

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

JAN KOVÁŘ

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Vliv krystalizačních přísad na samohojení betonu

Diplomová práce

Vypracoval: Jan Kovář
Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Bílý, Ph.D.
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Praha 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kovář	Jméno: Jan	Osobní číslo: 424355
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv krystalizačních přísad na samohojení betonu	
Název diplomové práce anglicky: Influence of crystalline waterproofing additives on self-healing of concrete	
Pokyny pro vypracování: V rámci diplomové práce vypracujte: - Přehled studií v českém i cizím jazyce, zabývajících se obdobnou problematikou. - Metodu pro řízené vytvoření trhliny v betonovém vzorku v laboratorních podmínkách. - Experiment, kterým se prokáže míra vlivu účinnosti krystalizační přísady na samohojení betonu. - Experiment, kterým se prokáže míra vlivu účinnosti zvýšeného obsahu cementu v betonu na samohojení betonu. - Porovnání a vyhodnocení výsledků experimentu z technologického hlediska.	
Seznam doporučené literatury: - Skripta Fakulty stavební ČVUT z oblasti technologie a navrhování betonových konstrukcí a z oblasti konstrukcí pozemních staveb. - Odborný časopis Beton TKS. - Technické podklady výrobců krystalizačních přísad. - Impaktované časopisy pokrývající oblast technologie betonu (zejména Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Composites).	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Bílý, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

1.10.2018	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s využitím poskytnutých odborných konzultací. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Jsem si vědom toho, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb. (autorský zákon).

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Ústřední knihovně ČVUT.

V Praze dne 6.1.2019

.....
Jan Kovář

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Petru Bílému, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za cenné rady a připomínky při konzultacích této diplomové práce. Dále chci poděkovat panu Ing. Vladimíru Veselému a panu Ing. Stanislavovi Smiřinskému za odborné konzultace a možnost provádět experiment v akreditované zkušební laboratoři Betotech, s.r.o. Závěrem chci poděkovat mé rodině, která mě po celou dobu studia a psaní této práce podporovala.

Souhrn

Tato diplomová práce je zaměřena na otestování vlivu krystalizační přísady do betonu na jeho samohojení. Jejím obsahem je úvod, ve kterém je podrobněji popsána motivace k realizaci tohoto experimentu a také stručný přehled krystalizačních přísad a jejich vlastností. Následuje rešerše experimentů, zabývajících se předmětem této diplomové práce. Dále je popsána snaha o vyvinutí metody, která by zajistila řízené vytvoření trhliny ve zkoušeném betonovém prvku tak, aby nebyl problém s jejím následným testováním. Hlavní kapitola se zabývá uskutečněným experimentem a jeho vyhodnocením, jejím závěrem je vyhodnocení schopností samohojení betonu v závislosti na použití krystalizačních přísad. V práci nejsou opomenuty ani běžné zkoušky jak čerstvého, tak ztvrdlého betonu. Mimo jiné je také vyhodnocena alternativní metoda s jiným způsobem vytvoření trhliny. Poslední část práce je věnována závěrům, ke kterým autor práce došel vyhodnocením experimentu a zároveň zamyšlení se nad účinností krystalizačních přísad.

Klíčová slova

Beton, krystalizační, přísady, Xypex, pevnost, průsak, trhlina, samohojení

Summary

This master thesis is focused on testing of influence of a crystalline waterproofing concrete additive on self healing of concrete. The first part of this thesis is introduction which contains motivation to realize this experiment. It also contains overview of available crystalline waterproofing additives, which are offered on the market and their characteristics. Next part is a review, which is focused on similar experiments, which tested influence of a crystalline waterproofing concrete additive on self healing of concrete. In other part is described effort of development of the method, which would help to create crack in tested concrete element. The main chapter is about realized experiment and its evaluation, which contains evaluation of influence of a crystalline waterproofing concrete additive on self healing of concrete. There are also results of basic tests of fresh concrete and hardened concrete. Last chapter before conclusion is also about evaluation of method of testing of influence of a crystalline waterproofing concrete additive on self healing of concrete, but with alternative method of crack development. The final section is dedicated to conclusions, which are described in context of results of the experiment and to the discussion of the effectivity of crystalline waterproofing concrete additives.

Keywords

Concrete, crystallization, additives, Xypex, strength, depth of penetration of water, crack, self healing

Obsah

1.	Úvod	9
2.	Krystalizační přísady a samohojení betonu.....	11
2.1.	Samohojení betonu.....	11
2.2.	Obecně o krystalizačních přísadách	12
2.3.	Samohojení betonu s krystalizačními přísadami	13
2.4.	Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments [1]	13
2.4.1.	Seznámení s tématem experimentu	13
2.4.2.	Experimentální část	14
2.4.3.	Vyhodnocení	19
2.4.4.	Závěr.....	22
2.5.	Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive [2]	23
2.5.1.	Seznámení s tématem experimentu	23
2.5.2.	Experimentální část	24
2.5.3.	Vyhodnocení	25
2.5.4.	Závěr.....	28
3.	Podstata vlastního experimentu.....	29
3.1.	Cíl experimentu	29
3.2.	Plán experimentu.....	29
3.3.	Návrh receptur testovaných betonů.....	29
4.	Vývoj postupu pro vytvoření trhliny definované šířky	31
4.1.	Úvod	31
4.2.	Teorie	31
4.3.	Praxe.....	38
4.3.1.	Betonování vzorků	38
4.3.2.	Zkouška tříbodovým ohybem, tvorba trhliny.....	39
4.3.3.	Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem.....	40
4.3.4.	Grafická data ze zkoušky	42
4.3.5.	Závěr experimentu.....	43
5.	Vývoj postupu pro zkoušení vzorků s trhlinou na průsak tlakové vody	44
5.1.	Příprava krychlí z trámců s trhlinou	44
5.2.	Možné cesty pokračování vývoje experimentu	45
6.	Finální varianta experimentu.....	47
6.1.	Zvolené postupy pro realizaci experimentu	47
6.2.	Použité přístroje a pomůcky	49
6.3.	Příprava a míchání jednotlivých typů betonu.....	52
7.	Běžné zkoušky čerstvého a ztvrdlého betonu	57
7.1.	Zkouška sednutí kužele	57
7.2.	Měření objemové hmotnosti čerstvého betonu	59
7.3.	Měření objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.....	60
7.4.	Měření pevnosti v tlaku zkušebních těles	62
7.5.	Měření hloubky průsaku tlakové vody do vzorků bez spáry	64

8. Měření hloubky průsaku tlakovou vodou na vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou.....	69
8.1. Úvod.....	69
8.2. Průběh křivky průsaku v čase A.....	69
8.3. Průběh křivky průsaku v čase B.....	74
8.4. Průběh křivky průsaku v čase C.....	80
8.5. Vyhodnocení naměřených hodnot.....	85
8.6. Fotografie spár v čase testování C focené s 10 násobným zvětšením.....	88
9. Nedestruktivní zkouška pozorování zacelení trhliny v čase.....	91
9.1. Příprava vzorků.....	91
9.2. Průběh zkoušky alternativní nedestruktivní metody zacelení trhliny.....	92
9.3. Dokumentace výšky výtoku tlakové vody z krychlí v čase A.....	93
9.4. Shrnutí naměřených hodnot výšek výtoku na vzorcích s alternativním vytvořením trhliny.....	95
10. Závěr.....	96
11. Literatura.....	99

1. Úvod

Beton se v současné době řadí do výčtu nejpoužívanějších stavebních materiálů po celém světě. Díky jeho dobrým mechanickým vlastnostem, zejména v kombinaci s ocelovou výztuží, a vysoké tvarové flexibilitě se stal hojně používaným jak pro konstrukce, které jsou pouze nosné, tak pro konstrukce, které mají splňovat specifická doplňková kritéria, jako například vodonepropustnost. Velkým problémem, se kterým se stavitelství od jeho počátků potýká, je výskyt vody – v případě betonových konstrukcí je jí zejména voda podzemní. Pro izolaci spodní stavby byl dříve často používán jí.

S rozvojem stavebnictví byly objeveny nové možnosti izolování spodní stavby – černá a bílá vana. Rozdíl mezi těmito dvěma pojmy je jednoduchý. Vycházet lze z předpokladu, že je potřeba zamezit vniku podzemní vody do stavebního objektu. V případě černé vany je nosná konstrukce bez hydroizolační funkce a musí být proto doplněna hydroizolací například v podobě asfaltových pásů. Bílá vana je železobetonová konstrukce, která plní jak funkci nosnou, tak funkci hydroizolační, které je dosaženo vhodným návrhem betonové směsi, vyztužením konstrukce a především správným technologickým prováděním.

Betonová konstrukce musí pro hydroizolační funkci vyhovět požadavkům, které jsou na ní kladeny normou ČSN EN 12390–8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou [9]. Závěrem testování vzorků dle této normy, je naměřená hloubka průsaku tak, že je zkušební krychle zatížena tlakem 0,5 MPa po dobu 72 hodin. Cílem technologie je v případě voděodolného betonu vytvořit směs takovou, aby měla kromě předepsaných pevnostních vlastností a dalších předepsaných požadavků zároveň co nejmenší naměřenou hodnotu průsaku tlakovou vodou.

Pro zlepšení vodonepropustných vlastností vznikly krystalizační přísady. Jejich úkolem je vylepšit vodonepropustné vlastnosti betonu. Děje se tak dvojím způsobem, jednak by měl dle tvrzení výrobců krystalizačních přísad beton nabýt lepších parametrů při zkoušce průsaku tlakovou vodou a jednak se má zvýšit schopnost samohojení betonové konstrukce pomocí krystalů, které se začnou po vytvoření trhliny v konstrukci vytvářet a utěsní ji. Nutné je podotknout, že se bavíme o velmi malém měřítku trhlin v řádech desetin milimetrů.

Tato diplomová práce se zabývá vlivem krystalizační přísady Xypex Admix C – 1000 NF na samohojení betonu. Myšlenkou celého experimentu je otestování vlivu na vzorcích, na kterých bude vytvořena spára definovaných rozměrů. V dostatečně dlouhém časovém horizontu budou vzorky testovány na zkoušku průsaku tlakovou vodou, která jasně prokáže, zda trhlina během doby mezi jednotlivými časy testování zarostla anebo nezarostla dle toho, zda se po rozlomení krychle ukáže, že se voda dostala do spáry, či nikoliv, protože spára

zarostla. Hlavní část experimentu trvala 7 měsíců. Na standardních zkušebních krychlích byla vytvořena spára o šířce 0,1 mm a 0,2 mm, která zasahovala přibližně 90 mm do hloubky vzorku. Pro ověření efektivity krystalizační přísady byly vytvořeny 3 záměsi – záměs referenční (srovnávací), záměs s přidanou krystalizační přísadou a záměs s přidaným množstvím cementu. Tyto záměsi byly otestovány v různých časech experimentu a vzájemně porovnávány. Závěrem experimentu je vyhodnocení, po jaké době zarostla spára konkrétních rozměrů a na jakém vzorku v závislosti na receptuře betonu se tak stalo.

V části rešerše jsou rozebrány podrobně experimenty [1, 2], které se podobnou problematikou již zabývaly. Všechno testování však probíhalo, lze říci, velmi opatrně ve smyslu zatěžování vzorků vodou. V podstatě se jednalo o zatížení vodou, která nebyla tlaková a měření snižování průtoku trhlinou, která se v čase zacelovala. O tom, jaká je skutečně účinnost a smysluplnost využití krystalizačních přísad, jsou mezi odbornou veřejností vedeny diskuze a názory se velmi různí. Cílem a motivací této diplomové práce je zhodnotit efektivitu návrhu krystalizační přísady přímo v kontextu s normou ČSN EN 12390–8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou [9] a jasně tím dokázat, zda matrice, která zacelí spáru, dokáže odolat tlaku 0,5 MPa po dobu 72 hodin, aniž by byla voda protlačena do samohojící se spáry v testovaném vzorku. Další motivací bylo pokusit se přijít s vlastní metodou vytvoření trhliny tak, aby se dalo prokazatelně v souladu s normou testovat postupné zacelování trhlín.

Celý experiment byl prováděn ve zkušební společnosti Betotech akreditované dle standardu ČSN EN ISO/IEC 17025 [10]. Konkrétně na pracovišti v Berouně, v areálu Českomoravského cementu. Všechny zkoušky byly provedeny pod odborným dozorem zaměstnanců (pracovníků) a plán experimentu byl sestaven s pomocí vedoucích laboratoře.

2. Krystalizační přísady a samohojení betonu

2.1. Samohojení betonu

Beton je hojně používaný stavební materiál, ale jeho nedostatkem je náchylnost k tvorbě trhlin. Kvůli tomuto problému se může výrazně snížit trvanlivost a použitelnost konstrukcí. Se snižující se trvanlivostí přichází potřeba zvýšení nákladů na údržbu konstrukce. V zájmu zachování její funkčnosti je výzkum samohojení betonu celkem zajímavým odvětvím s potenciálem dlouhodobých úspor běžně vynaložených na udržování konstrukcí. Pokud je jediným problémem řešené konstrukce tvorba trhlin, pak se lze bavit o bezúdržbovém provozu po celou navrženou dobu životnosti.

Potenciál samohojení betonových konstrukcí je ovlivněn několika faktory. Mezi ně patří množství použité záměsové vody vzhledem k množství cementu, protože čím je nižší množství vody v záměsi, tím je vyšší pravděpodobnost, že nedojde k hydrataci všech cementových zrn, která mají na autogenní hojení zásadní vliv. Dalším faktorem je jemnost mletí cementu. Pokud je jemnost mletí vyšší, pak budou jednotlivá zrna lépe hydratovat a nestane se, že by zhydratovala jen částečně, potom nebude prostor pro další hydrataci v době potřeby samohojení.

Podstata samohojení stojí na následujícím principu. Díky vodě, která protéká vzniklou trhlinou, dochází k hydrataci dosud nezhydratovaných cementových zrn a tím dochází k postupnému zacelování trhliny nově vznikající maticí. Pokud dojde k vniknutí vody a oxidu uhličitého, tak může být uzavření trhlin dosaženo srážením částic uhličitanu vápenatého vznikajících vyluhováním hydroxidu vápenatého přítomného v matici.

Známe dva mechanismy samohojení betonu. Prvním je možnost takzvaného samozavírání, kdy dochází pouze k uzavření trhliny. Druhou možností je léčení, při kterém nastává kromě samotného zacelení i obnova mechanických vlastností. Další rozdělení samohojení může být dle toho, zda se jedná o základní betonovou směs nebo zda se jedná o betonovou směs, která je vylepšená speciálně za účelem samohojící funkce, tak jako v případě této diplomové práce například krystalizační přísadou.

Samohojení betonových konstrukcí je téma, které je známé již delší dobu. I přesto nelze říci, že se jedná o zcela probádané území a názor odborné veřejnosti na tuto problematiku není zcela sjednocený, hlavně pokud se jedná o použití krystalizačních přísad. [23, 24, 25]

2.2. Obecně o krystalizačních přísadách

Tato práce se zabývá testováním konkrétní krystalizační přísady – Xypex Admix C-1000 NF při dávkování 1% hmotnosti cementu. Na základě prostudování technického listu se dá říci, jaké má tato přísada přibližně složení, určitou část si však výrobci chrání. Příklad Xypex Admix se skládá z cementu, jehož zastoupení se pohybuje mezi 80–90 %. Druhá významná složka je hydroxid vápenatý, kterému ve složení náleží 10–20 %. Přidáním hydroxidu vápenatého dochází ke zvýšení pH alkalického prostředí v betonu a s tím vzrůstá odolnost proti chemickým vlivům. Poslední složka je zastoupena ve velmi malém množství a je jí redukční činidlo – to však nemá vliv na chemické složení betonu a je běžnou složkou v případě pytlovaného cementu. Dále se objevuje výraz aktivní báze Xypex, avšak její množství ani složení není upřesněno. Lze však říci, že s ohledem na procentuální zastoupení ostatních složek je množství aktivní báze Xypex velmi malé. [13]

Krystalizačních přísad je na trhu více od různých výrobců a namátkou lze zmínit například výrobce: Xypex [20], Sika [14], [15], Balchem [16], Redrock Construction [17], ARTESA capillary dry [18] či DRIZORO [19].

Po nastudování technických listů jednotlivých výrobců krystalizačních přísad lze vyvodit obecná doporučení, kterých se drží všichni výrobci, stejně tak jako to, jak by se měla přísada dávkovat a jaký by měla mít v konstrukci vliv.

Doporučené množství cementu je zpravidla v rozmezí 300–350 kg/m³. Při takovém množství cementu je otázkou, zda má použití krystalizační přísady stále smysl, protože pro správně navržený vodonepropustný beton se používá dávka cementu kolem 300–320 kg/m³. Dalším pravidlem, na kterém se všichni výrobci shodují, je dávkování krystalizační přísady. Zpravidla se pohybuje mezi 1–2 % hmotnosti cementu. Existují dva způsoby přidání krystalizační přísady do betonu. První variantou je dávkování krystalizační přísady do kameniva s následným promícháním po dobu 1 minuty, poté jsou přidány ostatní složky. Alternativou je přidání přísady do záměsové vody, ve formě velmi řídké suspenze, která je přidána se záměsovou vodou. Mezi výhodami použití krystalizační přísady je vždy zmíněno, že betonová směs nabyde lepší zpracovatelnosti, a že u ztvrdlého betonu se zvýší pevnost přibližně o 15 %. Přísadou má být také pozitivně ovlivněna nasákavost, propustnost a odolnost proti chemickým vlivům. [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]

V celkovém pohledu na přísadu Xypex Admix a na její prezentaci produkt působí jako přísada pro zajištění vodonepropustnosti betonu. Dle prohlášení o vlastnostech k produktu Xypex Admix [21] se však jedná o práškovou přísadu do betonu a malt zpomalující tuhnutí s bází Xypex pro zvýšení vodotěsnosti betonu sekundární krystalickou reakcí. Dle normy

ČSN EN 934-2+A1 Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označení a značení štítkem [22] je tato přísada zařazena jako přísada zpomalující tuhnutí s označením 3.2.8. [3]

2.3. Samohojení betonu s krystalizačními přísadami

Smyslem rešerše je shrnutí dřívějších experimentů, které se týkají přímo zkoumání autogenního hojení betonu, případně cementové malty. Z množství nalezených článků byly jako nejhodnotnější vybrány práce Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments [1] (viz kapitola 2.4). a Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive [2] (viz kapitola 2.5). Tito dva zástupci jsou velmi cennými a obsáhlými zdroji a jejich výsledky a přístup k přípravám a k samotnému provádění experimentu by byla rozhodně škoda opomenout. Mezi českými zdroji autor nenalezl adekvátní experiment, který by se problematikou této diplomové práce zabíral více do hloubky. I přes to, že jsou zmíněné experimenty provedeny dostatečně kvalitně, je důležité si uvědomit, že k testování zacelení trhliny přistupují velice opatrně. Testování průsaku dle normy ČSN EN 12390–8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou [9] hovoří jasně jak v délce zatěžování vzorku, tak v předepsaném tlaku 0,5 MPa. Ani jeden z těchto dvou experimentů však vzorky takovýmto způsobem nezatěžuje. Prostudováním těchto zdrojů autor získal přehled o možnostech celého procesu experimentu začínajícím vytvářením betonových záměsí, přes snahu o vytvoření trhliny definovaných rozměrů, až po různé způsoby zatěžování a vyhodnocení účinnosti krystalizačních přísad.

2.4. Self–healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments [1]

2.4.1. Seznámení s tématem experimentu

Studie pojednává o analýze účinku krystalizačních přísad ve čtyřech různých prostředích na samohojící schopnost betonu ve srovnání s betonem referenčním. Srovnání účinnosti směsí proběhlo na základě testu propustnosti na vzorcích s vytvořenou trhlinou. Zároveň bylo pozorováno fyzické uzavření trhliny optickým mikroskopem. Účinnost byla posuzována popisem geometrických parametrů trhlin.

Hlavními cíli výzkumu jsou: analýza účinku krystalizačních přísad s odkázáním na vylepšení samohojících mechanismů; stanovení vlivu rozdílu prostředí, ve kterém testování

probíhá, na autogenní hojení betonu při porovnání betonu s krystalizačními přísadami a bez nich; vyvinutí a porovnání metody pro hodnocení autogenního hojení prvků s trhlinou založené na míře propustnosti vzorků a popisu geometrických charakteristik trhlín před a po autogenním hojení.

Bylo rozhodnuto, že největší trhlina v betonu bude vždy menší než 0,3 mm. Je to hodnota, do které by se měl beton s krystalizační přísadou spolehlivě zacelit. Trhlina byla vytvořena ve stáří vzorku 2 dny a první zkouška propustnosti betonu byla provedena den po vytvoření trhliny. Čas pro ukončení testování byl stanoven na 42 dní, protože dle dosavadních studií se trhliny do tohoto času spolehlivě zacelily.

Pro testování byly použity dvě záměsi. Referenční záměs, ve které nebyla použita krystalizační přísada a vzorky s přidávanými 4% krystalizační přísady na hmotnost cementu. Zajímavostí toho experimentu je vystavení obou záměsí různým vodním prostředím. Konkrétně se jedná o ponoření do vody, kontakt s vodou, vlhkostní komoru a vystavení vzduchu v laboratorních podmínkách.

