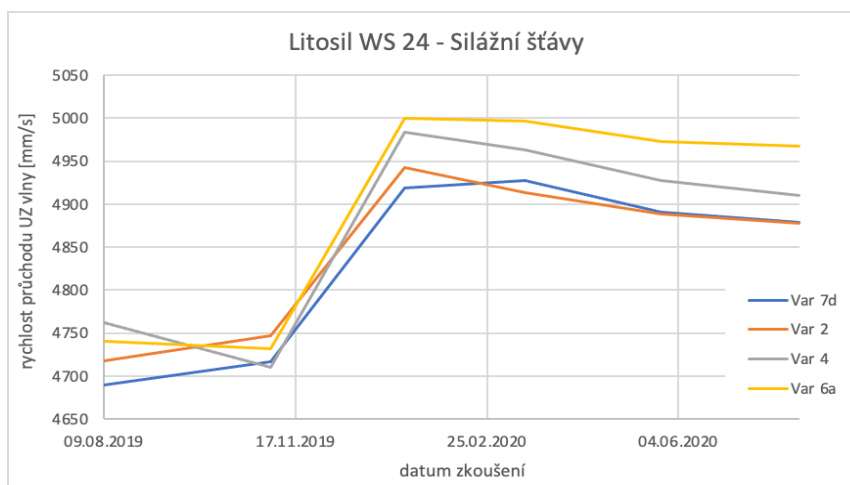


Obr. 6 Grafické porovnání rychlosti šíření ultrazvukové vlny pro vzorky uložené v roztoku nízkého pH, nátěr LITOSIL WS 24

Také výsledky grafů pro uložení v roztoku kukuřičné siláže demonstrují vývin rychlosti průchodu vysílaného impulsu v čase. V případě tohoto uložení byla po 1 roce působení agresivního prostředí rychlost průchodu vysílaného impulsu v rozmezí 4800 – 4970 m/s. V tomto případě byla zaznamenána nejkratší doba průchodu nejčastěji u receptury č. 2, ale také ostatní receptury vykazovaly velmi dobré parametry výsledků tj. dobrou homogenitu a minimální snížení trvanlivosti betonu.



Obr. 7 Grafické porovnání rychlosti šíření ultrazvukové vlny pro vzorky uložené v roztoku silážních šťáv, nátěr MAPEI



Obr. 8 Grafické porovnání rychlosti šíření ultrazvukové vlny pro vzorky uložené v roztoku silážních šťáv, nátěr LITOSIL WS 24

6 Závěr

V případě uložení v prostředí KNO_3 byla po 1 roku rychlost průchodu vysílaného impulsu v rozmezí 5000 – 5100 m/s. Z toho nejkratší dobu průchodu vykazovali receptury 8,5,3 a 4. U betonů uložených v prostředí HCl byla po 1 roku rychlost průchodu vysílaného impulsu v rozmezí 4950 – 5070 m/s. Z toho nejkratší dobu průchodu vykazovali receptury 8,5 a 6. U siláží byla po 1 roku rychlost průchodu vysílaného impulsu v rozmezí 4940 – 5030 m/s. Z toho nejkratší dobu průchodu vykazovali receptury 8 a 6. Dle získaných výsledků z uložení v chemicky agresivním prostředí se obecně jako nejlepší varianty jeví receptury č.8, kde byl použit vysokopecní cement CEM III/A, který je vhodný pro použití do betonů se zvýšenou odolností proti chemicky agresivnímu prostředí, přičemž při hydrataci nedochází k uvolňování tak velkého hydratačního tepla a průběh samotné hydratace je pomalý. Další receptury, které vykazovaly nejkratší doby průchodu jsou receptury č 4, 5 a 6. Ve všech recepturách byl tentokrát použit portlandský cement v příměsí vysokoteplotního popílku v rozmezí 20-40 %. V případě receptury 6 byly použity kombinace aktivních příměsí vysokoteplotní popílek a jemně mleté strusky obojí v množství 15 %. Obecně lze však konstatovat, že ani u jednoho typu betonů nedošlo k žádnému výraznému poškození vlivem působení agresivního prostředí a tyto receptury lze považovat za vysoce odolné.

Také výsledky vybraných receptur betonů, opatřených ochranným nátěrem, vykazovaly velmi dobré hodnoty trvanlivosti betonu, vystaveného působení nízkého pH anebo roztoku silážních šťáv. Všechny použité nátěry vykazovaly vysokou odolnost vůči působení těchto chemicky agresivních médií a tím pádem také dobrý předpoklad pro vysokou trvanlivost sledovaných betonů.

Závěrem lze pro zvýšení životnosti betonů v konstrukcích např. silážních žlabů doporučit používat kombinace cementu CEM I s el. popílky a jemně mletou granulovanou vysokopecní struskou a případně vysokopecními cementy CEM III/A.

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. TH 03020072, „Vývoj vysokohodnotných betonů odolných vůči chemicky agresivním prostředí speciálních zemědělských staveb“, za podpory Technologické agentury ČR.

Literatura

- [1] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] DORAZILOVÁ, I. BODNÁROVÁ, L. SEDLÁK, P. HORÁK, O. VÁLEK, J. Vlastnosti betonů s green cementy. 18. Konference betonářské dny, 2011.
- [3] WASSERBAUER, R. *Biologické znehodnocení staveb*. Praha: ARCH, 2000. ISBN 80-861-6530-2.
- [4] DROCHYTKA, R. *Trvanlivost stavebních materiálů, CJ07*. Brno, 2007. Studijní opory. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ.
- [5] N.De Belie, M.Debruyckere, D.Van Nieuwenburg, B.De Blaere: Attack of Concrete Flooers in Pig Houses by Feed Acids: Influences of Aly Ash Addition and Cement-bound Surface Layers, J. Argic. Engng Res. /1997/ 68, 101-108
- [6] KOENIGEN, A, DEHN, F. *Biogenic acid attack on concretes in biogas plants*. Biosystems Engineering. Elsevier, 2016. ISBN 1537-5110.
- [7] Kukuřičné siláže. *Pícninářství a výroba krmiv* [online]. Brno: Mendelova univerzita, 2012 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: https://web2.mendelu.cz/af_222_multitext/picvk/index.php?N=10&I=1
- [8] DROCHYTKA, Rostislav. *Trvanlivost stavebních materiálů, CJ07*. Brno, 2007. Studijní opory. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ.

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

✉ Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební, THD
Veveří 95, 602 00 Brno
☎ +420 541 148 062
😊 hubacek.a@fce.vutbr.cz

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

✉ Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební, THD
Veveří 95, 602 00 Brno
☎ +420 541 147 508
😊 hela.r@fce.vutbr.cz

POŽADAVEK NA STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU V KONSTRUKCI – ZKUŠENOSTI, PROBLÉMY, PŘÍKLADY

Dalibor Kocáb, Tomáš Vymazal, Martin Lišovský, Martin Alexa

1 Úvod

V současnosti jsou na kvalitu konstrukcí kladeny poměrně vysoké nároky, ať už se jedná o pevnostní nebo trvanlivostní parametry použitých materiálů, či udržitelný přístup k výstavbě obecně. Betonové konstrukce nejsou v tomto ohledu výjimkou, naopak jsou pod drobnohledem zejména z pohledu udržitelnosti, konkrétně z pohledu jejich environmentálních dopadů. Důvodem je mimo jiné vysoká produkce CO₂ při výrobě cementu a spotřebě neobnovitelných zdrojů, které jsou nedílnou součástí betonu [1].

Pokud se jedná o výstavbu nové betonové konstrukce, není s určením všech různých vlastností a parametrů většinou žádný podstatný problém. Kontrola vlastností vstupních materiálů je podrobně prováděna desítky let, takže výrobci betonu dobře ví, s čím pracují. Kontrola kvality betonu je taktéž na vysoké úrovni a v poslední době se usilovně řeší problematika různých součinitelů či indikátorů, které zohledňují udržitelnost návrhu a/nebo výstavby betonových konstrukcí [2,3].

Jisté problémy však mohou nastat v případě hodnocení stávající konstrukce ve chvíli, kdy je z libovolných důvodů (např. oprava, kontrola, změna, přestavba apod.) požadována její diagnostika. Zhodnocení kvality betonu v konstrukci je mnohdy poměrně složité, zejména v případech, kdy je požadováno zhodnotit i jeho trvanlivost. Důvodem je jednak skutečnost, že trvanlivost je značně vágní termín, neboť není např. oproti životnosti nijak časově charakterizována, a jednak to, že je nutné při jejím posuzování přesně definovat prostředí, v němž má být hodnocena [4]. V dnešní době není příliš složité určit pevnost v tlaku, modul pružnosti či rovnoměrnost betonu v konstrukci (ať již s využitím nedestruktivních nebo destruktivních metod), ale s trvanlivostí je to jiné. Trvanlivost betonu lze totiž charakterizovat jako schopnost odolávat působení vnějších i vnitřních činitelů, přičemž způsob porušování betonu značně závisí na typu a intenzitě působícího vlivu. Zcela jinou odolnost může vykazat tentýž beton při působení hladových vod (jedná se o korozi I. druhu, kterou představuje vyluhování hydroxidu vápenatého) a jinou při působení síranů (jedná se o korozi III. druhu, která je způsobena porušením struktury betonu vlivem tvorby objemných sloučenin) [5].

Jednou ze základních trvanlivostních vlastností betonu je v mírném podnebném pásmu bezesporu jeho odolnost proti působení mrazu [6]. Jedná se o schopnost betonu odolávat opakujícímu se střídání kladných a záporných teplot, a to v případě, kdy je současně vystaven působení vody, vysoké míry vlhkosti, anebo vody v kombinaci s chemickými rozmrazovacími látkami (CHRL). Na suchý beton totiž nemá střídání kladných a záporných teplot žádný výraznější negativní dopad [7].

Co může nastat, když je při diagnostice betonové konstrukce požadováno stanovení mrazuvzdornosti betonu, popisuje tento článek.

2 Odolnost betonu proti působení změny kladných a záporných teplot

V případě, že je betonová konstrukce nebo její část vystavena vodě a současně střídavému působení kladných a záporných teplot, je nezbytné zhodnotit, zda na povrch betonu působí také libovolné rozmrazovací činidlo (nejčastěji posypová sůl a následně vzniklý roztok NaCl, který na povrch betonu může působit přímo, anebo formou solné mlhy či odstříků). Pokud totiž rozmrazovací činidlo na beton působí, degradační procesy jsou naprosto jiné než v případě, kdy je beton vystaven jen vodě a mrazu.

2.1 Mrazuvzdornost

Když je betonový povrch konstrukce v kontaktu s vodou (silniční vozovka či panely, části mostů nebo tunelů, kolejové pražce, vodní nádrže apod.), pak se vlivem nasákavosti dostane voda dovnitř pórové struktury betonu. V případě, že dojde k jejímu zmrznutí, objevuje se riziko vzniku nejdříve mikrotrhlin a poté i trhlin. Příčinou je expanze vody při změně z kapalného na pevné skupenství. Voda, která se nachází v kapilárních pórech betonu, se začíná měnit na ledovou tříšť přibližně při teplotě $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (počátek mrznutí vody závisí na velikosti pórů, při $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ by však měla zmrznout veškerá kapilární voda [8]). Vzniklý led má na rozdíl od vody v kapalném stavu větší objem přibližně o 9 %. Toto rozpínání vody ve formě ledu vede ke vzniku vnitřního napětí v betonu, a to o velikosti řádově desítek MPa. Výsledkem je porušení vnitřní struktury betonu a následné nevratné snížení jeho relevantních materiálových vlastností [9].

Ověřit odolnost proti účinkům mrazu není u nově navrženého betonu problém – na zkušebních tělesech se provedou příslušné zkoušky, jejichž výsledkem je stanovení míry odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování, tedy tzv. mrazuvzdornost. Pokud je však nutné ověřit tento parametr u starších betonů zabudovaných v konstrukci (např. v případě přestavby nebo opravy konstrukce), nastává mnohdy poměrně zásadní problém, neboť na tento případ žádná v současné době v České republice platná norma nepamatuje. Nastává proto improvizace, jejíž příklad byl popsán na minulé konferenci Technologie a provádění, viz [10].

2.2 Odlupování

Odlupování vlivem působení solí (přesněji jejích roztoků) je definováno jako povrchové poškození vzniklé působením mrazu a solného roztoku na povrch betonu. Současně je to jeden z hlavních problémů, kterým beton ve smyslu jeho trvanlivosti v těchto klimatických podmínkách čelí [11]. Je důležité ještě jednou zdůraznit, že mechanismus odlupování betonu není analogický konvenčnímu působení mrazu, které způsobuje krystalizaci vody ve vnitřní struktuře betonu, a tím způsobuje její porušení. V případě odlupování se jedná o povrchové působení. To sice neohrožuje kvalitu betonu uvnitř konstrukce, činí jej ovšem náchylným k pronikání vody a dalších agresivních látek do jeho struktury. Tím je pochopitelně snížena celková odolnost betonu a následně životnost konstrukce případně i riziko depasivace výztuže. Odlupování bylo již několikrát rozsáhle studováno a popsáno, více je možné se dočíst např. v [12,13,14].

3 Požadavek na stanovení odolnosti betonu v konstrukci proti mrazu

3.1 Požadavek na mrazuvzdornost

Při diagnostických průzkumech stávajících betonových konstrukcí není požadavek na stanovení mrazuvzdornosti betonu kladen příliš často, ať už je důvodem časová i finanční náročnost zkoušky nebo nízké povědomí o této zkoušce. Většinou se stanoví objemová hmotnost betonu, jeho pevnost v tlaku, případně nasákavost, výjimečně rovnoměrnost, dále se ověří vyztužení důležitých částí konstrukce či zainjektování kabelových kanálků předpínací vyztuže. Stanovení mrazuvzdornosti betonu je vyžadováno výjimečně, stejně jako stanovení odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek.

Bohužel se navíc často stává, že mrazuvzdornost betonu a jeho odolnost proti působení CHRL jsou libovolně zaměňovány. Někteří vlastníci (správci) konstrukcí či projektanti oprav těchto konstrukcí dvě výše uvedené vlastnosti betonu v podstatě nerozlišují. U obou vstupuje do hry mráz, což k záměně svádí. Kdo si ale myslí, že v případě, že je beton mrazuvzdorný, je současně také odolný proti působení CHRL, ten se dopouští zásadního omylu. Opak je totiž mnohdy pravdou. Není tedy výjimkou situace, kdy odpovědná osoba požaduje v rámci průzkumu konstrukce stanovit mimo jiné mrazuvzdornost betonu. Během debaty, která pro upřesnění požadavků následuje, vyjde najevo několik skutečností. Do hry totiž vstupuje hned několik problémů:

- zkoušku nelze provést přesně dle normy ČSN 73 1322 [15], která se pro zkoušení mrazuvzdornosti betonu běžně používá, a ani podle ČSN 73 1380 [16], která se však naopak v podstatě nepoužívá – důvodem je fakt, že zkouška podle obou norem probíhá na zkušebních hranolech vyrobených pomocí forem,
- i po modifikaci, kdy by se zkoušely hranoly 100×100×400 mm vyřezané z jádrových vývrtů, nastává problém, neboť z konstrukce je prakticky nemožné odebrat potřebný počet vývrtů, ze kterých by bylo možné takto velká zkušební tělesa získat,
- v modifikaci by se muselo jít ještě dále a zkoušet výrazně menší zkušební tělesa, anebo nahradit rozhodující vlastnost, kterou je zde pevnost v tahu ohybem, jinou zkouškou, např. pevností v příčném tahu – na toto téma více informací viz článek [10],
- i přes případné překonání výše uvedených překážek platí, že zkouška je časově náročná – každých 25 zmrazovacích a rozmrazovacích (F-T) cyklů trvá 1 týden, tudíž při požadavku zkoušet beton na 100 cyklů zabere stanovení mrazuvzdornosti 4 týdny,
- na závěr objednatel průzkumu často zjistí, že mrazuvzdornost betonu vlastně stanovit nechce, že ho zajímá odolnost betonu proti působení vody a CHRL.

3.2 Požadavek na odolnost vůči vodě a CHRL

Není-li tedy požadováno stanovit mrazuvzdornost betonu, stočí se debata na problematiku zkoušení odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Ovšem i v tomto případě vstupuje do hry několik problémů, namátkou:

- norma ČSN 73 1326 [17], která tuto problematiku řeší, je napsána vágně, o čemž byl publikován např. článek [18],
- zkoušet lze podle tří metod, z nichž se reálně používají dvě – metoda A a metoda C, přičemž obě mohou udávat zcela rozdílné výsledky,
- zkoušen je povrch betonu tak, jak byl vyroben, což je zpravidla u starých betonových konstrukcí podmínka, kterou nelze splnit – v drtivé většině případů se tedy musí improvizovat,

- metoda A, která je časově a pracně méně náročná, je pro zkoušení betonu z konstrukce nevhodná, protože základním zkušebním tělesem je krychle o hraně 150 mm,
- metoda C, která je pro zkoušení betonu z konstrukce podstatně vhodnější, neboť zkušebním tělesem je 50 mm tlustý odřezek vývrtu průměru 150 mm, je ale časově i pracně podstatně náročnější.

Většinou to dopadne tak, že je o osudu stanovení odolnosti betonu v konstrukci proti mrazu rozhodnuto ve smyslu „provedte to co nejlevněji a co nejrychleji, je jedno jak a podle jaké normy“. Že se nejedná o ideální řešení, není asi nutné zdůrazňovat.

4 Příklady z praxe

4.1 Stanovení odolnosti betonu proti působení CHRL dle metody C

Pro zkoušku stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, dle metody C – automatické cyklování II, byl dodán jeden jediný (!) vývrt jmenovitého průměru 150 mm. Z něho byla vzhledem k jeho délce pro zkoušku připravena pouze dvě zkušební tělesa. První zkušební těleso označené číslicí **1** odpovídalo požadavkům normy [17], neboť zatěžovaná plocha byla povrchem konstrukce. Druhé zkušební těleso označené **2** bylo zatěžováno na plochu řezu, což požadavkům normy neodpovídá [17], jiná (lepší) varianta ovšem k dispozici nebyla.

Obě zkušební tělesa byla před začátek zkoušky opatřena objímkou, na jejichž zkoušený povrch byla nalita voda, která byla po dvou dnech vyměněna za 3% roztok NaCl v tloušťce vrstvy přibližně 5 mm. Následně byla tělesa umístěna do zařízení KD-20, v němž byla podrobena cyklickému zmrazování a rozmrazování přesně dle normy [17].

Již po 11 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech bylo u zkušebního tělesa **1** zjištěno, že degradace povrchové vrstvy betonu došla takové míry, že roztok protekl skrz zkušební těleso. Proto byla zkouška stanovení odolnosti proti CHRL pro těleso **1** v tomto okamžiku ukončena a byla stanovena hmotnost odpadu, která činila 76,7 g (**Obr. 1**). Druhé zkušební těleso vydrželo 25 zatěžovacích cyklů, po kterých byla zjištěna hmotnost odpadu, která činila 95,1 g (**Obr. 2**).



Obr. 1 Zkušební těleso **1** po zkoušce odolnosti proti CHRL včetně odpadu z povrchu tělesa



Obr. 2 Zkušební těleso 2 po zkoušce odolnosti proti CHRL včetně odpadu z povrchu tělesa

Větší vypovídající hodnotu by teoreticky měly mít výsledky u tělesa **1**, ovšem v tomto případě těžko soudit. Rozhodně platí, že zkušební tělesa by měla být minimálně 3, což zde dodrženo nebylo. Pokud je to možné, měl by být zkoušen povrch betonu, a to u všech zkušebních těles – zaručit to je však mnohdy nemožné. Norma [17] udává u zkoušení dle metody C podmínku, že při výpočtu průměrné hodnoty součinitele D z více těles se nesmí lišit jednotlivé hodnoty D o více než 20 % od průměru, což zde také splněno nebylo.

Požadavek na stanovení odolnosti betonu proti působení CHRL dle metody C byl v tomto případě splněn, co ovšem objednateli (či komukoliv jinému) výsledky prozradily, zůstává otázkou.

4.2 Stanovení odolnosti betonu proti působení CHRL dle metody A

Pro účely stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, dle metody A – automatické cyklování, sloužila zkušební tělesa tvaru válce o jmenovitém průměru 100 mm v celkovém počtu 12 ks. Tato zkušební tělesa byla získána kotoučovým řezáním z jádrových vývrtů. Konkrétně se jednalo o přední části vývrtů, přičemž délka zkušebních těles nebyla jednotná – záleželo především na délce jádrového vývrtu, neboť kromě zkušebních těles pro zkoušku odolnosti proti CHRL byla z vývrtů získána také zkušební tělesa pro zkoušku pevnosti v tlaku. Zkušební tělesa byla dle místa odebrání jádrových vývrtů rozdělena do 3 zkušebních souborů, přičemž v každém souboru byla 4 tělesa. Jednalo se o soubory „dřívky opěr“ (tělesa V1 až V4), „křídla“ (tělesa V5 až V8) a „sloupy“ (tělesa V9 až V12). Všechna zkušební tělesa byla s maximální péčí upravena tak, aby byl pokud možno zkoušen povrch betonové části konstrukce, ne vždy to ale možné bylo (problémem byla u některých vývrtů omítka, u jiných hydroizolace).

Všech 12 válců bylo umístěno do zkušebního zařízení KD-20, v němž v souladu s normou [17] proběhlo prvních 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Jako agresivní médium byl použit 3% roztok NaCl. Následně byla určena hmotnost odpadu ze zkoušených ploch jednotlivých těles a bylo provedeno dalších 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Poté byla opět určena hmotnost odpadu a zkouška byla následně ukončena. Zkušební tělesa po prvních 25 cyklech jsouobrazena na **Obr. 3**, po dalších 25 cyklech na **Obr. 4**. Z těchto obrázků je možné vidět rozdílné chování zkoušených betonů (rozdílné množství odpadlých částic).



Obr. 3 Zkušební tělesa umístěná v zařízení KD-20 po prvních 25 F-T cyklech



Obr. 4 Zkušební tělesa umístěná v zařízení KD-20 po druhých 25 F-T cyklech

Výsledky zkoušky stanovení odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle metody A jsou uvedeny v **Tab. 2** až **Tab. 4**. Pro větší přehlednost jsou jednotlivé soubory zkušebních těles uvedeny v samostatných tabulkách.

Tab. 1 Výsledky odolnosti betonu proti CHRL – soubor zkušebních těles „dřívky opěr“ – V4 bylo vyřazené z hodnocení souboru dat

Těleso č.	d [mm]	odpad po cyklech [g]		Odpad po cyklech [g/m ²]		
		25	50	0	25	50
V1	103,3	11,8	40,5	0	1181	5226
V2	103,2	7,5	31,2	0	746	3866
V3	103,3	10,6	46,7	0	1055	5724
V4	103,2	20,2	103,7	0	2018	12395
průměrná hodnota:				0	994	4939

Tab. 2 Výsledky odolnosti betonu proti CHRL – soubor zkušebních těles „křídla“

Těleso č.	d [mm]	odpad po cyklech [g]		Odpad po cyklech [g/m ²]		
		25	50	0	25	50
V5	103,3	6,6	9,3	0	662	1596
V6	103,3	4,5	25,0	0	452	2956
V7	103,4	32,7	135,9	0	3266	16832
V8	103,1	29,9	34,1	0	2998	6418
průměrná hodnota ze všech těles:				0	1845	6951
průměrná hodnota těles V5 + V6:				0	557	2276
průměrná hodnota těles V7 + V8:				0	3132	11625

Tab. 3 Výsledky odolnosti betonu proti CHRL – soubor zkušebních těles „sloupy“

Těleso č.	d [mm]	odpad po cyklech [g]		Odpad po cyklech [g/m ²]		
		25	50	0	25	50
V9	99,7	7,8	8,2	0	830	1699
V10	99,9	10,7	9,4	0	1140	2141
V11	99,6	3,1	2,0	0	331	546
V12	103,2	2,0	1,8	0	203	378
průměrná hodnota ze všech těles:				0	626	1191
průměrná hodnota těles V9 + V10:				0	985	1920
průměrná hodnota těles V11 + V12:				0	267	462

Jak je možné vidět z výsledků v **Tab. 2**, zkušební těleso V4 se od ostatních zkušebních těles sady „dříky opěr“ liší. Protože výsledky zkušební tělesa V4 (**Obr. 5** vlevo) se od průměrné hodnoty ze všech 4 těles liší o více než 50 %, bylo toto těleso v souladu s normou ČSN 73 1326 [17] z vyhodnocení vyřazeno – v **Tab. 2** jsou jeho výsledky přeškrtnuté. Zbývající tři zkušební tělesa se od nového aritmetického průměru neliší o více než 50 %, proto je možné tento výsledek považovat za definitivní.

Interpretace výsledků souboru zkušebních těles „křídla“ je poměrně komplikovaná. Pokud jsou všechna 4 zkušební tělesa uvažována jako jeden statistický soubor, není možné zkoušku odolnosti betonu proti CHRL dle normy [17] vyhodnotit, neboť se výsledky jednotlivých těles zásadně liší – viz výsledky v **Tab. 3**. Pokud by bylo možné uvažovat zkušební tělesa V5 a V6 jako jeden podsoubor (vývrty z jednoho křídla) a podobně tělesa V7 a V8 jako druhý samostatný podsoubor (vývrty z jiného křídla), vyhodnocení by bylo možné, viz poslední 2 řádky **Tab. 3**.

Interpretace výsledků souboru zkušebních těles „sloupy“ je také složitá. I zde platí, že jako jeden statistický soubor dat je zkouška nevyhodnotitelná. Vzhledem k vizuálnímu hodnocení betonů je však možné soubor rozdělit na dva podsoubory, neboť beton těles V11 a V12 je již na první pohled jiný, kvalitnější (**Obr. 5** vpravo). Situace je tedy podobná jako u souboru dat „křídla“.



Obr. 5 Zkušební těleso V4 (vlevo) a zkušební těleso V12 (vpravo) po 50 cyklech

Je nutné také poznamenat, že stanovení odolnosti betonu proti působení CHRL dle metody A bylo provedeno pouze ve smyslu normy [17], nikoliv přesně podle jejího znění. Základním zkušebním tělesem je totiž krychle o hraně 150 mm, zatímco zde byly zkoušeny vývrty o průměru 100 mm. Navíc zkoušení povrchu betonu bylo zajištěno jen u části zkušebních těles, u ostatních byl zkoušen řez betonem.

I v tomto případě byl požadavek na stanovení odolnosti betonu proti působení CHRL dle metody A splněn a i v tomto případě zůstává otázkou, co odpovědným osobám získané výsledky vlastně odhalily.

4.3 Stanovení mrazuvzdornosti

Podrobný popis zkoušení mrazuvzdornosti betonu v konstrukci je možné si přečíst v článku [10]. Zde jen krátce uvedme, že ani v tomto případě neprobíhalo vše hladce. K dispozici byly pouze vývrty průměru 100 mm, navíc bylo při přípravě zkušebních těles zjištěno, že vývrty jsou odebrány ze dvou různých betonů. Počet těles musel být upraven – místo 9 kusů zkušebních těles bylo zkoušeno 10 ks (z každého betonu 5 ks). Ani toto navýšení však nezajistilo dostatečný počet zkušebních těles. Namísto zkoušení pevnosti betonu v tahu ohybem musela být zkoušena jiná vlastnost. Zde byl využit relativní dynamický modul pružnosti (RDM) zjištěný pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody a pevnost v příčném tahu. Čtenáře pravděpodobně nepřekvapí, že získané výsledky jsou do značné míry nejednoznačné a pouze obtížně interpretovatelné.

4.4 Mrazuvzdornost vs. odolnost proti CHRL

Za účelem porovnání mrazuvzdornosti betonu s jeho odolností proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek byl vybrán provzdušněný beton, jehož složení je uvedeno v **Tab. 4**. Sednutí čerstvého betonu bylo 180 mm, objemová hmotnost čerstvého betonu 2290 kg/m^3 a obsah vzduchu v čerstvém betonu byl 5,0 % [19].

Pro potřeby experimentu byla z betonu vyrobena zkušební tělesa tvaru hranolu $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ pro zkoušku mrazuvzdornosti dle [15], zkušební tělesa tvaru krychle o hraně 150 mm pro zkoušku odolnosti proti CHRL dle metody A [17] a zkušební tělesa tvaru válce průměru 150 mm a výšce 50 mm pro zkoušku odolnosti proti CHRL dle metody C [17].

Tab. 4 Složení čerstvého betonu (ČB)

Složka	Množství [kg na 1 m ³ ČB]
CEM I 42,5 R	390,0
Písek 0–4 mm	810,0
Kamenivo 4–8 mm	160,0
Kamenivo 8–16 mm	760,0
Plastifikační přísada	1,0
Provdzušňovací přísada	0,6
Stabilizační přísada	1,6
Voda	185,0

Výsledky provedených zkoušek jsou jednoznačné. Průměrná hodnota odpadu po 100 cyklech dle metody A, zjištěná na 3 zkušebních krychlích (**Obr. 6**), byla 4706 g/m² (s nízkou variabilitou – variační koeficient $V_x = 3,4 \%$) a odpadu 1000 g/m² bylo dosaženo po 30 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech. Průměrná hodnota odpadu po 100 cyklech dle metody C, zjištěná na 4 zkušebních válcích (**Obr. 7**), byla dokonce 4933 g/m² (také s nízkou variabilitou – variační koeficient $V_x = 4,2 \%$) a odpadu 1000 g/m² (tedy součinitele D1) bylo dosaženo již po 14 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech. Beton tedy nemůže být z pohledu odolnosti proti CHRL hodnocen pozitivně.

**Obr. 6** Zkušební tělesa zkoušená dle metody A po 100 cyklech, vpravo detail porušení**Obr. 7** Zkušební tělesa zkoušená dle metody C po 100 cyklech, vpravo detail porušení

Výsledky mrazuvzdornosti se však diametrálně liší. Součinitel mrazuvzdornosti (tedy poměr mezi pevnostmi v tahu ohybem zmrazovaných a rozmrazovaných hranolů a pevnosti v tahu ohybem referenčních hranolů) dosahuje po 50 F-T cyklech hodnoty 0,924 a po 100 F-T cyklech dokonce hodnoty 0,988 (!). Tento výsledek byl podpořen také pomocí nedestruktivního měření relativních dynamických modulů pružnosti (což je obdobně určený

poměr této vlastnosti po zmrazování a před zmrazováním). RDM určený pomocí ultrazvukové impulzové metody byl po 50 F-T cyklech roven 0,960 a po 100 F-T cyklech 0,964. RDM určený pomocí rezonanční metody vykazoval téměř identické hodnoty – po 50 F-T cyklech byl 0,955 a po 100 F-T cyklech 0,959. Beton tedy může být hodnocen jako jednoznačně mrazuvzdorný na 100 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů.

Na základě výsledků tohoto experimentu lze konstatovat, že je bezpodmínečně nutné rozlišovat mezi mrazuvzdorností betonu a odolností betonu proti působení vody a CHRL.

5 Závěr

Stanovit odolnost betonu v konstrukci proti působení mrazu není jednoduchý úkol. Ať již se určuje mrazuvzdornost betonu, anebo jeho odolnost proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, provází zkoušku celá řada nástrah a problémů. V mnoha případech nelze získat zkušební tělesa, která by odpovídala příslušným normám, a proto se musí improvizovat a zkoušku dle situace méně či více modifikovat. I v případě, že je zkouška úspěšně provedena, není zdaleka vyhráno – velmi často se stává, že získané výsledky jsou jen velmi obtížně interpretovatelné.

Zřejmě nejdůležitějším aspektem zkoušení odolnosti betonu v konstrukci proti působení mrazu je jasná definice, podle jakého postupu se má zkouška provést – přesněji řečeno, zda je požadováno stanovení mrazuvzdornosti betonu, anebo stanovení odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Jedná se totiž o zcela jiné vlastnosti, které se projevují jiným způsobem porušování betonu. Z výsledků provedeného experimentu jednoznačně vyplývá, že beton, který je mrazuvzdorný, může být současně z hlediska odolnosti proti působení CHRL hodnocen jako zcela nevyhovující.

Příspěvek vznikl za podpory projektu GAČR č. 19-22708S „Nové přístupy k predikci trvanlivosti provzdušněného betonu prostřednictvím zjišťování obsahu a rozložení vzduchových pórů a mrazuvzdornosti“.

Literatura

- [1] fib Bulletin 71. Integrated Life Cycle Assessment of Concrete Structures. International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne Switzerland, 2014
- [2] K. Hrabová, T. Vymazal. Quantification of Sustainability of Concrete Structures. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, **19/6.3**, 2019
- [3] B. Teplý, T. Vymazal, P. Rovnaníková. Úvod k úloze kvantifikace trvalé udržitelnosti v betonovém stavitelství. Konference 24. Betonářské dny 2017, Česká betonářská společnost ČSSI, Litomyšl, 2017
- [4] M. Alexander, A. Bentur, S. Mindess. Durability of Concrete: Design and Construction, 1st ed. CRC Press, Boca Raton, 232 s., 2017, ISBN: 9781138746749
- [5] P. Rovnaníková. Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí. Beton TKS, **17/2**, 2017
- [6] W. Piasta, J. Góra, T. Turkiewicz. Properties and durability of coarse igneous rock aggregates and concretes. Construction and Building Materials, **126**, 2016
- [7] M. Collepardi. Moderní beton. ČKAIT, Praha, 2009, ISBN: 978-80-87093-75-7
- [8] P.-C. Aïtcin. Vysokohodnotný beton. ČKAIT, Praha, 2005, ISBN: 80-86769-39-9

- [9] H.-S. Shang, T.-H. Yi. Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained Concrete. The Scientific World Journal, **2013**, 2013
- [10] D. Kocáb, P. Žítt, S. Hübllová. Problematika stanovení mrazuvzdornosti betonu zabudovaného v konstrukci. Konference 16. Technologie a provádění 2019, Česká betonářská společnost ČSSI, Jihlava, 2019
- [11] J. J. Valenza, G. W. Scherer. A review of salt scaling: I. Phenomenology. Cement and Concrete Research, **37**(7), 2007
- [12] Z. Liu, W. Hansen. Freezing characteristics of air-entrained concrete in the presence of deicing salt. Cement and Concrete Research, **74**, 2015
- [13] D. Kocáb, P. Misák, M. Králíková, T. Komárková. Experimentální ověření vlivu provzdušňovací přísady na odolnost betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek. Konference Sanace a rekonstrukce staveb 2015, WTA, Blansko, 2015
- [14] Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Essen: Lund Institute of Technology, 1992
- [15] ČSN 73 1322. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Praha, UHM, 1968
- [16] ČSN 73 1380. Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury. ČNI, Praha, 2007
- [17] ČSN 73 1326. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Praha, ÚNM, 1985
- [18] D. Kocáb, P. Misák, T. Vymazal, T. Komárková, R. Halamová. Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – metody, praxe, problémy. Beton TKS, **17/2**, 2017
- [19] B. Jindrová. Možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu v konstrukci. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, SZK, Brno, 2020

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

✉ Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
☎ +420 541 147 811
☺ dalibor.kocab@vutbr.cz
URL www.fce.vutbr.cz

Ing. Martin Lišovský

✉ Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
☎ +420 541 147 801
☺
URL www.fce.vutbr.cz

doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.

✉ Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
☎ +420 541 147 801
☺ tomas.vymazal@vutbr.cz
URL www.fce.vutbr.cz

Ing. Martin Alexa

✉ Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
☎ +420 541 147 801
☺
URL www.fce.vutbr.cz

1.3 SEKCE: VÝZKUM A INOVACE

BETON Z RECYKLÁTU

Bohuslav Slánský, Pavel Zelinka, Jan Čermák

1 Úvod

V současné době tvoří inertní stavební sut' v průměru cca 45 % z celkové produkce odpadů v ČR i Evropě. V České republice vzniká ročně okolo 4 milionů tun inertní stavební suti, z čehož je výrazná část, tedy zhruba 85 %, ukládána na deponiích nebo skládkách a pouze 15 % je recyklováno a znovu využito, a to převážně s nízkou přidanou hodnotou jako zásypové, podkladní nebo stabilizační vrstvy. Tímto způsobem využití je výrazně ztížena jejich následná recyklace díky znečištění, např. zeminou.

Na druhé straně se snižují zásoby zdrojů přírodního kameniva z kamenolomů a povolování nové těžby je čím dál legislativně náročnější.

Snižující se množství přírodních zdrojů kameniva na jedné straně, a naopak rostoucí produkce stavební a demoliční suti na straně druhé, byly motivací a driverem k vývoji technologií pro maximální využití recyklovaného kameniva s co nejvyšší přidanou hodnotou a tak, aby výsledný produkt byl dále beze zbytku recyklovatelný.

Beton vyrobený z recyklovaného kameniva je právě takovým produktem, ideálně s využitím 100 % náhrady přírodního kameniva recyklovaným, tedy vč. drobné frakce do 4 mm. A to z betonové, cihelné nebo směsné stavební suti.

Náhrada přírodního kameniva v betonu recyklovaným s sebou přináší výhody v environmentální i ekonomické rovině. V rovině environmentální se jedná o zpracování málo využívaných, a přitom recyklovatelných surovin, které jsou z velké části ukládány na skládkách a zachování těchto kapacit pro skládkování materiálů, které recyklovat nelze. Zároveň jde o úsporu přírodních zdrojů kameniva pro aplikace, kde je přírodní kamenivo nenahraditelné. Dalším přínosem je snížení zátěže z dopravy, protože zdroje stavební suti pocházející z demolic starých objektů se většinou nachází v urbanizovaných oblastech a tedy blíže výroben betonu než lokality lomů a pískoven přírodního kameniva. V rovině ekonomické se jedná o snížení materiálových nákladů už jen díky náhradě drahého přírodního kameniva v podstatě odpadem, což může představovat úsporu až v desítkách procent.

2 Vývoj a princip řešení

Náhrada části přírodního kameniva v betonu, zejména hrubé frakce, recyklovaným je více méně standardní postup používaný jak ve světě, tak ojediněle i v ČR. Náš vývoj a výzkum se však zaměřil na výrobu betonu čistě z recyklovaného kameniva (RA) vč. drobných frakcí do 4 mm. Několikaleté laboratorní testování pracovníků společnosti ERC-TECH bylo korunováno úspěchem a byla vyvinuta nová technologie, která byla v roce 2018 patentována v ČR i mezinárodním patentem.

Na základě tohoto řešení uvedla společnost Skanska a.s. na trh v České republice beton ze 100 % recyklovaného kameniva pod názvem Rebetong. Řešení spočívá jednak ve správné přípravě recyklovaného kameniva (recyklátu) a hlavně v technologickém postupu míchání tohoto betonu s využitím speciálních surovin - "nanofillerů", jehož částice

posilují pevnostní strukturu kameniva a směsi tak, že výsledný beton dosahuje podobných mechanicko-fyzikálních vlastností jako konvenční beton z přírodního kameniva v pevnostních třídách až C25/30 vč. vodonepropustnosti a mrazuvzdornosti. A to při stejné nebo dokonce nižší dávce cementu díky použití nanofileru a reaktivaci pojivových složek obsažených v recyklovaném kamenivu. S ohledem na původ recyklovaného kameniva je potřeba počítat s tím, že modul pružnosti je nižší než u konvenčního betonu s čistým přírodním kamenivem, což je potřeba zohlednit při návrhu betonových a železobetonových konstrukcí z betonu z recyklovaného kameniva. Přesto je oblast použití velmi široká a pokud vezmeme v úvahu potenciální využití veškeré stavební suti do betonu, představovalo by to maximálně 20 % veškeré výroby betonu. Použití příměsí zajišťují trvanlivost takto vyrobených betonových výrobků, umožňují jejich opakovanou recyklaci a zcela tím eliminují budoucí ekologické zatížení a naplňují tak nejprísnejší pohledy na cirkulární ekonomiku ve stavebnictví.

3 Vývoj z laboratoře po průmyslovou výrobu

Užitné parametry betonu ze 100 % recyklovaného kameniva jsou výsledkem dlouhodobého vývoje společnosti ERC-TECH, na kterou navázala na začátku roku 2019 spolupráce společností Skanska, která je jednak jedním z největších výrobců betonu a zároveň přední stavební a developerskou společností a má šetrné stavění jako jednu z hlavních korporátních hodnot. První laboratorní testy v laboratořích Skanska ukázaly překvapivě dobré výsledky betonu ze 100 % betonového, cihelného nebo směsného recyklátu. Potvrdil se tak vysoký potenciál betonu z RA pro komerční využití, a to především na vlastních developerských projektech Skanska. Proto byly neprodleně zahájeny provozní testy přímo na pilotní betonárně v Olomouci opět s velmi dobrými výsledky. Společný vývoj přinesl mimo jiné další optimalizaci výrobních postupů, ověření vyrobiteľnosti v podmínkách průmyslové výroby na betonárně a ověření technologických a reologických vlastností betonu z RA při výrobě, dopravě a zpracování. Na základě těchto dobrých zkušeností přistoupila Skanska Transbeton s.r.o. k certifikaci výroby betonu ze 100 % RA a od září 2019 vyrábí certifikovaný transportní beton s obchodní značkou Rebetong v pevnostních třídách do C 25/30, stupně vlivu prostředí do XC2, a prefabrikované stěnové dílce pod obchodní značkou Reblok. Zaměřuje se na výrobu betonu ze 100 % RA z cihelné stavební suti (vč. drobné frakce do 4 mm), které je na trhu přebytek a jejíž využití má tudíž větší ekonomický i ekologický efekt. Na **Obr. 1** a **Obr. 2** je příklad vstupní suroviny z cihelného RA a ukázky z výroby na betonárně v Olomouci.



Obr. 1 Vstupní surovina – cihelný recyklát frakce 0/22 mm



Obr. 2 První výrobky z Rebetongu – prefabrikované stěnové dílce ReBlok

4 Laboratorní zkoušky a jejich výsledky

V rámci výzkumu a vývoje byly provedeny laboratorní zkoušky na čerstvém i ztvrdlém betonu. Standardně jsou prováděny zkoušky konzistence, obsahu vzduchu v čerstvém betonu, pevnosti betonu v tlaku, objemové hmotnosti čerstvého i ztvrdlého betonu.

Tab. 1 Výsledky laboratorních testů společnosti ERC-TECH

Č. vzorku	Typ recyklátu	Konzistence	Pevnostní třída	Pevnost v tlaku [MPa] / stáří [dny]		
				7	14	28
1	concrete	S4	C25/30	18,8	28,4	35,0
2	bricks	S4	C25/30	19,8	27,8	35,3
3	mix	S4	C25/30	22,5	31,0	38,0

Č. vzorku	Objemová hmotnost	Pevnost v tahu ohybem	Pevnost v příčném tahu	Nasákavost	Statický modul pružnosti	Hloubka průsaku
	kg/m ³	MPa	MPa	%	GPa	mm
1	2150	4,7	2,8	3,5	18,6	22
2	1920	3,7	2,4	3,2	12,9	16
3	2100	4,4	2,5	4,4	14,8	18

Tab. 2 Výsledky laboratorních testů společnosti Skanska

Pevnostní třída	Typ recyklátu	Konzistence	Pevnost v tlaku [MPa] / stáří [dny]				Objemová hmotnost [kg/m ³]	Koeficient mrazuvzdornosti
			2	7	28	92		
C25/30	betonový	S3	11,5	27,2	41,1	45,0	2 115	-
C25/30	betonový	S4	10,6	25,9	40,0	42,0	2 132	1,00
C25/30	cihelňý	S4	12,2	29,7	44,2	48,5	1 913	0,98
C25/30	cihelňý	S4	13,5	29,3	44,7	48,8	1 928	-
C25/30	směsný	S4	14,4	32,7	46,5	51,7	2 043	0,99
C25/30	směsný	S4	13,3	30,4	44,4	49,8	2 027	-

Na vybraných vzorcích pak pevnosti betonu v tahu ohybem i příčném tahu, mrazuvzdornosti, statického modulu pružnosti, nasákavosti, objemových změn betonu a

hloubky průsaku tlakovou vodou. Výsledky laboratorních i provozních zkoušek ukazují dobré užitné vlastnosti betonu se 100 % recyklovaného kameniva. V **Tab. 1** jsou výsledky zkoušek v laboratoři ERC-TECH a v **Tab. 2** jsou výsledky zkoušek v laboratoři Skanska prováděné začátkem roku 2019.

5 Provozní zkoušky

Po úspěšných laboratorních zkouškách bylo přistoupeno k provozním testům na míchacím zařízení BHS DKXS o objemu 1,67 m³ k ověření realizovatelnosti celého technologického postupu přímo v provozu betonárny. V rámci prvních provozních testů byly ověřeny receptury pro pevnostní třídy C20/25 a C25/30 na bázi 100 % cihelného recyklátu. Výsledky testů jsou zobrazeny v **Tab. 3**. Během provozních testů byla rovněž odzkoušena výroba betonových stěnových bloků - viz **Obr. 2**.

Tab. 3 Výsledky provozních zkoušek na betonárně

Pevnostní třída	Typ recyklátu	Konzistence	Počet vzorků	Pevnost v tlaku [MPa]		Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hloubka průsaku [mm]
				7	28		
C 20/25	cihelný	S4	20	22	32,4	1990	19 (6 vzorků)
C 25/30	cihelný	S4	6	25,6	36,9	1990	18 (4 vzorky)

Během provozních zkoušek byla ověřena zpracovatelnost betonu na bázi recyklovaného kameniva, jeho chování, transportovatelnost a možnosti ukládání. Bylo zjištěno, že chování recyklovaného čerstvého betonu je podobné konvenčnímu betonu na bázi přírodních kameniv.

V rámci provozního testování bylo dále provedeno stanovení konzistence v čase na betonu z cihelného recyklátu, aby byla ověřena zpracovatelnost a transportovatelnost recyklovaného betonu s použitím speciálních přísad. Výsledky jsou zobrazeny v **Tab. 4**.

Tab. 4 Stanovení konzistence v čase na betonu z cihelného recyklátu

Pevnostní třída	Typ recyklátu	Čas [min]	Obsah vzduchu [%]	Sednutí kužele [mm]	Teplota betonu [°C]
C25/30	cihelný	0	4,4	210	23,3
		30	4,2	210	23,0
		60	4,0	160	22,5

Vzhledem k vyšší fluktuaci nasákavosti recyklátu, speciálně cihelného, je potřeba věnovat pozornost době zpracovatelnosti čerstvého betonu a použít speciální přísady, aby byla zajištěna dobrá zpracovatelnost po dobu min. 90 min.

Jedním z faktorů úspěchu je kvalitní výroba recyklovaného kameniva ze stavební suti. Trvalo nějaký čas, než byl nastaven optimální výrobní proces, vybrána nejvhodnější zařízení a nastavení každého stroje ve výrobním řetězci. Vývoj betonu ze 100% RA byl zahájen použitím dvou frakcí RA, 0-8 a 8-16 mm. Po několika krocích optimalizace produkce RA byla vyrobena monofrakce 0-22 mm s podobnou granulometrií. To byl důležitý krok pro efektivní výrobu v betonárnách, protože jim obvykle chybí skladovací prostor pro více frakcí kameniva. Důležitý je také zdroj SDS, nejlepším možným

způsobem je řídit celý proces počínaje selektivní demolicí a vytvoření velkého úložiště recyklovaného kameniva s podobnými vlastnostmi. Vyrobené recyklované kamenivo je testováno podle ČSN EN 12620+A1 a dále je požadována předepsaná křivka zrnitosti. Skladování recyklovaného kameniva je podobné jako u přírodního.

6 Certifikace a uvedení na trh

Po úspěšném provozním testování bylo přistoupeno k certifikaci systému řízení výroby (SŘV) betonu z recyklátu podle podnikové normy č. TN TRB 03/2019 a po skončení certifikačního procesu bylo v září 2019 vydáno stavebně technické osvědčení (STO) č. 060-049062. Výsledky počátečních zkoušek typu jsou uvedeny v **Tab. 5**.

Tab. 5 Vlastnosti testované v rámci certifikace SŘV

Beton ze 100% recyklátu		C 25/30 cihelný recyklát				C 25/30 betonový recyklát			
<i>Stáří vzorků</i>	<i>dny</i>	7	14	28	56	7	14	28	56
<i>Pevnost v tlaku</i>	<i>Mpa</i>	24,1	31,8	37,8	41	19,7	22,8	35,1	37,5
<i>Objemová hmotnost</i>	<i>kg/m³</i>			2020				2110	
<i>Pevnost v tahu ohybem</i>	<i>Mpa</i>			4,3				3,9	
<i>Pevnost v příčném tahu</i>	<i>Mpa</i>			2,7				2,4	
<i>Marzuvzdornosti (100 c)</i>	<i>100 c.</i>			0,92				0,99	
<i>Nasákavost</i>	<i>%</i>			4,1				3,9	
<i>Modul pružnosti v tlaku</i>	<i>Gpa</i>			17,6				20,9	
<i>Hloubka průsaku</i>	<i>mm</i>			16				21	
<i>Objemové změny</i>	<i>‰</i>	0,428	0,697	0,977	1,188	0,558	0,854	1,119	1,307

V roce 2020 pak následovala certifikace dalších betonáren společnosti Skanska Transbeton, s.r.o. pro výrobu betonu z recyklátu v Praze-Uhřetěvesi, Praze-Řeporyjích a ve Veltrusech a v Brně. V současné době probíhá certifikace betonárny v Ostravě.