S ohledem na zadání experimentu byl zvolen beton vyztužený ocelovými vlákny. Vyztužení mělo pozitivní efekt rovnou ve dvou rovinách – jednak pomohlo při vytváření trhliny tím, že zabránilo rozpadnutí vzorku na dvě poloviny a jednak jím bylo zajištěno, že se trhlina v průběhu času při testování nehýbala a zůstala po celou dobu experimentu bez negativního vlivu deformace. Vlákna byla ve směsi v množství 40 kg/m³, právě tak, aby byla splněna kritéria pro jednoduché vytvoření trhliny ve vzorku za zabránění nadměrnému nežádoucímu rozšíření trhlín. Co se týká samotného složení betonu, tak za zmínku stojí zejména fakt, že v referenční receptuře i v receptuře s přidávanou krystalizační přísadou bylo použito 350 kg/m³ cementu, což je více než dost samo o sobě na to, aby se v betonu nastartoval proces samohojení i bez krystalizační přísady.

Na tomto místě by autor rád zmínil, že použití drátkobetonu dle tohoto experimentu je skutečně dobrým řešením, protože v rámci jeho vlastního experimentu se s tímto problémem potýkal, a to až v míře destrukce vzorků při testování, kvůli nízké pevnosti, zapříčiněné vytvořenou, testovanou trhlinou.

2.4.2. Experimentální část

Z obecných zkoušek byly provedeny následující. Zkouška pevnosti v tlaku po 28 dnech na válci a zkouška sednutí kužele. Testování betonu na pevnost v tlaku ukázalo, že beton s přidávanou krystalizační přísadou má lepší pevnost v tlaku asi o 15 % a zkouška sednutí kužele ukázala, že referenční beton poklesl o 13 cm a beton s krystalizační přísadou poklesl o 15 cm.

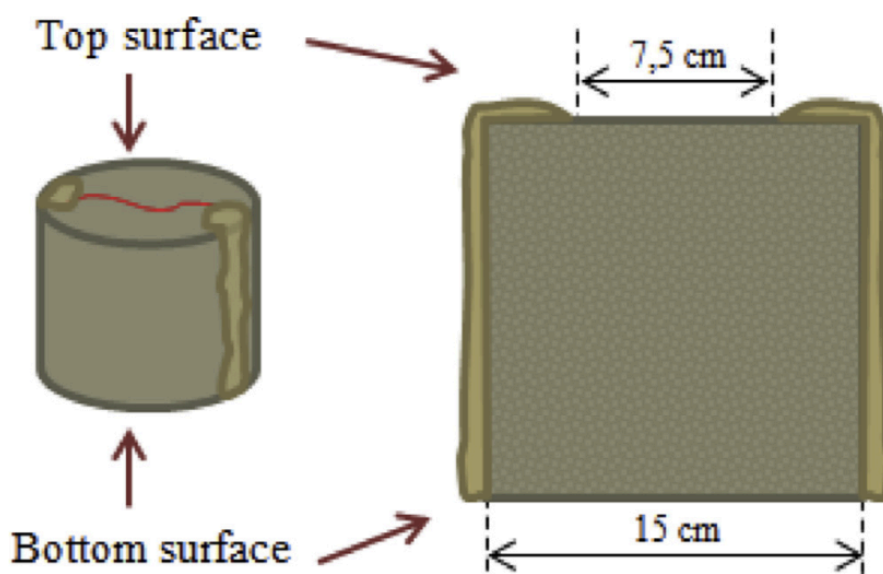
Zde je dobré zmínit, že tyto výsledky jsou v souladu s obecnými informacemi výrobců krystalizačních přísad, že pevnost roste o 10 až 15 % a také, že krystalizační přísada zlepšuje zpracovatelnost betonu. Naproti tomu stojí několik experimentů [11, 12], ve kterých pevnost betonu v tlaku vyšla nakonec nižší než pevnost betonu referenčního. V případě experimentu Vliv krystalizačních příměsí na pevnost betonu v tlaku [11] byly testovány vzorky betonu pevnosti C16/20. Zkoušky pevnosti prokázaly, že při použití přísady Penetron Admix v množství 2 % obsahu cementu klesla pevnost betonu z 36,8 MPa referenční záměsi na 36,2 MPa pro záměs s krystalizační přísadou. Studie s názvem Vliv sekundární krystalizace na vlastnosti betonu [12] se zabývala komplexním přehledem vlivu krystalizačních přísad na vlastnosti betonu. Zkouškami pevnosti betonu bylo opět prokázáno, že se pevnost vzorků s přidanou krystalizační přísadou Xypex Admix C-1000 při koncentraci 2 % snížila z 52 MPa na 49 MPa a v případě přísady Xypex Admix C-1000 NF se pevnost snížila dokonce na hodnotu 47 MPa. K nižším pevnostem dospěl i autor této diplomové práce v jeho bakalářské práci s názvem Krystalizační přísady a odolnost betonu proti působení tlakové vody [3].

Experiment probíhal dle následujícího postupu. V první fázi byl prvek řízeně poškozen tak, aby v něm vznikla trhlina s požadovanými charakteristikami. To se provádělo tak, že byly válcové vzorky o průměru 150 mm a výšce 150 mm uloženy vodorovně do lisu pro zkoušku tlakem. Následkem silového působení, které ve vzorku vyvolalo napětí v příčném tahu, vznikla v prvku svislá trhlina. Její šířka byla kontrolována kalibrovaným měřítkem. Šířka trhliny byla považována za dostatečně vhodnou, pokud se pohybovala v rozmezí 0 – 0,3 mm. Ve druhé části byly vzorky vystaveny různým vodním/vlhkostním prostředím. Závěrem je pozorován a vyhodnocen efekt autogenního hojení, a to v podobě geometrických parametrů trhlín – její šířky, případně plochy.



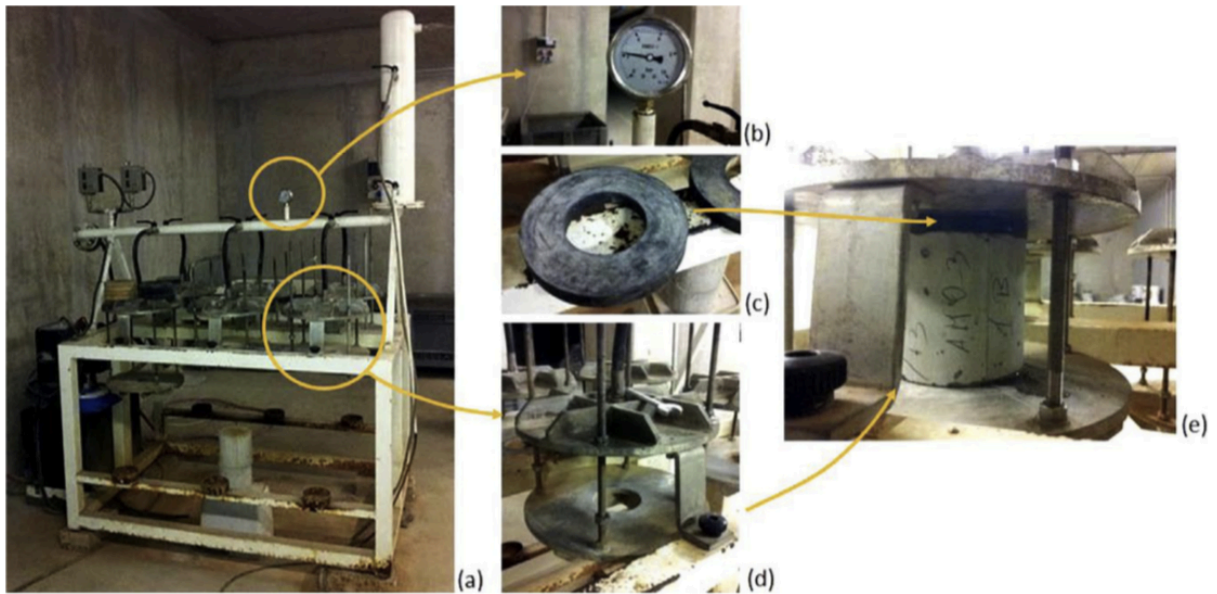
Obr. 1: Proces tvorby trhliny na betonovém prvku

Při testování prvků zkouškou propustnosti musel být vzorek zajištěn tak, aby voda neprotékala po celém obvodu prvku, ale aby její dráha vedla od spodní podstavy k horní části, se zamezením úniku vody z povrchu pláště. Pro zajištění nepropustnosti pláště byla podélná trhlinka utěsněna epoxidovou pryskyřicí. Utěsnění bylo provedeno tak, aby nevstupovalo do trhliny – je provedeno externě. Měření propustnosti probíhalo při tlaku 5 barů, a to po dobu pěti minut. Předpoklad vývoje experimentu v čase je takový, že pokud dojde k zacelování trhlinky, tak by se měl průtok zmenšovat.



Obr. 2: Názorné zobrazení utěsnění pláště vzorku epoxidovou pryskyřicí

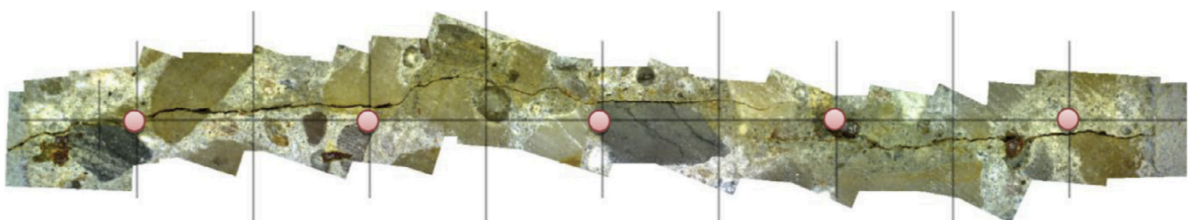
K samotnému pozorování trhliny bylo přistupováno skutečně velmi detailně. Kromě měření propustnosti byla měřena i geometrie vytvořené trhliny v čase. Měření je založeno na složení panoramatických snímků, které nakonec vytváří snímek trhliny po celé její délce. K samotnému měření bylo přistoupeno dvěma způsoby. Trhlinka byla měřena buď ve vybraných bodech nebo probíhalo měření a následná analýza celé plochy trhliny.



Obr. 3: Přístroj pro měření permeability a jeho části – manometr, těsnící kroužek, pomocná konstrukce a testovaný vzorek

V tomto experimentu byly měřeny 4 parametry:

- Maximální šířka trhliny podél celé zkoumané délky vyhodnocená pomocí softwaru z fotografií.
- Průměrná šířka trhlin určená s pomocí softwaru v pěti pevných pozicích a následně zprůměrovaná
- Plocha trhliny, která byla vypočtena pomocí pěti určených bodů pro výpočet průměrné šířky trhlin. Každý bod měl přidruženou délku, která k němu byla vztažena. Přidružená délka v mm byla vynásobena šířkou trhliny v konkrétním místě a výsledkem byla plocha trhliny v daném úseku.
- Měření černých pixelů pomocí grafického softwaru, který je spočítal. Jejich množství poukazuje na velikost oblasti trhliny. Kvůli pórům, které jsou mimo trhlínu, musel být snímek ještě mimo oblast trhliny vyčištěn, aby nevznikla při sčítání plochy chyba.



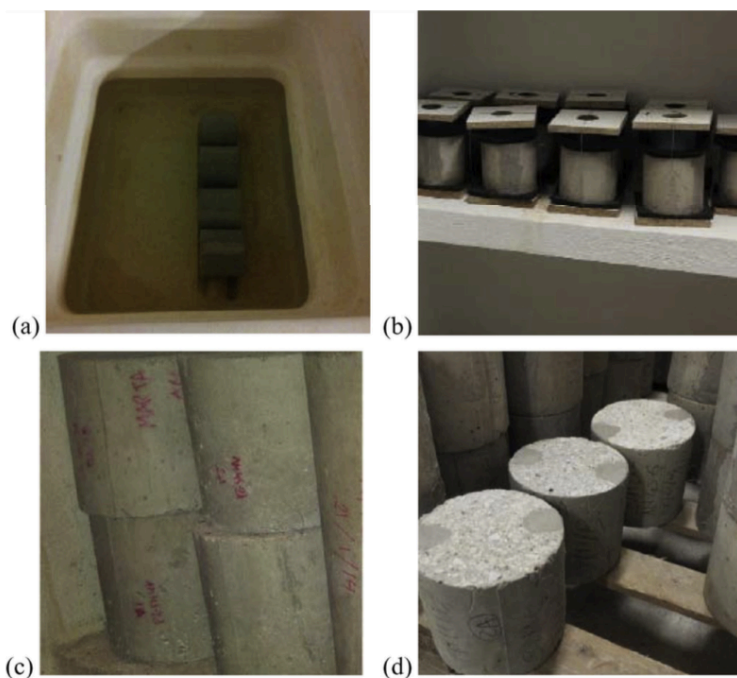
Obr. 4: Panoramatický snímek horní trhliny a mřížky označující měřící body



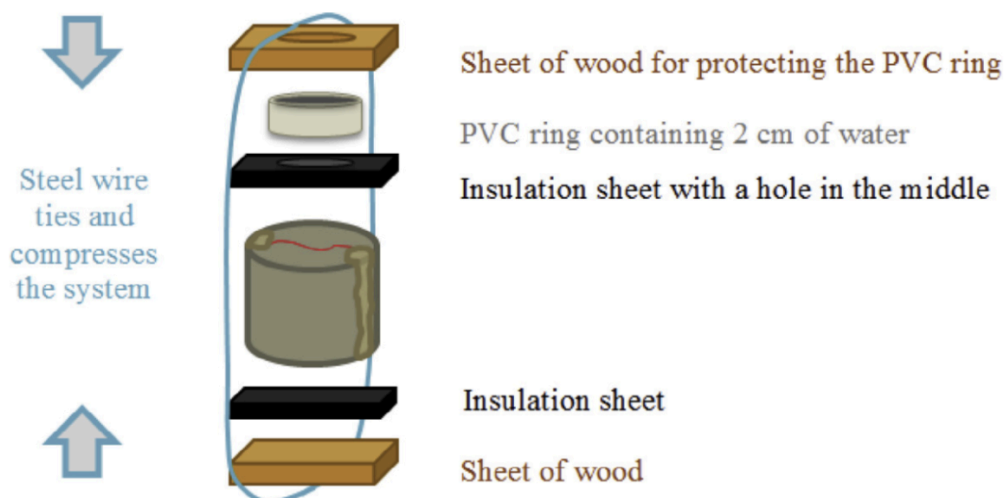
Obr. 5: Panoramatický snímek horní trhliny a její černé pixely (před čištěním)

Experiment byl proveden s proměnnou v podobě různých vlhkostních podmínek působících na beton.

- *WI (Water immersion)* Ponoření vzorku do vody z vodovodu v laboratorních podmínkách bez obnovy vody během hojení za teploty 15–16 °C. Tento způsob expozice má za cíl simulovat podkladní betonové prvky.
- *WC (Water contact)* Trhlina horní podstavy je vystavena tlaku výšky vodního sloupce 2 cm. Vzorky byly takto uloženy do vlhké komory s relativní vlhkostí cca 95 %. Dodatečná voda byla v případě potřeby dodávána tak, aby byl udržen konstantní sloupec vody výšky 2 cm. Účelem vystavení takovýmto podmínkám je simulace, kdy je jedna strana stěny vystavena velmi nízkému vodnímu tlaku a druhá strana je neexponovaná – jedná se například o podzemní stěny.
- *HC (Humidity chambre)* Skladování vzorků uvnitř standardní vlhkostní komory. HC simuluje betonové prvky, které nejsou v přímém kontaktu s vodou, ale konstrukčně se jedná o prostředí s vysokou vlhkostí.
- *AE (Air exposure)* Vzorky byly skladovány v normálních laboratorních podmínkách bez přístupu vnějších vlivů při přibližné teplotě 17 °C a relativní vlhkosti 40 %. Touto metodou je simulováno prostředí bez přímého kontaktu s vodou a s průměrnou vlhkostí.



Obr. 6: Čtyři expozice: a) ponoření do vody, b) kontakt s vodou, c) vlhkostní komora a d) expozice na vzduchu



Obr. 7: Názorné zobrazení simulace podmínek „kontakt s vodou (WC)“

2.4.3. Vyhodnocení

Z pozorování trhlin lze vyčíst následující informace. V kontrolních vzorcích s přidáním krystalizační přísady byly vytvořeny bílé formace, které poukazují na přítomnost krystalů zacelujících trhlinu. Jejich přítomnost se ovšem objevila jen u vzorků WI a WC. U vzorků WI, kde byly obě podstavy v kontaktu s vodou, zarostly trhliny na obou podstavách. U vzorků WC, kde byla v kontaktu s vodou jen jedna podstava, zarostla trhlina právě v ní. Z toho vyplývá, že transport vody přes trhlinu se zatížením vodou jen z jedné strany nestačí pro

zajištění hojení na obou površích. Trhlina ve vzorku může vést buď skrz cementovou pastu nebo skrz kamenivo. Vyhodnocením vzorků bylo zjištěno, že většina vytvořených krystalických formací pochází z cementové pasty, to je však očekávané, protože krystalizační přísada je rozptýlena v betonové matici mezi částicemi cementu.

Vyhodnocení zkoušky permeability lze vidět na jednoduchém grafu viz obr. 9, ve kterém jsou srovnány referenční záměs a záměs s přidanou krystalizační přísadou ve všech čtyřech prostředích, ve kterých byly vzorky uloženy. Zkouška byla vyhodnocena dle jednoduchého vzorce.

$$\text{Healing rate} = 1 - \frac{\text{Final flow}}{\text{Initial flow}} = 1 - \frac{Q_{42}}{Q_0}$$

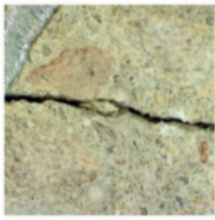
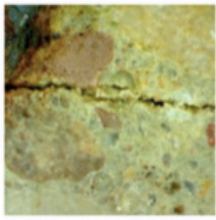

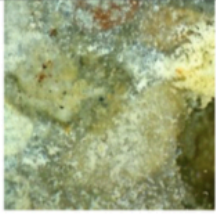
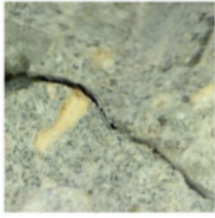

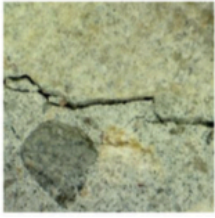
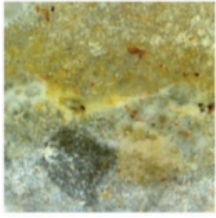
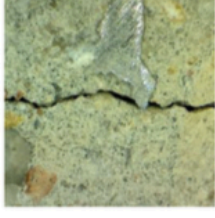
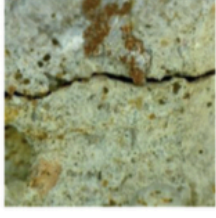


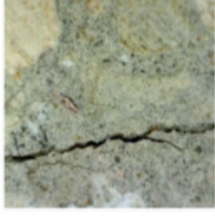
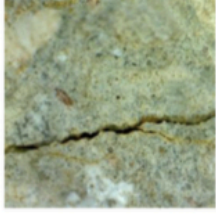


Healing rate – míra zahojení

Final flow – průtok prvkem na konci experimentu – po hojení

Initial flow – průtok prvkem na začátku experimentu – před hojením

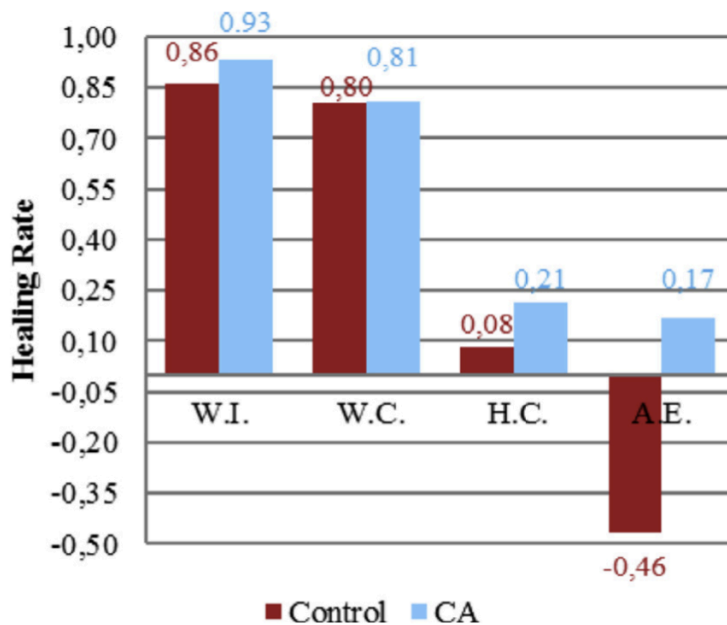
Ze vzorce vyplývá, že výsledek, který generuje, by se měl pohybovat mezi hodnotami 0 a 1. Pokud vyjde Healing rate roven 1, znamená to, že se trhlina zahojila absolutně a po 42 dnech skrze ni nic neprotéká. Pokud je Healing rate roven 0, pak se trhlina nezahojila vůbec a průtok po 42 dnech je totožný s průtokem v den 0. V extrémním případě může Healing rate nabýt i záporné hodnoty. Tato situace může nastat tehdy, když se například beton, který je uložen v laboratoři v kontaktu se vzduchem, začne smršťovat.

Na základě výsledků lze říci, že čím je vzorku k dispozici více vody, tím lépe proces samohojení probíhá. Dále, že přirozená vlhkost prostředí není absolutně dostatečná pro samohojení betonové konstrukce, a to ani tehdy, je-li ve směsi krystalizační přísada. Vliv krystalizační přísady se při dostatečné dotaci vody do vzorku jeví jako zanedbatelný. Při nedostatečném přísunu vody se vzorky s přísadou zahojí relativně více než vzorky bez přísady, avšak absolutní míra zahojení je i tak zanedbatelná.

		Control concrete		Concrete with Crystalline Admixtures	
		Before healing	After healing	Before healing	After healing
EXPOSURE	Water Immersion		 →		 →
		Crack closure ~ 75%		Crack closure ~ 100%	
	Water Contact		 →		 →
		Crack closure ~ 60%		Crack closure ~ 100%	
Humidity Chamber		 →		 →	
	Crack closure ~ 0 %		Crack closure ~ 0 %		
Air Exposure		 →		 →	
	Crack closure ~ 0%		Crack closure ~ 0 %		

Obr. 8: Fotografie trhliny na začátku experimentu a na konci s proměnnými v podobě rozdílů referenční záměsi a záměsi s přidáním krystalizační přísady v jedné rovině, a s proměnnými v podobě rozdílných podmínek uložení v rovině druhé

Z fotografií trhlin je vidět, že krystalizační přísada odvedla vizuálně svoji práci. V podmínkách přímého kontaktu s vodou byla trhlina skutečně zacelena lépe u vzorků s použitím krystalizační přísady. Vizuální zlepšení však neznamená fyzické utěsnění pro zkoušku permeability, jak je vidět z následujícího grafu.



Obr. 9: Graf zobrazující míru Healing rate pro referenční záměs a záměs s přidanou krystalizační přísadou v různých podmínkách uložení vzorků, vycházející ze zkoušky propustnosti betonových zkušebních prvků

Z grafu lze vyčíst, že navzdory vizuálnímu zacelení trhliny, kde se rozdíl v účinnosti krystalizační přísady jeví například jako 40 %, pokud se podíváme na fotografie vzorků v kontaktu s vodou (Water Contact), ve skutečnosti zkouška permeability vyšla téměř totožně. Z relativně malého rozdílu výsledků referenční záměsi a záměsi s přidanou krystalizační přísadou, v kombinaci se znalostí vizuálního zacelení trhliny, se autor domnívá, že se nelze spolehnout v kontextu krystalizačních přísad pouze na vizuální dojem, ale je vhodné zabývat se problémem doslova do hloubky a uvažovat nad tím, co se děje v trhlíně v místech, kam již vidět není a zda krystalická struktura, kterou trhlina zarostla, nabývá skutečně dostatečných vodonepropustných vlastností pro zaručenou funkčnost a spolehlivost.

2.4.4. Závěr

Z celého experimentu vyplývají následující závěry. Hodnota Healing rate, která je vypočtena z výsledků permeability, je spolehlivým ukazatelem efektivity autogenního hojení betonu. Metoda měření plochy černých pixelů trhliny dosahovala nejvyšších rozdílů naměřených hodnot.

Vzorky, ve kterých byla použita krystalizační přísada, vykazovaly stabilnější a spolehlivější chování v testech autogenního hojení betonu. Dosahovaly nižšího rozptylu a dobře čitelného trendu.

Přítomnost vody v trhlině je rozhodující pro efektivitu autogenního hojení betonových konstrukcí, a to jak pro standardní – referenční beton, tak pro beton s přidanou krystalizační přísadou. Vzorky, které nejsou dostatečně vystaveny vodnímu prostředí, se neuzdravují bez ohledu na použití krystalizačních přísad.

2.5. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive [2]

2.5.1. Seznámení s tématem experimentu

Předmětem zkoumání byl potenciál samohojícího účinku materiálů na bázi cementu, s obsahem expanzivní přísady na bázi síranu vápenatého (CSA) a krystalické přísady (CA). Pro testování byly použity vzorky malty. Při době zrání 28 dnů byly na vzorcích vytvořeny trhliny o šířce 0,1 až 0,4 mm. Vzorky s trhlinou byly ponořeny do vody pro nastartování procesu samohojení. Optimální recepturou byla sledována směs Portlandského cementu s přidanými 10 % expanzivní přísady na bázi síranu vápenatého (CSA) a s 1,5 % krystalizační přísady (CA). Touto směsí se podařilo během 28 dnů zacelit trhlinu 0,249 mm.

V tomto experimentu bylo do zkoumání zařazeno poměrně velké množství směsí. Jejich receptury lze vidět v tabulce 1:

Tab. 1: Složení jednotlivých záměsí [2]

Mix design of mortars by mass ratio.

Mix	Description	OPC	CSA- α	CSA- β	CA	Water	Sand
M1	Control	100	–	–	–	25	200
M2	CA1.5	98.5	–	–	1.5	25	200
M3	CA4	96	–	–	4	25	200
M4	CSA α	90	10	–	–	25	200
M5	CSA β	90	–	10	–	25	200
M6	CA1.5/CSA α	88.5	10	–	1.5	25	200

- M1 Referenční složení
- M2 Referenční složení s přidanými 1,5 % krystalizační přísady (CA)
- M3 Referenční složení s přidanými 4 % krystalizační přísady (CA)
- M4 Referenční složení s přidanými 10 % expanzivní přísady na bázi síranu vápenatého (CSA α)

-
- M5 Referenční složení s přidanými 10 % expanzivní přísady na bázi síranu vápenatého (CSA β)
- M6 Referenční složení s přidanými 10 % expanzivní přísady na bázi síranu vápenatého (CSA α) a 1,5 % krystalizační přísady (CA)

Rozdíl mezi expanzivními přísadami CSA α a CSA β je především v tom, že CSA β obsahuje více volného CaO, což způsobuje pomalejší hydrataci. [2]

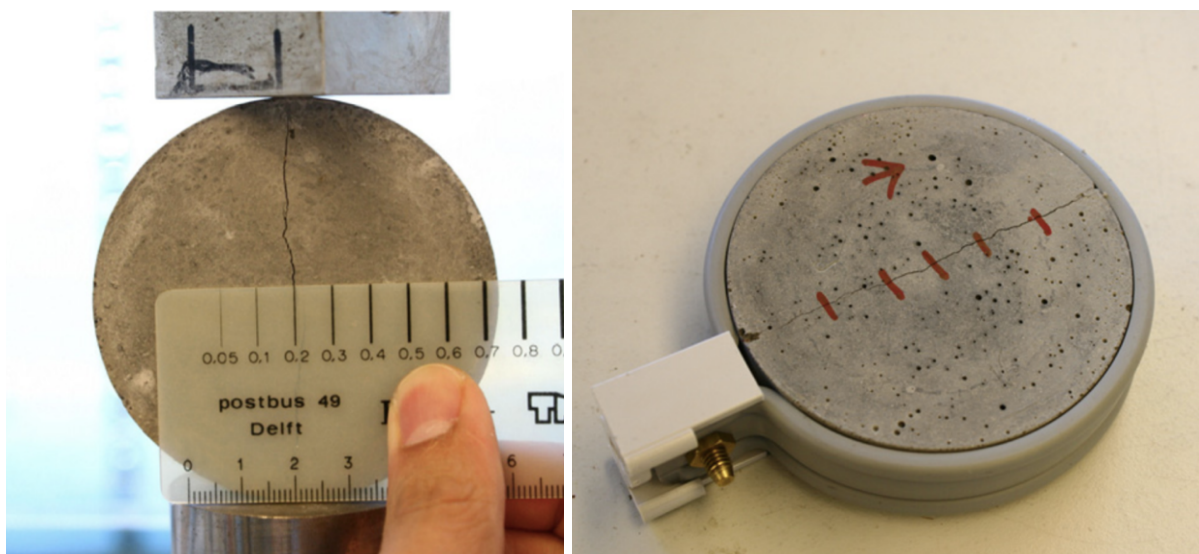
2.5.2. Experimentální část

Zkušební vzorky byly vytvořeny celkem ze šesti různých záměsí a práce je tudíž vcelku komplexní a rozsáhlá. Testovaná směs byla navržena s vodním součinitelem 0,25 a poměrem písku k cementu 2,0. Pro dosažení dobré zpracovatelnosti malty byl použit superplastifikátor Glenium ACE30. Vytvoření vzorků proběhlo odlitím do forem o průměru 75 mm a výšce 20 mm. Pro vytvoření trhliny byla do vzorků vložena pozinkovaná drátěná síť, která byla umístěna uprostřed vzorku – v rovině 10 mm. Takto vyplněné formy byly dále vibrovány po dobu 20 s na vibračním stole a po 24 hodinách byly odbedněny. Následovalo uložení vzorků do vlhkého prostředí s relativní vlhkostí 95 ± 5 % o teplotě 25 ± 2 °C na dobu 3 dnů. Závěrem proběhlo vystavení laboratornímu vzduchu po dobu 25 dnů.

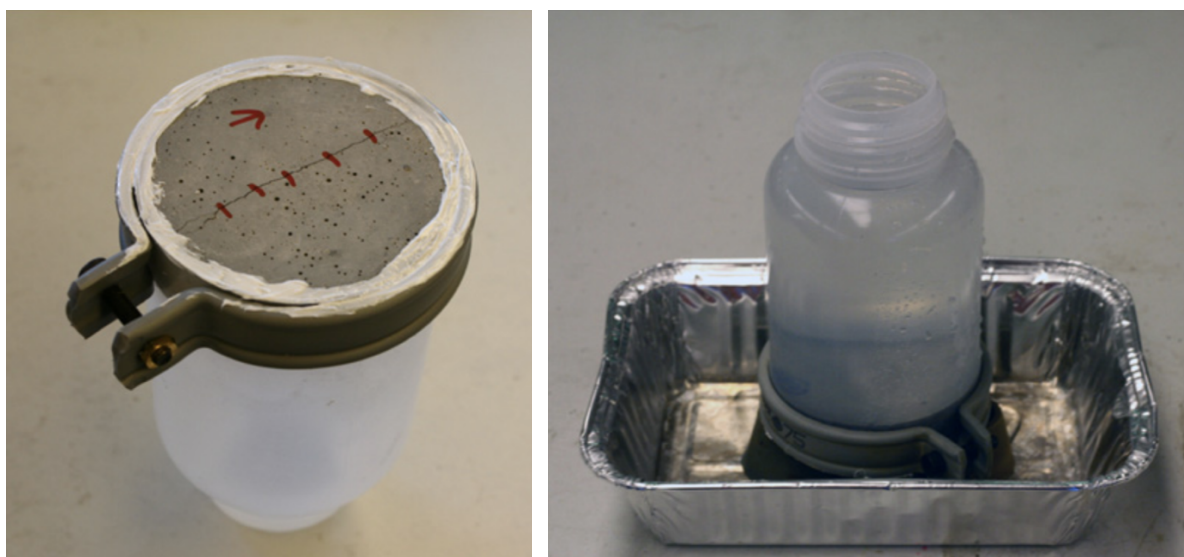
Ve vzorcích byly vytvořeny trhliny povrchové šířky 0,1 až 0,4 mm. Ty vznikly od namáhání příčným tahem při zatížení v lisu a jejich šířka byla kontrolována kalibrovaným měřítkem. Po vytvoření trhlin byly vzorky uloženy do PVC kroužků. Šířka trhliny byla měřena stereomikroskopem Leica LAS. Měření probíhalo v pěti jasně vyznačených polohách na vzorku, přičemž vzdálenost mezi nimi byla přibližně 10 mm. Počty vzorků byly nastaveny tak, že nakonec vzniklo pro každou záměs 20 měřených pozic, kde byla odečítána šířka trhliny. Měření probíhalo každých 7 dní, zároveň s výměnou vody. Aby se předešlo vlivu jednotlivých záměsí na záměsi ostatní, byly rozdílné vzorky uloženy v separátních nádržích.

Testování samohojení probíhalo zkouškou průtoku vody. Jednalo se pouze o vodu gravitační. PVC kroužek, ve kterém byl umístěn vzorek, byl utěsněn tmelem tak, aby voda nemohla po jeho obvodě uniknout. Zkoumalo se, kolik vody proteče trhlinou za omezený časový interval. Každý vzorek byl testován pomocí soustavy, která se skládala z PVC kroužku, ve kterém byl umístěn vzorek a z plastové nádoby, která byla k PVC kroužku a testovanému vzorku přidělena tak, jako na obr. 12. Díky této nádobě byl v horní podstavě vzorku udržován konstantní vodní sloupec výšky 100 ± 5 mm. Takto testovaná soustava byla celou dobu umístěna na podpěrkách, aby voda mohla do misky pod soustavou bez problému

proudit, viz obr. 13. Zkouška byla provedena ve stáří betonu 4, 7, 8, 14, 15 a 28 dnů. Měření průtoku trvalo pokaždé 10 minut.



Obr. 10, 11: Vlevo tvorba trhliny na vzorku, vpravo vzorek v PVC chrániče

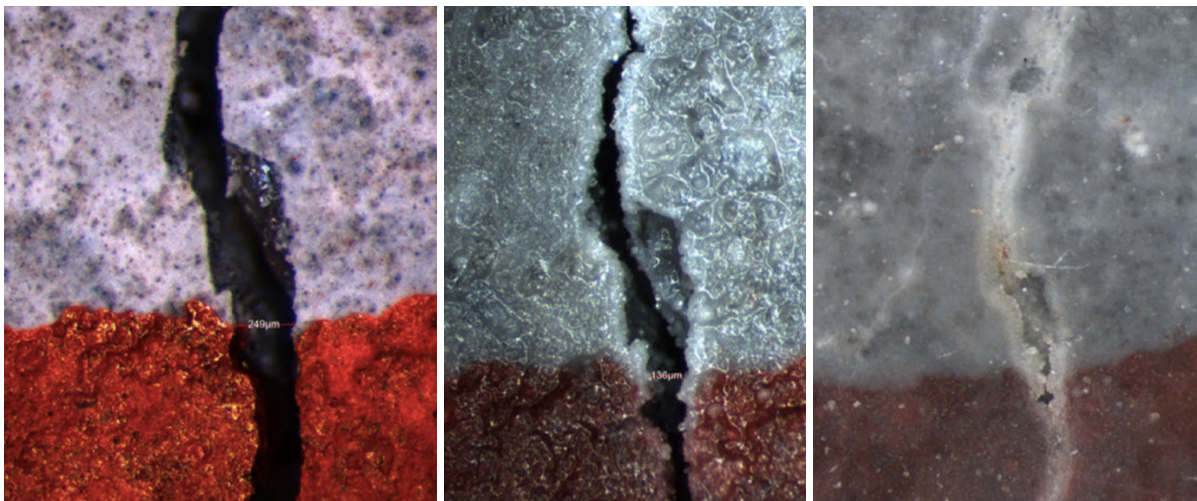


Obr. 12, 13: Vlevo příprava vzorku pro zkoušku propustnosti vody, vpravo zkušební soustava

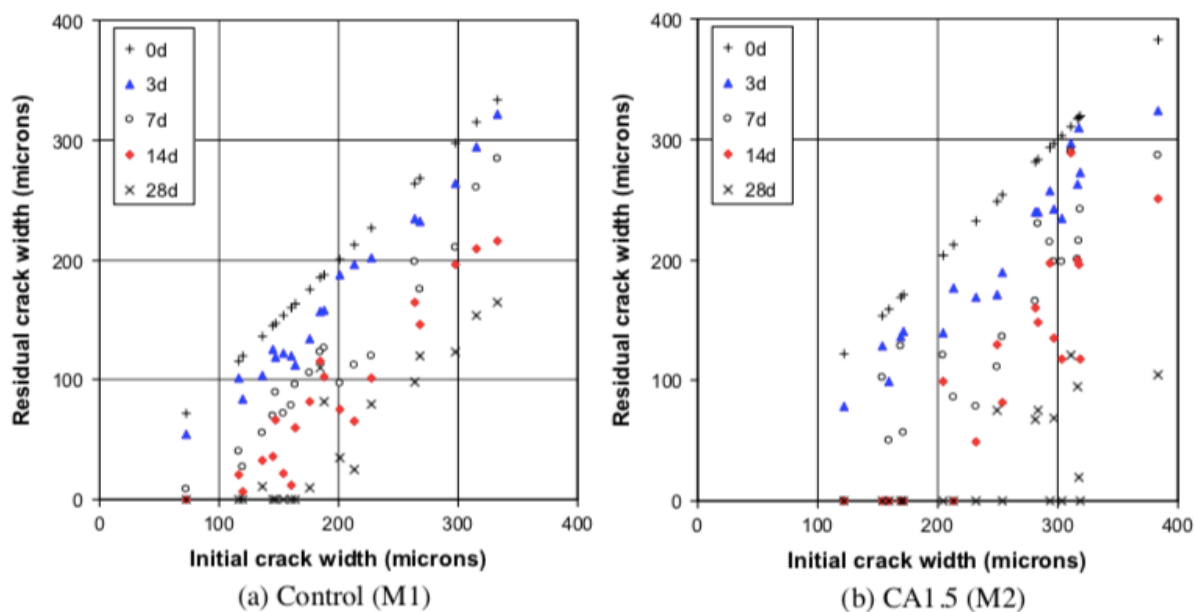
2.5.3. Vyhodnocení

Jako ukazatel kvantitativního vyhodnocení samohojení trhliny byla vzata změna šířky trhliny na povrchu vzorku. Nebyl zřejmý rozdíl v uzavírání trhliny na horní či spodní ploše zkušebního tělesa. U směsi s přidáním Xypexem bylo prokázáno, že lze během 28 dnů zacelit trhlínu o šířce přibližně 0,2 – 0,25 mm. Výsledky byly prezentovány v poměru relativní šířky trhlín k počátečním hodnotám. Na počátku testování byla naměřena rychlost průtoku vody

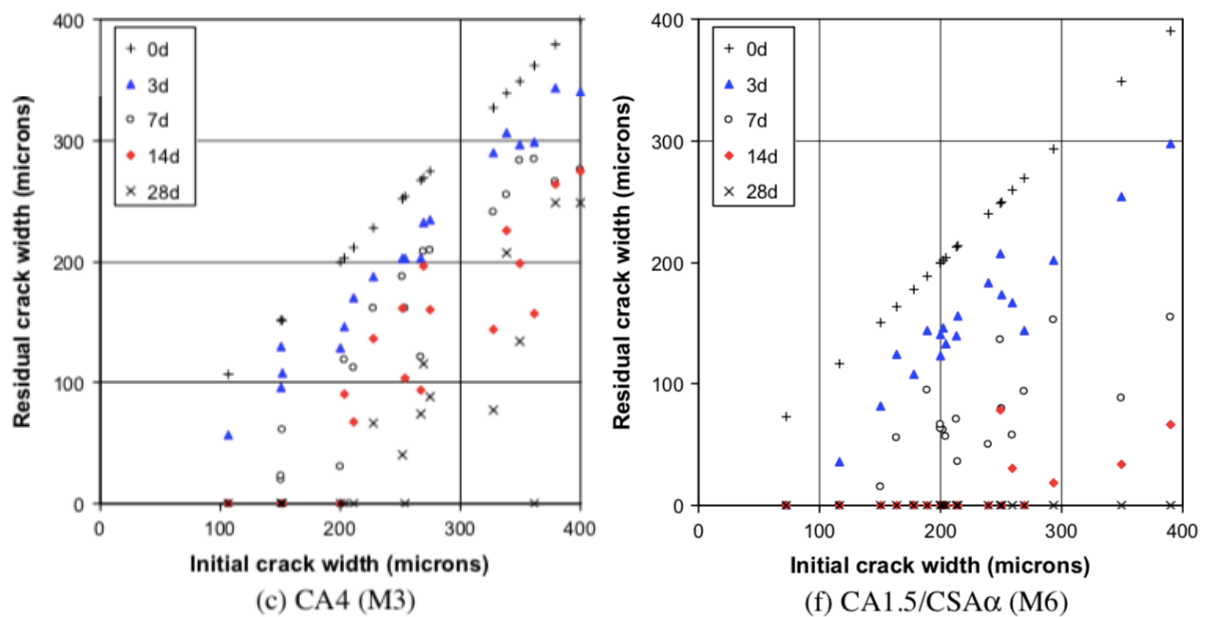
trhlinou v rozmezí mezi 22 a 35 g/min. V grafech jsou použity relativní hodnoty průtoku. Malta s přidanou krystalizační přísadou prokázala snížení průtoku vody již po prvních pěti až sedmi dnech. Dalším zkoumáním bylo ukázáno, že větší vliv na snížení průtoku vody mělo hojení povrchových trhlin než vnitřní hojení. Je důležité zmínit, že zahojením povrchové trhliny nedochází k opravě mechanických vlastností malty či betonu.