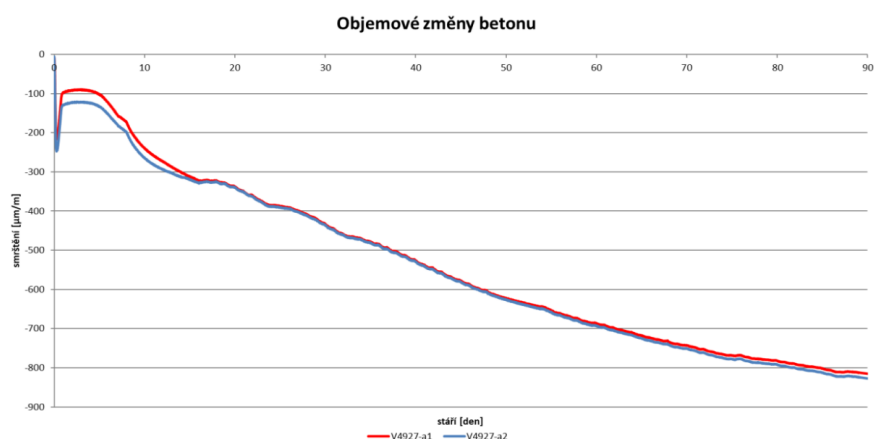
7 Další doplňkové zkoušky

Kromě základních zkoušek jsou prováděny a připravovány další nadstandardní zkoušky betonu z recyklátu, které mají za cíl rozptýlit obavy investorů a projektantů a odstranit tak bariéry pro jeho širší využití. Příkladem je např. zkouška soudržnosti s betonářskou výztuží dle ČSN 73 1328 pro beton C 25/30 z cihelného recyklátu s průměrným výsledkem 5,2 MPa ve srovnání s betonem s přírodním kamenivem C 25/30 se soudržností 5,4 MPa. Fotografie ze zkoušky jsou na **Obr. 3**.

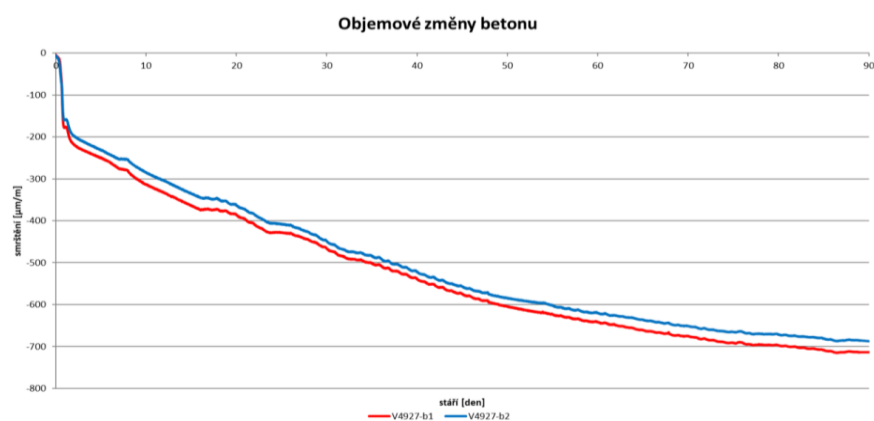


Obr. 3 Zkouška soudržnosti s betonářskou výztuží

Další zkoumanou vlastností bylo zjištění a porovnání objemových změn betonu z recyklovaného kameniva a betonu s přírodním kamenivem pevnostní třídy C 25/30 podle rakouské normy [8], kdy měření probíhá ve žlabu o rozměrech 100×60×1000 mm již od čerstvého, ještě nezatvrdlého stavu betonu. Měření probíhala do stáří 90 dnů. Výstupy těchto měření jsou uvedené na **Obr. 4** pro beton s recyklovaným kamenivem a **Obr. 5** pro beton s použitím přírodního kameniva.



Obr. 4 Beton s recyklovaným kamenivem



Obr. 5 Beton s přírodním kamenivem

8 Pilotní projekty, příklady použití

Beton vyrobený ze 100 % RA má užité vlastnosti obdobné jako konvenční beton vyrobený z přírodních kameniv. Proto je možné jej použít pro běžné stavební betonové a železobetonové konstrukce. Při návrhu vodorovných nosných konstrukcí je potřeba brát v úvahu nižší modul pružnosti (viz kap. 4.)

Velmi rychle se projevil zájem o prefabrikované stěnové dílce, kterých již bylo vyrobeno téměř tisíc kusů. Jako prezentace první pilotní výroby byly tyto prefabrikáty použity pro stavbu parkourového hřiště na “Cukrkandlu” v Praze-Modřanech, viz **Obr. 6**.



Obr. 6 První pilotní projekt z Rebetongu ve formě prefabrikovaných stěnových dílců ReBlok – parkourové hřiště v Praze, Modřanech

První pilotní projekt ve formě transportního betonu ze 100% cihelného recyklátu byl realizován v Olomouci na stavbě Nová Envelope, kde byla zahájena betonáž podkladních betonů v objemu 350 m³. Dosavadní zkušenosti s dopravou, čerpáním a zpracováním tohoto materiálu jsou dobré, fotografie z realizace jsou na **Obr. 7**.



Obr. 7 První pilotní projekt Rebetongu ve formě transportního betonu – Nová Envelope v Olomouci

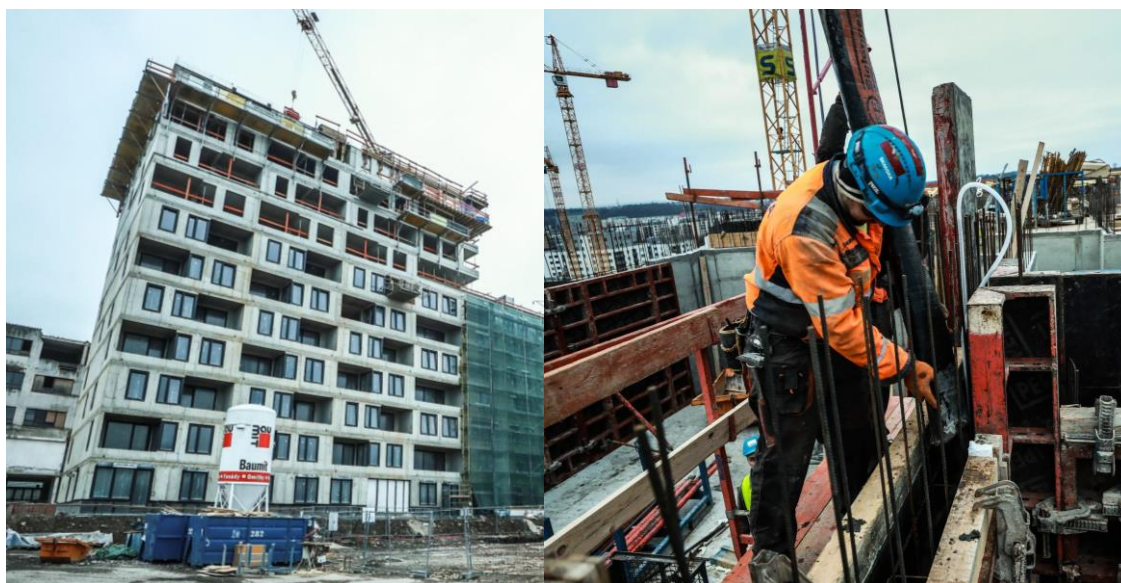
Dalším pilotním projektem je developerský rezidenční projekt Skanska Čertův vršek v Praze – viz **Obr. 8**. Rebetong se zde používá nejen pro podkladní betony, ale také pro železobetonové nosné stěny – viz **Obr. 9**. Další realizací je rezidenční čtvrť Emila Kolbena v Praze – viz **Obr. 10**. V současné době se připravují budoucí pilotní projekty aplikace monolitického Rebetongu.



Obr. 8 Rezidenční projekt čertův Vršek v Praze



Obr. 9 První železobetonová stěna z Rebetongu na projektu Čertův Vršek v Praze



Obr. 10 Železobetonové stěny bytového komplexu Emila Kolbena v Praze

9 Technická legislativa

V současné době jsou nejen v rámci ČR, ale celé EU značné bariéry v technických předpisech, které významně omezují použití recyklovaných kameniv v betonu. Evropská norma pro beton EN 206+A1 doporučuje použití hrubého recyklovaného kameniva do betonu pouze do výše max. 50 % pro typ A a B, a to pouze pro stupeň vlivu prostředí X0. Česká národní norma ČSN P 73 2404 toto doporučení převzala jako limit. Pro podporu širšího využití RA do betonu a tím zlepšení hospodaření s druhotnými surovinami ve stavebnictví je nezbytné změnit tento konzervativní přístup a zaměřit se na výsledné vlastnosti betonu z recyklovaného kameniva bez omezení jeho obsahu. V ČR tento proces díky výrazné podpoře MŽP, MPO a ČAS započal v září 2019 a cílem je vytvoření předpisu, který by tento přístup umožňoval.

Situace se začíná pomalu ale přece měnit, jak si veřejní zadavatelé čím dál víc uvědomují důležitost šetrného stavění a cirkulární ekonomiky, a naopak přichází s požadavky ve svých projektech na stavební výrobky z druhotných, recyklovaných surovin. Přesto je změna stávajících technických předpisů nezbytná.

10 Závěr

Zjištěné parametry během laboratorních i provozních zkoušek ukazují velký potenciál betonu ze 100 % recyklovaného kameniva, jelikož jeho užitné vlastnosti jsou srovnatelné s konvenčními betony a má své uplatnění v řadě stavebních konstrukcích. Patentované řešení je plně v souladu s principy cirkulární ekonomiky, kdy lze velkou část inertní stavební suťi proměnit zpět na stavební materiál s výbornými vlastnostmi, který je navíc plně recyklovatelný a dále zpracovatelný stejným technologickým postupem. Vzhledem k stále se snižující zásobě přírodních zdrojů kameniv je využívání alternativních zdrojů ekonomicky i environmentálně výhodné.

Díky snížení dopravní vzdálenosti recyklovaného kameniva, které se nachází spíše v urbanizovaných oblastech, proti přírodnímu kamenivu dováženého většinou z větších vzdáleností, je nižší uhlíková stopa, kterou lze dále snížit optimalizací skladby receptury použitím nižší dávky cementu. Celkově je možné snížit uhlíkovou stopu až o více než 10 %. Dále je používáno jinak příliš nevyužívané stavební a demoliční suti na místo přírodního kameniva.

Literatura

- [1] Čermák, J.; Fiala, J.; Polák, F. Comparison of utility properties of concrete with different types of recycled aggregates. Brno University of Technology, 2020. ISBN 978-80-214-5894-9
- [2] Slánský, B.; Zelinka, P.; Čermák, J. Beton z recyklovaného kameniva. Hradec Králové: ČBS, 2020. ISBN 978-80-907611-3-1
- [3] ČSN EN 206+A1. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, ČR 2018.
- [4] ČSN EN 12620 + A1. Kamenivo do betonu, ČR, 2008.
- [5] ČSN P 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace, ČR 2016.
- [6] ČSN 73 1328. Stanovení soudržnosti oceli s betonem, ČSSR 1971.
- [7] ÖNORM B 3329. Grout – Requirements and test methods. The Austrian Standard: Austria, 2009

Ing. Bohuslav Slánský, Ph.D.

✉ Skanska a.s.
Pavelkova 1131/6, 779 00 Olomouc
☎ +420 737 257 261
😊 bohuslav.slansky@skanska.cz
URL www.skanska.cz

Pavel Zelinka

✉ Skanska Skanska Transbeton s.r.o.
Pavelkova 1177/8 779 00 Olomouc
☎ +420 737 256 781
😊 pavel.zelinka@skanska.cz
URL www.skanska.cz

Ing. Jan Čermák, Ph.D.

✉ ERC-TECH
Čelakovského sady 1580/4, 110 00
Praha 1
☎ +420 777 755 122
😊 cermak@erc-tech.eu
URL www.erc-tech.eu

KONTROLA BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ METODOU PULSE ECHO

Petr Cíkrle, David Juráň, Dalibor Kocáb, Jaroslav Šnédar

1 Úvod

V současné době jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu provádění staveb, betonové konstrukce nevyjímaje. Zatímco kontrola vlastností vstupních materiálů je na solidní úrovni, a navíc i relativně snadno proveditelná, podstatně horší je prokazování kvality hotových konstrukcí. Z hlediska betonu nejde jen o jeho vlastnosti, jako jsou např. rovnoměrnost, pevnost v tlaku nebo statický modul pružnosti, ale rovněž o skryté vady a poruchy, k nimž řadíme nedodržení tloušťky konstrukce (což je typické např. pro průmyslové podlahy nebo ostění tunelů), přítomnost velkých kaveren (u hustě vyztužených konstrukcí) nebo delaminaci (nešetřené pracovní spáry, trhliny apod.).

Diagnostika výše uvedených vad a poruch byla donedávna značně obtížná, zvláště u masivnějších konstrukcí přístupných pouze z jedné strany. V minulosti byla částečně používána metoda radiografická, i když s řadou omezení, dále např. metoda impact-echo. Jinak nezbývalo než provést řadu jádrových vývrtů. V posledním desetiletí však došlo k výraznému posunu v oblasti nedestruktivní diagnostiky jak z hlediska rozvoje metod, tak i z hlediska vývoje přístrojové techniky. Velkého rozmachu ve stavebnictví dosáhla metoda GPR (radarová), ale rovněž ultrazvuková odrazová metoda, nazývaná též pulse echo. Právě možnostem metody pulse echo je věnován tento příspěvek.

2 Princip ultrazvukové odrazové metody (pulse-echo)

Pro zjišťování vlastností betonu využíváme ve stavební praxi ultrazvukovou impulzovou metodu, spočívající ve vysílání krátkých svazků tlumeného mechanického kmitání do materiálu. Toto kmitání vzniká v budiči, který pravidelně a opakovaně vysílá elektrické impulzy. Během zkoušení konstrukcí a materiálu se mohou použít dvě, popřípadě jedna sonda. Při použití dvou sond funguje jedna jako budič ultrazvukových vln a druhá jako jejich snímač. Pokud se používá jen jedna sonda, zastává obě funkce a je tedy zároveň budičem a snímačem. Sonda (piezoelektrická) po přiložení k povrchu konstrukce nejprve funguje jako budič vysílající do konstrukce mechanický signál, poté se přepne do režimu snímání, kdy přijímá signál odražený od protějšího povrchu konstrukce nebo překážky a mění ho na elektrický obraz. Takto přeměněný obraz se zobrazuje na obrazovce přístroje jako tzv. „echo“. Podle počtu sond, jež jsou použity při zkoumání konstrukce, se metody nazývají [1, 2]:

- ultrazvuková metoda impulzová průchodová – využívá dvě sondy;
- ultrazvuková metoda impulzová odrazová (pulse-echo) – využívá jednu sondu.

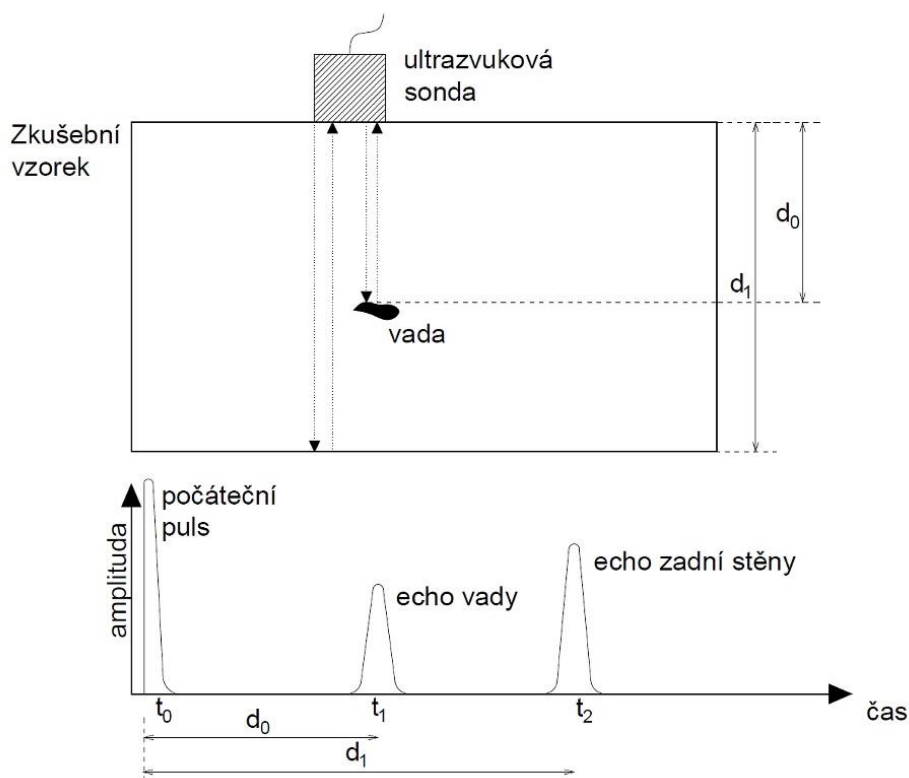
Ultrazvuková impulzová metoda odrazová se neustále zdokonaluje a rozšiřují se její možnosti využití v diagnostice konstrukcí. Metoda může být použita například k:

- měření tloušťky;
- zjištění přítomnosti vad ve vybraném prvku nebo konstrukci (kaveren, delaminací);

- určení polohy vad;
- stanovení rovnoměrnosti betonu;
- stanovení fyzikálně-mechanických vlastností (zejména modulu pružnosti).

Nevýhodou metody je nutnost použití složitějších a dražších přístrojů než u metody průchodové, výhodou je naopak možnost zkoumat i konstrukce přístupné pouze z jedné strany, jako jsou stěny, průmyslové podlahy nebo ostění tunelů. Rovněž se lépe diagnostikují např. stropní desky, které jsou sice přístupné z obou stran, avšak zajištění protažení kabeláže skrz ně a koordinace měření průchodovou metodou jsou složité a časově náročné.

Při použití ultrazvukové metody odrazové se doba průchodu signálu zkoumaným prvkem zjišťuje jako čas, který uplyne mezi vysláním ultrazvukové vlny do prostředí, následným odrazem vlny od vzdáleného povrchu (případně vady) a zaznamenáním odraženého echa v místě vyslání signálu. Moderní přístroje dokáží sledovanou dobu zobrazit na svých obrazovkách jako graf A-scan, který zachycuje výchylky impulsu v závislosti na času (**Obr. 1**). Nejprve je na obrazovce zaznamenán počáteční impuls, dále impuls vady uvnitř prostředí (echo vady) nebo echo zadní stěny.



Obr. 1 Typické ultrazvukové pulse-echo s A-skenem [3]

Z přesného času průchodu ultrazvuku zkoumaným prostředím lze stanovit tloušťku konstrukce, popřípadě hloubku zjištěné vady. Při známé rychlosti šíření ultrazvukových vln zkoumaným prostředím a času t_1 , který udává dobu mezi vysláním a zaznamenáním odraženého signálu od vady, lze stanovit hloubku vady jako d_0 :

$$d_0 = \frac{v \cdot t_1}{2}. \quad (1)$$

Obdobným způsobem přístroje vyhodnotí také tloušťku dané konstrukce jako:

$$d_2 = \frac{v \cdot t_2}{2} \quad (2)$$

pouze s tím rozdílem, že čas t_2 je čas zaznamenání odraženého echa zadní stěny konstrukce [3].

Je nutné poznamenat, že ultrazvuková odrazová metoda využívá příčné vlnění, na rozdíl od průchodové metody, kdy měříme rychlost podélného vlnění.

3 Použité přístroje a sondy

Na trhu se objevuje stále více přístrojů pro ultrazvukovou odrazovou metodu. Mezi nejznámější patří např. systém MIRA [4]. Autoři příspěvku měli k dispozici přístroj Pundit PL 200 PE a Pundit 250 Array. Odrazové sondy jsou z důvodu zlepšení možností analýzy odražených signálů konstruovány jako maticové, tedy s větším počtem budičů a snímačů uspořádaných do matice – **Obr. 2**. Používají se nízkofrekvenční ultrazvukové snímače krátkých pulzů s kontaktem suchého bodu – ve světě je tento princip známý jako tzv. „dry point contact“, ve zkratce DPC [5].



Obr. 2 Ultrazvukový přístroj Pundit 250 Array s maticovou sondou osazenou 24 snímači typu DPC, uspořádanými do 8 řad

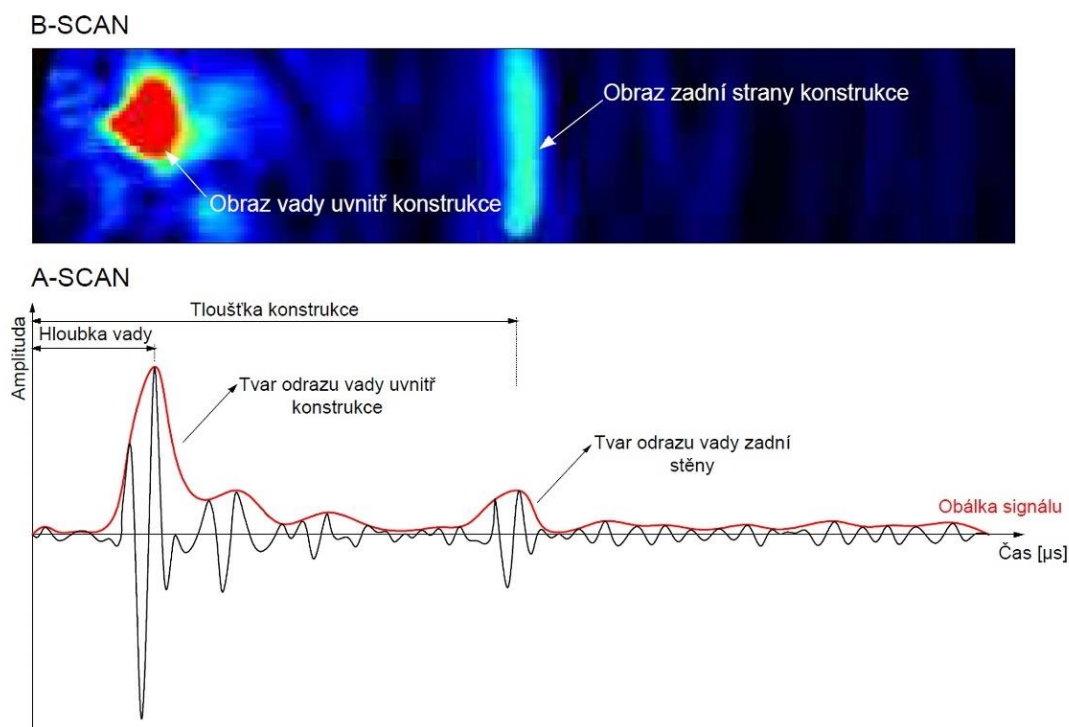
Na obrazovce přístroje lze ultrazvukové impulzy zobrazit třemi možnými způsoby, a to jako zobrazení A (A-scan), B (B-scan) a C (C-scan).

A-scan je zkratkou pro „amplitude scan“. Jedná se o nejjednodušší zobrazení, při kterém jsou zaznamenávány dva základní parametry odezvy: velikost (amplituda) a čas výskytu odezvy. Většinou se tyto parametry zobrazují na jednorozměrné jednoduché mřížce, kde vertikální osa představuje amplitudu a horizontální osa představuje čas [6].

B-scan je zkratkou pro „brightness scan“. Jedná se o dvojrozměrné zobrazení s informacemi vyšetřovaného prostředí v určitém řezu. Toto zobrazení nám umožňuje „nahlédnutí“ do zkoumané konstrukce. Pohybem sondy po dráze, která bývá většinou přímočará, se průběžně získávají jednotlivá echa. Výstupem je poté vykreslení tloušťky

konstrukce, případná hloubka vad na horizontální ose, které byly získány z naměřených odezev. Vertikální osa zde představuje dráhu sondy, po které se pohybovala [6].

Zobrazení B je doplnění zobrazení A a je možné zobrazení obou scanů současně na obrazovce přístroje – viz **Obr. 3**.



Obr. 3 Zobrazení vady uvnitř konstrukce a obrazu zadní stěny přístrojem Pundit 250 Array pomocí A-skenu a B-skenu

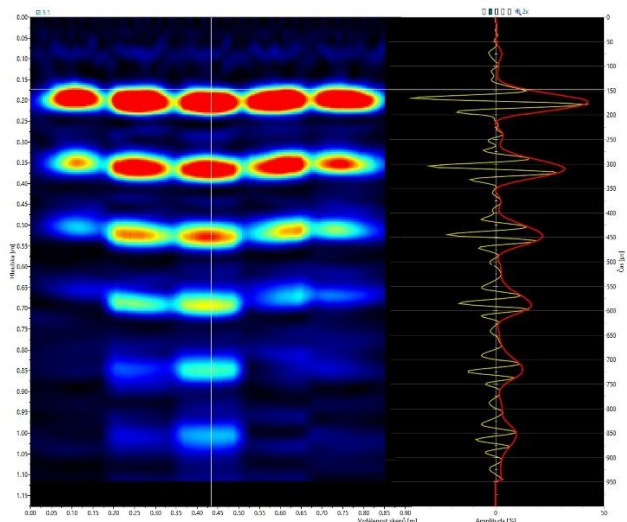
Pundit 200 pulse echo je přístroj z řady Pundit. Ke zkoušení konstrukce využívá celkem 18 ultrazvukových DPC snímačů, které jsou vzájemně propojeny, k získání co nejlepších výsledků. Je schopen měřit až do hloubky jednoho metru. Přístroj dokáže pracovat s režimy: získávání rychlosti šíření ultrazvukových vln, A-scan, B-scan, C-scan a měření vzdáleností [7].

Pundit 250 Array patří taktéž do řady Pundit s tím rozdílem, že oproti jeho předchůdci narostl počet snímačů z 18 na 24. Snímače jsou rozděleny po řadách do 8 kanálů. Při snímání dané konstrukce vždy funguje jeden kanál jako vysílač a zbylé jako přijímače s tím, že během snímání musí zastat každý kanál funkci vysílače i přijímače. Takto vznikne celkem 28 A-scanů, které se mapují pomocí syntetické clony do obrazu hledaného B-scanu. Výrobce udává taktéž možnost měření do hloubky až jednoho metru. Oproti předchůdci je schopný měřit v režimech: A-scan, B-scan v reálném čase, panoramatický B-scan a získávání rychlosti šíření ultrazvukových vln [8].

4 Měření tloušťky průmyslové podlahy

Prvním příkladem praktické aplikace ultrazvukové odrazové metody (pulse echo) je měření tloušťky průmyslové podlahy. Jedná se o typický příklad ze stavební praxe, kdy nedodržení požadované tloušťky podlahy lze poměrně výrazně „ušetřit“. V případě zkoumané podlahy byla podle projektové dokumentace požadována tloušťka podlahy

z drátkobetonu 240 mm. Jelikož vznikly oprávněné pochybnosti o dodržení této hodnoty, byly provedeny zkoušky pomocí přístroje Pundit 250 Array. V různých částech haly vycházela tloušťka podlahy pomocí ultrazvuku od 167 mm do 190 mm. V místě, kde byla naměřena nejnižší hodnota 167 mm (viz **Obr. 4**), byl proveden kontrolní jádrový vývrt o průměru 100 mm (viz **Obr. 5**), jednak za účelem ověření tloušťky, jednak pro stanovení pevnosti v tlaku a obsahu drátků.



Obr. 4 Panoramatický B-scan podlahy se znázorněním až 6násobného echa zadní stěny, z něhož byla odečtena tloušťka podlahy 167 mm



Obr. 5 Jádrový vývrt, z něhož byla zjištěna průměrná hodnota tloušťky podlahy 171,5 mm

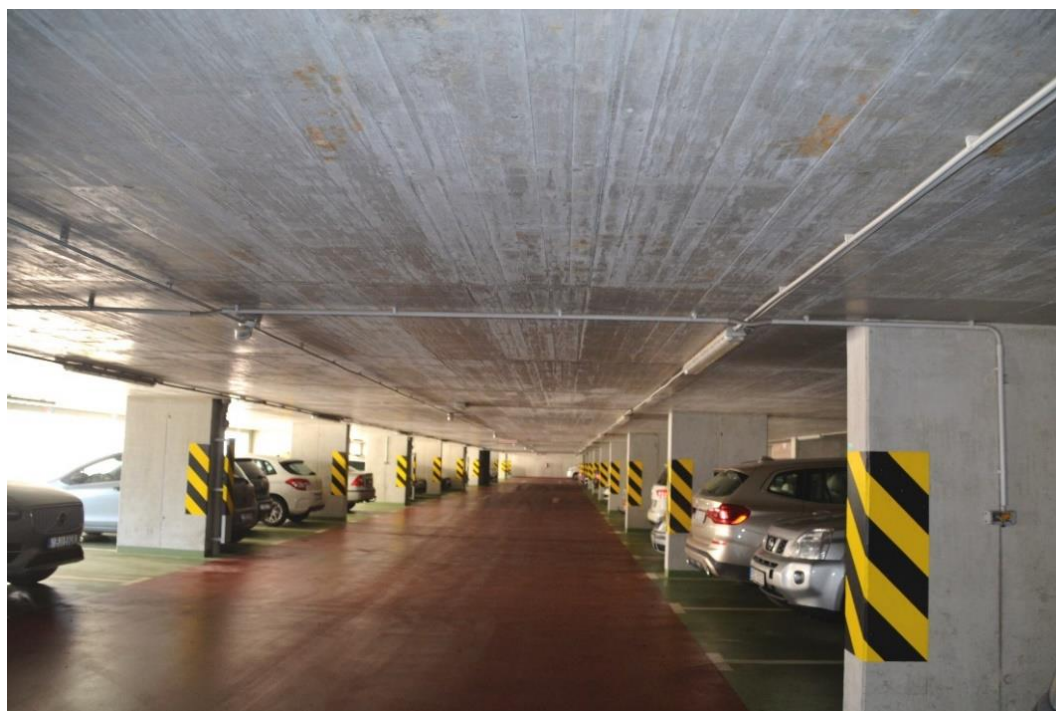
Jádrové vývrty byly následně odebrány v dalších místech, kde tloušťky pomocí ultrazvuku vycházely od 173 mm do 190 mm. Porovnání výsledků měření tloušťky podlahy s délkou jádrových vývrtů ve stejných místech jsou uvedeny v **Tab. 1**. Nenalezen zdroj odkazů.. Výsledky měření pomocí ultrazvuku a na vývrtech se lišily od 1 mm do 7 mm.

Tab. 1 Porovnání tloušťky podlahy změřené ultrazukovou odrazovou metodou s délkou vývrtů ve stejných místech

Označení tělesa	Tloušťka podlahy h_{UZ} [mm] (pomocí UZ metody)	Délka vývrtu L [mm]				
		L_1	L_2	L_3	L_4	Průměr
V2	167	170,4	171,2	172,4	172,4	171,6
V3	173	182,4	173,8	171,5	175,7	175,9
V4	175	181,1	184,1	181,9	180,4	181,9
V5	190	191,9	189,2	185,6	189,8	189,1

5 Kalibrační měření na polostěnách o známé tloušťce

Při měření sondami Pundit PL 200 – PE a Pundit 250 Array byly zjištěny určité odchylky v naměřené tloušťce betonu. Z toho důvodu byly obě sondy testovány na polostěnách v parkovacím domě FAST VUT (viz **Obr. 6**), u nichž byla známá tloušťka (300 mm).



Obr. 6 Polostěny v parkovacím domě FAST pro kalibraci ultrazvukového měření tloušťky betonu

Na každé stěně byla nejprve stanovena průměrná rychlost šíření příčných ultrazvukových vln (s-wave) ze šesti měření v různé výšce. Takto stanovená rychlost pak spolu s dobou průchodu (rovněž stanovenou na 6 místech v různé výšce) sloužila k výpočtu tloušťky prvků. Výsledky měření pomocí sondy Pundit PL 200 – PE a Pundit 250 Array jsou uvedeny v **Tab. 2** a **Tab. 3**.

Tab. 2 Výsledky měření tloušťky polostěn pomocí ultrazvukové odrazové sondy Pundit PL 200

Polostěna	C1	D1	C2	D2	A3	B3	C3	D3	A4	C4	D4
Tloušťka l [m]	284	283	279	272	261	272	278	284	263	272	307
	284	286	275	272	262	270	274	282	260	275	307
	283	280	279	276	258	268	275	283	262	274	300
	281	279	280	280	258	268	274	281	261	273	292
	278	283	280	282	258	268	274	282	264	273	281
	280	281	279	283	260	267	268	277	263	268	282
Průměr l [m]	282	282	279	278	260	269	274	282	262	273	295
Odchylka [mm]	-18	-18	-21	-23	-41	-31	-26	-19	-38	-28	-5
Odchylka [%]	-6,1	-6,0	-7,1	-7,5	-13,5	-10,4	-8,7	-6,2	-12,6	-9,2	-1,7

Průměrná hodnota tloušťky betonu polostěn stanovená sondou Pundit PL 200 – PE vyšla 275,2 mm, což je přibližně o 8,3 % méně, než byla skutečná tloušťka. Největší odchylka o - 41 mm (13,5 %) byla zjištěna u vnější polostěny A3 (vystavené povětrnostním vlivům).

Tab. 3 Výsledky měření tloušťky polostěn ultrazvukovou odrazovou sondou Pundit 250 Array

Polostěna	C1	D1	C2	D2	A3	B3	C3	D3	A4	C4	D4
Tloušťka I [m]	295	300	292	284	268	285	281	300	281	283	313
	295	304	290	283	269	285	280	304	281	282	312
	294	297	294	284	265	278	278	309	277	283	310
	297	296	298	290	266	278	278	306	280	286	292
	295	301	297	295	268	281	280	302	285	283	284
	293	300	296	293	266	278	281	299	285	285	284
Průměr I [m]	295	300	295	288	267	281	280	303	282	284	299
Odchylka [mm]	-5	0	-6	-12	-33	-19	-20	3	-19	-16	-1
Odchylka [%]	-1,7	-0,1	-1,8	-3,9	-11,0	-6,4	-6,8	1,1	-6,2	-5,4	-0,3

Průměrná hodnota tloušťky betonu polostěn stanovená sondou Pundit 250 Array vyšla 288,4 mm, což je přibližně o 3,9 % méně, než byla skutečná tloušťka. Největší odchylka o -33 mm (11,0 %) byla zjištěna rovněž u vnější polostěny A3.

Výsledky porovnávacího ultrazvukového měření tloušťky betonu polostěn ukázaly, že měření je poměrně přesné, a to zejména při použití sondy novější generace Pundit 250 Array. Průměrná odchylka měřené tloušťky dosáhla jen -3,9 % ze skutečné hodnoty. Odchylky při měření starším typem sondy Pundit PL 200 PE jsou větší, v průměru -8,3 % (maximální odchylka činila -13,5 %). Rozhodujícím faktorem odchylky naměřené tloušťky je stanovená rychlost šíření ultrazvukového vlnění. Tato se měří na povrchu konstrukce. Vzhledem ke skutečnosti, že největší odchylka měřené tloušťky betonu byla zjištěna vždy u polostěny A3 (v řadě polostěn u otevřené strany parkovacího domu) a rovněž u dalších méně chráněných polostěn B3 a A4, je zde patrná souvislost mezi stavem povrchu betonu a naměřenou rychlostí šíření ultrazvukového vlnění. Toto zjištění je důležité pro další využití metody a rozhodně stojí za bližší zkoumání.

6 Závěr

Ultrazvuková odrazová metoda, známá ve světě pod názvem pulse echo, je velmi perspektivní metodou určenou zejména pro diagnostiku masivních konstrukcí a konstrukcí přístupných pouze z jedné strany. Příspěvek se zaměřil zejména na zjišťování tloušťky betonu. V prvním případě byla nedostatečná tloušťka drátkobetonové podlahy zjištěná ultrazvukem následně potvrzena pomocí jadrových vývrtů. Ve druhém případě šlo o porovnání přesnosti měření prováděného dvěma různými odrazovými sondami od stejného výrobce. Zde se ukázalo, že novější typ sondy je pro stanovení tloušťky konstrukce vhodnější, neboť dosahuje vyšší přesnosti – odchylka od skutečné tloušťky činila v průměru jen -3,9 %. Současně se ukázalo, že měření může být ovlivněno vlastnostmi povrchu betonové konstrukce. Studium těchto vlivů na výsledky ultrazvukových měření bude jistě předmětem budoucích výzkumů.

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu juniorského specifického vysokoškolského výzkumu na VUT č. FAST-J-21-7485.

Literatura

- [1] Kopec, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno, CERM, 2008, ISBN: 978-80-7204-591-4
- [2] Anton, O.: Základy zkušebnictví: návody do cvičení. Brno, CERM, 2002, ISBN: 80-214-2079-0
- [3] Ultrasonic Wave - an overview | ScienceDirect Topics. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2020 Elsevier B.V. or its licensors or contributors. [cit. 20. 02. 2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/ultrasonic-wave>
- [4] MIRA - Ultrasonic Pulse Echo Imaging. Construction Testing Equipment | PCTE [online]. Copyright © 2019 PCTE [cit. 20. 02. 2020]. Dostupné z: <https://www.pcte.com.au/mira-ultrasonic-pulse-echo-imaging>
- [5] Moved Permanently [online]. [cit. 20. 02. 2020]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v066/v066.htm>
- [6] Schempp, P.; Preuß, K.; Tröger, M. About the Correlation Between Crude Oil Corrosiveness and Results From Corrosion Monitoring in an Oil Refinery. Corrosion. 72, 2016, doi: 10.5006/1940
- [7] Pundit PL-200 / PL-200PE – Ultrasonic Testing. Construction Testing Equipment | PCTE [online]. Copyright © 2019 PCTE [cit. 20. 02. 2020]. Dostupné z: <https://www.pcte.com.au/pundit-pl-200-pl-200pe-ultrasonic-testing>
- [8] Pundit 250 Array - Ultrasonic Imaging Scanner. Construction Testing Equipment | PCTE [online]. Copyright © 2019 PCTE [cit. 20. 02. 2020]. Dostupné z: <https://www.pcte.com.au/pundit-250-array-ultrasonic-imaging-scanner>

doc. Ing. Petr Cíkrle, Ph.D.

✉ Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
☎ +420 541 147 814
😊 petr.cikrle@vutbr.cz
URL www.fce.vutbr.cz

David Juráň

✉ Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
☎ +420 541 147 801
😊
URL www.fce.vutbr.cz

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

✉ Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
☎ +420 541 147 811
😊 dalibor.kocab@vutbr.cz
URL www.fce.vutbr.cz

Ing. Jaroslav Šnédar

✉ Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
☎ +420 541 147 801
😊
URL www.fce.vutbr.cz

ANALÝZA SOUDRŽNOSTI VÝZTUŽE S UHPC VYSTAVENÉHO VYSOKÝM TEPLOTÁM

Jiří Kolísko, David Čítek, Jindřich Čech, Adam Čítek, Martin Kryštov

1 Úvod

Teplota prostředí je důležitým faktorem, jenž ovlivňuje chování stavebních konstrukcí, a neméně důležité je její působení na pevnost ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) a jeho soudržnost s ocelovou výztuží. Teplota prostředí a její účinky na konstrukce by proto měly být zohledňovány při návrhu železobetonových konstrukcí vystavených právě působení vysokých teplot nejen z důvodu možného budoucího kolapsu konstrukce, ale také z důvodu zamezení vzniku nevratných poškození či poruch.

Použití UHPC pro různorodé druhy konstrukcí je ve stavebnictví stále častější. Praktický význam těchto cementových kompozitů je založen na jejich vysokých pevnostech, lomových parametrech, odolnosti proti nárazu a na trvanlivosti. Příznivé parametry materiálu jako nízká permeabilita, nasákavost a celkově velmi vysoká homogenita jemnozrnné směsi však mohou v některých situacích představovat vážné riziko. U betonových konstrukcí je toto riziko způsobeno vystavením konstrukce účinkům zvýšených teplot např. při požáru. Při působení vysokých teplot dochází v betonu k extrémnímu namáhání, které zejména u přirozeně vlhkého betonu vede až k explozivnímu odprýskávání a poškození povrchových vrstev.

Prvním z vlivů způsobujících destrukční projevy je teplotně-mechanický proces, při kterém je teplo přenášeno mezi jednotlivými komponenty matrice. Vzhledem k rozdílným teplotním roztažnostem pojivové složky a kameniva dochází k nerovnoměrné deformaci částí a k lokálnímu působení tahových sil v betonu. Tyto síly mohou mít za následek popraskání betonu.

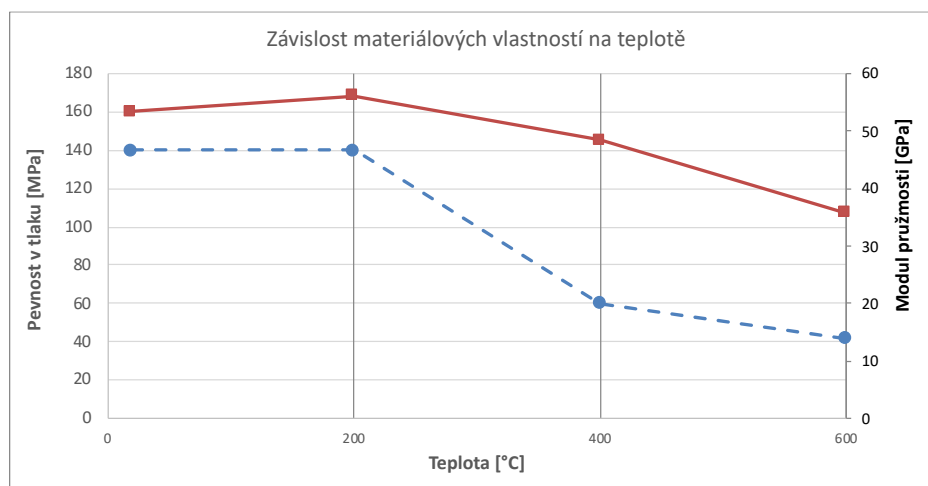
Dalším významnějším vlivem na poškození betonu vystaveného vysokým teplotám je teplotně-vlhkostní proces, při kterém dochází k přeměně vázané vody v betonu na páru. Struktura matrice UHPC vzhledem ke své nízké pórovitosti neposkytuje dostatek prostoru pro expanzi vodních par a extrémní tlak těchto vodních par tak má za následek zvýšení tahových napětí, odprýskávání a poškození materiálu.

Redukci trhlin a zlepšení materiálových parametrů však lze docílit přidáním vhodného množství rozptýlené výztuže (ocel, sklo, kompozit). Aplikace různých druhů rozptýlené výztuže do betonu je v dnešní době již běžnou záležitostí, díky které lze docílit snížení smrštění a eliminaci případných trhlin. Přidáním rozptýlené výztuže do matrice vysokohodnotných betonů také získáváme významně lepší materiálové parametry, duktilitu a zpevnění materiálu po vzniku první trhliny. Nejčastěji používanou rozptýlenou výztuží v UHPC jsou ocelová vlákna o délce cca 6 až 12 mm. V této fázi experimentu byla použita směs UHPC se zastoupením 1,5 % objemu ocelových vláken délky 12 mm.

Tento článek je doplněním předchozího experimentu popsáno v [1] – nově navíc zhodnocuje výsledky numerického statického modelování vytahovací zkoušky na zkušebních krychlech v programu Atena a porovnává je s výsledky experimentálních zkoušek. V modelech jsou zahrnuty změny vlastností zkušební krychle z UHPC vlivem ohřátí na vysoké teploty a následného ochlazení, které byly zjištěny experimentálně.

2 Experimentální část

Jako vstupní parametry pro numerické modelování byly experimentálně zjištěny krychelná pevnost a modul pružnosti za referenční teploty (cca 20 °C) a dále při zvýšených teplotách 200, 400 a 600 °C. Teplota byla vyvozována automaticky v elektrické peci s rychlostí zatěžování 1 °C/min. Na dané teplotě byla pec temperována po dobu 1 h. Chladnutí pece nebylo řízeno. Vychladlé vzorky byly dále zkoušeny kvůli stanovení jednotlivých materiálových parametrů – ty jsou patrné z grafu na **Obr. 1**.

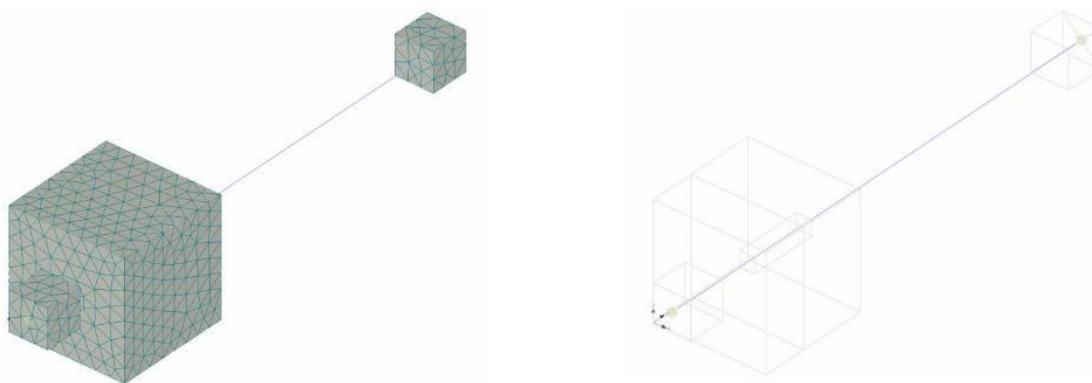


Obr. 1 Porovnání modelů soudržnosti UHPC s ocelí generovaných programem Atena na základě krychelné pevnosti

Pomocí zjištěné krychelné pevnosti za dané teploty byly pak pomocí programu Atena vygenerovány další materiálové vlastnosti potřebné pro numerickou analýzu (válcová pevnost v tlaku, pevnost v tahu). Moduly pružnosti vygenerované programem Atena byly následně upraveny na základě experimentálního měření modulu pružnosti na skutečných vzorcích za vyšších teplot.

3 Numerické modelování

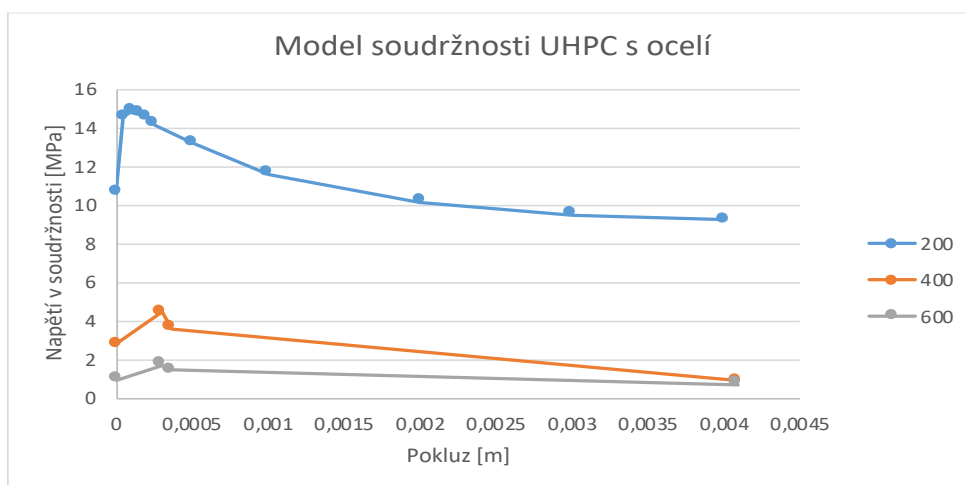
Numerický model uspořádání zkoušky soudržnosti na vytažení byl vytvořen a počítán v softwaru Atena 3D Engineering (**Obr. 3** a **Obr. 4**). Zkušební krychle z UHPC byla modelována jako dva standardní makroprvky – jeden o délce hrany 60 mm, v němž byla výztuž zakotvena, a druhý o délce hrany 90 mm s otvorem pro výztuž pro simulaci separace ocelového prutu (předpínacího lana). Zabetonované ocelové lano bylo modelováno jako prvek s označením Prutová výztuž s parametry shodnými se zkouškou v laboratoři. Mimo tyto prvky byly vymodelovány ještě pomocné makroprvky, a to krychličky na volných koncích ocelového prutu. Na tyto pomocné makroprvky bylo aplikováno zatížení posunem a monitory ke sledování posunu a působící síly, poněvadž program Atena neumožňuje aplikovat monitory a zatížení do koncového bodu položky Prutová výztuž. Schémata z programu Atena jsou zobrazeny na **Obr. 2**.



Obr. 2 Numerický model testu soudržnosti – vlevo plný model se sítí konečných prvků; vpravo drátový model

Jako materiál zkušební krychle byl z knihovny programu Atena vybrán materiálový model 3D Nonlinear Cementitious 2. S jeho pomocí byly vygenerovány materiálové vlastnosti na základě experimentálně zjištěné krychelné pevnosti UHPC po ohřevu na příslušnou teplotu a ochlazení. Experimentálně zjištěné moduly pružnosti UHPC byly do vygenerovaných materiálových modelů dodatečně doplněny.