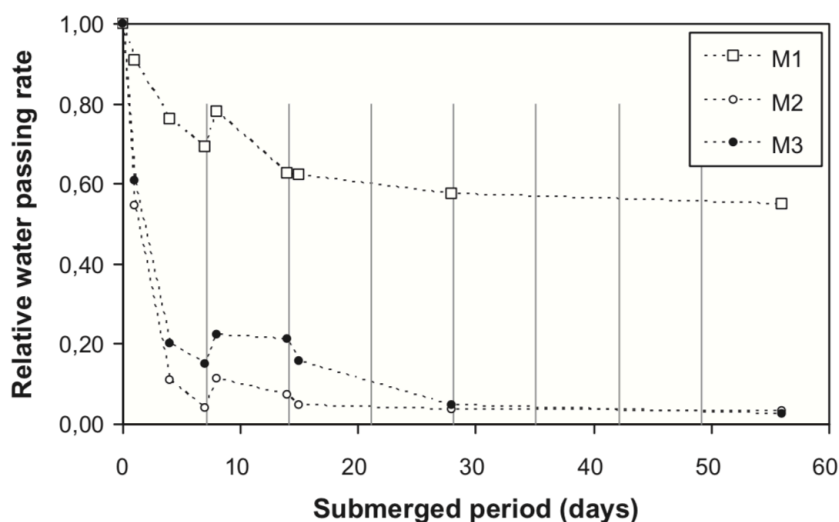
Obr. 14, 15, 16: Vlevo počáteční trhlina šířky 0,249 mm, uprostřed trhlina po 7 dnech šířky 0,136 mm a vpravo zacelená trhlina po 28 dnech; jedná se o recepturu s nejlepšími dosaženými výsledky M6



Obr. 17, 18: Analýza zacelení trhliny, vlevo výsledky směsi M1, vpravo směsi M2



Obr. 19, 20: Analýza zacelení trhliny, vlevo výsledky směsi M3, vpravo směsi M6



(a) Control and mortars with CA

Obr. 21: Relativní rychlost průtoku vody maltou referenční M1, s přidaným 1,5 % Xypexu M2 a s přidanými 4 % Xypexu M3.

Z obr. 21 je vidět efektivita množství přidané krystalizační přísady v čase. Lze vyčíst, že účinnost krystalizační přísady v množství 1,5 % i 4 % je ve srovnání s referenční záměsí výrazná. Samotný rozdíl mezi 1,5 % a 4 % v koncentraci krystalizační přísady je patrný pouze po dobu 28 dní a při zvážení ceny krystalizačních přísad je zanedbatelný. Po 28 dnech je účinnost stejná. Obecně lze tedy říci, že krystalizační přísada má smysl právě v množství 1,5 % kdy je její efektivita, při zvážení ekonomické náročnosti, maximálně využita.

2.5.4. Závěr

Po vyhodnocení experimentu lze konstatovat, že krystalická přísada má pozitivní vliv na samohojení betonu. V případě referenční směsi bylo prokázáno, že se uzavřela povrchová trhлина do šířky přibližně 0,15 mm během 28 dnů. Pokud se zvýší koncentrace krystalické přísady na 4 %, lze očekávat, že se zahojí trhлина o šířce 0,25 až 0,4 mm. Nejlepších výsledků samohojení bylo dosaženo díky receptuře, která byla složena z referenční receptury s přidanými 10 % expanzní přísady na bázi síranu vápenatého (CSA) v kombinaci s 1,5 % krystalizační přísady – tato receptura, označována jako M6, prokázala velký vliv hojení při zacelení trhliny šířky 0,249 mm do 28 dnů.

3. Podstata vlastního experimentu

3.1. Cíl experimentu

Cílem experimentu provedeného autorem práce bylo zejména ověřit vliv krystalizační přísady Xypex Admix C–1000 NF z hlediska schopnosti zacelení trhlin v betonu ve srovnání s referenčním betonem a betonem se zvýšeným obsahem cementu, dále pak vyhodnotit pevnost betonu v tlaku a odolnost betonu proti průsaku tlakovou vodou.

3.2. Plán experimentu

Hlavní myšlenkou pro otestování vlivu Xypexu bylo vystavit beton s krystalizační přísadou Xypex působení vody v běžném laboratorním uložení po dostatečně dlouhou dobu a tím umožnit betonu spuštění procesu samohojení trhlin. Díky tomuto procesu lze závěrem z dlouhodobého hlediska prokázat zkouškou průsaku tlakovou vodou, zda skutečně krystalizační přísada urychluje zarůstání trhlin v betonu a zároveň, jak kvalitní je matrice, kterou se mezera zacelila. Hlavní experiment byl proveden během sedmi měsíců. Z každé záměsi bylo zhotoveno celkem 19 betonových krychlí. Záměsi byly tři.

3.3. Návrh receptur testovaných betonů

Pro experiment jsou navržena celkem 3 různá složení betonu. Prvním složením je referenční beton – zkráceně REF, který slouží pro porovnání s dalšími modifikovanými recepturami. Druhé složení je REF s přidanou krystalizační přísadou Xypex Admix C–1000 NF, v práci označen jako XYP. Třetí vzorek je opět REF, ale s přidaným množstvím cementu, značen zkratkou CEM. Konkrétní receptury jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 2: Tabulka složení betonu na 1 m³

Návrh složení betonové směsi na 1 m ³								
Název betonu	Kamenivo [kg]			Cement [kg]	Voda [kg]	Xypex [kg]	Plastifikátor [kg]	Vypočtená objemová hmotnost [kg/m ³]
	0/4	8/16	11/22					
REF	1000	571	343	287	175	0,000	1,148	2377
XYP	1000	571	343	287	175	2,870	1,148	2380
CEM	938	560	336	331	175	0,000	1,324	2341

Tab. 3: Tabulka složení betonu na 70 litrů (pro záměs v laboratorní míchačce)

Návrh složení betonové směsi na 0,07 m ³ (70 litrů)							
Název betonu	Kamenivo [kg]			Cement [kg]	Voda [kg]	Xypex [kg]	Plastifikátor [kg]
	0/4	8/16	11/22				
REF	70,00	40,00	24,00	20,09	12,25	0,00	0,080
XYP	70,00	40,00	24,00	20,09	12,25	0,201	0,080
CEM	65,66	39,20	23,52	23,17	12,25	0,00	0,093

Použité kamenivo

Pro frakci 0/4 bylo použito drobné těžené kamenivo z pískovny v Zálezlicích. Pro frakce 8/16 a 11/22 bylo dovezeno hrubé drcené kamenivo z lomu v lokalitě Holý Vrch.

Cement

Pro experiment byl použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Radotín.

Voda

Jako záměsová voda byla použita voda pitná.

Krystalizační přísada

Testovaná krystalizační přísada má název Xypex Admix C-1000 NF. Příklad byla přidána v množství 1 % hmotnosti cementu.

Plastifikátor

Za účelem lepší zpracovatelnosti betonové směsi byla použita plastifikační přísada Sika ViscoCrete 1035. Jedná se o univerzální a velmi účinný ztekucovač pro vysoce pevnostní betony. Dávkována byla v množství 0,4 % hmotnosti cementu.

4. Vývoj postupu pro vytvoření trhliny definované šířky

4.1. Úvod

Pro otestování samohojení trhliny v betonu je nezbytným krokem vymyšlení způsobu, jak bude trhlina v testovaném prvku vytvořena. Hlavní myšlenkou bylo vytvoření trhliny s co nejrealističtějšími parametry. Snahou bylo simulovat trhlinu, která může vzniknout například v podzemní stěně namáhané ohybem. Za tímto účelem bylo přistoupeno k tvorbě trhliny na železobetonových trámcích, které byly vyztuženy a namáhány třibodovým ohybem. Postup byl zahájen pomocí teoretického výpočtu šířky trhlín, kterým byla vypočtena potřebná šířka trhliny pod zatížením tak, aby po odtížení zůstala v prvku trhlina požadované velikosti do 0,4 mm. Při vytváření trhliny v laboratoři byla potřebná šířka trhliny pod zatížením doladěna tak, aby nabyl výsledek po odtížení požadované šířky, protože teoretickým výpočtem byly získány předpokládané hodnoty, které nebyly ve shodě s reálným měřením.

4.2. Teorie

Teoretický výpočet je založen na výpočtu šířky trhlín v ohýbané železobetonové konstrukci pod zatížením podle postupu definovaného v ČSN EN 1992-1-1. Problémem je, že daný výpočet neřeší velikost trhliny po odtížení konstrukce, kdy dojde k jejímu úplnému či částečnému uzavření. Proto musel být lehce přizpůsoben pro potřeby experimentu.

Předpokladem správnosti teoretického výpočtu je zatížit betonový trámec třibodovým ohybem, který zajistí vytvoření ideálně jedné trhliny. Prakticky vzniknou trhliny většinou dvě, ale stále je to příznivější varianta než rovnoměrný rozvoj trhlín od ohybu čtyřbodového.

Betonový trámec je vyztužen dvěma pruty průměru 8 mm se střední hodnotou meze kluzu $f_{ym} = 550$ MPa. Výpočtem lze zjistit, při jakém působícím momentu bude ve výztuži dosažena mez kluzu.

Materiálové charakteristiky

$$f_{cm} = 38 \text{ MPa}$$

$$f_{ym} = 550 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 32 \text{ GPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200}{32} = 6,25$$

kde je:

f_{cm} – průměrná pevnost betonu

f_{ym} – střední hodnota meze kluzu oceli

f_{ctm} – průměrná pevnost betonu v tahu

E_{cm} – přibližná hodnota 28 denního modulu pružnosti betonu

E_s – modul pružnosti oceli

α_e – poměr modulu pružnosti oceli a modulu pružnosti betonu (pracovní součinitel)

Parametry konstrukce

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$c = 30 \text{ mm}$$

$$\phi_{s1} = 8 \text{ mm}$$

$$\phi_{s2} = 0 \text{ mm}$$

$$d = h - c - \frac{\phi_{s1}}{2} = 150 - 30 - \frac{8}{2} = 116 \text{ mm}$$

$$d_2 = c + \frac{\phi_{s2}}{2} = 30 + \frac{0}{2} = 30 \text{ mm}$$

$$A_{s1} = 100 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$A_{s2} = 0 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

kde je:

h – výška zkušebního tělesa

b – šířka zkušebního tělesa

c – krytí výztuže

Φ_{s1} – průměr tažené výztuže

Φ_{s2} – průměr tlačené výztuže

d – účinná výška průřezu

d₂ – vzdálenost od hrany průřezu na střed tlačené výztuže

A_{s1} – průřezová plocha tažené nebo méně tlačené (dolní) betonářské výztuže

A_{s2} – průřezová plocha tlačené nebo méně tažené (horní) betonářské výztuže

Charakteristiky průřezu bez trhlin

$$A_I = A_c + \alpha_e(A_{s1} + A_{s2}) = 150 \times 150 + 6,25(100 + 0) = 23125 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$a_I = \frac{1}{A_I} \left[A_c \frac{h}{2} + \alpha_e(A_{s1}d + A_{s2}d_2) \right]$$

$$a_I = \frac{1}{23125} \left[150 \times 150 \times \frac{150}{2} + 6,25(100 \times 116 + 0 \times 30) \right] = 76 \text{ mm}$$

$$I_I = I_c + A_c \left(a_I - \frac{h}{2} \right)^2 + \alpha_e [A_{s1}(d - a_I)^2 + A_{s2}(a_I - d_2)^2]$$

$$I_I = \frac{1}{12} \times 150 \times 150^3 + 150^2 \left(76 - \frac{150}{2} \right)^2 + 6,25 [100(116 - 76)^2 + 0(76 - 30)^2]$$

$$I_I = 43209729,73 \text{ mm}^4$$

$$M_{cr} = f_{ctm} \frac{I_I}{h - a_I} = 2,9 \frac{43209729,73}{150 - 76} \times 10^{-6} = 1,7 \text{ kNm/m}$$

kde je:

A_I – plocha ideálního průřezu

A_c – plocha betonové části průřezu

α_e – vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje

I_I – moment setrvačnosti ideálního průřezu k jeho těžišti

I_c – moment setrvačnosti betonové části průřezu k jeho těžišťové ose

M_{cr} – ohybový moment při vzniku trhlin

Charakteristiky průřezu s trhlinami

$$x_{cr} = \frac{\alpha_e}{b} (A_{s1} + A_{s2}) \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2b A_{s1} d + A_{s2} d_2}{\alpha_e (A_{s1} + A_{s2})^2}} \right]$$

$$x_{cr} = \frac{6,25}{150} (100 + 0) \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \times 150}{6,25} \times \frac{100 \times 116 + 0 \times 30}{(100 + 0)^2}} \right] = 27,2 \text{ mm}$$

$$I_{II} = \frac{1}{3} b x_{cr}^3 + \alpha_e [A_{s1} (d - x_{cr})^2 + A_{s2} (x_{cr} - d_2)^2]$$

$$I_{II} = \frac{1}{3} \times 150 \times 27,2^3 + 6,25 [100(116 - 27,2)^2 + 0 \times (27,2 - 30)^2] = 5934582,4 \text{ mm}^2$$

kde je:

x_{cr} – vzdálenost neutrální osy od tlačného okraje

I_{II} – moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinou

Výpočet ohybového momentu při dosažení meze kluzu výztuže M_E

Pro x_{cr} s uvážením lineárního průběhu napětí v tlačném betonu (MSP)

$$x_{cr} = 27,2 \text{ mm}$$

$$z = d - \frac{1}{3} x_{cr} = 116 - \frac{1}{3} \times 27,2 = 106,9 \text{ mm}$$

$$M_E = f_{ym} A_s z = 550 \times 100 \times 106,9 \times 10^{-6} = 5,88 \text{ kNm}$$

Potřebná zatěžovací síla F_R pro vzdálenost mezi podporami $l = 0,6 \text{ m}$

$$F_R = \frac{4M_E}{l} = \frac{4 \times 5,88}{0,6} = 39,20 \text{ kN}$$

Stanovení šířky trhliny

$$\sigma_s = \alpha_e \frac{M_E}{I_{II}} (d - x_{cr}) = 6,25 \times \frac{5,88 \times 10^6}{5934582,37} \times (116 - 27,2) = 549,89 \text{ MPa}$$

$$\phi_{eq} = \frac{n_1 \phi_1^2 + n_2 \phi_2^2}{n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2} = \frac{2 \times 8^2 + 0 \times 0^2}{2 \times 8 + 0 \times 0} = 8 \text{ mm}$$

$$h_{c,eff} = \min \left[2,5(h - d); \frac{(h - x_{cr})}{3}; \frac{h}{2} \right]$$

$$h_{c,eff} = \min \left[2,5(150 - 116); \frac{(150 - 27,2)}{3}; \frac{150}{2} \right] = 41 \text{ mm}$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{n_1 \pi \frac{\Phi_1^2}{4}}{bh_{c,eff}} = \frac{2 \times 3,14 \times \frac{8^2}{4}}{150 \times 41} = 0,016$$

$$s_{r,max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \Phi_{eq}}{\rho_{p,eff}} = 3,4 \times 30 + \frac{0,8 \times 0,5 \times 0,425 \times 8}{0,016} = 187 \text{ mm}$$

$$w_k = s_{r,max} \frac{1}{E_s} \left[\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) \right]$$

$$w_k = 187 \frac{1}{200000} \left[550 - 0,6 \frac{2,9}{0,016} (1 + 6,25 \times 0,016) \right] = 0,39 \text{ mm}$$

kde je:

σ_s – napětí ve výztuži v průřezu s trhlinou

M_E – ohybový moment působící na obdélníkový železobetonový průřez

Φ_{eq} – ekvivalentní průměr prutů výztuže v jednom průřezu

n_1 – počet prutů v řadě tažené výztuže

n_2 – počet prutů v řadě tlačené výztuže

Φ_1 – průměr tažené výztuže

Φ_2 – průměr tlačené výztuže

$h_{c,eff}$ – efektivní výška průřezu

$\rho_{p,eff}$ – efektivní stupeň vyztužení průřezu

$s_{r,max}$ – maximální vzdálenost trhlin

k_1 – součinitel zohledňující vlastnosti soudržné výztuže

$k_1 = 0,8$ pro pruty s velkou soudržností

k_2 – součinitel zohledňující rozdělení poměrného přetvoření

$k_2 = 0,5$ pro namáhání ohybem

k_3 – součinitel, jehož hodnota se uvažuje $k_3 = 3,4$

k_4 – součinitel, jehož hodnota se uvažuje $k_4 = 0,425$

k_t – součinitel závisící na době trvání

$k_t = 0,6$ pro krátkodobé zatížení

$f_{ct,eff}$ – efektivní pevnost betonu v tahu v uvažovaném časovém okamžiku

w_k – charakteristická šířka trhliny

Výše popsaným postupem bylo spočteno, že při zatížení tříbodovým ohybem zkušebního trámce musí být vyvozený moment 5,88 kNm, aby bylo zaručeno, že po odtížení zkušebního tělesa se ocelová výztuž smrští do původního stavu před zatížením a s tím se uzavřou vzniklé trhliny, protože v oceli nebude dosažena mez kluzu. Při vzdálenosti podpor 0,6 m je předpokládaná síla vyvolaná zatěžovacím strojem k vyvození tohoto momentu 39,21 kN. Nyní je třeba k hodnotě 0,39 mm přičíst libovolné číslo reprezentující šířku trhliny po odtížení, které je potřeba dosáhnout. Po rozšiřování trhliny za mezí kluzu oceli se ocel již chová plasticky a zpět se smrští jen o hodnotu protažení, které vzniklo v pružné fázi zatěžování prvku. Potřebná šířka trhliny po odtížení pro realizaci experimentu byla stanovena na 0,4 mm. Závěrem teoretického výpočtu bylo zatížit prvek tak, aby vznikla pod zatížením trhlina $0,4 \text{ mm} + 0,39 \text{ mm} = 0,79 \text{ mm}$, která se po odtížení zúží na hodnotu požadovaných 0,4 mm.

V laboratoři se při samotném testování ukázalo, že spočtený odhad je nutné korigovat. Jedním důvodem byla situace, kdy se na jednom vzorku otevřely trhliny dvě, místo trhliny jedné, jak bylo při tříbodovém ohybu předpokládáno. Takové vzorky byly vyloučeny jako nevhodné pro další experimenty. Dalším důvodem byl fakt, že teoretický výpočet pracující s předpokládanými (nikoliv skutečnými) charakteristikami materiálů není schopen tento problém přesně popsat a na místě musela být upravena cílová šířka trhliny, protože se ukázalo, že se trhlina zatahuje místo o spočtených 0,39 mm pouze o 0,25 mm. Protože pro ověření vzniku trhliny na ohýbaném trámci bylo připraveno více vzorků, postupným testováním byl postup upraven s následujícím závěrem.

Pro vytvoření trhliny šířky 0,4 mm na zkušebním trámci o rozměrech 150x150x700 mm, je při předpokladu vzdálenosti podpor 0,6 m a při vyztužení dvěma pruty o průměru 8 mm vzdálenými osově 82 mm, potřeba vytvořit pod zatížením trhlinu šířky 0,65 mm. Taková trhlina se po odtížení zmenší právě o 0,25 mm na požadovanou hodnotu 0,4 mm.

4.3. Praxe

4.3.1. Betonování vzorků

Jedním ze základních kamenů pro uskutečnění této diplomové práce byl návrh postupu pro vytvoření trhliny definované šířky. Celý experiment byl proveden s dostatečným předstihem před betonáží trámců pro diplomovou práci. Betonování zkušebních trámců proběhlo dne 22.9.2017 v akreditované laboratoři Betotech.



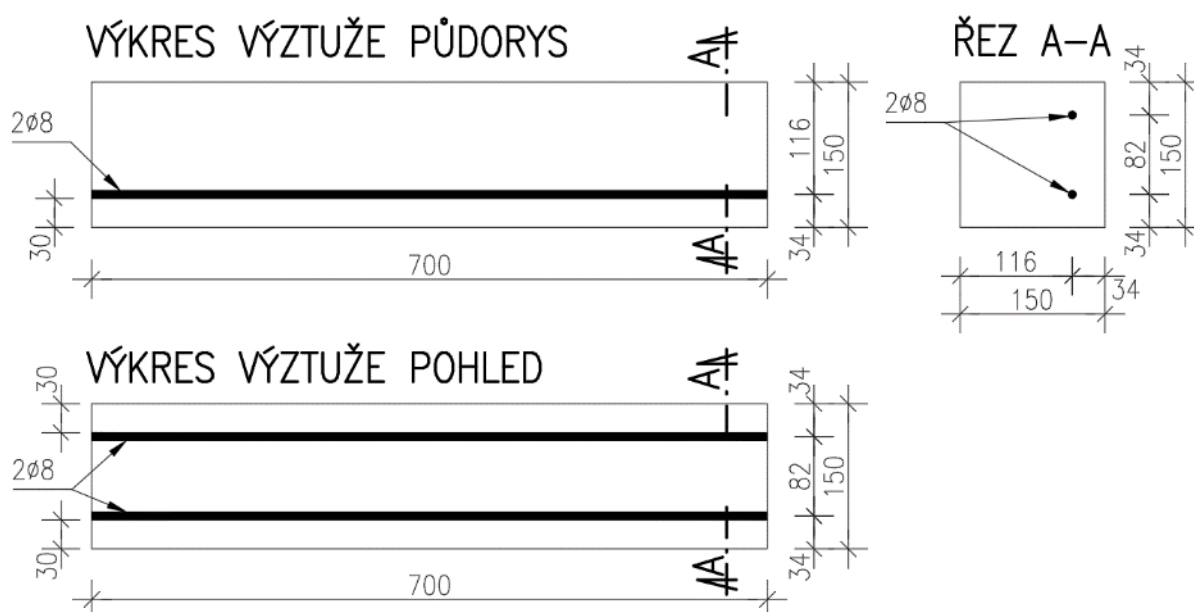
Obr. 22, 23: Vlevo výztuž připravená na uložení do formy, vpravo ukládání betonu do formy ležící na deskovém vibrátoru



Obr. 24, 25: Vlevo formy se zabetonovanou prutovou výztuží, vpravo odformované zkušební trávce

Beton, který je použitý pro experiment, představuje záměs REF. Jednalo se o beton C30/37. Byl odebrán z autodomíchávače před odjezdem na stavbu v objemu odpovídajícím osmi betonovým zkušebním trámčům, tj. přibližně $0,135 \text{ m}^3$. Před samotnou betonáží bylo potřeba připravit výztuže pro vložení do formy tak, aby bylo splněno její předepsané

krytí 30 mm. Toho je docíleno připevněním prutů k dřevěným distančním hranolům vázacím drátem. Na obr. 26 vpravo lze vidět uložení výztuže ve formě. Výztuž nebyla při betonáži uložena na dně formy, ale na boku, protože dle normy má zatěžování vzorku ohybem probíhat kolmo na směr hutnění. Během ukládání betonu probíhalo průběžně jeho zhutňování. Po vybetonování forem byla vrchní hrana všech vzorků zakryta plastovou fólií pro zabránění odpařování vody. O 24 hodin později došlo k odformování vzorků. To proběhlo bez problémů a trávce byly uloženy po dobu přibližně šesti týdnů do komory s relativní vlhkostí $95 \pm 2 \%$ a s teplotou $20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Obr. 26: Výkres výztuže zkušebního trávce o rozměru 150x150x700 mm (půdorys a pohled je v souladu s uložení výztuží do formy)

4.3.2. Zkouška třibodovým ohybem, tvorba trhliny

Zkouška třibodovým ohybem na zkušebních trávcech proběhla dne 3.11.2017 v akreditované laboratoři Betotech. Trávce byly postupně odnášeny z vlhkého uložení ke zkušebnímu stroji. Vnější rozměry zkušební tělesa jsou 0,15x0,15x0,7 m. Vzdálenost podpor na zatěžovacím stroji byla nastavena na 0,6 m.