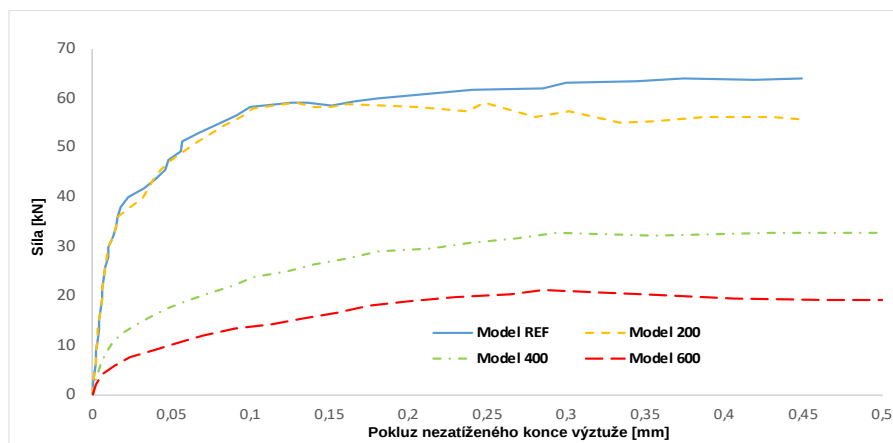
Jako materiál výztužného prutu byla zvolena položka s názvem Výztuž se středními hodnotami bilineárního pracovního diagramu v tahu. Soudržnost výztužného ocelového prutu byla modelována materiálovou položkou s názvem Soudržnost výztuže, jejíž parametry byly vygenerovány programem na základě profilu prutu, experimentálně zjištěné krychelné pevnosti UHPC v tlaku a odborně odhadnuté kvality soudržnosti (program nabízí možnosti: výborná, dobrá nebo špatná). Pomocné krychličky byly modelovány z materiálu Bilinear Steel von Mises. Model soudržnosti je kvantifikován na grafu na **Obr. 3**.



Obr. 3 Porovnání modelů soudržnosti UHPC s ocelí generovaných programem Atena na základě krychelné pevnosti

Jako zatížení byl aplikován posun na jednom volném konci výztužného prutu (na pomocný makroprvek), a to v hodnotě 0,1 mm v každém kroku. Současně byl osazeným monitorem na opačném konci měřen posun tohoto konce výztužného prutu (podobně jako v experimentu). Dalším osazeným monitorem byla dopočítávána síla, která působící posun

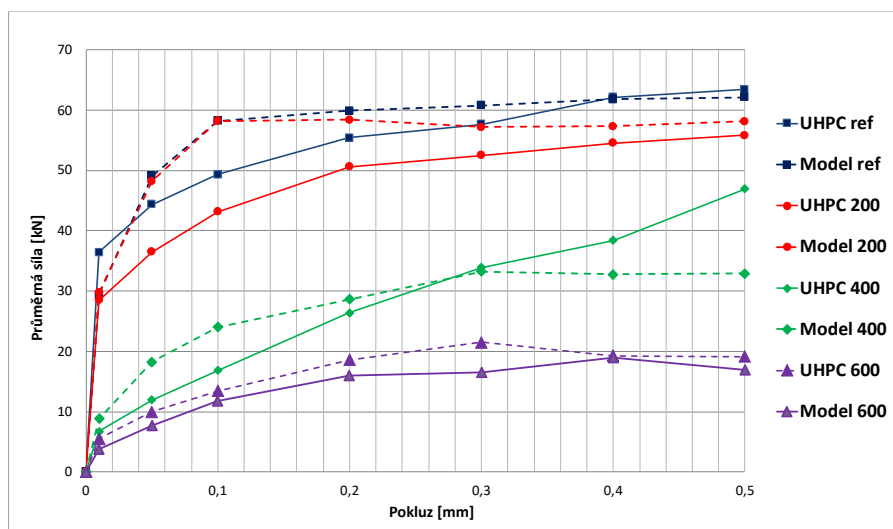
vyvolává, a tak byl vytvářen L-D diagram pro srovnání chování krychlí vystavených extrémním teplotám a krychle za referenční teploty (**Obr. 4**). Jednotlivé makroprvky byly nasítovány lineárními „tetrahedra“ konečnými prvky o velikosti hrany 10 mm.



Obr. 4 Průběhy testů vytahování při určitých teplotách UHPC z numerické analýzy

4 Výsledky

Pro jednotlivá teplotní namáhání byla provedena řada výpočtů, které byly kalibrovány z hlediska materiálových vlastností a okrajových podmínek. Pro jednotlivé teploty jsou zde prezentovány grafy závislosti síly na prokluzu. Z numerické analýzy vyplývá, že při ohřátí UHPC na teplotu do 200 °C nedojde v soudržnosti s ocelovou výztuží téměř k žádné změně. Výrazné změny v soudržnosti UHPC s výztužnou ocelí se projeví při ohřátí betonu na 400 a 600 °C, kdy se sníží jak krychelná pevnost v tlaku, tak statický modul pružnosti. Tyto skutečnosti se výrazně projeví na průběhu vytahovacího testu. Výsledné průběhy testů vytahování ocelového prutu ze zkušební krychle z UHPC při referenční teplotě (cca 20 °C) a při teplotách 200, 400 a 600 °C a porovnání výsledků numerických modelů a výsledků experimentálního měření znázorňují grafy na **Obr. 5**.



Obr. 5 Porovnání výsledků numerického modelu a experimentu pro referenční vzorek a pro vzorky ohřáté na 200 – 600 °C

5 Závěr

Z numerické analýzy testu vytahování ocelového prutu z krychle z UHPC vyplývá, že soudržnost UHPC s ocelovým prutem je téměř totožná při referenční teplotě 20 °C a při zvýšené teplotě do 200 °C. Teprve při ohřátí na 400 a 600 °C se model soudržnosti změkčuje v závislosti na zvyšující se teplotě. Snížení soudržnosti koreluje se snížením materiálových parametrů matrice UHPC.

Z porovnání výsledků numerické analýzy a výsledků experimentu je zřejmá shoda numerického modelování a experimentálního chování všech vzorků ohřátých na příslušné teploty. Na základě numerických modelů soudržnosti UHPC s ocelí použitých v numerické analýze lze říci, že po vystavení UHPC teplotě do 200 °C se materiálové vlastnosti a soudržnost UHPC s ocelí prakticky nezmění. Snížení hodnot materiálových vlastností a únosnosti v soudržnosti UHPC s ocelí se projeví až při ohřátí UHPC na teploty cca 400 °C, 600 °C a vyšší. Zatímco při zahřátí UHPC na teplotu 400 °C a následném ochlazení se krychelná pevnost sníží o cca 10 % hodnot ve srovnání s pevností krychlí při referenční teplotě a teplotě 200 °C, modul pružnosti se sníží o více než 50 %. Vzorek UHPC zahřátý na 600 °C a následně ochlazený vykázal pokles krychelné pevnosti 30 až 35 %, ale pokles hodnoty modulu pružnosti až cca 70 %. Poklesy hodnot soudržnosti UHPC s ocelí vykazují podobnost spíše s modulem pružnosti, kdy mezi hodnotami soudržnosti pro teplotu 200 °C a teplotu 400 °C je pokles 70 až 90 %. Pro teplotu 600 °C je pak pokles hodnot soudržnosti 90 až 95 %. Největší pokles smykového napětí v soudržnosti tedy nastane mezi teplotami 200 °C a 400 °C, při teplotě vyšší než 400 °C je další pokles hodnot v závislosti na zvyšující se teplotě již mírnější.

Lze tedy konstatovat, že chování UHPC v soudržnosti s ocelí za běžných teplot lze pro analýzu konstrukce uvažovat až do zahřátí či vystavení konstrukce teplotám do 200 °C. Pro konstrukce z UHPC vyztuženého předpínací výztuží vystavené teplotám vyšším než 200 °C se musí pokles hodnot soudržnosti zahrnout do statického návrhu či tato skutečnost řešit dalšími opatřeními.

Tyto dílčí výsledky jsou podkladem pro náročnější simulace konstrukčních prvků a konstrukcí namáhaných zvýšenou teplotou, u kterých je experimentální zkouška komplikovaná či nemožná.

V článku byly popsány výsledky výzkumného projektu GAČR 17-22796S. Zkoušky byly provedeny v laboratořích Kloknerova ústavu ČVUT v Praze.

Literatura

- [1] ČÍTEK, D., KOLÍSKO, J., POKORNÝ, P. Teplotní namáhání UHPC – vliv na soudržnost předpínací výztuže. *Beton TKS*. 2019, roč. 19, č. 6, s. 60–61. ISSN 1213-3116.
- [2] POKORNÝ, P. Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem. *Koroze a ochrana materiálu*. 2012, 56(4), s. 119–135.
- [3] ČÍTEK, D., HUŇKA, P., ŘEHÁČEK, S., KOLÍSKO, J. Investigation of Bond Behaviour of UHPC. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, Vol. 617, pp. 225–228. Trans Tech Publications, Switzerland, 2014.

- [4] ČÍTEK, D., KOLÍSKO, J., VÍTEK, J. L., HUŇKA, P. Vliv kotevní délky na soudržnost předpínací výztuže a UHPC. In: *Sborník 12. konference Technologie betonu, Jihlava*. ČBS, 2014. ISBN 978-80-903806-4-6.
- [5] PHAN, L. T. *High-Strength concrete at high temperature – an overview* [online]. Dostupné z: fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02171.pdf
- [6] ABRAMS, M. S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1 600 °F. *ACI Special Publication*. Vol. 25. Temperature and Concrete. Detroit, Michigan, 1971.
- [7] Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures – modelling and applications, Part 1: Introduction – General presentation. *Materials and Structures*. 2007, Vol. 40, Issue 5, pp. 449–458. DOI 10.1617/s11527-007-9285-2
- [8] SCHNEIDER, U., SCHWESINGER, P. (eds) *Mechanical testing of concrete at high temperatures. RILEM Transaction 1*. February 1990, p. 72. ISBN 3-88122-565-X.
- [9] SCHNEIDER, U. *Properties of materials at high temperatures – Concretes. RILEM-Report 44-PHT*. 2nd ed. Kassel, June 1986.

Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
☎ +420 603 214 926
😊 jiri.kolisko@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

Ing. David Čítek

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
☎ +420 224 353 521
😊 david.citek@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

Ing. Jindřich Čech, Ph.D.

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
☎ +420 224 353 519
😊 jindrich.cech@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

Ing. Adam Čítek

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
☎ +420 224 353 550
😊 adam.citek@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

Ing. Martin Kryštov

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
☎ +420 224 353 550
😊 martin.krystov@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

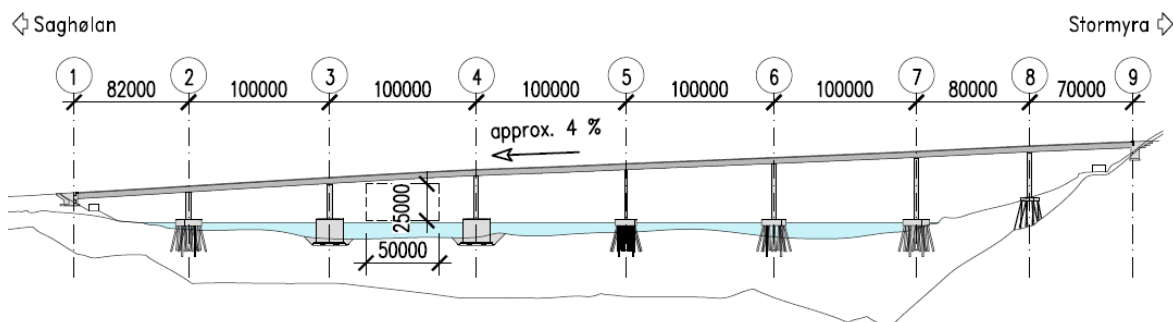
1.4 SEKCE: BETON V PRAXI

BETONÁŽE ZÁKLADOVÝCH KONSTRUKCÍ V MOŘI MOST PŘES ÅSTFJORD NA SILNICI FV. 714 V NORSKU

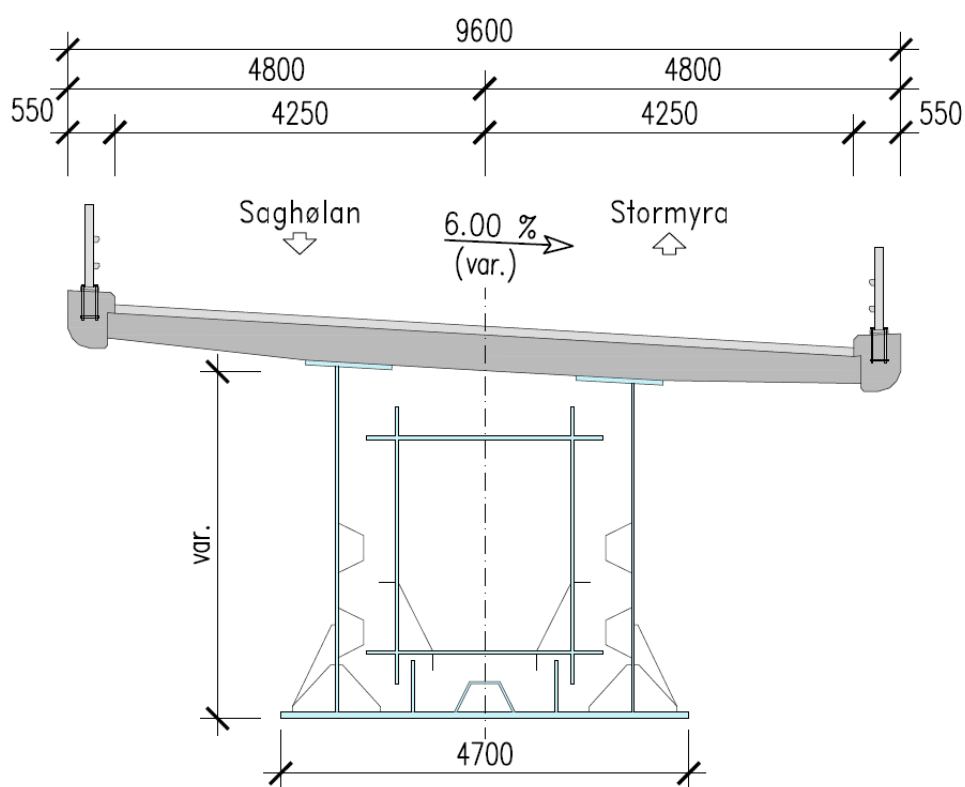
Robert Brož, Petr Koukolík, Matěj Novotný, Jiří Lukeš, Vít Kavka, Dominik Hanus, Marek Klíma, Jakub Beneš

1 Úvod

Most Åstfjorbrua je 735 m dlouhý a je tvořen spojitým nosníkem o osmi polích s rozpětími $82 + 5 \times 100 + 80 + 70$ m a podélným sklonem cca 4 až 6 % (**Obr. 1**). Šířka mostu je 9,6 až 11,1 m s proměnným příčným sklonem maximálně 7 % v souladu se směrovým řešením převáděné komunikace Fv. 714 Stokkhaugen–Sundan. Nosná konstrukce je tvořena ocelovým komorovým nosníkem s železobetonovou deskou, která je uložena na železobetonových pilířích a opěrách pomocí hrncových ložisek (**Obr. 2**). Mostní konstrukce překlenuje fjord, který je otevřený ze západní strany do Norského moře, a rozdíl mezi hladinou odlivu a přílivu je v daném místě cca 3,2 m. V průběhu realizace bylo nutné překonávat drsné klimatické podmínky běžné v tomto pásmu, rychlost větru dosahovala až 120 km/h.



Obr. 1 Podélný řez mostu



Obr. 2 Příčný řez mostu

2 Založení mostu

Vzhledem k proměnlivosti podloží je mostní konstrukce založena plošně a různými typy hlubinných základů. Opěra 1 je založena na násypu vybudovaném z vytěženého materiálu získaného při ražbě nedalekého tunelu Slørdal. Zde před zahájením budování opěry probíhalo měření sedání podloží pod násypem a vodorovných pohybů celého násypu. Opěra 9 (Obr. 3) byla založena na kvalitním skalním žulovém podkladu ve skalním masivu.



Obr. 3 Opěra 9 ve skalním masivu

Pilíře v ose 2, 5, 6 a 7 jsou založeny na ocelových beraněných pilotách Ø 914 mm s tloušťkou stěny 20 mm následně vyplňovaných betonem B45 SV-Standard (podle českých standardů odpovídá betonu C45/55 XC4 XD3 XS3 XF4 XA3 XA4) s betonářskou výztuží B500 NC s jmenovitým krytím 75 mm [4]. Pilíř v ose 8 je založen na pilotách s ocelovým jádrem (Ø 230 mm, ocel S355J2+AR). Ocelové piloty (kvalita S355J2H) byly opatřeny ocelovým hrotem, který byl zatěsněn expanzní ucpávkou (**Obr. 4**). Celková délka zaberaněných pilot byla 1621 m (nejdelší dl.47 m), 14ks pilot /základ.



Obr. 4 Ocelová pilota s ocelovým hrotem

Po dokončení ocelových pilot byla zhotovena podkladní ŽB deska, která byla spřažena s ocelovými pilotami pomocí ocelových objímek. V ose 2 a 7 byl základ budován na násypu (**Obr. 5**), v ose 5 a 6 na ocelovém roštu se ztraceným bedněním (**Obr. 6**), pomocí potápěčů (**Obr. 7**, **Obr. 8**).



Obr. 5 Podkladní deska osa 2,7



Obr. 6 Podkladní deska osa 5,6

**Obr. 7** Ocelový rošt osa 5,6**Obr. 8** Ocelový rošt osa 5,6

Následně byla vybudována suchá jímka pomocí prefabrikátů (**Obr. 9**), které byly spřaženy s podkladní ŽB deskou a spáry mezi jednotlivými prefabrikáty zatěsněny betonovou zálivkou. Suchá jímka zajišťovala ochranu pracovního prostoru před proměnnou hladinou moře, kdy rozdíl mezi přílivem a odlivem (2x denně) dosahoval až 3,2m.

**Obr. 9** Osazení prefabrikátů – suchá jímka

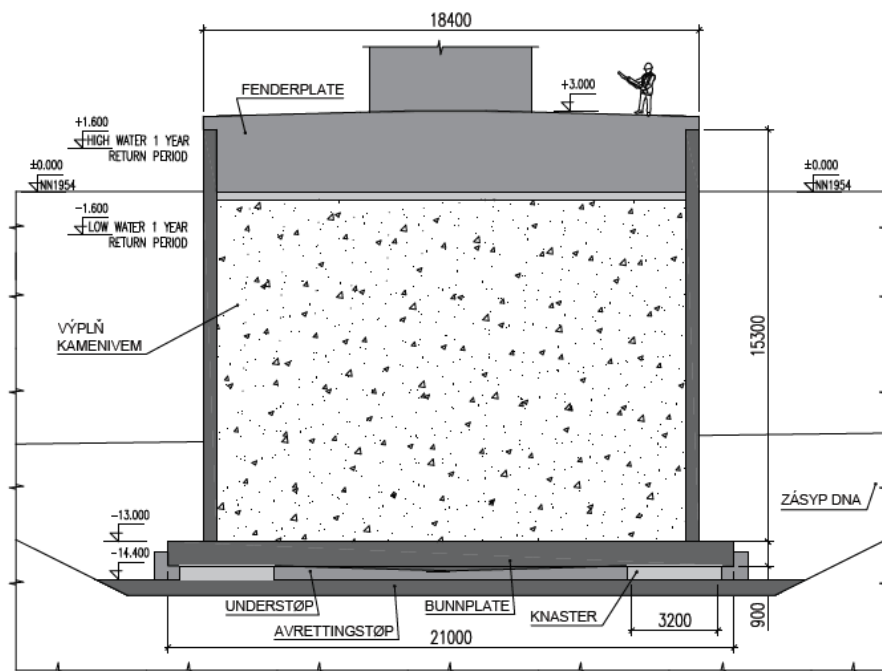
Po dokončení suché jímky bylo třeba vyčerpat vodu z ocelových pilot, osadit armokoše z betonářské výztuže B500 NC a zabetonovat piloty z betonu B45 SV-Standard (C45/55 – XC4, XD3, XS3, XF4, XA3, XA4) s jmenovitým krytím 75 mm (**Obr. 10**, **Obr. 11**). Betonáž probíhala do zcela vysušené ocelové piloty při zajištění elektrického odizolování armokoše a pláště piloty.

**Obr. 10** Osazení armokoše**Obr. 11** Zabetonovaná pilota v suché jímce

Následovala realizace základového bloku do suché jímky, proarmování betonářskou výztuží B500 NC s armaturou pilot (**Obr. 12**, **Obr. 13**) a následně betonáže z betonu B45 SV-Standard (C45/55 – XC4, XD3, XS3, XF4, XA3, XA4) s jmenovitým krytím 120 mm (**Obr. 14**).

**Obr. 12** Armatura základu**Obr. 13** Armatura základu**Obr. 14** Betonáž základu

Nejnáročnější bylo založení pilířů v ose 3 a 4 na železobetonových studních. Každá studna o hmotnosti cca 2 200 t, vnějším průměru 18,4 m, s podstavou průměru 21 m a stěnou tloušťky 0,5 m musela být postavena, zaplavena a potopena do hloubky cca 14 m (**Obr. 15**). Parametry studní a lokalita stavby určily volbu výstavby na pontonu v těsné blízkosti finální pozice studní s následným zaplavením do projektované polohy.



Obr. 15 Optimalizovaný tvar studní

Zahájení realizace studní spočívalo v hloubení výkopů na dně moře (**Obr. 16**). Dno výkopu bylo před zhotovením podkladních betonů vyrovnáno pomocí šterku. Na podkladním betonu byly zhotoveny železobetonové knasty (terče) průměru 3,2 m, a to vždy tři kusy pod každou studní. Pro realizaci podvodních betonáží byl použit beton AUV B35 M40 (podle českých standardů odpovídá betonu C35/45 XC4 XD3 XS3 XA3 XA4), který byl dopravován čerpadlem a potrubím umístěným na lodi na dno moře, kde potápěči vybetonovali konstrukce v souladu s projektem (**Obr. 17**).



Obr. 16 Hloubení výkopů na dně moře



Obr. 17 Podvodní betonáž

S částečným překryvem probíhala realizace vlastních konstrukcí studní na palubě pontonu Boa Barge 33. Nejdříve byla vybetonována dna studní tloušťky 900 až 1 100 mm, která byla přizpůsobena budoucímu uložení na knasty a podkladní beton tloušťky 0,6 m na dně moře. Následně byly vybetonovány stěny studní technologií taženého bednění společnosti Interform. Pro železobetonové konstrukce studní byl použit beton B45 SV-Standard (podle českých standardů odpovídá betonu C45/55 XC4 XD3 XS3 XF4 XA3 XA4), betonářská výztuž B500 NC s jmenovitým krytím 120 mm a v případě stěn z důvodu technologie taženého bednění s krytím 130 mm. Při zhotovování železobetonové konstrukce studní musela být řádně provedena betonářská výztuž jako součást katodické ochrany, řádně ošetřeny pracovní spáry včetně použití epoxidové injektáže, do konstrukce vložena řada ocelových prvků pro následné dokončení hlavice, podbetonovány studně a provedena nezávislá kontrola investora. Katodická ochrana je tvořena obětními anodami umístěnými uvnitř a na vnějším povrchu studní. Současně je v obou studnách osazen systém nedestruktivní diagnostiky, který umožňuje sledovat správci funkčnost katodické ochrany, postup koroze betonářské výztuže a umožní případná další opatření pro zajištění životnosti 100 let. (**Obr. 18, Obr. 19**).



Obr. 18 Realizace studní na pontonu



Obr. 19 Dokončení studní na pontonu

K potopení pontonu a zaplavení studní došlo v blízkosti staveniště v místě hloubky fjordu 50 m (**Obr. 20**). Studny začaly plavat dle předpokladů v hloubce cca 7 m a následně byly přesunuty do definitivní pozice (**Obr. 21**), zaplaveny a během dvou dnů potopeny pomocí plnění studní vodou.



Obr. 20 Potopení pontonu



Obr. 21 Přesun studně do definitivní pozice

Po osazení studní na předpřipravené knasty s přesností do 50 mm (**Obr. 22**) byly studny podbetonovány a následně vyplněny štěrkem a vrstvou podkladního betonu tl.300 mm. Kvalita podbetonování byly ověřena pomocí jádrového vrtání. Následně byly realizovány železobetonové hlavice s vytrnováním pro pilře.



Obr. 22 Osazení studně na knastr



Obr. 23 Podkladní beton



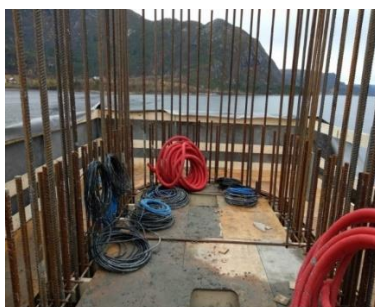
Obr. 24 Betonáž hlavice studně (základ)

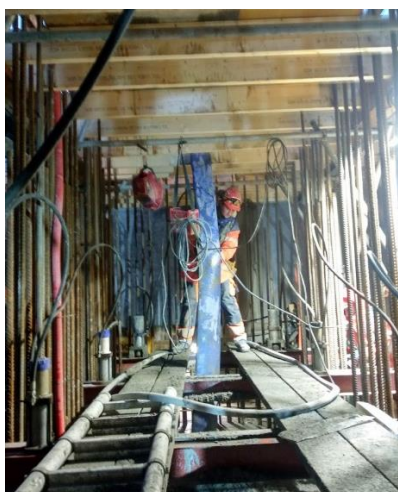
3 Spodní stavba

Spodní stavba je tvořena železobetonovými pilíři proudnicového tvaru šířky 6 m a tloušťky 1,6 m (v ose 2, 5, 6 a 7), 2 m (v ose 8) a 2,6 m (v ose 3 a 4). Nejvyšší pilíř v ose 7 dosahuje výšky 40 m (**Obr. 25**, **Obr. 26**) Pro výstavbu pilířů byla také použita technologie taženého bednění, která probíhala ve třech výškových úrovních 1) plošina pro montáž armatury; 2) plošina pro obsluhu bednění, betonáž a montáž smykové výztuže; 3) sanační lávka s prostorem pro montáž tepelné izolace (**Obr. 27**, **Obr. 28**, **Obr. 29**).

**Obr. 25** Betonáž pilířů-tažené bednění**Obr. 26** Betonáž pilířů-tažené bednění

Krajní opěry byly realizovány pomocí systémového bednění DOKA. Kompletní spodní stavba v dosahu moře byla zhotovena z betonu B45 SV-Standard (podle českých standardů odpovídá betonu C45/55 XC4 XD3 XS3 XF4 XA3 XA4), betonářské výztuže B500 NC s krytím 120 mm (130 mm v případě taženého bednění) – (**Obr. 30**)

**Obr. 27** Plošina-úroveň 1)

**Obr. 28** Plošina-úroveň 2)**Obr. 29** Plošina-úroveň 3)**Obr. 30** Opěra O9 a pilíře

4 Nosná konstrukce

Výroba ocelového komorového nosníku o celkové hmotnosti 2 600 t a délce cca 735 m probíhala ve výrobních prostorách společnosti AKER Solutions v Egersundu. Konstrukce byla rozdělena do osmi montážních sekcí (BR1 až BR8), a to se zohledněním dispozice spodní stavby a kapacity zvedacích mechanismů. Délka nejdelší sekce BR4 byla 138 m

s tonáží sekce 620 t. Montáž sekce BR1 až BR6 probíhala lodním jeřábem HLV Uglen. Pro montáž sekce BR7 a BR8 byl použit pásový jeřáb CC3800-1 (**Obr. 31, Obr. 32**).



Obr. 31 Montáž ocelové konstrukce



Obr. 32 Osazená ocelové konstrukce

Po dokončení ocelové konstrukce včetně podlití ložisek bylo přistoupeno k realizaci spřažené desky. Betonáž desky probíhá ze dvou směrů od krajních opěr mostu pomocí horních bednicích vozíků Doka (**Obr. 33**) a ztraceného bednění Permadeck, namontovaného již ve výrobně ocelové konstrukce. Standardní betonážní krok měl délku cca 25 m a byl realizován v cca 10-ti až 14-ti denním cyklu v závislosti na klimatických podmínkách.



Obr. 33 Betonářské vozíky DOKA pro betonáž mostovky

Realizace říms probíhala po betonáži mostovky, postup betonáží byl ze dvou směrů od krajních opěr mostu pomocí dvou párů římsových bednicích vozíků Doka (**Obr. 34**).

Kompletní železobetonová nosná konstrukce je zhotovena z betonu B45 SV-Standard (podle českých standardů odpovídá betonu C45/55 XC4 XD3 XS3 XF4 XA3 XA4), betonářské výztuže B500 NC.

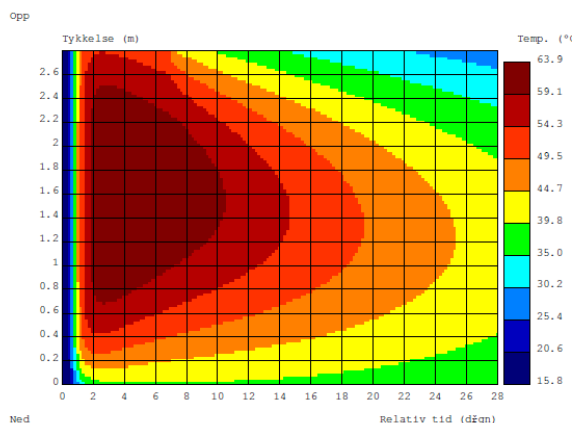


Obr. 34 Betonářský vozík DOKA pro betonáž říms

5 Zkušebnictví

Zodpovědností realizačního týmu je i vedení staveništní laboratoře (**Obr. 37, Obr. 38, Obr. 39**) a veškeré numerické simulace a teoretické modelace tvrdnutí betonu a vývoje hydratačního tepla pro návrh opatření pro omezení vzniku trhlin (**Obr. 35**). Numerické simulace a teoretické modelace byly následně prověřovány měřením teplot na osazených teplotních čidlech v každé ŽB konstrukci (**Obr. 36**).

Fargekart - Temperatur - Hele resultatmengden



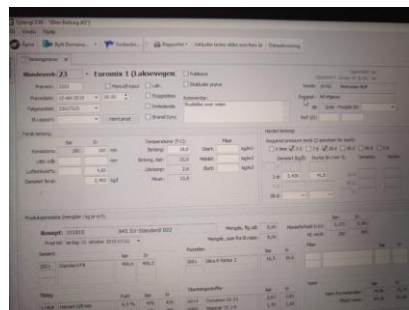
Obr. 35 Numerická simulace vývoje hydratačního tepla



Obr. 36 Osazení čidel pro měření teplot



Obr. 37 Krychelná zkouška pevnosti



Obr. 38 Výstupní protokol



Obr. 39 Měření teplot v konstrukci

6 Logistika

Pro zdárný průběh výstavby a splnění milníků, bylo třeba optimalizovat výstavbu a vyřešit logistiku zásobování a výstavby. Pro eliminaci prací na moři, byly zhotoveny násypy podél poloostrova pro obslužní komunikaci s menšími výběžky pro osazení jeřábu a betonpumpy tak, aby byly konstrukce v ose 2,4,5,6,7 v dosahu těchto zařízení. Pro výstavbu zejména osy 3, bylo nutno pronajmout ponton, z kterého byla osa 3 zásobena (Obr. 40, Obr. 41).



Obr. 40 Obslužnost staveniště



Obr. 41 Obslužnost staveniště

Jednou z největších výzev jsou klimatické podmínky. Velkým nepřítelem je vítr, který v této oblasti středozápadního Norska bývá velkou část v roce a nabývá intenzity až 120 km/hod (**Obr. 42**). Další výzvou zejména při budování založení a spodní stavby byl příliv a odliv moře, který měl periodu 2x/24 hod a rozdíl hladiny je až 3,2m (**Obr. 43**). Teploty (zejména pocitově s kombinací s větrem) jsou v létě do 20°C a v zimě do -15° C. Další nepříjemností pro některé lidi je v zimě téměř neustálá tma (cca 5hod denního světla) a v létě naopak neustálé světlo.



8 Závěr

Výstavba mostu Åstfjorbrua byla zahájena v lednu 2018 a termín zprovoznění byl dle smlouvy v listopadu 2020. Metrostav ukončil své práce, i přes pozastavení prací z důvodu probíhající pandemie Covid 19, v červnu 2020. Metrostav tímto projektem navazuje na několikaletou sérii projektů v severských zemích, která se však dosud omezovala pouze na podzemní stavby. Stavba mostu přes Åstfjord přináší mnohé nové a náročné překážky, se kterými se realizačnímu týmu daří vypořádat a pomáhá tak šířit dobré jméno českého stavebnictví.

Literatura

- [1] Wangler, T., *Předběžné výpočty montážních stavů studní*. Praha, 2017.
- [2] Hauge, S., K., *Realizační výpočty montážních stavů studní*. Bergen, 2018.
- [3] Kučera, B., Jeku s.r.o., *Katodická ochrana studní*. Praha, 2018.
- [4] *Realizační dokumentace provizorních konstrukcí pilotového založení*. Brno: SHP, s. r. o., a FEVIA, s. r. o., 2018.

Ing. Robert Brož, Ph.D.

✉ Metrostav a.s.
 Koželužská 2450/4, 180 00 Praha 8
 Czech Republic
 ☎ +420 606 791 204
 ☺ robert.broz@metrostav.cz
 URL www.metrostav.cz

Ing. Petr Koukolík

✉ Metrostav a.s.
 Koželužská 2450/4, 180 00 Praha 8
 Czech Republic
 ☎ +420 606 703 050
 ☺ petr.koukolik@metrostav.cz
 URL www.metrostav.cz

Ing. Matěj Novotný

✉ Metrostav a.s.
 Koželužská 2450/4, 180 00 Praha 8
 Czech Republic
 ☎ +420 601 130 089
 ☺ matej.novotny@metrostav.cz
 URL www.metrostav.cz

Ing. Jiří Lukeš

✉ Metrostav a.s., Divize 5
 Koželužská 2450/4, 180 00 Praha 8
 Czech Republic
 ☎ +420 602 664 891
 ☺ jiri.lukes@metrostav.cz
 URL www.metrostav.cz

Vít Kavka

✉ Metrostav a.s., Divize 5
 Koželužská 2450/4, 180 00 Praha 8
 Czech Republic
 ☎ +420 602 766 249
 ☺ vit.kavka@metrostav.cz
 URL www.metrostav.cz

Ing. Dominik Hanus

✉ Metrostav a.s., Divize 5
 Koželužská 2450/4, 180 00 Praha 8
 Czech Republic
 ☎ +420 605 803 734
 ☺ dominik.hanus@metrostav.cz
 URL www.metrostav.cz

Ing. Marek Klíma

✉ Metrostav a.s., Divize 5
 Koželužská 2450/4, 180 00 Praha 8
 Czech Republic
 ☎ +420 702 024 929
 ☺ marek.klima@metrostav.cz
 URL www.metrostav.cz

Jakub Beneš

✉ Metrostav a.s., Divize 5
 Koželužská 2450/4, 180 00 Praha 8
 Czech Republic
 ☎ +420 605 803 734
 ☺ jakub.benes@metrostav.cz
 URL www.metrostav.cz

VYUŽITÍ UHPC A ADITIVNÍ ROBOTICKÉ FABRIKACE VE STAVEBNICTVÍ

Jiří Kolísko, Federico Díaz, David Čítek, Karel Hurtig, Martin Kroc

1 Úvod

Využití průmyslových robotů se do nedávné doby omezovalo především na aplikace v strojírenském a zpracovatelském průmyslu. S postupující vlnou automatizace a rozšířením principů Průmyslu 4.0 se robotizace dostává i do oblastí, kde její uplatnění nebylo doposud běžné nebo účelné. Jedním z takových oborů je stavebnictví. Přesnost a rychlost strojové výroby a postupující technologický vývoj robotických manipulátorů umožňují nové využití těchto nástrojů v odvětvích vyžadujících přesnou práci ve větších měřítkách (stavební prvky, ale i celé stavby). Mezi výhody využití těchto technologií ve stavebnictví patří potenciálně výrazně vyšší rychlost výstavby, úspora materiálu a fyzicky a ekonomicky náročné lidské práce. Další nezanedbatelnou výhodou je možnost vytvářet tvarově téměř neomezené objekty nebo jejich části.

Dosud se využití automatizovaných technologií při realizaci staveb omezovalo především na subtraktivní metody (kdy dochází k odebrání materiálu, dokud není docíleno výsledného tvaru výrobku), jako jsou CNC frézování, laserové, plazmové řezání a řezání vodním paprskem, soustružení apod. Rozvojem technologií aditivní fabrikace a postupným zvětšováním výrobků vytvářených touto technologií se stala její aplikace ve stavebnictví nejen možnou, ale často i velmi účelnou.

Vzhledem k posunu těžiště práce s automatizovanými systémy od tradičního navrhování a fyzických úkonů k programování pohybových drah, začíná se profese stavebního inženýra v těchto oblastech stavebnictví překrývat s profesí programátora robotických systémů. V závislosti na zvoleném technologickém řešení (šestiosé rameno či tříosý systém, odlišní výrobci apod.) se liší také způsoby návrhů pohybových drah, programovací jazyky atd. Relativní mládí oblasti aditivní robotické fabrikace v těchto měřítkách s sebou nese také problém s neexistencí stabilních profesionálních řešení pro programování těchto činností. Důležitou roli v procesu proto hraje vývoj vlastních softwarových řešení pro generování pohybových drah, ovládání hardwarových periférií, optimalizace geometrií apod.

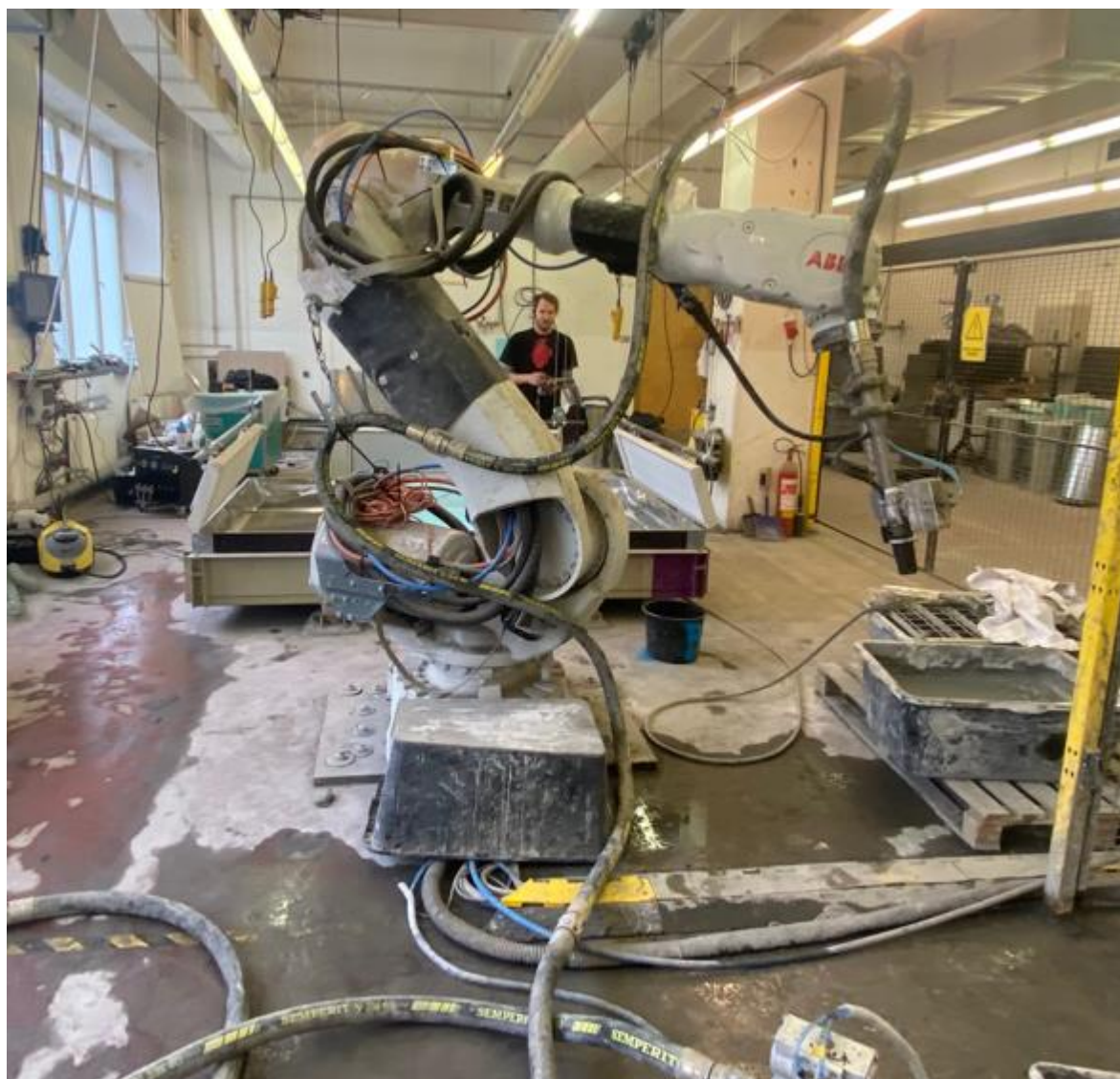
2 Aditivní fabrikace

Zásadní součástí technologie aditivní fabrikace, při které dochází k extruzi (vytlačování) materiálu tryskou a postupnému vrstvení tohoto materiálu do požadovaného tvaru, je extrudovací nástroj (extrudér). V závislosti na vytlačovaném materiálu obsahuje tento nástroj nejrůznější komponenty. Pro extruzi termoplastů je zásadní součástí extrudérů tavící element. U dvou a vícesložkových materiálů, u nichž je potřeba přísady v extrudéru promíchat k aktivaci složek, musí extrudér obsahovat řízené dávkovací mechanismy (poháněné pneumaticky či elektricky). Dále je většinou součástí extrudéru tzv. aktuátor, tedy ventil, jehož spínání se dá řídit vzdáleně a který umožňuje řídit průtok materiálu extrudérem.

Extrudéry mohou být dále opatřeny soustavou senzorů pro zjišťování parametrů materiálu (teplotní senzory, senzory průtoků či senzory bublin), senzory spínání ventilů, bezpečnostními obvody apod. Velmi důležitou součástí extrudérů je tryska, ze které je materiál vytlačován. Určuje rozměry a tvar, který dostává materiál při extruzi. Její vnitřní geometrie musí upravovat tvar průřezu vytlačovaného materiálu bez negativního ovlivnění průtoků (tzn. musí její vnitřní tvar být navržen v souladu s principy CFD - Computational Fluid Dynamics). Dále může být extrudér opatřen vyhlazovacími nástroji pro eliminaci “vrstvené” struktury povrchů vyráběného objektu. Tyto nástroje mohou být také motorizované a řízené v závislosti na trajektorii pohybů extrudéru. Extrudér pro výrobu velkoformátových objektů bývá osazen na robotickém 6-osém rameni či 3-osém systému, umožňujícím pohyb v osách X, Y, Z. Výhodou 6-osých řešení je možnost variabilně extrudér natáčet ve všech směrech a tedy vytvářet komplexnější geometrie pomocí bohatšího repertoáru pohybů a principu extruze. Výhodou 3-osých systémů je možnost tisknout v teorii rozměrově rozsáhlejší prvky.



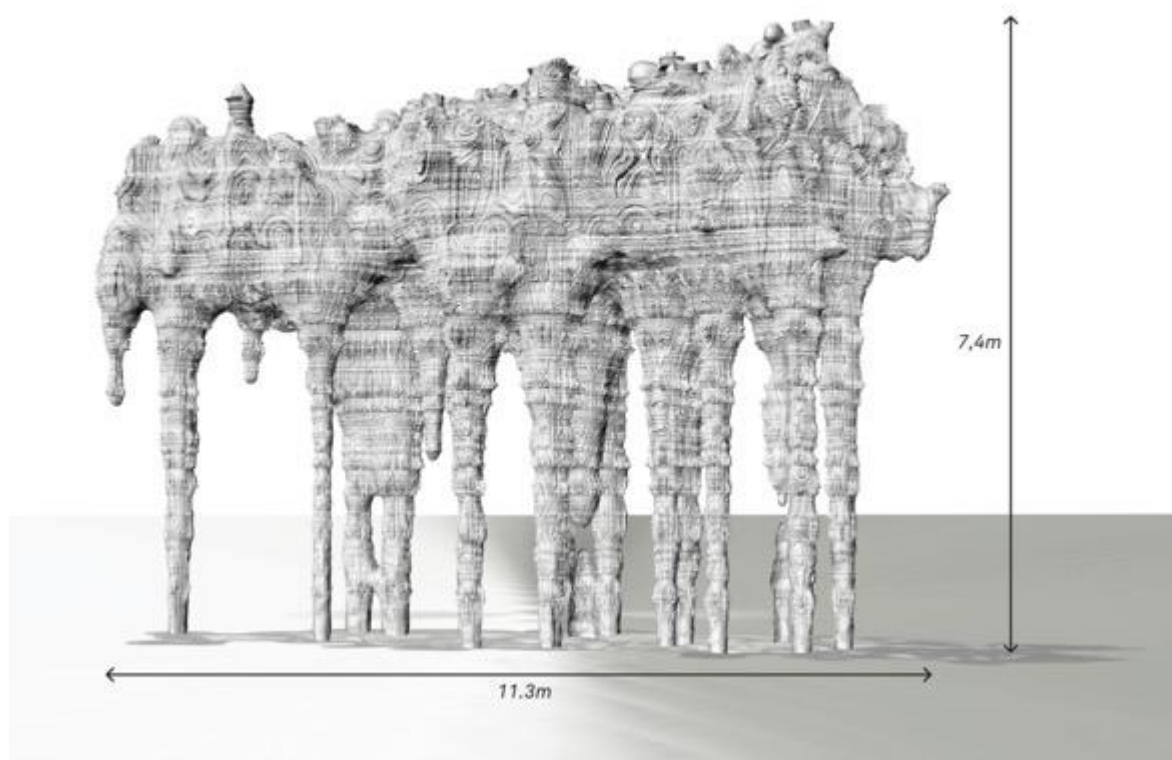
Obr. 1 Extrudér



Obr. 2 Šestiosý systém robotické fabrikace ve Studiu Federico Díaz

3 Využití aditivní robotické fabrikace UHPC k vytvoření sochy

S myšlenkou využití robotické aditivní fabrikace a vysokohodnotného materiálu UHPC k vytvoření sochy pro projekt Bořislavka investovaného společností KKCG, přišel za pracovníky KÚ umělec a architekt Federico Díaz v roce 2019. O parametrech a vlastnostech UHPC bylo již publikováno řada článků (viz Literatura). Zde tedy nebudou vlastnosti UHPC blíže rozebírány a popisovány. Tento zcela nový směr UHPC okamžitě všechny zaujal a nadchnul a krok po kroku je tento záměr naplňován. Tvar unikátní sochy je patrný na **Obr. 3**. Je jasné, že vytvoření tohoto artefaktu velikosti cca 11×7,5×5 m aditivní robotickou fabrikací UHPC zahrnuje velkou škálu problémů a k jejich popisu nestačí prostor konferenčního článku.



Obr. 3 Vizualizace hlavní sochy, která má být vytvořena ve venkovním prostoru mezi objekty projektu Bořislavka – investor KKCG. Ze sochy kape voda, která je zachycována v rezervoáru, rovněž vytvořeném aditivní robotickou fabrikací UHPC

4 Realizace sochy

Přípravné práce na realizaci sochy probíhaly od roku 2019. Samotná realizace začala ve Studiu Federico Díaz (SFD) na podzim roku 2020. SFD vyvinulo se spolupracovníky linku pro aditivní robotickou fabrikaci, která realizuje jednotlivé části sochy. Z **Obr. 3** je zřejmé, že v rámci realizace metodou aditivní robotické fabrikace materiálu UHPC je nutno čelit široké škále komplikovaných problémů, které až doposud nebyly řešeny. SFD spolu s KÚ modifikovali UHPC a oblasti, kterými bylo nutné se zabývat jsou:

- Statické řešení sochy jako celku i jednotlivých dílčích prvků a detailů
- Rozčlenění sochy na dílčí elementy tak, aby je bylo možné jednotlivě extrudovat a na stavbě sestavit.
- Návrh a sestavení strojního zařízení od míchacího centra přes dopravu směsi po samotné robotické rameno a extrudér.
- Optimalizace UHPC směsi tak, aby byla využitelná pro robotickou fabrikaci použitým strojním zařízením.
- Převedení tvaru sochy do digitální formy použitelné pro programování robotického ramene.
- Programové řešení ovládání robotického ramene.
- Robotická fabrikace jednotlivých dílů sochy.
- Experimentální ověřování materiálu a dílčích elementů sochy.
- Samotná sestavení sochy na místo určené k instalaci.

Za každou odrážkou je skryto velké množství dílčích teoretických i praktických kroků, s cílem realizovat vytčený záměr. Realizační tým zahrnoval pracovníky SFD, pracovníky KÚ a také zástupce společnosti PREMIX Servis jako dodavatele suché směsi UHPC pod obchodním názvem Valucem. Tato směs byla v rámci prací modifikována ve spolupráci se SFD a KÚ do podoby Valucem 3D.