Obr. 27, 28: Vlevo stroj pro zatížení trámců ohybem s přidavnou pracovní stanicí, vpravo uložený vyztužený zkušební trámec před zahájením zkoušky tříbodovým ohybem

Zatěžování zkušebních těles probíhalo posunem horního pístu, a to konstantní rychlostí 0,008 mm/s. S ohledem na dostatek připravených trámců k testování bylo možné postupně vyladit testování tak, aby byl skutečně vytvořen žádaný rozměr trhliny.

4.3.3. Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem

Nyní budou popsány výsledky měření trhlin na jednotlivých trámcích. Ne všechny trámce byly testovány, z toho důvodu není číslování od jedné do osmi a některá pořadová čísla jsou vynechána.

Jako první byl testován trámec č.2. Měřením bylo stanoveno, že při zatížení trámce silou 39,21 kN, odpovídající teoretickému okamžiku dosažení meze kluzu v oceli, vznikla trhlina šířky 0,55 mm. Působením dalšího zatížení nad hranici meze kluzu oceli vznikla trhlina šířky 0,75 mm, která se po odtížení zmenšila na přibližně 0,45 – 0,5 mm. Za předpokladu lineární úměrnosti mezi šířkou trhliny pod zatížením a šířkou trhliny po odtížení lze dopočítat, jak velká šířka trhliny pod zatížením x bude potřeba pro vznik trhliny požadované šířky 0,4 mm po odtížení. Výpočtem lineární úměrou bylo zjištěno, že $x = (0,4 \times 0,75) / 0,45 = 0,67$ mm, což je přibližně 0,65 mm. Na dalších trámcích probíhala při zatěžování snaha o potvrzení tohoto předpokladu.



Obr. 29, 30: Obrázek vlevo a vpravo, měření trhliny po odtížení na trámci 2

Následovalo testování dalších trámců. Předpoklad z výpočtu lineární úměrou byl potvrzen na trámcích 3, 4 a 5. Zatěžovány byly tak, že byla naměřena trhlina pod zatížením 0,65 mm a po odtížení 0,4 mm.



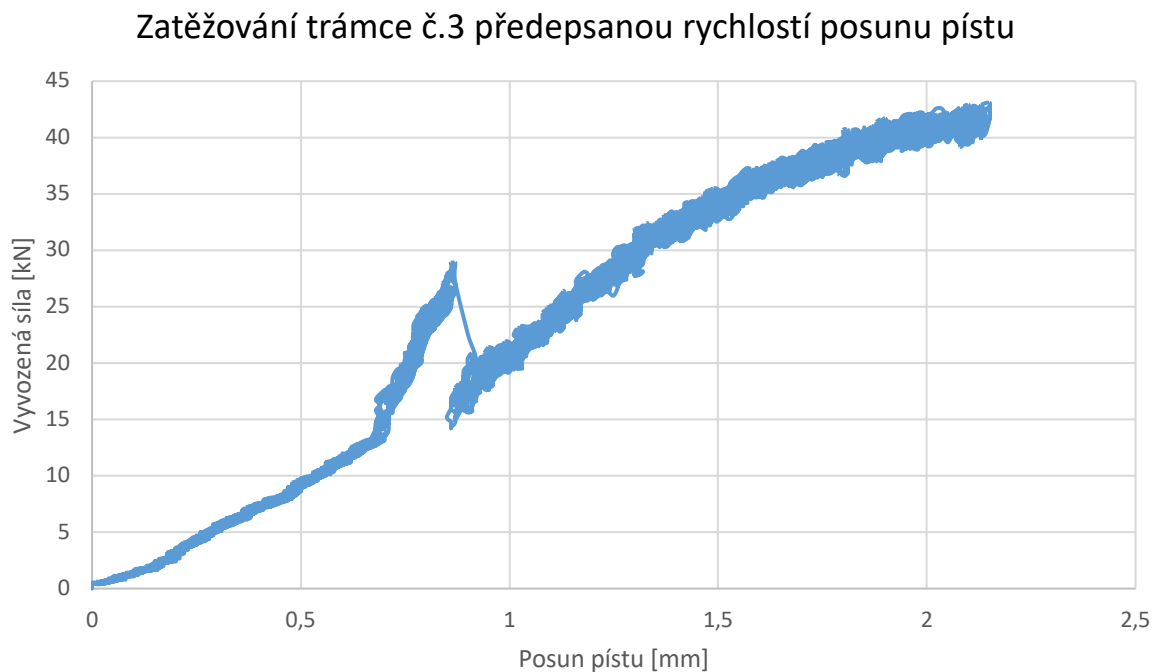
Obr. 31, 32: Obrázek vlevo a vpravo, měření trhliny po odtížení na trámci 3 a 4

Poslední testování tvorby trhliny proběhlo na trámci 6. Byl proveden test pro vytvoření trhliny širší než 0,4 mm. Důvodem byla potenciální možnost pozorování zarůstání trhlín v dlouhodobějším horizontu a s tím spojené krajní schopnosti zacelení trhliny jednotlivých záměsí. Při tomto pokusu byl trámec zatížen tak, že trhlina pod zatížením nabyla velikosti 1,3 mm a na této hodnotě byl trámec zatížen 30 minut, po jeho odtížení se trhlina zavřela na 0,9 mm.

4.3.4. Grafická data ze zkoušky

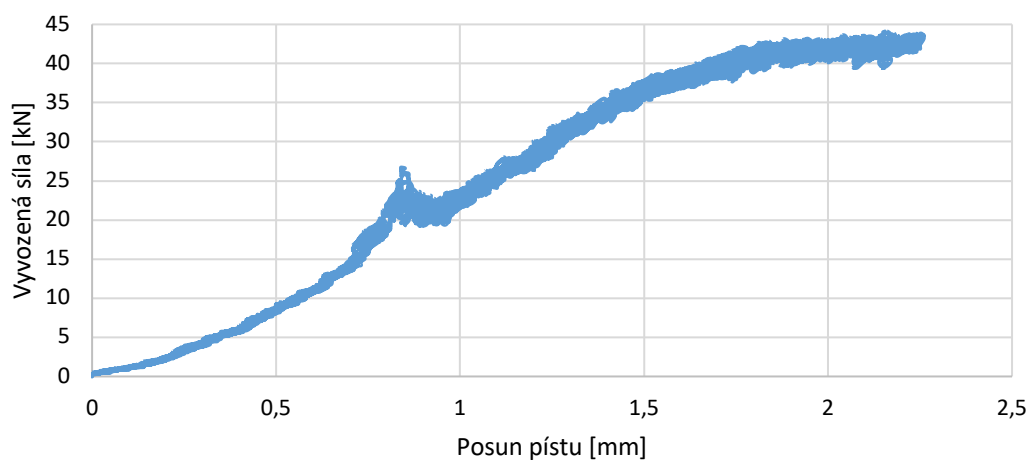
Zde jsou uvedeny grafy, které jsou záznamem průběhu působící síly a posunu pístu pro trámce 3, 4 a 5. Ze všech třech grafů jsou zřetelně vidět dva stavy. První stav, který lze vyčíst, je okamžik, kdy při zatěžování trámce přestal působit beton v tahu a všechno napětí začala přebírat výztuž prvku. Z grafů lze vidět, že tento stav nastal při posunu pístu mezi 0,7 až 0,9 mm. Druhý stav je vidět až na konci měření. Konečná síla, kterou byl průřez zatížen, se pohybuje přibližně na hodnotě 42 až 43 kN, a to při svislém naměřeném posunu pístu mezi 2,2 až 2,5 mm.

Teoretickým výpočtem byla predikována síla, která způsobí v oceli dosažení meze kluzu, na hodnotu 39,21 kN. To velmi dobře odpovídá reálnému průběhu zatěžování, kdy při síle mezi 35 a 40 kN započalo plastické přetváření výztuže, které se v grafu projevuje rychlým narůstáním deformace při malém nárůstu působící síly.



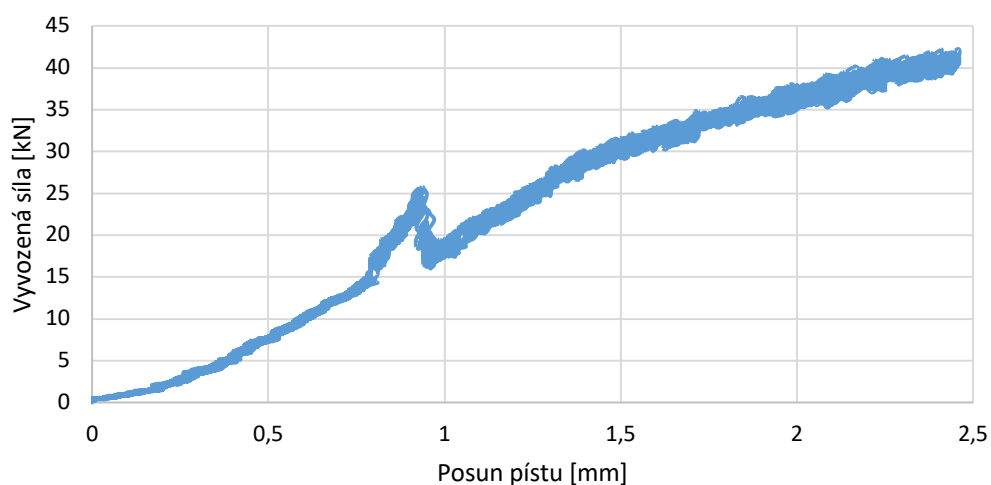
Obr. 33: Graf zatěžování trámce číslo 3

Zatěžování trámce č.4 předepsanou rychlostí posunu pístu



Obr. 34: Graf zatěžování trámce číslo 4

Zatěžování trámce č.5 předepsanou rychlostí posunu pístu



Obr. 35: Graf zatěžování trámce číslo 5

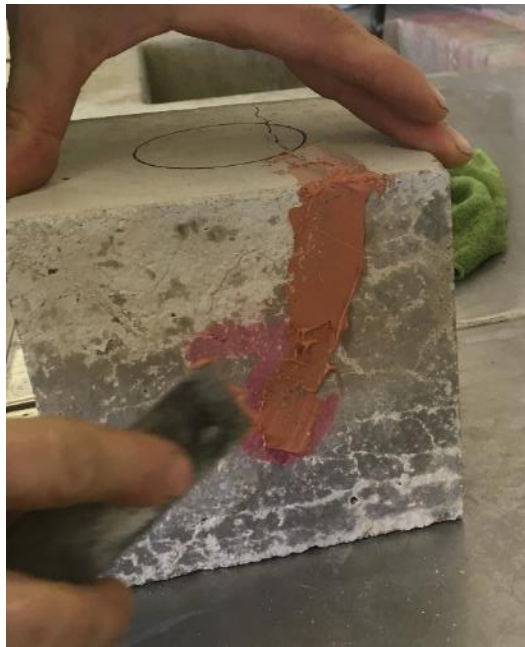
4.3.5. Závěr experimentu

Předběžnou zkouškou bylo prokázáno, že nelze jednoznačně výpočtem pro velikost šířky trhliny určit, jak se bude vytvořená trhlina chovat po odtížení. Teoretický odhad bylo nutné korigovat krátkým výpočtem na místě, v laboratoři, a správnost postupu korekce experimentálně ověřit. Kombinací početního a experimentálního přístupu byl odladěn postup pro vytvoření trhliny definované šířky na zkušební trámci.

5. Vývoj postupu pro zkoušení vzorků s trhlinou na průsak tlakové vody

5.1. Příprava krychlí z trámců s trhlinou

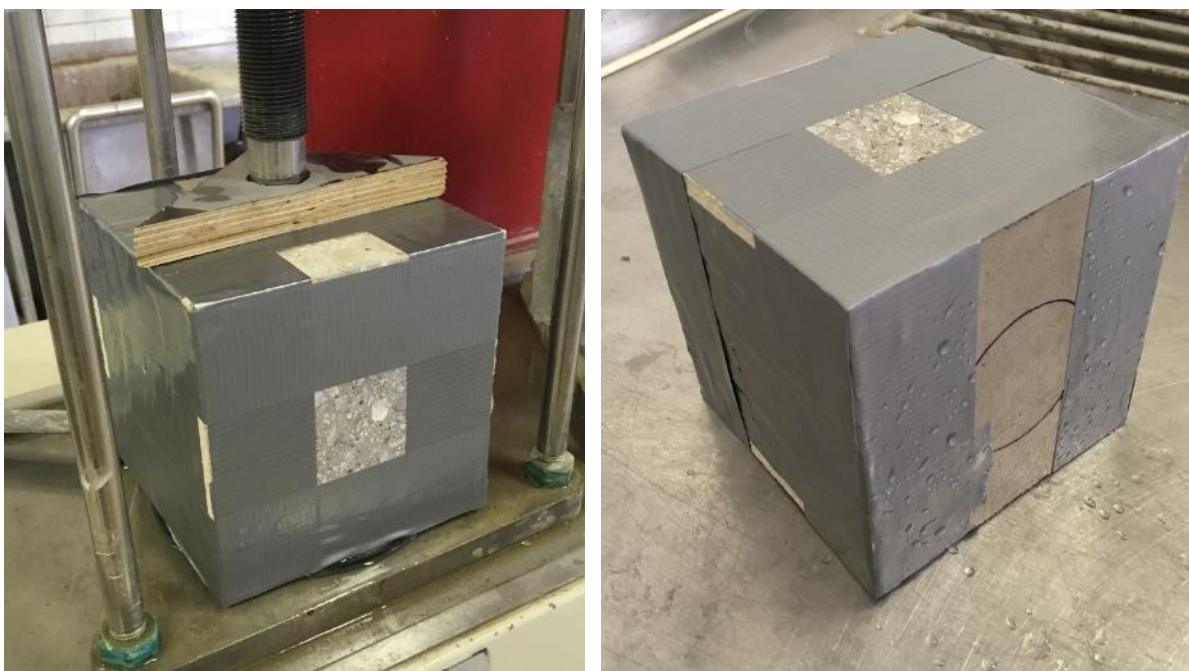
Vybetonované zkušební trámce, na kterých byla vytvořena trhlina za pomoci tříbodového ohybu, byly ořezány symetricky okolo trhliny tak, aby vznikla zkušební krychle o straně 150 mm. Jejich ořezání proběhlo na pile přímo v laboratoři. Od začátku bylo zřejmé, že při testování průsaku nastane problém se zatěžováním trhliny, která se otevřela nejvíce na spodní straně trámce, ale dále samozřejmě běžela téměř k hornímu líci trámce po jeho bočních stěnách. Při testování průsaku byla voda tlačena od spodního líce trámce – na fotografii viz obr. 36 je vyznačeno místo zatěžování černým kroužkem. Z fotografie viz obr. 37 lze vidět, že krychle byla skutečně zatěžována od spodního líce trámce – od strany vyztužení, které je po řezu na boční stěně krychle patrné. Následkem trhliny, která je viditelná i na bocích, vznikl problém, kdy voda při zatěžování na zkušební stolici vytékala pryč z celé vodní soustavy a žádný průsak se nepodařilo naměřit. Proto bylo přistoupeno k variantě krychle co nejlépe zaizolovat tak, aby vydržely testování po požadovanou dobu – 72 hodin.



Obr. 36, 37: Vlevo zajišťování trhliny tmelem, vpravo krychle zajištěná tmelem po obvodě

Pro zaizolování byly použity dva materiály. Jednak polyuretanový tmel, který byl špachtlí vtlačen do trhliny po celém obvodě krychle, kromě místa, kde proběhne zatěžování tlakovou vodou – černého kruhu. Druhým materiálem byla stříbrná lepicí páska s tkaninou.

Myšlenka funkčnosti izolace byla následující. Polyuretanový tmel měl zajistit hydroizolační funkci a lepenka funkci zajištění proti vytlačení polyuretanového tmelu tlakovou vodou.



Obr. 38, 39: Vlevo zaizolovaná krychle tmelem a páskou nasazená na zkoušku průsakem, vpravo krychle z předčasně ukončené zkoušky

Zaizolovaná krychle byla nasazena na zkoušku průsaku tlakovou vodou. Bohužel již během první minuty bylo zřetelně vidět, že provedené provizorní izolační opatření zkušební krychle nefunguje tak jak by mělo. V několika místech si voda i přes pečlivost, s jakou bylo zajištění krychle zpracováno, cestu našla. Zkouška byla tímto ukončena se závěrem, že zvolený postup výroby vzorků s trhlinou je pro zkoušky tlakovou vodou nepoužitelný.

Nezdařené zaizolování krychle představuje problém, který znemožňuje pokračovat zvoleným směrem. Muselo být vymyšleno nové řešení.

5.2. Možné cesty pokračování vývoje experimentu

První cestou, kterou se lze vydat, je zachování stávající varianty vytvoření trhliny v trámci a vyříznutí krychle, tak jako tomu bylo doposud, avšak se změněnou variantou izolace trhlín na bocích. V úvahu připadají dvě alternativní možnosti izolování krychle. Možností první je zaizolovat celou krychli epoxidovou pryskyřicí. Možností druhou je obetonování krychle o rozměru strany 150 mm ve formě na krychli o straně 200 mm.

Po zvážení obou variant byly vyhodnoceny obě dodatečné úpravy jako zbytečně pracné a od tvorby trhliny cestou ohybu trámů bylo ustoupeno.

Významnou roli ve změně postupu tvorby trhliny hraje také myšlenka neurčitosti experimentu. Došlo se k závěru, že toto je opravdu cesta, jak vytvořit reálnou trhlinu. Nicméně pro vzájemné srovnání trhlín a průsaků na různých vzorcích vyvstává příliš mnoho neurčitostí. Příkladem lze uvést, že žádné dvě trhliny nebudou stejné a to, že lze vytvořit stejnou šířku trhliny na pohled při spodním líci konstrukce neznámá, že její průběh bude stejný i po výšce trámce. Znamená to tedy, že po výšce trámce má trhlina v různých výškách různé tloušťky. Pro měření a srovnání průsaku na různých vzorcích není tato cesta nejvhodnější.

Bylo tedy potřeba vymyslet nový postup, který umožní srovnání s vyšší přesností než ten stávající.

6. Finální varianta experimentu

6.1. Zvolené postupy pro realizaci experimentu

Nabízejí se rovnou dvě nové varianty, jak postupovat. Hlavním motivem je stále snaha o experiment umožňující srovnání zarůstání mezery v různých betonech. Nová metoda je snazší na výrobu vzorků a šířka mezery je u všech vzorků prakticky stejná.

První varianta zní následovně. Betonovány budou zkušební krychle o straně 150 mm. Při betonáži vzorků do nich bude z volné strany zabetonována spárová měrka tloušťky 0,1 nebo 0,2 mm a šířky 25 mm do hloubky 60 mm. Měrka bude zabetonována právě v oblasti zatěžované při zkoušce průsaku tlakovou vodou. Její vytažení proběhne právě tehdy, když beton dosáhne takové pevnosti, že po vytažení spárové měrky se vlastní tíhou nezdeformuje a mezera si zachová požadovaný tvar – především tloušťku. Testování vzorků na zkoušku průsakem poté již proběhne standardní cestou. Trhlina bude zatížena vodním tlakem a po 72 hodinách bude krychle rozlomena ve směru kolmém na mezeru. Patříčně se změří hloubka průsaku ve všech směrech a bude porovnána pro jednotlivé záměsi v různých časových okamžicích.