Je jasné, že jednotlivé oblasti se prolínají je nutné je řešit paralelně. Mnohdy se realizační tým potýkal i s nevyhovujícími výsledky, které jej postrčily novým směrem. V současnosti již tedy probíhá kromě extruze jednotlivých elementů také samotná instalace sochy. Postup prací ilustrují **Obr. 4 - Obr. 8** z pracovního prostředí SFD.



Obr. 4 Postup extruze deskového prvku rezervoáru pod hlavní sochu. Metoda aditivní robotické fabrikace UHPC



Obr. 5 Instalace extrudované části rezervoáru



Obr. 6 Instalovaná část nohy sochy z UHPC



Obr. 7 Extrudovaný vzorek stěny z UHPC



Obr. 8 Instalace sochy na prostranství mezi objekty projektu Bořislavka, Praha 6. Prozatím je extrudován a instalován rezervoár a části nohou sochy

5 Závěr

V rámci developerského projektu realizovaného společností KKCG a známého pod názvem Bořislavka, Praha 6 je realizována unikátní socha metodou aditivní robotické fabrikace materiálu UHPC. Socha byla navržena umělcem Federicem Díazem. K její realizaci přizval pracovníky Kloknerova ústavu, aby mu pomohli se statickými a technologickými aspekty jeho díla a také byl přizván dodavatel prefabrikované směsi UHPC s názvem Valucem a to společnost PREMIX Servis s.r.o.. V rámci realizace se daří postupně řešit řadu zcela nových a unikátních problémů ve velmi rozmanité a široké škále. V současnosti probíhá kromě aditivní robotické fabrikace jednotlivých elementů sochy již samotná instalace sochy. Realizace sochy je v plném proudu a měla by být dokončena na podzim roku 2021. Již nyní je jasné, že se podařilo posunout technologii aditivní robotické fabrikace UHPC na realizační úroveň. Otvírá se tak prostor k dalším praktickým počínům a to nejen u takto unikátního artefaktu. Získané zkušenosti potvrzují realizovatelnost téměř neomezené škály tvarů s dostatečnou mechanickou odolností a zejména trvanlivostí.

Literatura

- [1] Metodika 1–Metodika pro návrh UHPC a materiálové zkoušky, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014, <http://www.klok.cvut.cz/veda-a-vyzkum/vedecke-projekty/>
- [2] Metodika 2–Metodika pro navrhování prvků z UHPC, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014, <http://www.klok.cvut.cz/veda-a-vyzkum/vedecke-projekty/>
- [3] Metodika 3 - Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014, <http://www.klok.cvut.cz/veda-a-vyzkum/vedecke-projekty/>
- [4] Kolísko, J.; Čítek, D.; Císlar, O.; Tej, P.; Márek, J. Unikátní tenkostěnná oblouková lávka z UHPFRC, In: Beton TKS, 2018, 18(02), str. 34-38. ISSN 1213-3116.
- [5] Kolísko, J.; Čítek, D.; Tej, P.; Rydval, M. THIN-WALLED U-PROFILE UHPFRC FOOTBRIDGE In: UHPFRC 2017 Designing and Building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards. Bagnaux: Rilem Publications s.a.r.l., 2017. p. 745- 754. ISBN 978-2-35158-166-7.
- [6] Kolísko, J. - Rydval, M. – Huňka, P. UHPC – Assessing the Distribution of the Steel Fibre and Homogeneity of the Matrix. fib Symp. Tel Aviv, Tel Aviv, Israel. 2013. ISBN 978-965-92039-0-1.
- [7] Kolísko, J.; Tichý, J. ; Kalný, M. ; Huňka P. ; Hájek P.; Trefil, V.: Vývoj ultravysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR, BETON TKS, příloha Betonové konstrukce 21. století betony s přidanou hodnotou, ročník 20. č. 6 samostatná příloha, s. 51-56, ISSN 1213-3116
- [8] Čítek, D.; Marek, J.; Řeháček, S.; Dobiáš, D.; Kolísko, J.; Tej, P. Innovative Elements and Structures Made From Ultra High – Performance Fibre Reinforced Concrete In: Fib Congress 2018, Better, Smarter, Stronger. Lausanne: fib, 2018. ISBN 978-1-877040-14-6.

Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
☎ +420 603 214 926
😊 jiri.kolisko@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

Ing. David Čítek

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
☎ +420 224 353 521
😊 david.citek@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

Ing. Martin Kroc, Ph.D.

✉ PREMIX Servis, s.r.o.
Libiš 1, 27700 Neratovice,
☎ +420 737 256 875
😊 kroc@premixservis.cz
URL www.premixservis.cz

Federico Díaz

✉ Studio Federico Díaz s.r.o.
Podkovářská 647, 190 00 Praha 9
☎ +420 728827287
😊 federico@federicodiaz.studio
URL www.federicodiaz.net

Ing. Karel Hurtig

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
☎ +420 224 353 550
😊 karel.hurtig@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

BETON V RŮZNÝCH KLIMATICKÝCH PODMÍNKÁCH

Robert Coufal

1 Úvod

V zimním období je provádění betonářských prací značně ovlivněno nízkými teplotami prostředí. Kvalitu výsledné betonové konstrukce a rychlost dosažení požadovaných parametrů betonu ovlivňují zejména následující skutečnosti:

- Teplota čerstvého betonu
- Složení betonu
- Teplota prostředí a ošetřování betonu

V letním období je naopak nutno řešit zejména následující problémy:

- Zrychlená ztráta konzistence, z důvodu zvýšeného odparu záměsové vody vlivem vysoké teploty čerstvého betonu
- Zrychlená ztráta konzistence vlivem urychleného počátku tuhnutí teplého betonu
- Zvýšené maximální dosažené teploty v betonové konstrukci během hydratace, vlivem vysoké teploty čerstvého betonu i okolního prostředí. Zvýšená maximální dosažená teplota v betonovaném prvku má za výsledek zvýšená vynucená namáhání jak z důvodu vychládání konstrukce, tak z důvodu teplotního gradientu po průřezu.
- Omezení maximální teploty čerstvého betonu dané doplňkovými předpisy

Vždy je nutné uvážit, jaký z případných problémů je aktuální, v závislosti na použitém betonu, způsobu a délce přepravy a na typu konstrukce. Následně je možné hledat řešení.

Problematika teploty prostředí a ošetřování betonu je uvedena například v normě ČSN EN 13670 nebo v dokumentu „Všeobecný (základní) návod na použití betonu“ od Svazu výrobců betonu ČR.

Všechny dokumenty v souladu určují jako limitní teplotu 5°C. Ve chvíli, kdy teplota betonu poklesne pod 5°C, hydratace se zásadním způsobem zpomaluje, téměř zastavuje. Beton by tedy měl být na stavbu dovezen o vyšší teplotě než je 5°C a pomocí ošetřování by jeho teplota měla být nad touto hodnotou udržena až do dosažení pevnosti v tlaku minimálně 5MPa. Je ovšem nutno uvažovat s tím, že když se po dosažení pevnosti 5MPa přestane beton teplotně ošetřovat a vychladne na teplotu nižší než 5°C, nárůst pevností se téměř zastaví. Toto může negativně ovlivnit čas odbednění, zejména stropních konstrukcí.

Tento příspěvek se zabývá technologickými možnostmi, jak urychlit dosažení požadovaných vlastností betonu pomocí jeho složení.

Uvedené výsledky jsou naměřené na betonech dodávaných z betonáren TBG Metrostav v Praze.

2 Betony v zimním období

2.1 Volba cementu

Použitý cement zásadním způsobem ovlivňuje rychlost náběhu pevností betonu v čase. V zimním období je rychlost náběhu pevností betonu v konstrukci výrazně ovlivněna i vývojem hydratačního tepla cementu.

2.1.1 CEM II/B-S 32,5 R

Jedná se o základní typ cementu. Betony s tímto cementem jsou optimální variantou z pohledu ceny a technických parametrů.

2.1.2 CEM I 42,5 R

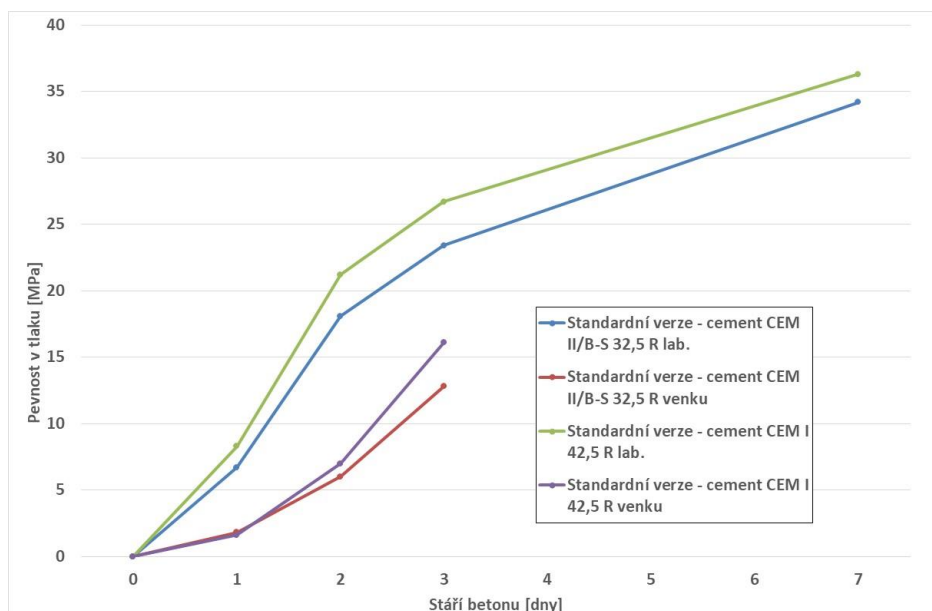
Typ cementu, určený zejména pro betony v prostředí XF2-4 nebo pro betony s rychlým náběhem pevností. Betony s tímto cementem jsou vhodné pro konstrukce prováděné v zimním období.

2.1.3 CEM III/B 32,5 L – LH/SR

Cement s nízkým vývojem hydratačního tepla, určený zejména pro vodonepropustné a masivní konstrukce a pro konstrukce v prostředí se síranovou agresivitou.

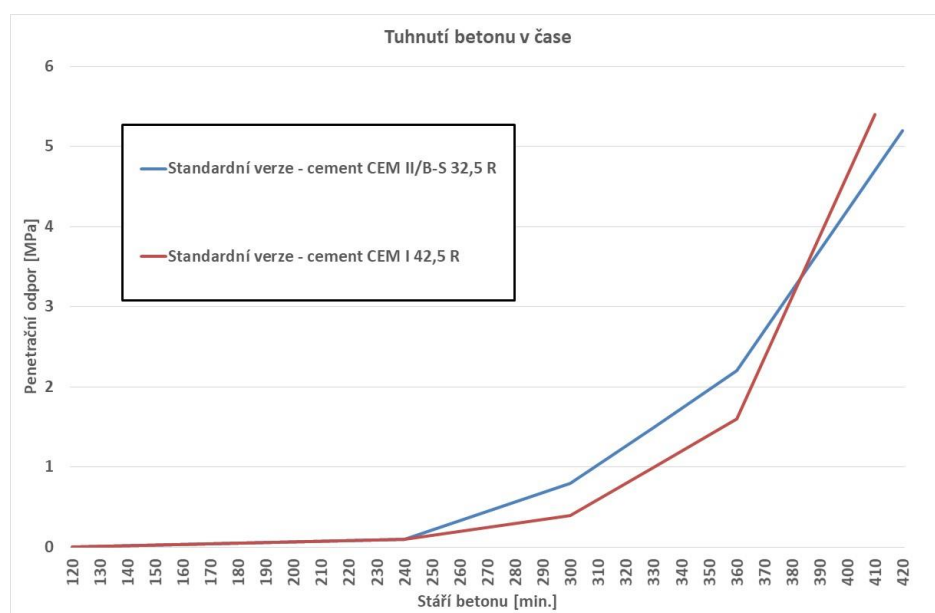
2.1.4 DOPORUČENÍ K VOLBĚ CEMENTU

V zimních podmínkách přichází v úvahu záměna rychlého portlandského cementu CEM I 42,5 R místo standardního cementu CEM II/B-S 32,5 R. Touto záměnou nezkrátíme zpracovatelnost betonu, ale zvýšíme samoohřev betonové konstrukce během tvrdnutí a urychlíme náběh pevností. Rozdíl v náběhu pevností ve venkovních chladných (cca 5°C) a laboratorních podmínkách je uveden v **Obr. 1**.



Obr. 1 Porovnání rychlostí náběhu krátkodobých pevností betonů s cementy CEM I 42,5 R a CEM II/B-S 32,5 R

V grafu je vidět rozdílný nárůst pevností betonů s různými cementy. Je vidět, že ve stáří 2-3 dny je pevnost betonu s portlandským cementem CEM I 42,5 R vyšší o 15-25% než pevnost betonu se struskoportlandským cementem CEM II/B-S 32,5 R. Při použití receptur s portlandským cementem CEM I 42,5 dosáhneme rychlejšího nárůstu pevností, ale bez zkrácení zpracovatelnosti. Máme tedy stejnou dobu na zpracování a dopravu jako u běžné receptury, ale s podstatně rychlejším vývojem pevností a vyšším ohřátím konstrukce od hydratačního tepla. Tohoto rychlejšího nárůstu pevností dosáhneme jak v chladných, tak v teplých podmínkách. Záměna cementu naopak není řešením v případech, kdy je potřeba rychlejšího nastartování směsi, třeba kvůli rychlejšímu leštění (viz **Obr. 2**).

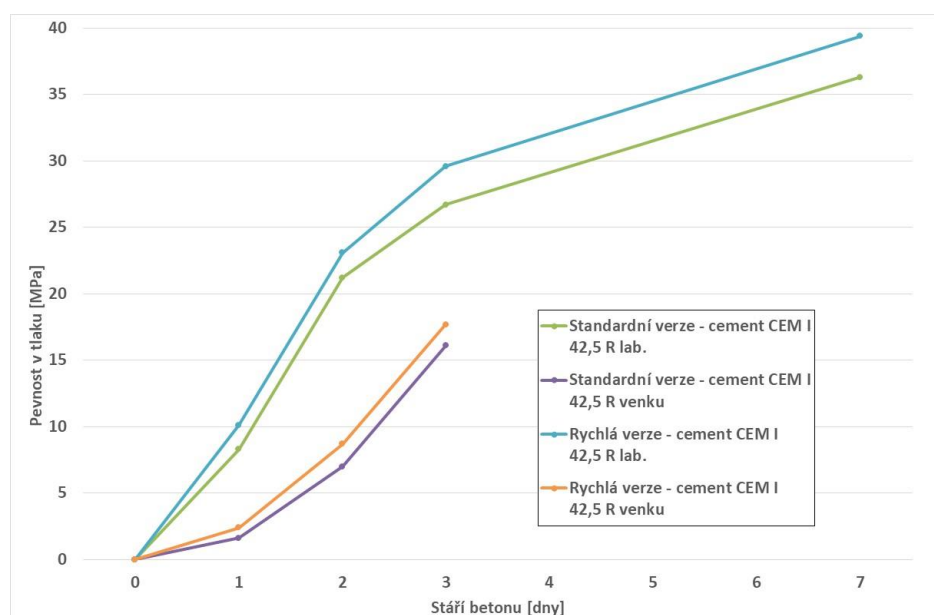


Obr. 2 Porovnání počátků tuhnutí a tvrdnutí penetračním odporem u betonů s cementy CEM I 42,5 R a CEM II/B-S 32,5 R

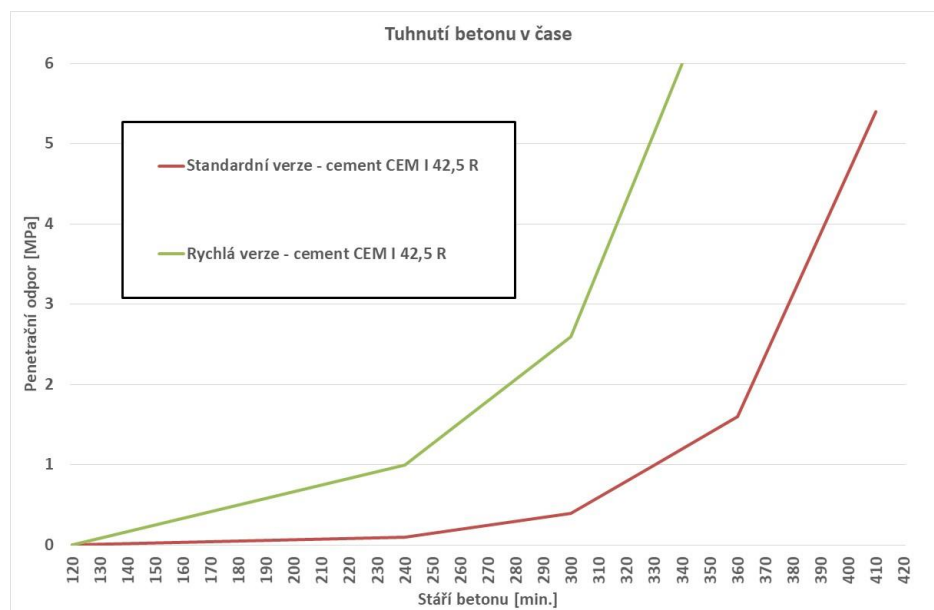
2.2 Vliv přísad

Typ plastifikační přísady ovlivňuje zejména počátek tuhnutí a tvrdnutí betonu. Na trhu existuje široká škála přísad, umožňující nastavení parametrů betonu na míru zákazníkovi. Pro zimní období jsou k dispozici superplastifikační přísady s urychlujícím účinkem. Betony s těmito přísadami jsou zde značeny variantou „R“. Jejich účinek je v urychlení počátku tuhnutí a tvrdnutí (**Obr. 4**). Tímto se sice určitým způsobem zkracuje doba zpracovatelnosti, ale výrazně se omezí vychládání betonu před počátkem hydratace a započítáním samoohřevu betonu. Nárůst pevností na laboratorních vzorcích se zásadním způsobem neliší (**Obr. 3**).

Efektu urychlení počátku tuhnutí a tvrdnutí se využívá i v případech, kde potřebujeme začít rychle po uložení betonu leštit. Efekt urychlení oproti standardnímu betonu je viditelný vždy, pouze se v závislosti na aktuálních podmínkách mění absolutní hodnoty.



Obr. 3 Porovnání rychlostí náběhu krátkodobých pevností betonů v rychlé variantě (R) a standardních betonů



Obr. 4 Porovnání počátků tuhnutí a tvrdnutí penetračním odporem betonů v rychlé variantě (R) a standardních betonů

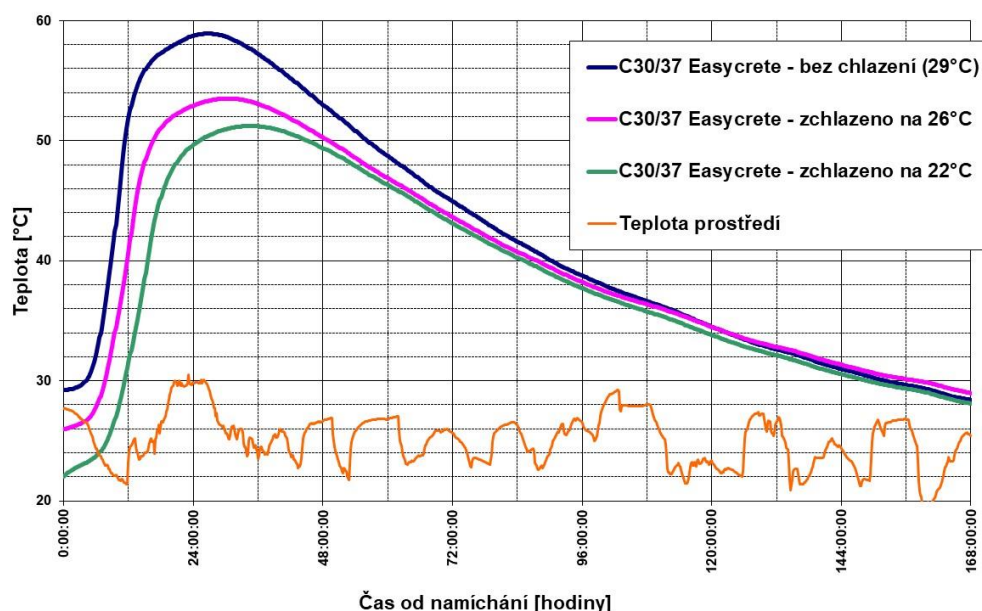
3 Betony v letním období

3.1 Chlazený beton

Teplota čerstvého betonu výrazně ovlivňuje zejména dobu zpracovatelnosti, počátek tuhnutí i tvrdnutí, nárůst pevností a vývoj hydratačního tepla. Omezení maximální teploty čerstvého betonu je vyžadováno zejména pro vodonepropustné konstrukce (bílé vany), masivní konstrukce a pro významné konstrukce dopravních staveb. Zároveň lze snížením teploty

prodloužit zpracovatelnost betonu i pro provádění běžných konstrukcí v horkých klimatických podmínkách

Vliv snížení teploty čerstvého betonu na průběh teplot v betonovém prvku je vidět v **Obr. 5**. Jeden průběh teploty byl měřen na betonu nechlazeném, jeden na betonu ochlazeném o 3°C a poslední na betonu ochlazeném o 7°C. Z grafu je vidět mírné zpoždění dosažení maxima teploty v prvku se snižující se teplotou čerstvého betonu a zároveň snížení tohoto maxima zhruba o hodnotu zchlazení betonu. Hodnoty v **Obr. 5** jsou naměřené na modelu, který zhruba vystihuje chování 1 m silné desky. Za předpokladu dat z **Obr. 5**, tzn. že snížení maximální teploty v konstrukci zhruba odpovídá snížení teploty čerstvého betonu, se zchlazení čerstvého betonu významně projeví hlavně u nemasivních prvků. Při snížení teploty čerstvého betonu o 4°C činí snížení maxima o 23% u 1000 mm silné konstrukce a o 50% u konstrukce silné 300 mm (viz. **Obr. 6** a **Obr. 7**). Toto má již velký vliv na vynucená namáhání mladého chladnoucího betonu.



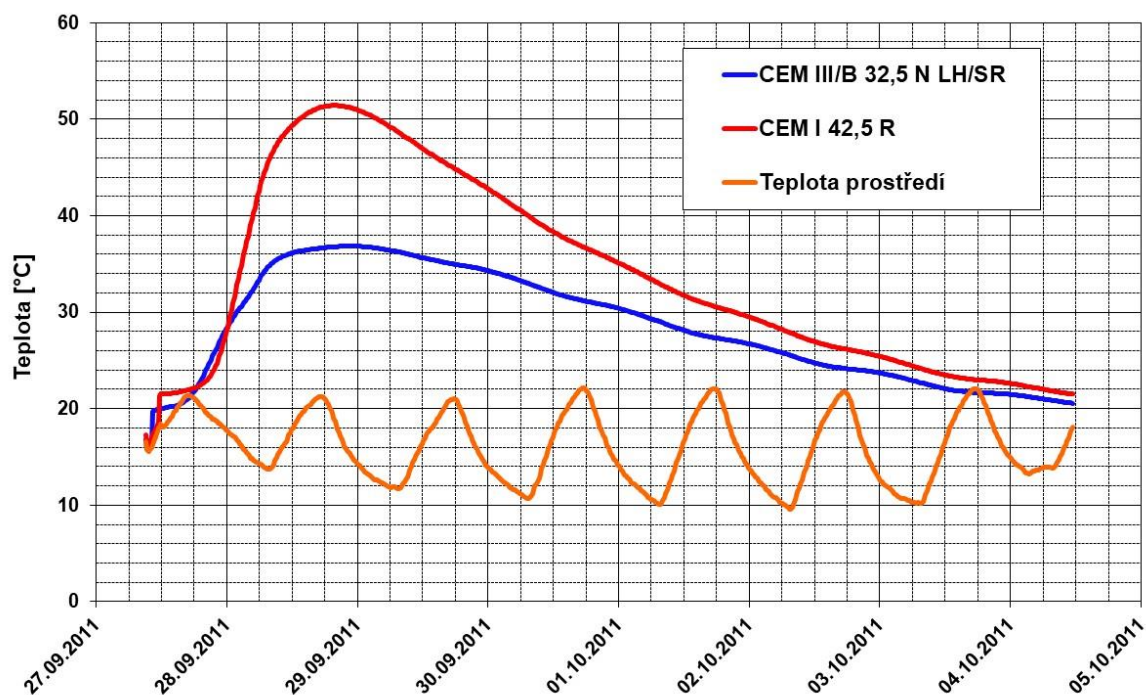
Obr. 5 Průběh teploty betonovaného prvku v závislosti na teplotě použitého čerstvého betonu

Na betonárně TBG Metrostav v Praze Libni (Troja) je instalováno chlazení čerstvého betonu za pomoci ledově vychlazené vody (teplota cca 1°C). Tímto způsobem chlazení lze teplotu betonu snížit až o 4°C oproti betonu standardní teploty.