Druhá varianta je již pouze doplňková a spočívá v betonáži zkušebních krychlí standardním postupem jako například pro zkoušku pevnosti v tlaku. Po tom, co beton dozraje, se krychle nasadí do lisu a vypodloží se tak, jako by měla být rozštípnuta pro vyhodnocení zkoušky průsakem. Její zatěžování ovšem nejde do takového stádia, ale bude zastaveno již ve chvíli, kdy bude viditelný vznik trhliny – bez ohledu na její šířku. V krychli se tímto vytvoří malá trhlina a zároveň se jejím včasným vyjmutím zajistí celistvost vzorku. Postup této zkoušky je nedestruktivní v celém jejím časovém rozsahu. Krychle bude nasazena na stolicí pro zatěžování tlakovou vodou tak, aby tlak vody zatěžoval stranu opačnou od vzniklé trhliny – stranu bez trhliny. Na bocích krychle bude dobře vidět, v jaké výšce vytéká tlaková voda, zatěžující spodní stranu, viz obr. 164. Výsledky tohoto doplňkového experimentu budou odměřené výšky z boků krychle, ve kterých v časovém rozestupu vytékala voda, a získáme tak představu o postupném zarůstání trhliny. Výhodou je, že měření bude probíhat po celou dobu v čase na jednom vzorku pro stejnou záměs. Příprava vzorků a jejich vyhodnocení je věnována kapitola 9. Nedestruktivní zkouška pozorování zacelení trhliny v čase.

Díky možnosti provádění experimentu v delším časovém horizontu mohlo být přistoupeno k vhodným časovým rozestupům mezi testováním jednotlivých vzorků. Dny testování budou nyní uvedeny bez 28 dní zrání betonu. První sada vzorků byla testována v čase 0 dní. Druhá sada po 84 dnech, tedy po třech měsících. Třetí sada byla otestována v čase

168 dní (půl roku) od ukončení 28 denního zrání betonových zkušebních krychlí ve vodním uložení.

Na všech záměsích byla provedena zkouška pevnosti v tlaku a hloubky průsaku tlakovou vodou. Výše zmíněné zkoušky byly provedeny ve všech zkoušených časech. Dále pro všechny časy bylo provedeno testování výše zmíněné druhé varianty – nedestruktivní zkouškou. Pro lepší orientaci je v celé práci použito následující značení vzorků.

Tab. 4: Značení vzorků

ZNAČENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ	
Celý název	Zkratka
Referenční beton	REF (R)
Referenční beton s přidaným Xypexem	XYP (X)
Referenční beton s přidaným cementem	CEM (C)
měrka 0,1 mm	1
měrka 0,2 mm	2
0 dní	A
84 dní	B
168 dní	C
Krychle s trhlinou	T

Příklad: Vzorek, který je ze záměsi referenčního betonu, který zral 168 dní a mezera v něm byla vytvořena pomocí spárové měrky tloušťky 0,1 mm, má označení REF 1C. Pokud je testováno více vzorků od REF 1C, pak jsou vzorky číslovány římskými číslicemi. V práci je někdy použita i zkrácená verze značení, kdy je například místo značení REF použito pouze písmeno R. Obdobně je tomu i u značení XYP a CEM.

Tab. 5: Tabulka s počtem potřebných krychlí na zkoušky

	REF	XYP	CEM
Zkušební tělesa			
krychle na pevnost v tlaku	2	2	2
krychle na hloubku průsaku bez spáry	3	3	3
krychle na zacelení spáry tl. 0,1 mm	6	6	6
krychle na zacelení spáry tl. 0,2 mm	6	6	6
krychle pro zacelení vytvořené trhliny	2	2	2
Celkem zkušebních těles	19	19	19
Zkoušky			
konzistence 5 minut	1	1	1
objemová hmotnost čerstvého betonu	1	1	1
I. Sada se spárou 0,1 mm			
Zkouška hloubky průsaku v čase A	2	2	2
Zkouška hloubky průsaku v čase B	2	2	2
Zkouška hloubky průsaku v čase C	2	2	2
II. Sada se spárou 0,2 mm			
Zkouška hloubky průsaku v čase A	2	2	2
Zkouška hloubky průsaku v čase B	2	2	2
Zkouška hloubky průsaku v čase C	2	2	2
III. Sada pro zacelení vytvořené trhliny			
Zkouška na stejném vzorku v čase A, B i C	2	2	2

Poznámka k tabulce č. 4: Zkoušky čerstvého betonu nejsou započteny do počtu vzorků, protože jejich zkoušení probíhalo na betonu, který byl později promíchán a uložen jako vzorek ztvrdlého betonu.

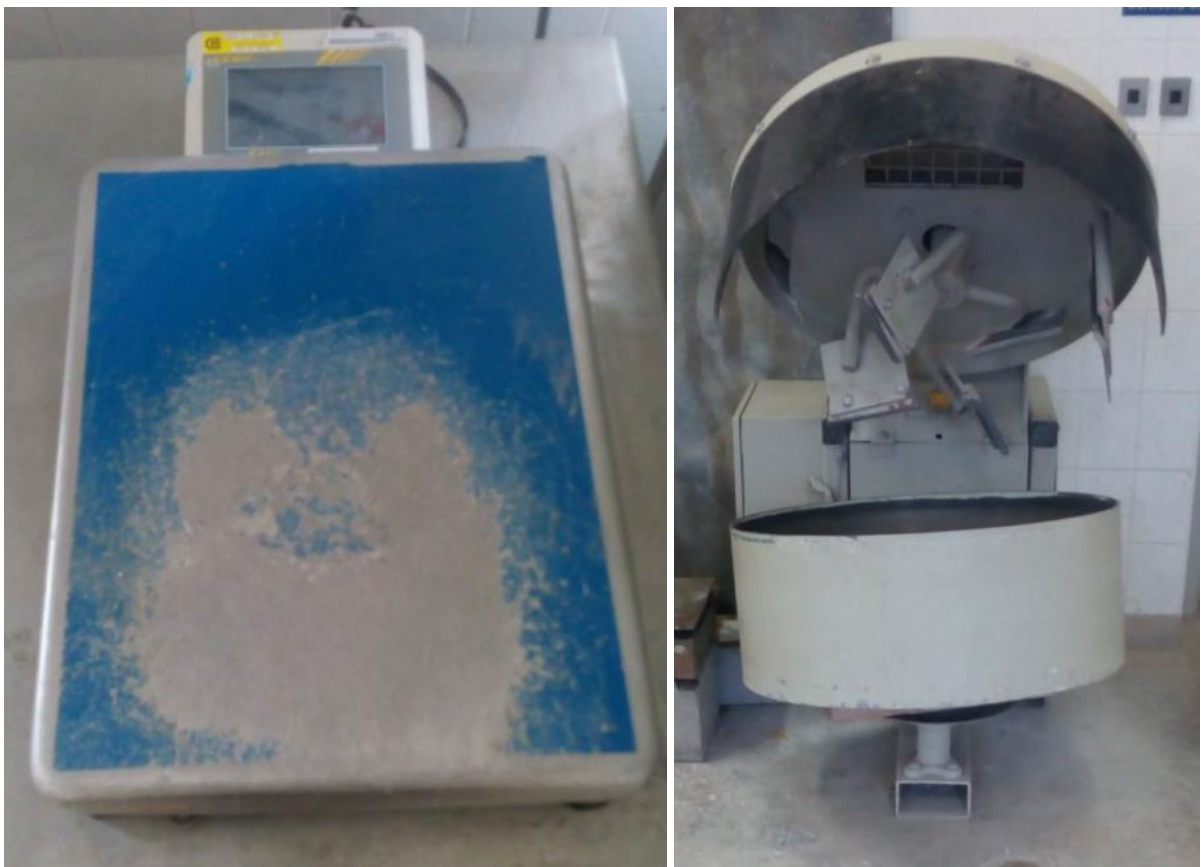
6.2. Použité přístroje a pomůcky

Pro experiment byly využity následující laboratorní přístroje:

- Zkušební stolice na zkoušky vodotěsnosti betonu (testování průsaků betonovými vzorky) s kalibrací do 5.12.2020.
- Váha značky Kern s kalibrací do 22.3.2020.
- Pro pevnostní zkoušky byl použit přístroj od firmy FORM + TEST s maximální možnou silou v tlaku 4 000 kN, typ Alpha 4 s platností kalibrace do 13.6.2019.
- Zatěžovací stroj pro testování prvků namáhaných ohybem firmy FORM + TEST s maximálním možným silovým účinkem 300 kN, posunem pístu 220 mm a s průměrem pístu 115 mm s platností kalibrace do 3.8.2019.
- Na zamísení betonu byla použita laboratorní míchačka betonu s obsahem 70 litrů.
- Pro focení zvětšené trhliny byla použita lupa Peak 2028 Light Scale Loupe 10x.



Obr. 40, 41: Vlevo zkušební stolice pro zatížení hydrostatickým tlakem, vpravo spárová měřka šířky 25 mm



Obr. 42, 43: Vlevo je použitá váha, vpravo míchačka pro záměs 70 litrů betonu



Obr. 44: Zatěžovací stroj pro testování prvků namáhaných ohybem



Obr. 45,46: Vlevo použité plastové formy, vpravo přístroj použitý pro zkoušky pevnosti v tlaku



Obr. 47, 48: Lupa Peak 2028 Light Scale Loupe 10x

6.3. Příprava a míchání jednotlivých typů betonu

Betonáž normových krychlí proběhla dne 26.3.2018. Z každé záměsi bylo odlito 57 normových krychlí o hraně $a = 150$ mm. Celkem tedy 19 krychlí pro REF, 19 krychlí pro XYP a 19 krychlí CEM.

Tři dny před betonáží byly do laboratoře navezeny všechny suroviny, aby se dalo pracovat se suchým materiálem. Postup betonáže a přidávání jednotlivých surovin byl pro zamísení Xypexu dle doporučení výrobce. Nejprve bylo vloženo kamenivo s pískem a cementem, do něhož byl přidán v suchém stavu Xypex. Tyto složky se důkladně promíchaly a poté byla přidána voda. Beton byl odlit do plastových forem vytřených odbedňovacím přípravkem. První záměs byla do míchačky přidána v 10:30. Postupné přidávání surovin proběhlo dle následující tabulky. Druhá záměs byla připravena přibližně v 12:30 a třetí záměs okolo 14:00.

Tab. 6: Tabulka postupu betonáže

Vzorek	1. minuta	2. minuta	3. minuta	4. minuta	5. minuta	6. minuta	14. minuta
REF	míchání kameniva + cementu + písku	míchání kameniva + cementu + písku	stroj vypnut a přidány 3/4 vody	stroj vypnut a přidán plastifikátor + 1/4 vody	míchání	zastavení míchání + kontrola konzistence	ukládání betonu
XYP	míchání kameniva + cementu + písku + Xypexu	míchání kameniva + cementu + písku + Xypexu	stroj vypnut a přidány 3/4 vody	stroj vypnut a přidán plastifikátor + 1/4 vody	míchání	zastavení míchání + kontrola konzistence	ukládání betonu
CEM	míchání kameniva + cementu + písku	míchání kameniva + cementu + písku	stroj vypnut a přidány 3/4 vody	stroj vypnut a přidán plastifikátor + 1/4 vody	míchání	zastavení míchání + kontrola konzistence	ukládání betonu

Příprava betonu a výroba zkušebních těles trvala přibližně 6 hodin a během této doby byly provedeny základní zkoušky čerstvého betonu. Konkrétně bylo změřeno sednutí kužele všech tří záměsí po 5 minutách od ukončení míchání. Dále byla v této fázi naměřena objemová hmotnost čerstvého betonu. Výroba betonu proběhla v souladu s normou ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti [4]. Beton byl odebrán po řádném promísení směsi a zhutnění každého vzorku bylo zajištěno vibračním stolem. Odstranění přebytečného betonu bylo provedeno zednickou lžící. Tělesa byla uložena 24 hodin při teplotě splňující $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Místem jejich uložení byla laboratoř. Tělesa byla zakryta polystyrenovým čtvercem o hraně $a=150\text{ mm}$, skrz který byly do vzorků zasunuty spárové měrky. Řešení v podobě polystyrenu mělo trojí účinek. Jednak byla v polystyrenu před položením na čerstvý beton vyřezána spára, do které byla měrka zasunuta – to pozitivně ovlivnilo přesnost její polohy. Dále se tak vytvořila ochranná vrstva proti nadměrnému odpařování vody z povrchu vzorku. Především však bylo zakrytí polystyrenem vytvořeno kvůli zkoušce testování průsaku tlakovou vodou, protože má být zatěžována hladká strana krychle – tzn. strana, která je přilehlá ke stěně formy. Polystyrenem bylo zajištěno uhazení testované strany krychle.



Obr. 49: Příprava forem betonových vzorků – zleva pěnové ucpávky do otvoru ve formě, odbedňovací prostředek, plastová forma pro normovou krychli o hraně 150 mm



Obr. 50, 51: Vlevo plnění formy uložené na vibrační desce, vpravo spárové měrky přesných rozměrů připravené pro zasunutí do betonu



Obr. 52: Detail vzorku připraveného pro osazení spárové měrky



Obr. 53: Uložené vzorky betonu REF

Odformování vzorků proběhlo dne 27.3.2018, a to po 24 hodinách od uložení čerstvé betonové směsi. Krychle byly z forem vytlačeny pomocí vzduchu stlačeného kompresorem. Při odformování byly krychle zároveň popisovány dle značení betonových záměsí. Spárové měrky byly však vytaženy dříve, přibližně po dvanácti hodinách od uložení do forem – tedy v čase, který zajišťoval co nejlepší možnost vytažení spárových měrek z tvrdnoucí směsi a zároveň byl dostatečný na to, aby beton udržel svůj vlastní tvar a spára po vytažení měrky nezatekla okolním betonem.



Obr. 54: Odformované betonové krychle připravené pro uložení do vodní lázně na 28 dní



Obr. 55: Betonové krychle uložené ve vodní lázni

7. Běžné zkoušky čerstvého a ztvrdlého betonu

7.1. Zkouška sednutí kužele

V této kapitole jsou uvedeny výsledky zkoušky sednutí čerstvého betonu po 5 minutách od ukončení míchání. Zkouška sednutí je provedena v souladu s normou ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím [5]. Okrajové podmínky zkoušky omezují její použitelnost na vhodné naměřené hodnoty sednutí mezi 10 mm a 210 mm a dále omezují použití pro beton s maximální velikostí zrna kameniva 40 mm.

Zkouška probíhala dle následujícího postupu. Forma pro zkoušku sednutí kužele byla plněna 5 minut po zamíchání směsi. Přebytek betonu ve formě byl srovnán zednickou lžící a odstraněn z povrchu podkladní desky. Forma má tvar komolého kužele a beton v ní je v průběhu ukládání zhutňován ve třech vrstvách ocelovou propichovací tyčí. Zvedání formy proběhlo během přibližně tří vteřin bez jejího pootáčení. Změřenou hodnotou sednutí je vzdálenost, o kterou poklesl beton po zvednutí formy. Forma pro testování měla standardní rozměry. Průměr dolní základny byl 200 mm, průměr horní základny byl 100 mm a výška dutého komolého kužele byla 300 mm. Jako měřidlo byl použit metr s dělením 1 mm. Pro podklad byla použita deska z nenasákavého materiálu, která byla po každé zkoušce setřena vlhkým hadříkem.

Způsob sednutí kužele byl vyhodnocen u všech vzorků jako správný. Teplota REF a CEM byla 19,5 °C. Teplota XYP byla 19 °C. Teplota vody přidávané do všech betonů byla 12,5 °C.

Tab. 7: Výsledky zkoušky sednutí kužele

Název betonu	Hodnoty sednutí čerstvého betonu [mm]
	Sednutí 5 minut
REF	150
XYP	150
CEM	125

Podle výsledků změřených sednutí po 5 minutách se směsi REF a XYP jeví jako rovnocenně zpracovatelné. V případě měření CEM po 5 minutách došlo ve směsi k sednutí o 25 mm většímu než u ostatních směsí. Všechny záměsi působily při míchání vizuálně obdobně.



Obr. 56, 57: Vlevo hutnění betonu ukládaného do formy pro zkoušku sednutí kužele, vpravo plná forma před zvednutím



Obr. 58, 59, 60: Sednutí jednotlivých záměsí – vlevo REF – 150 mm, uprostřed XYP – 150 mm, vpravo CEM – 125 mm

7.2. Měření objemové hmotnosti čerstvého betonu

Měření objemové hmotnosti proběhlo během ukládání betonů do forem. Toto měření proběhlo dle normy ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost [6]. Měření betonu proběhlo po jeho uložení do formy s následným zhutněním na vibračním stole. Forma byla před vložením betonu zvlášť zvážena a na váze byla nastavena nulová hodnota pro odečtení její váhy.

Po zvážení formy proběhlo její plnění a krátké vibrování na desce. Při vibrování beton lehce sedl a forma byla poté doplněna až po okraj. Beton, který z formy přebýval, byl odstraněn zednickou lžící a okraje formy byly otřeny hadříkem. Následným vážením byla zjištěna hmotnost čerstvého betonu v nádobě. Jeho objem byl získán výpočtem objemu zkušební formy.

Celý postup byl proveden s jedinou odchylkou od normy. V normě je minimální požadavek na testovaný objem 5 litrů. Z praktických důvodů byla měřena objemová hmotnost ve formách na normové krychle, které mají objem 3,375 litru.

Výpočet čerstvé objemové hmotnosti betonu proběhl dle vzorce

$$D = \frac{m}{V}$$

kde je:

D – objemová hmotnost čerstvého betonu, v kg/m³

m – hmotnost betonu ve formě, v kg

V – objem formy, v m³

Jedinou proměnnou ve výpočtu jsou naměřené hmotnosti. Objem formy je konstantní. Pro každou záměs byly zváženy dvě hmotnosti pro výpočet čerstvé objemové hmotnosti, v tabulce popsané jako vzorek I a vzorek II. Objemová hmotnost je vypočtena u všech vzorků a závěrem jsou průměry hodnot I a II zaokrouhleny na nejbližších 10 kg/m³.

Tab. 8: Tabulka naměřených hodnot a výpočet objemové hmotnosti čerstvého betonu

Vzorek		Hmotnost betonu ve formě [kg]	Objem nádoby [m ³]	Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	Průměr I a II	Průměrná a zaokrouhlená objemová hmotnost [kg/m ³]
REF	I	7,823	0,003375	2317,93	2300,59	2300
	II	7,706	0,003375	2283,26		
XYP	I	7,809	0,003375	2313,78	2330,37	2330
	II	7,921	0,003375	2346,96		
CEM	I	7,822	0,003375	2317,63	2333,33	2330
	II	7,928	0,003375	2349,04		

Srovnáním objemových hmotností lze říci, že pro záměs REF vyšla přibližně o 30 kg/m³ menší, než u betonu XYP a CEM. Tento rozdíl je prakticky zanedbatelný.

7.3. Měření objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Testování objemové hmotnosti ztvrdlého betonu proběhlo dle normy ČSN EN 12390–7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [7]. Měření bylo provedeno na 6 krychlích. Všechny krychle ve stáří 28 dní byly po celou dobu uloženy ve vodní lázni. Zkouška proběhla na dvou krychlích od každé záměsi – tedy 2xREF, 2xXYP a 2xCEM. Vážení proběhlo měřením hmotnosti na vzduchu. Tělesa byla vyjmuta z vodní lázně a jejich strany byly povrchově osušeny suchým hadříkem. Následně byla tělesa zvážena a jejich hmotnost zaznamenána. Objem těles byl získán výpočtem z jmenovitých rozměrů. Pro testy byly použity normové krychle o hraně 150 mm, a tudíž je vycházeno z objemu formy, do které byla tělesa odlita.

Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlého betonu proběhl dle vzorce

$$D = \frac{m}{V}$$

kde je:

D – objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m³

m – hmotnost zkušební tělesa měřená na vzduchu, v kg

V – objem zkušební tělesa dopočítaný z rozměrů formy, v m³

Tab. 9: Tabulka naměřených hodnot a výpočet objemové hmotnosti ztvrdlého betonu uloženého ve vodní lázni po dobu 28 dní všech záměsí

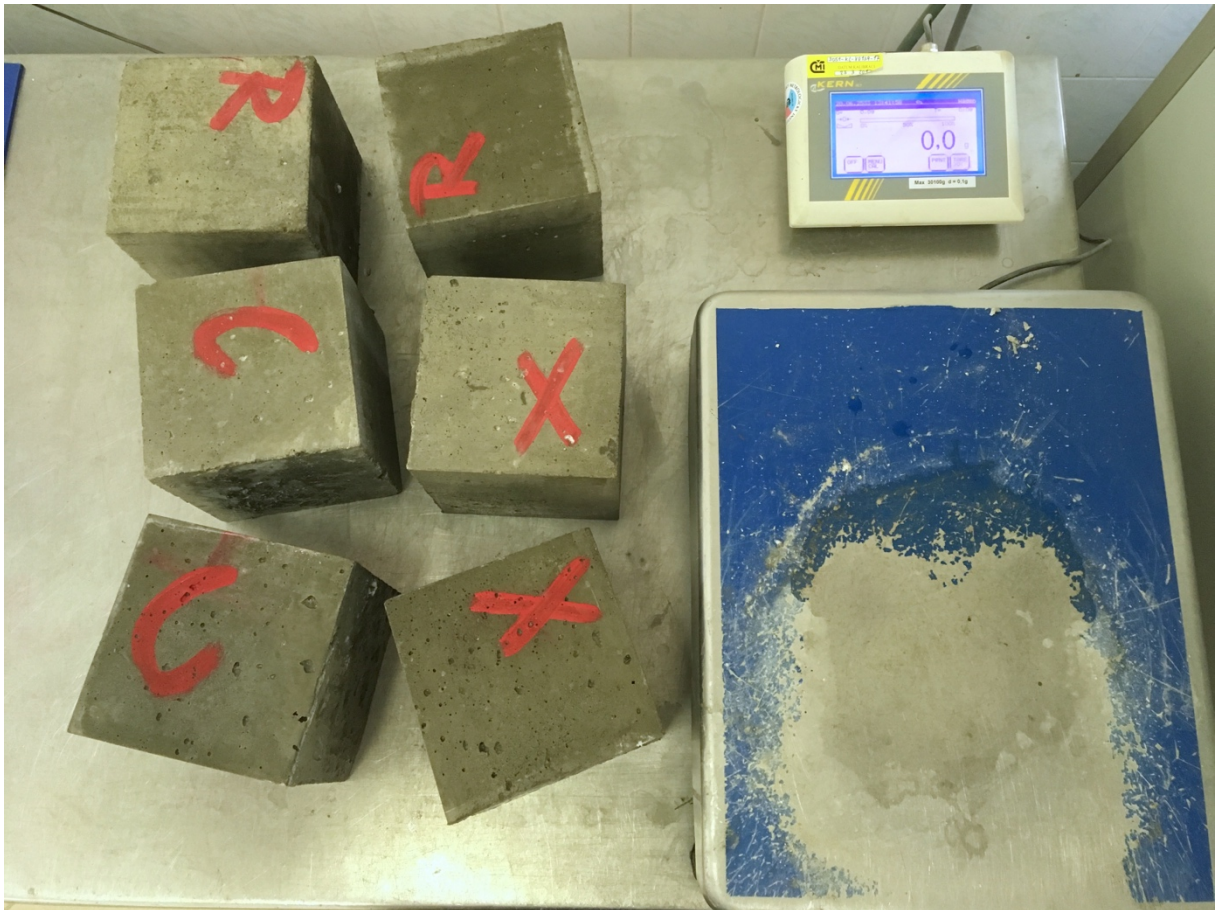
Vzorek		Hmotnost betonu ve formě [kg]	Objem nádoby [m ³]	Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	Průměr I a II	Průměrná a zaokrouhlená objemová hmotnost [kg/m ³]
REF	I	8,088	0,003375	2396,44	2380,15	2380
	II	7,978	0,003375	2363,85		
XYP	I	7,787	0,003375	2307,26	2317,04	2320
	II	7,853	0,003375	2326,82		
CEM	I	8,010	0,003375	2373,33	2365,48	2370
	II	7,957	0,003375	2357,63		

Z vypočtených hodnot lze vidět, že rozdíl objemové hmotnosti REF čerstvého betonu a ztvrdlého betonu je 80 kg/m³, zatímco záměs XYP má objemové hmotnosti téměř stejné. CEM má objemovou hmotnost ztvrdlého betonu mezi zbylými dvěma hodnotami.

S ohledem na přesnost měření a způsob stanovení objemu měřených těles lze považovat výsledné objemové hmotnosti za téměř stejné. Měření neukázalo prokazatelný vliv přidání Xypexu do betonové směsi na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu.



Obr. 61: Pomůcky pro měření objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, hadřík pro otření povrchu zkušební krychle od povrchové vody, digitální posuvné měřítko, pro ověření přesnosti měřeného vzorku a kleště pro manipulaci se vzorky



Obr. 62: Krychle, na kterých byla měřena objemová hmotnost ztvrdlého betonu a použitá váha

7.4. Měření pevnosti v tlaku zkušebních těles

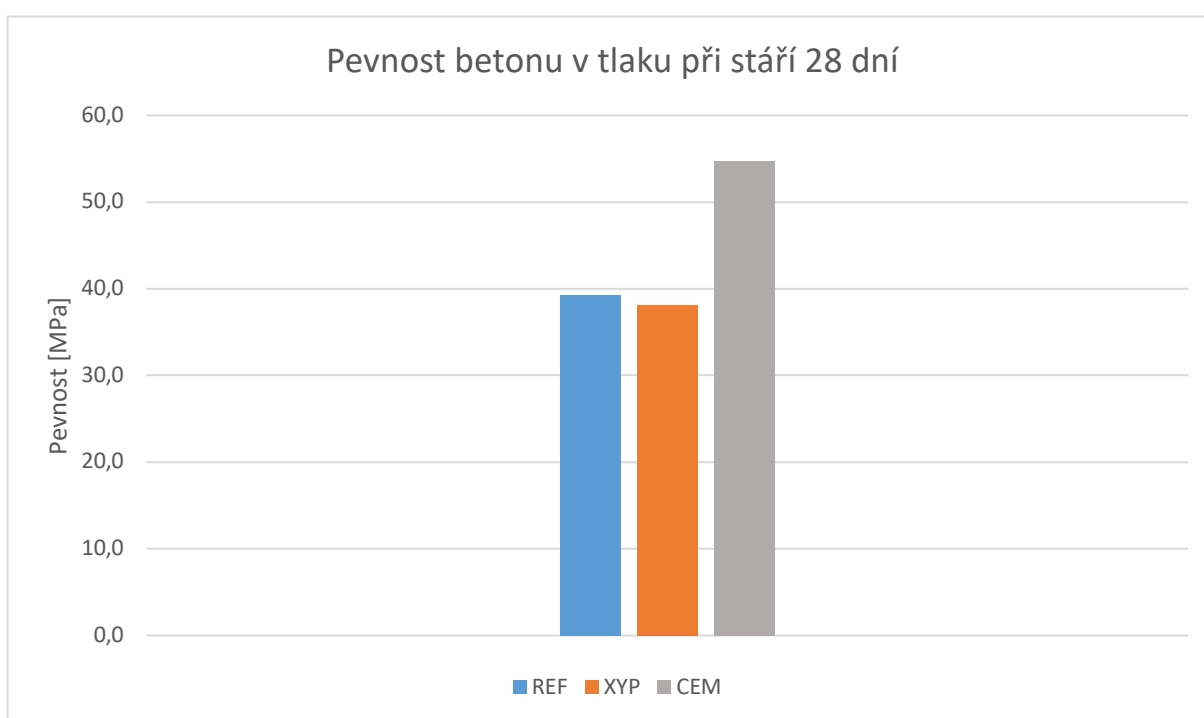
Stanovení pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu proběhlo dle normy ČSN EN 12390–3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [8]. Stanovení bylo provedeno na 6 krychlích. Všechny krychle ve stáří 28 dní byly po celou dobu uloženy ve vodní lázni. Zkouška proběhla na dvou krychlích od každé záměsi – tedy 2xREF, 2xXYP a 2xCEM. Zkušební tělesa byla zatěžována ve zkušebním lisu do porušení vzorků. Tvar těles pro zkoušky byl ve formě normových krychlí o straně 150 mm.

Před uložení vzorku do lisu byly otřeny hadříkem dotykové plochy tlačných desek a stejně tak byly očištěny plochy zkušebního tělesa, které se dotýkají při zkoušce ploch lisu. Krychle byla usazena tak, že směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Těleso se umístilo na střed lisu. Ve zkušebním lisu se předem nastavila velikost tlačné plochy testovaného tělesa a rychlost zatěžování. Při destrukci tělesa byla zaznamenána maximální síla v kN. Po přepočtu na velikost tlačné plochy byla stanovena pevnost v MPa. Zaznamenané hodnoty jsou zapsány s přesností na nejbližších 0,1 MPa. Rozměry těles vyhovovaly a nebylo

potřeba je tvarově upravovat. Všechna porušení vzorků, ke kterým došlo, byla v pořádku a žádný nevyhovující způsob porušení nenastal. Lis byl digitální a bylo možné do něj přímo vložit tlačnou plochu testovaného tělesa.

Tab. 10: Tabulka naměřených hodnot pevností betonu v tlaku všech vzorků s rozdílnou dobou a místem uložení, ve druhém sloupci vždy zapsána průměrná hodnota vzorků I a II:

Vzorek		Pevnost betonu [MPa]	Průměrná pevnost betonu [MPa]
REF	I	40,3	39,4
	II	38,4	
XYP	I	37,2	38,1
	II	39	
CEM	I	55,8	54,7
	II	53,6	



Obr. 63: Graf zobrazující naměřené průměrné hodnoty pevností betonu v tlaku

Při jednoduchém pohledu na graf lze vidět, že XYP vyšel při zkoušce pevnosti betonu v tlaku jako nejhorší. Z grafu lze dále vidět, že nejvyšší pevnosti po 28 dnech nabyly vzorek připravený z receptury CEM, tento fakt však není vzhledem k přidanému množství cementu a nižšímu vodnímu součiniteli překvapující.

Z tabulky lze vyčíst, že průměrná pevnost betonu XYP je o 1,3 MPa nižší, než pevnost betonu REF. Tento rozdíl je zanedbatelný a lze říci, že jsou pevnosti téměř totožné. Beton

CEM nabyl průměrné pevnosti 54,7 MPa, což je o 15,3 MPa vyšší pevnost, než u betonu REF.

Vývoj pevnosti v tlaku XYP nabyl nejvyšší hodnoty 39 MPa. Jeho pevnost v tlaku byla v porovnání s pevností REF nepatrně nižší a nebyly pozorovány výrazné pevnostní rozdíly. Tato informace je v přímém rozporu s informacemi uvedenými v technickém listu produktu Xypex Admix [20], ve kterém je psáno, že při dávce 2 % Xypexu se pevnost betonu v tlaku navýší minimálně o 15 %. Z technického listu nelze vyčíst, zda je informace k produktu základnímu, který má dávkování 1–3 %, nebo k produktu s koncovkou „NF“, jehož dávkování je doporučeno 0,5–1,5 %. V tomto případě není ale důležitá konkrétní dávka, jako spíše to, že by pevnost betonu v tlaku dle technického listu neměla klesat. Lze tedy říci, že se u zkoušky pevnosti betonu v tlaku nepotvrdily informace, které výrobce o produktu dodává.



Obr. 64: Pohled na zatěžovací lis, vlevo ovládací panel s naměřenými hodnotami, vpravo zatěžovací lis s vloženým betonovým vzorkem

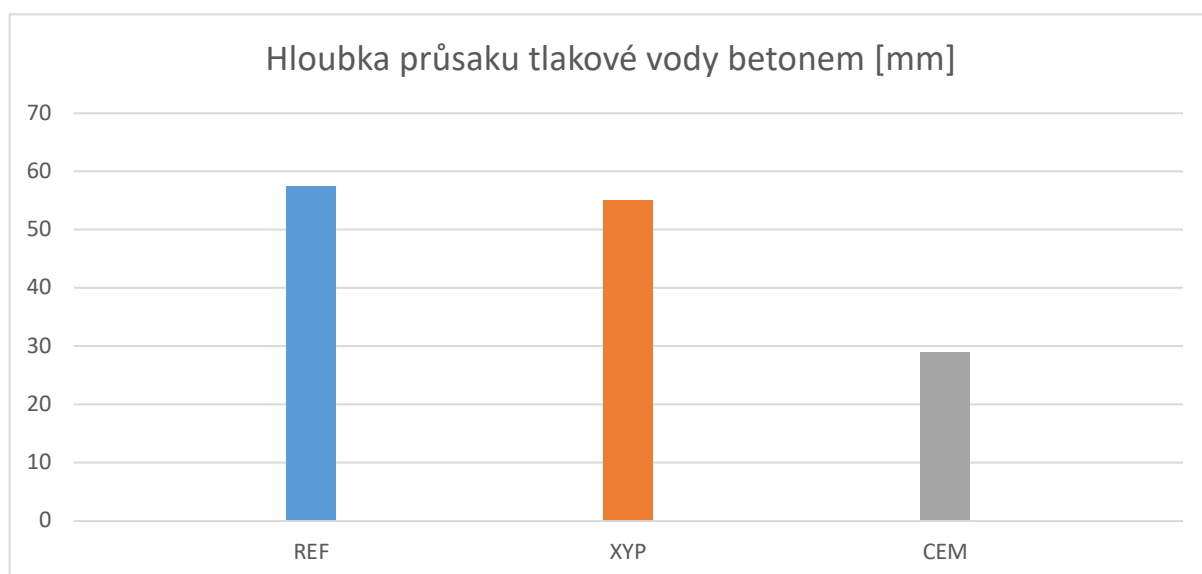
7.5. Měření hloubky průsaku tlakové vody do vzorků bez spáry

Měření hloubky průsaku betonových vzorků proběhlo dle normy ČSN EN 12390–8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou [9]. Podstatou zkoušky je nechat působit tlakovou vodu na povrch ztvrdlého betonu. Následuje rozlomení zkušebního tělesa a změření hloubky průsaku vody. Použitým zařízením byla zkušební stolice, do které bylo těleso upnuto. K utěsnění kontaktní plochy byla použita těsnící pryžová podložka. Zkušebními tělesy byly betonové krychle o rozměru hrany 150 mm.

Měření průsaku tlakovou vodou probíhalo na tělesech, která byla stará 28 dnů, což jsou vzorky stáří A. Zkušební těleso bylo upnuto do zařízení a po dobu 72 ± 2 hodin na něj působil tlak 500 ± 50 kPa. Na nezatěžovaných stěnách tělesa se po celou dobu testování neobjevila voda. Testování všech vzorků tedy lze považovat za platné. Po ukončení zkoušky bylo těleso vyjmuta ze zatěžovací stolice a bylo otřeno od přebytečné vody ze zatěžované strany. Následně bylo rozlomeno v polovině, kolmo k povrchu zatěžovanému vodním tlakem. Po rozlomení byla označena hranice průsaku fixem a naměřené hodnoty největších průsaků byly zaznamenány na nejbližší milimetr.

Tab. 11: Tabulka naměřených hodnot hloubek průsaků tlakovou vodou všech betonových vzorků v době uložení A

Vzorek		Průsak betonu stáří A [mm]	
REF	I	55	58
	II	60	
XYP	I	60	55
	II	50	
CEM	I	28	29
	II	30	



Obr. 65: Graf zobrazující naměřené průměrné hodnoty průsaků tlakovou vodou na betonových vzorcích v čase zrání A

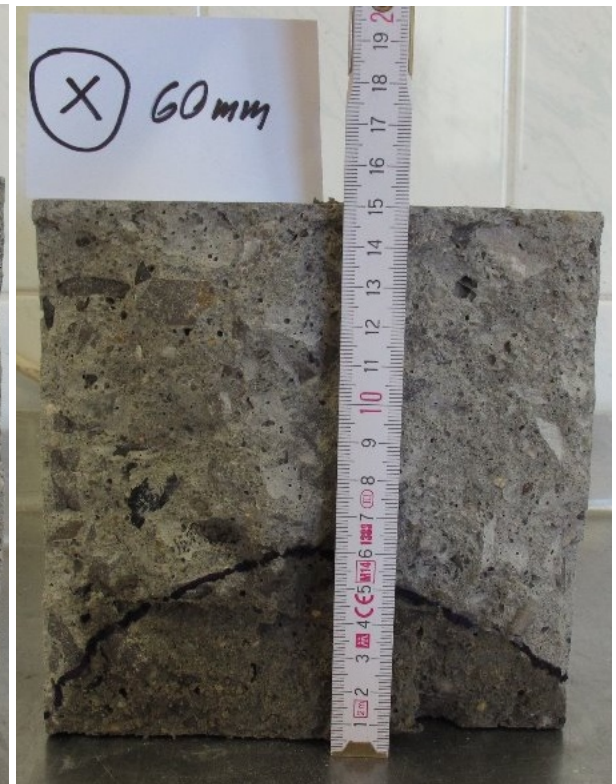
Z grafu lze vidět výsledky zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou. Nejvyšší hodnoty průsaku dosáhl beton REF, u kterého bylo naměřeno 58 mm. Téměř stejného průsaku nabyl beton XYP, jehož průsak byl naměřen 55 mm. Nejlépe ze všech směsí vyšel beton CEM, naměřená hodnota průsaku byla u této směsi 29 mm.



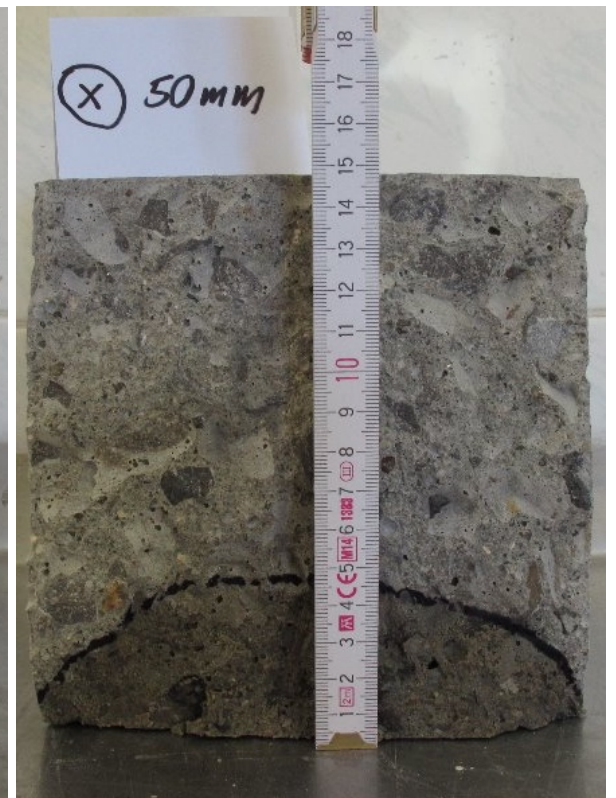
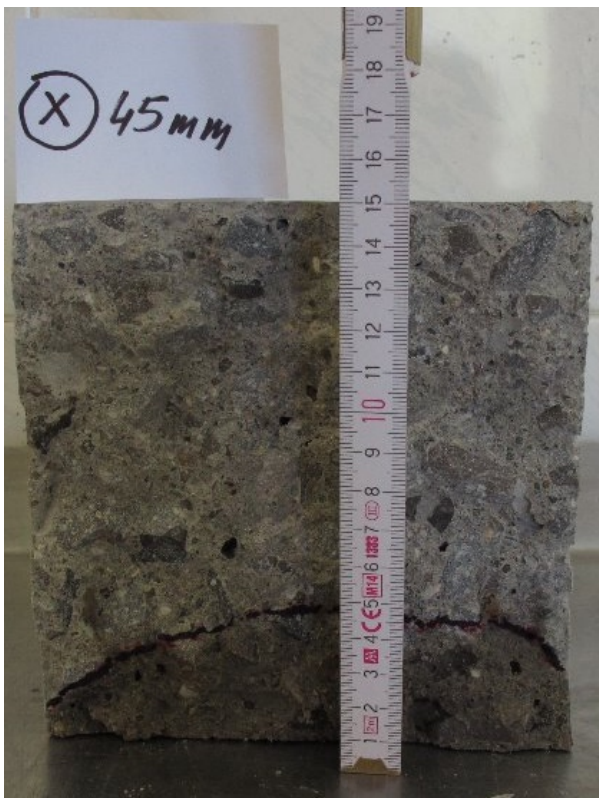
Obr. 66, 67: Průsaky tlakovou vodou obou polovin zkušební krychle REF I–55 mm



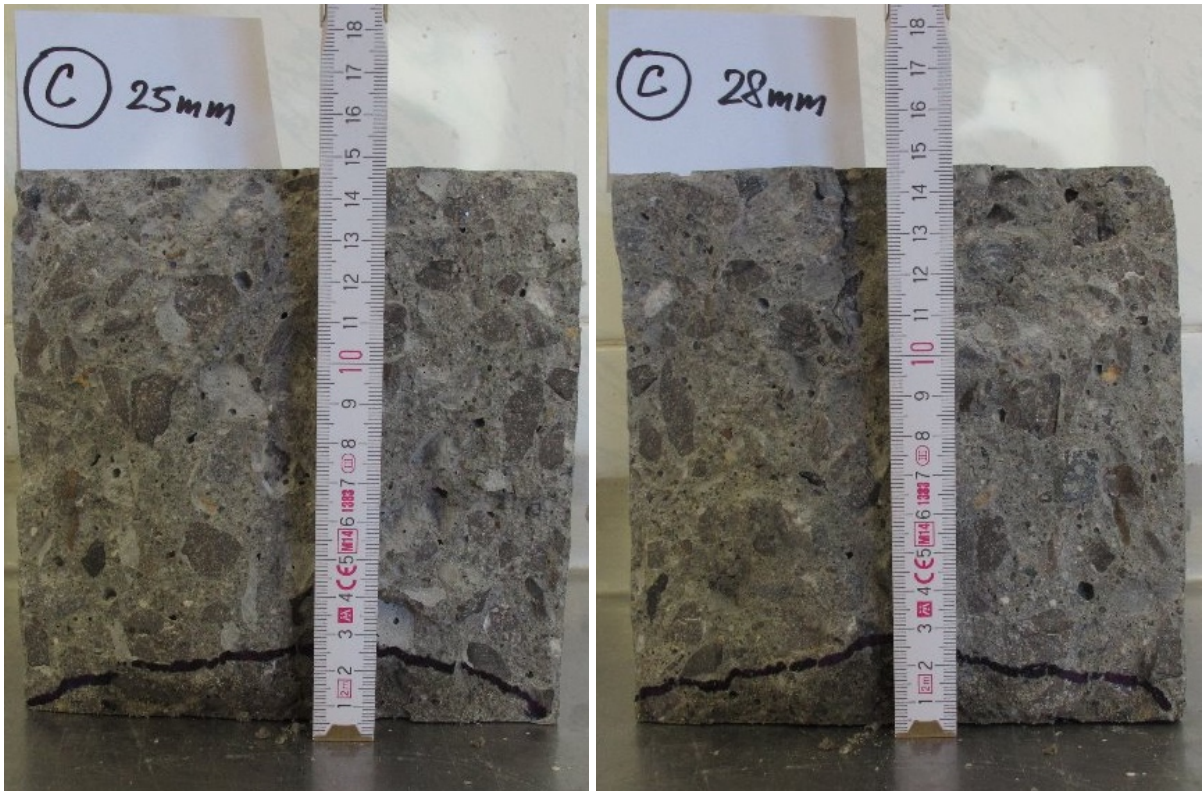
Obr. 68, 69: Průsaky tlakovou vodou obou polovin zkušební krychle REF II – 60 mm