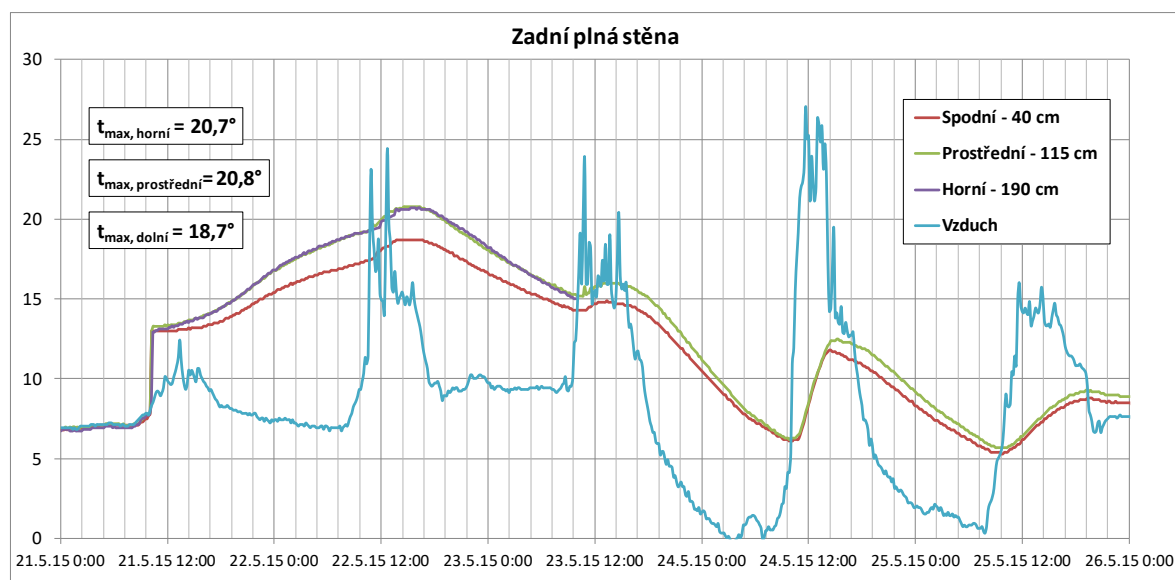
3.2 Beton s nízkým vývojem hydratačního tepla

Maximální dosaženou teplotu v konstrukci můžeme snížit použitím betonu s nízkým vývojem hydratačního tepla (např. Permacrete). Použitím tohoto typu betonu obecně neprodloužíme zpracovatelnost. Snížená maximální teplota hydratujícího betonu snižuje teplotní gradient po průřezu konstrukce a napětí od objemových změn při vychládání konstrukce. Maximální dosaženou teplotu ovlivňuje typ použitého cementu a příměsi, stejně jako teplota čerstvého betonu. Vliv typu cementu na vývoj teploty betonového prvku (model 1 m silné desky) během hydratace je uveden v **Obr. 6**. Použitím betonu s nízkým vývojem hydratačního tepla (Permacrete) dochází ke snížení nárůstu teploty vlivem hydratace z 30°C

na 17°C, tzn. o cca 43%. V **Obr. 7** je znázorněn průběh teplot v reálné vodonepropustné konstrukci tloušťky 300 mm z betonu Permacrete, který vlastnostmi zhruba odpovídá betonu s cementem CEM III/B z **Obr. 6**. Je zřejmé, že maximální dosažené teploty v betonovém prvku zásadně závisí i na tloušťce prvku.



Obr. 6 Vývoj teploty betonovaného prvku v závislosti na použitém cementu

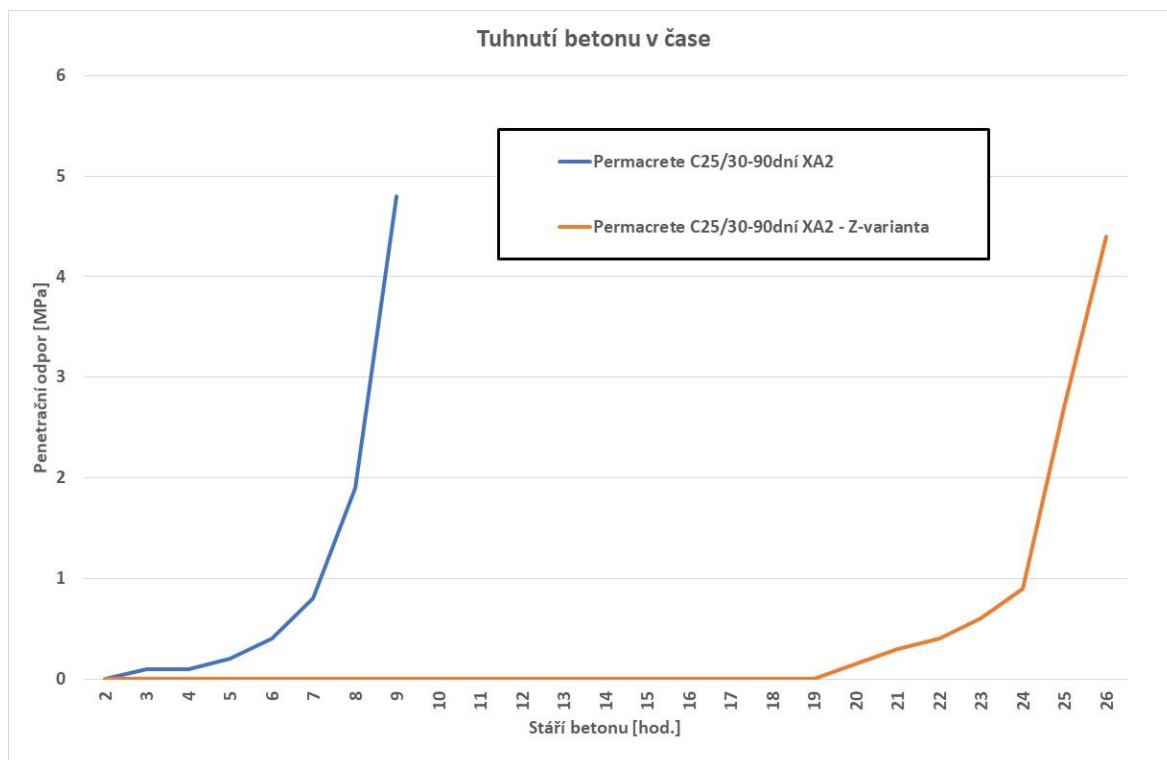


Obr. 7 Průběh teplot ve vodonepropustné konstrukci tloušťky 300 mm z betonu Permacrete

3.3 Zpomalený beton

Pokud je potřeba prodloužit zpracovatelnost betonu v čase, jak kvůli dlouhé ukladce, tak kvůli oddálenému leštění povrchu, je možno zvolit zpomalenou variantu. U těchto betonů je

pomocí přísad oddálen počátek hydratace. Pomocí přísady ale nemůže být principiálně zabráněno ztrátě konzistence z důvodu rychlého odparu záměsové vody z teplého betonu. Dopředu je nutno specifikovat, jakého oddálení počátků tuhnutí má být dosaženo, v jakých podmínkách a u jakého betonu. Z důvodu mnoha vlivů nelze čas počátku tuhnutí stanovit naprosto přesně, ale pouze provést kvalifikovaný odhad. V **Obr. 8** je znázorněn příklad oddálení počátků tuhnutí i tvrdnutí zpomalené varianty oproti standardní variantě betonu.



Obr. 8 Oddálení počátků tuhnutí i tvrdnutí zpomalené varianty

4 Závěr

4.1 Betony v zimním období

V tomto příspěvku byly ukázány způsoby, jak urychlit počátek tuhnutí a tvrdnutí nebo jak urychlit nárůst krátkodobých pevností. Uvedené výsledky jsou reálně naměřené, nejsou ale hodnotami zaručenými. Poměry a závislosti jsou však obecně platné. Obecně platí, že chceme-li urychlit nárůst pevností, zvolíme rychlejší portlandský cement. Zachováme si tak i dobu zpracovatelnosti. Chceme-li naopak urychlit počátek tuhnutí a tvrdnutí, zvolíme variantu s rychlejší plastifikační přísadou, ale za cenu zkrácení zpracovatelnosti. Vždy je možné zvolit oba způsoby naráz a získám tak nejrychlejší možnou variantu betonu, vhodnou zejména pro použití v zimním období.

4.2 Betony v letním období

Teplota čerstvého betonu, stejně jako jeho složení, má velký vliv na vývoj parametrů mladého betonu i na vznik vynucených namáhání v konstrukci. Snížení teploty chlazením a zpomalení betonu přísadami má vliv na prodloužení zpracovatelnosti.

Snížování teploty čerstvého betonu má smysl zejména v následujících případech:

- Je potřeba prodloužit zpracovatelnost v letním období
- Snížení maximální dosažené teploty u masivních konstrukcí (cca o 23% u 1000mm silné desky) za účelem snížení teplotního gradientu po průřezu konstrukce.
- Snížení maximální dosažené teploty u vodonepropustných konstrukcí (cca o 50% u 300mm silné konstrukce) za účelem snížení vynucených namáhání, způsobených vychládáním konstrukce.
- Pro splnění podmínek na teplotu čerstvého betonu v letních podmínkách dle doplňkových předpisů, např. dle TKP staveb pozemních komunikací, Kapitola 18 - BETONOVÉ KONSTRUKCE A MOSTY

Použití betonu s nízkým vývojem hydratačního tepla má smysl zejména v následujících případech:

- Snížení maximální dosažené teploty u masivních konstrukcí (až o 43% u 1000mm silné desky) za účelem snížení teplotního gradientu po průřezu konstrukce.
- Snížení maximální dosažené teploty u vodonepropustných konstrukcí za účelem snížení vynucených namáhání, způsobených vychládáním konstrukce.

Použití zpomalené varianty betonu má smysl zejména v následujících případech:

- Oddálení počátků tuhnutí i tvrdnutí z důvodu odloženého leštění povrchu desky
- Prodloužení dopravní vzdálenosti čerstvého betonu
- Prodloužení zpracovatelnosti betonu za předpokladu, že nebude docházet k nadměrnému odparu záměsové vody z čerstvého betonu

Ing. Robert Coufal Ph.D

✉ TBG METROSTAV s.r.o.
Koželužská 2246/5, Praha8 - Libeň
☎ +420 221 709 709
😊 robert.coufal@tbg-beton.cz
URL www.tbg-metrostav.cz

BETONÁŽ V EXTRÉMNÍCH KLIMATICKÝCH PODMÍNKÁCH

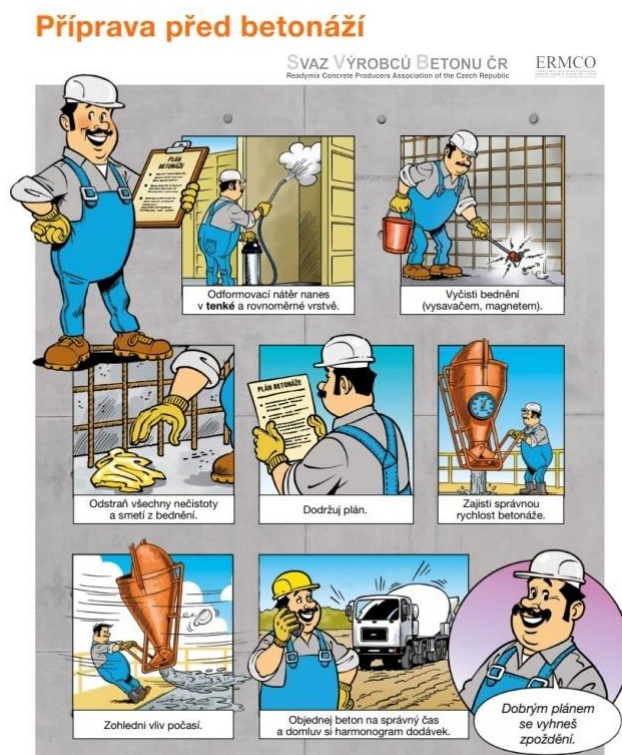
Michal Števíla

1 Úvod

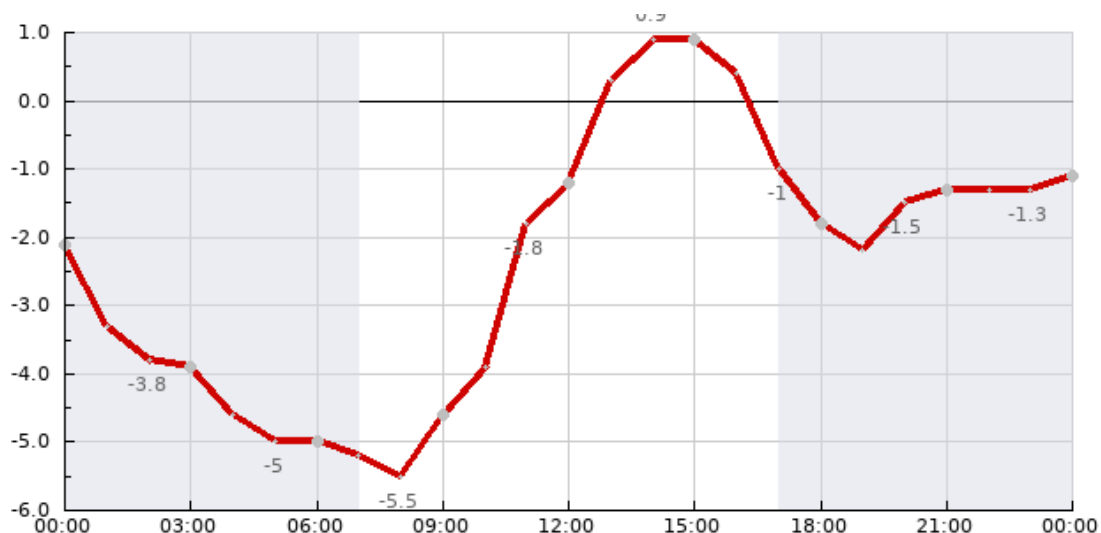
Výroba betonových konstrukcí na staveništi probíhá v průběhu celého roku, bez ohledu na povětrnostní podmínky. Absolutní prioritou zhotovitele stavby je dodržení termínu předání stavby. V důsledku toho se betonuje i ve dnech, kdy je teplota vzduchu velmi nízko (méně než 0°C) anebo, jak je tomu v posledních zhruba třech letech, naopak velmi vysoko (více než 30°C).

2 Betonáž, ukládání betonu, ošetřování betonu

Vědomosti o tom, jak betonovat v jiných než příznivých povětrnostních podmínkách jsou známé desítky let a dnes online dostupné na internetu. Jejich formalizované znění najdeme v technických normách a podobných dokumentech, např. EN 206+A1, EN 13 690 apod. Viz [1], [2], [3], [4]. Populárně zpracované jsou dostupné v různých formách, viz například **Obr. 1**. “Úhelným kamenem” je, je-li zhotovitel stavby ochoten a připraven tyto vědomosti použít.



3 Příklad první – únor 2018



Obr. 2 Teplota vzduchu v den betonáže.



Obr. 3 Přípravenost staveniště v den betonáže.

Výstavba bytového domu v únoru za nízkých teplot. Návštěva staveniště se odehrála na žádost zhotovitele stavby: „Vaše betony netvrdnou, zkouška Schmidtem ukázala pevnost 1 MPa“.

Posléze bylo zjištěno, že stěny byly odbedněny 24 hodin po betonáži v den, kdy se teploty držely více než 20 hodin pod nulou.

Legislativa uvádí:

ČSN EN 13670

8.2 Postupy před betonováním

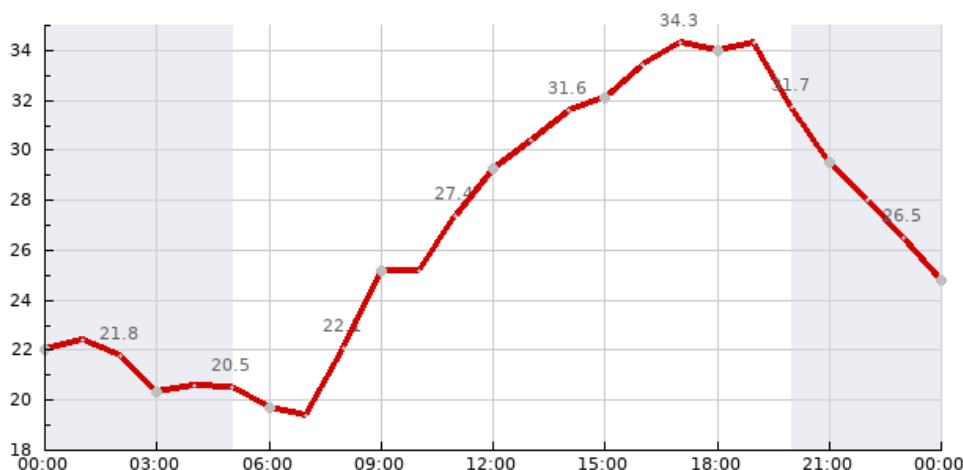
(9) Pokud je okolní teplota nízká nebo předpověď počasí uvádí, že teplota vnějšího prostředí bude nízká v době ukládání betonu nebo v období jeho ošetřování, musí se připravit předběžná opatření na ochranu betonu proti poškození mrazem.

F.8.2 Činnosti před betonováním

(4) V době betonování má být teplota povrchu pracovní spáry vyšší než 0 °C.

I pouze z obrázků je zřejmé, že požadavky normy splněny nebyly a beton tudíž nedostal čas ztuhnout.

4 Příklad druhý – srpen 2018



Obr. 4 Teplota vzduchu v den betonáže.

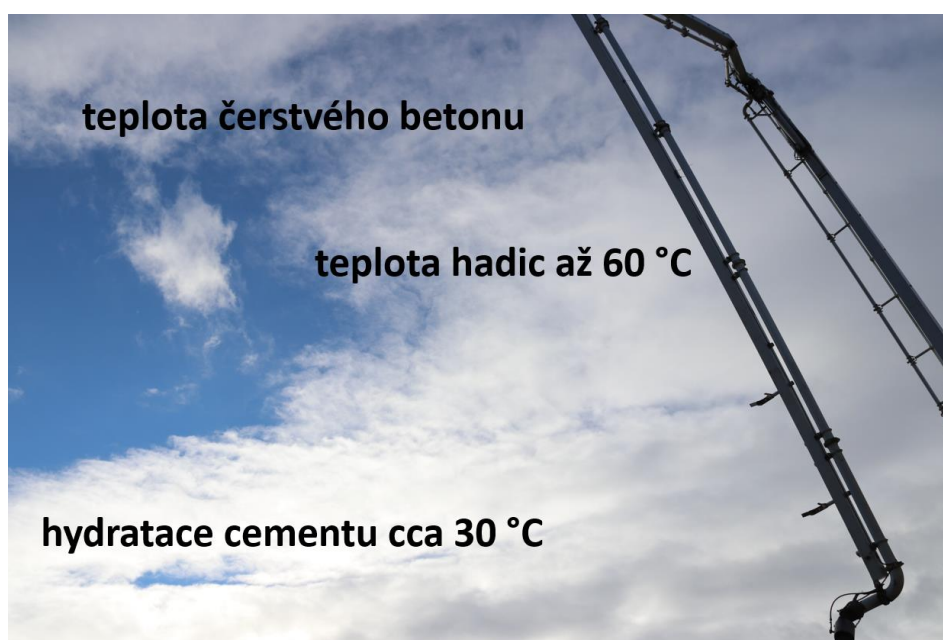
Výstavba velkého propustku v náspu dálnice. Několik týdnů trvající vysoké teploty bez dešťů vytvořily specifické podmínky pro betonáž:

- Teplota čerstvého betonu.
- Rozpálená technika - automixy, čerpadla.
- Rozpálené bednění a výztuž.

Další parametry betonáže byly dány objemem prací a požadovaným typem betonu:

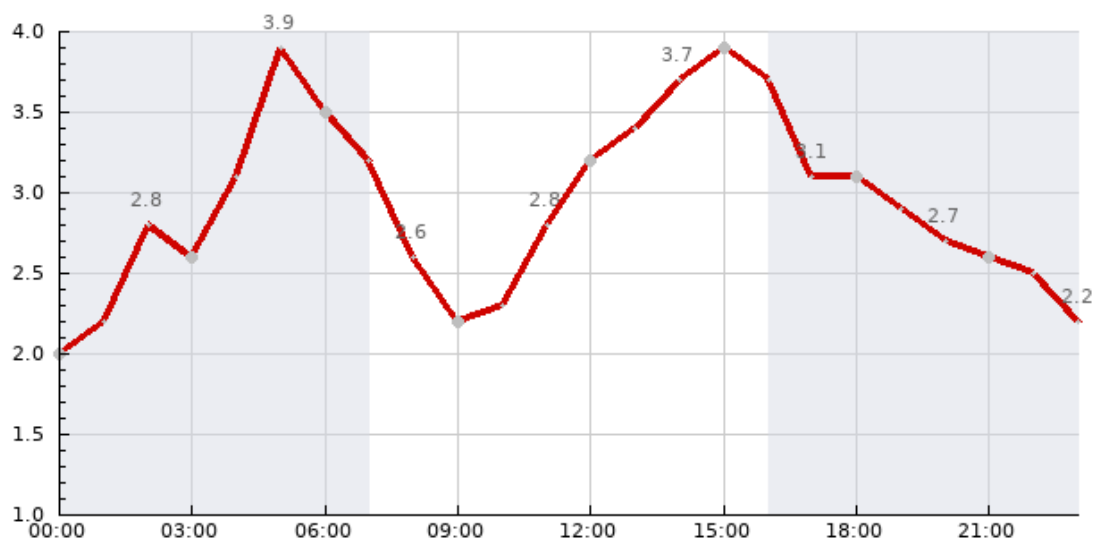
- Betonáž cca 500 m³ betonu.
- Provzdušněný beton s vysokou dávkou CEM I, který má rychlé náběhy počátečních pevností a rychle vyvíjí velké množství hydratačního tepla.

Možnosti výrobce betonu a zhotovitele stavby přijmout za horkého počasí nějaká opatření jsou mnohem menší než u betonáže za nízkých teplot. Rizika při jakémkoliv přerušení betonáže jsou obrovská – zejména možnost ztuhnutí betonu v čerpadle.



Obr. 5 Specifické faktory při betonáži za horkého dne.

5 Příklad třetí – leden 2019



Obr. 6 Teplota vzduchu v den betonáže.



Obr. 7 Noční betonáž.



Obr. 8 Uložení vzorků betonu odebraných na staveništi.



Obr. 9 Opatření (zakrytí betonu) aplikované hned po betonáži.

Stejná stavba jako v druhém příkladu. Betonáž o objemu 1000 m^3 v chladném období. Zhotovitel stavby, vědom si všech okolností, několikrát posouval termín betonáže, až se mu podařilo trefit „okno“, kdy se teplota vzduchu dostala významně nad 0°C (viz. **Obr. 6**). Přípravenost stavby, betonáren, čerpadel a ostatní logistiky byla vynikající. Původně odhadovaná doba betonáže v délce 26 hodin proběhla ve skutečnosti pouze v délce 18 hodin. Zhotovitel stavby měl připraveny prostředky pro ošetřování betonu (zakrytí, viz **Obr. 9**), uložení vzorků odebraného betonu (**Obr. 8**), osvětlení pracoviště a všechny další věci nutné k betonáži uvedeného rozsahu. Celá akce proběhla v relativní pohodě, bez úrazu.

6 Závěr

V případě betonáže za nestandardních teplot je potřeba vzít v úvahu:

- Přípravu staveniště.
- Změnu konzistence betonu v čase.
- Obsah vzduchu v čerstvém betonu.
- Počátek tuhnutí.
- Vývoj pevnosti.
- Teplotu čerstvého betonu.
- Vysoká rizika při přerušení betonáže.
- Ošetřování betonu.

Betonáž za nepříznivých teplot je možná, je-li stavba dobře připravena. Zkušený zhotovitel je schopen realizovat stavbu v takřka jakémkoliv počasí.

Literatura

- [1] ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, ČAS, Praha, 4.2018
- [2] ČSN EN 13670 Provádění betonových konstrukcí, ČAS, Praha, 6.2010
- [3] ČSN P 73 2404 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace, ČAS, Praha, 1.2016
- [4] TKP 18 – Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací Kapitola 18 – Betonové konstrukce a mosty, Ministerstvo dopravy ČR, 1.2016
- [5] Všeobecný (základní) návod na použití betonu. Svaz výrobců betonu ČR/ ERMCO, Praha 2018

Ing. Michal Števula, Ph.D.

✉ BETOTECH, s r. o.
Beroun 660 01, Beron



☺ michal.stevula@betotech.cz

URL www.betotech.cz