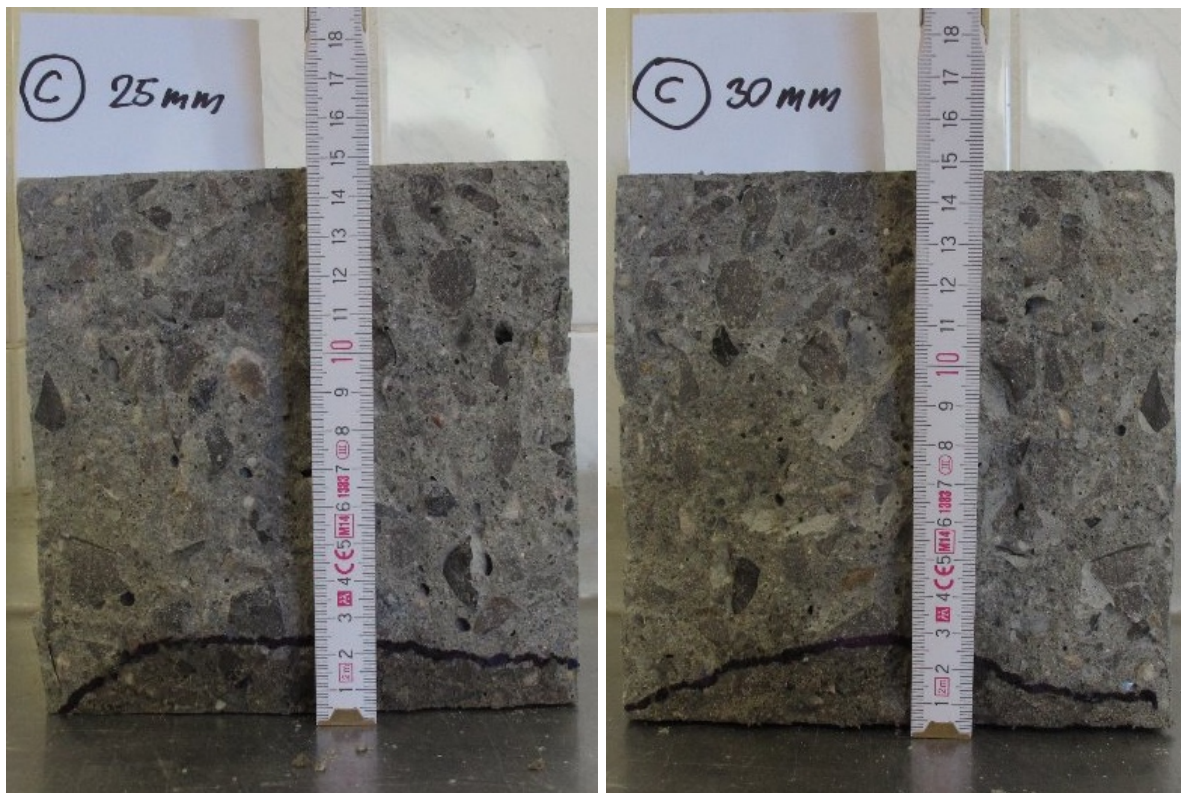
Obr. 70, 71: Průsaky tlakovou vodou obou polovin zkušební krychle XYP I-60 mm



Obr. 72, 73: Průsaky tlakovou vodou obou polovin zkušební krychle XYP II-50 mm



Obr. 74, 75: Průsaky tlakovou vodou obou polovin zkušební krychle CEM I–28 mm



Obr. 76, 77: Průsaky tlakovou vodou obou polovin zkušební krychle CEM II–30 mm

8. Měření hloubky průsaku tlakovou vodou na vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou

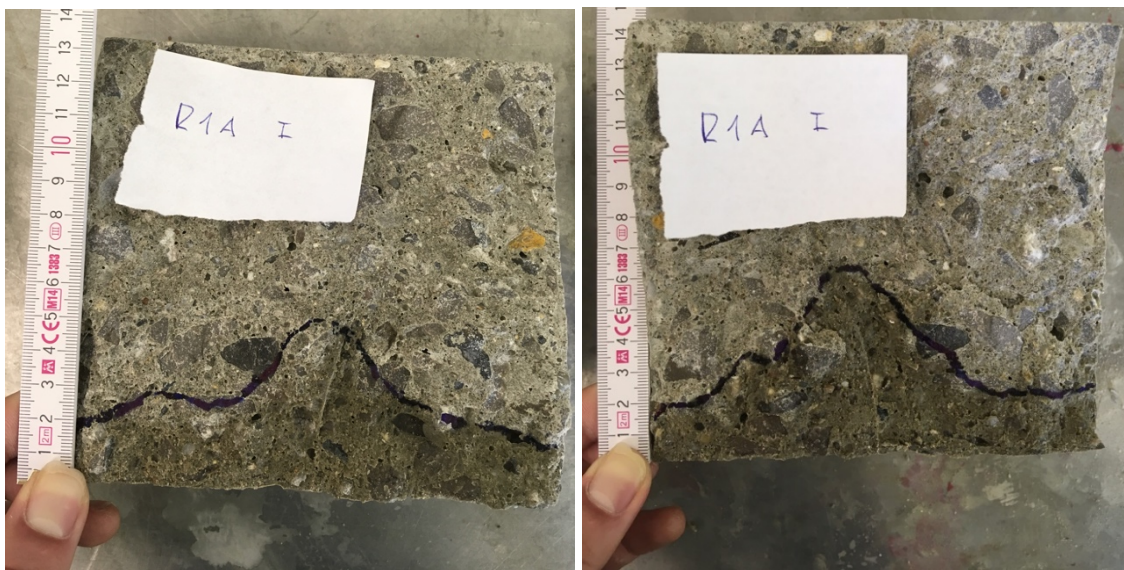
8.1. Úvod

Měření průsaku tlakovou vodou probíhalo na tělesech, která byla stará 28 dnů a více. Zkušební těleso bylo upnuto do zařízení a po dobu 72 ± 2 hodin na něj působil tlak 500 ± 50 kPa.

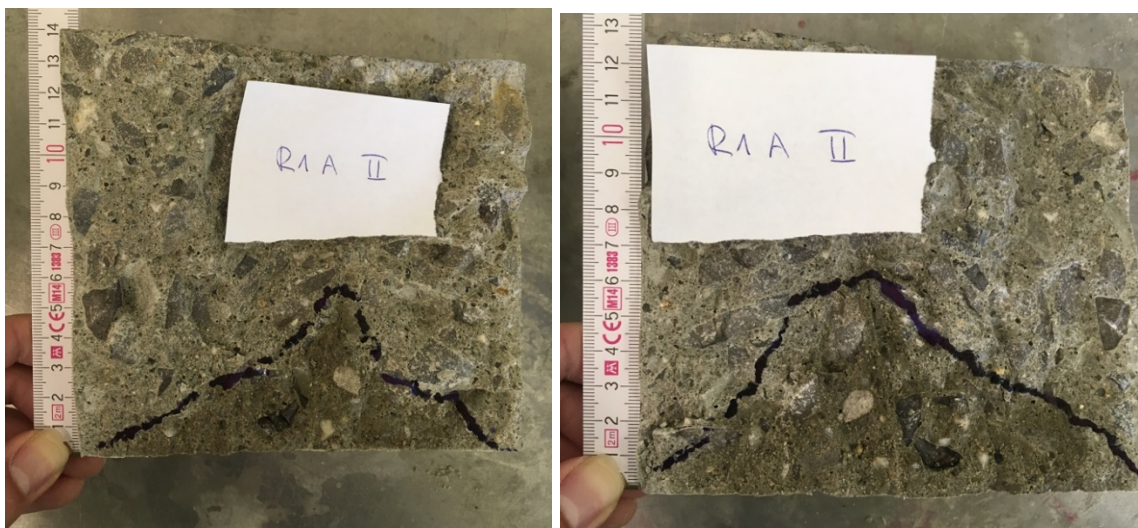
Podstatnou odchylkou od normy byla vytvořená trhлина. V normě žádná taková varianta není. Na nezatěžovaných stěnách tělesa se v některých případech objevila voda – to může být způsobeno především tím, že navzdory snaze o uhlazení povrchu krychle polystyrenovou deskou se to ne vždy podařilo a voda ve skutečnosti působila na větším poloměru, než je tomu běžně. To však v ničem nebrání úspěšnému vyhodnocení výsledků experimentu. Po ukončení zkoušky bylo těleso vyjmuta ze zatěžovací stolice a bylo otřeno od přebytečné vody ze zatěžované strany. Následně bylo rozlomeno v polovině, kolmo k povrchu zatěžovanému vodním tlakem. Po rozlomení byla označena hranice průsaku fixem a naměřené hodnoty největších průsaků byly zaznamenány na nejbližších 5 milimetrů. Bylo potřeba dbát zvýšené opatrnosti při lámání krychle, protože bylo velmi důležité, aby lom procházel místem, kde byla zasunuta spárová měrka. Po lomu krychle byly vždy z jedné krychle naměřeny 2 hodnoty průsaku, které byly někdy rozdílné více, někdy méně. Základní charakter křivky však zůstal vždy stejný. Z těchto dvou hodnot je vždy vybrána hodnota větší. Od každého typu vzorku byly testovány dva prvky.

8.2. Průběh křivky průsaku v čase A

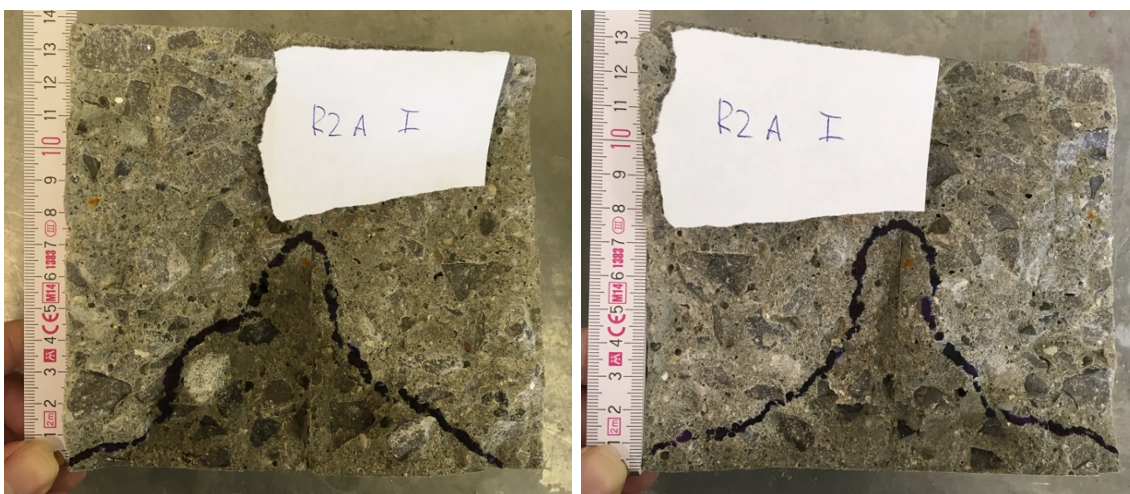
První testování průsaku krychlí s vytvořenou spárou proběhlo dne 30.4.2018. Jedná se o vzorky referenční – takové, kde beton zrál 28 dní a poté byly vzorky testovány. Lze vidět, že po době 28 dní zrání betonu se u žádné z receptur neprojevila samohojící funkce betonu do takové míry, aby zarostla alespoň spára o velikosti 0,1 mm.



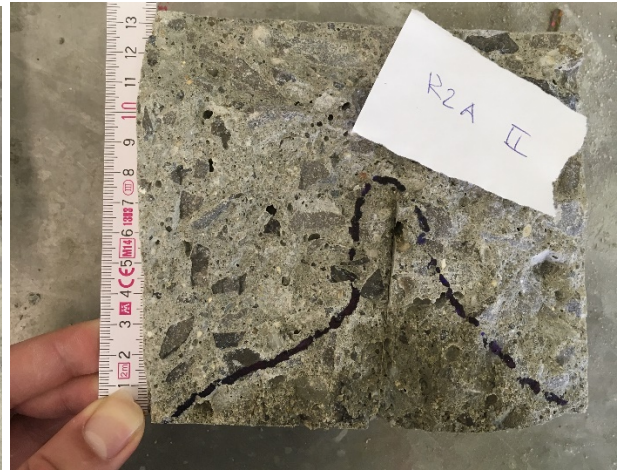
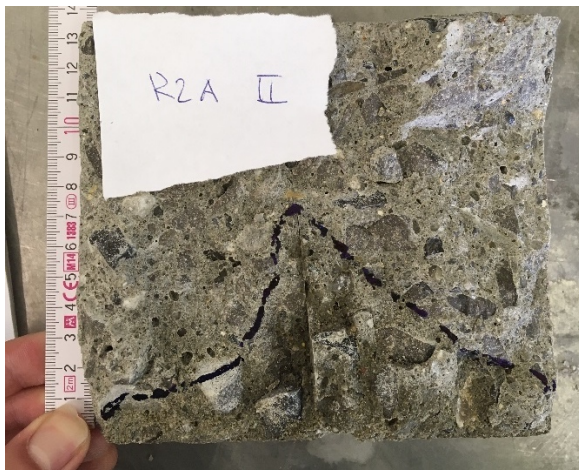
Obr. 78, 79: Průsaky tlakovou vodou vzorku R1A I– vlevo 50 mm, vpravo 65 mm



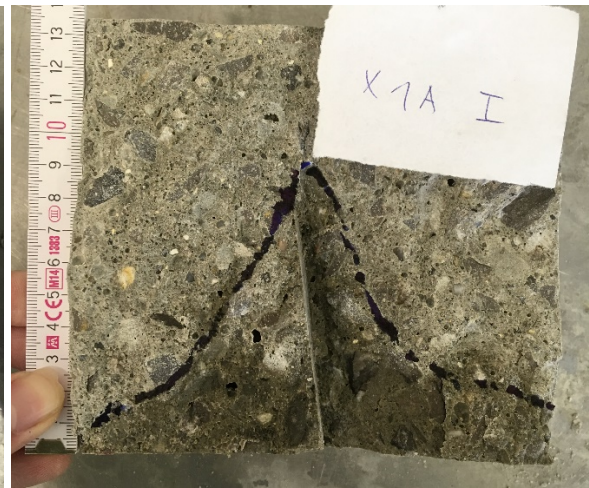
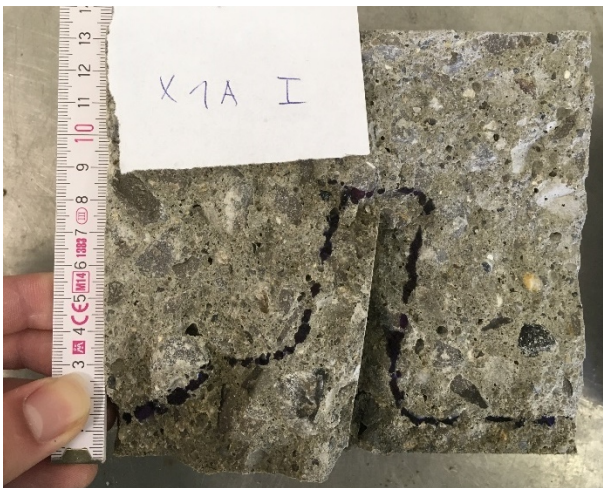
Obr. 80, 81: Průsaky tlakovou vodou vzorku R1A II– vlevo 60 mm, vpravo 65 mm



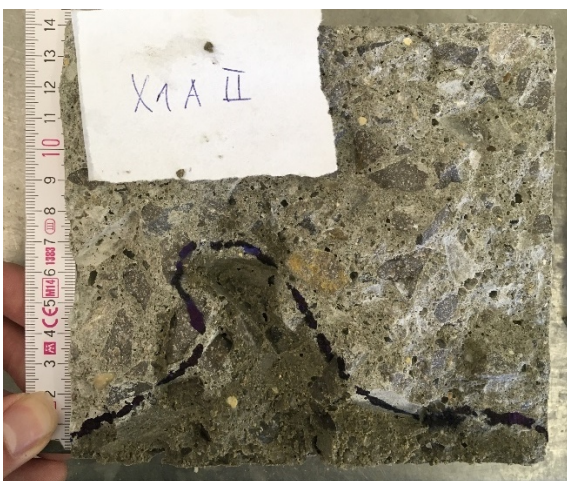
Obr. 82, 83: Průsaky tlakovou vodou vzorku R2A I– vlevo 75 mm, vpravo 80 mm



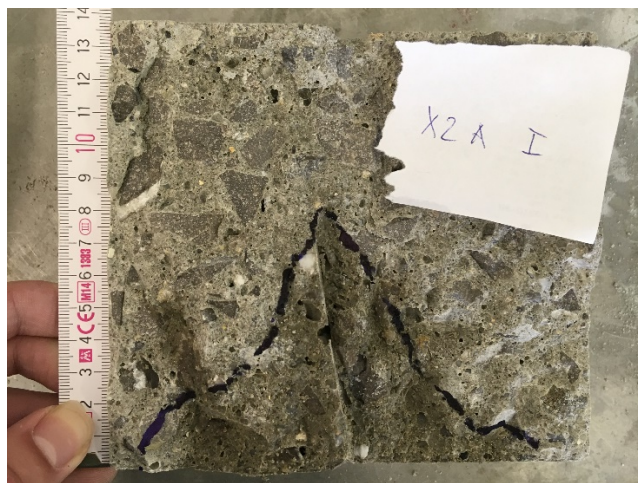
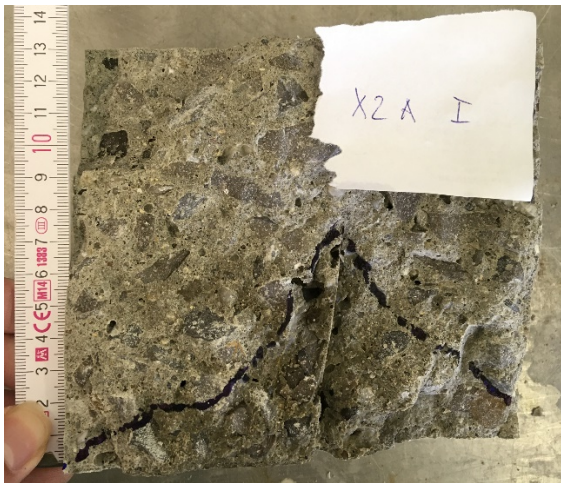
Obr. 84, 85: Průsaky tlakovou vodou vzorku R2A II– vlevo 80 mm, vpravo 80 mm



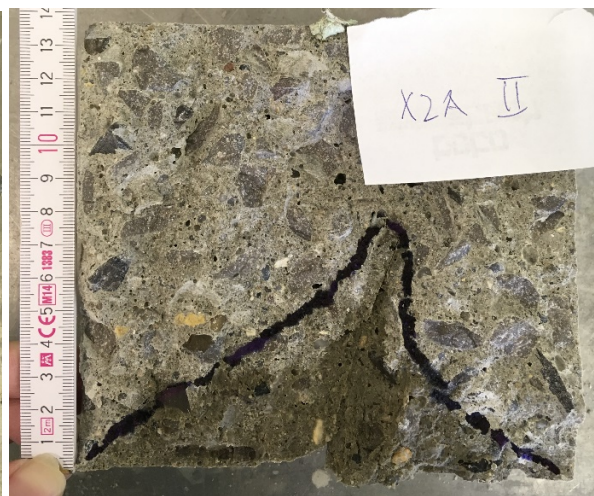
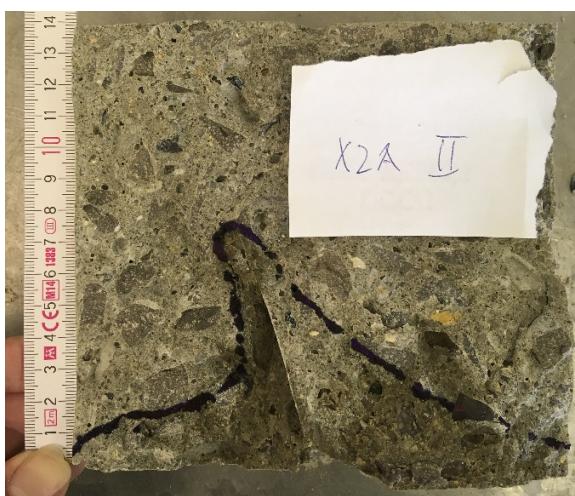
Obr. 86, 87: Průsaky tlakovou vodou vzorku X1A I– vlevo 85 mm, vpravo 90 mm



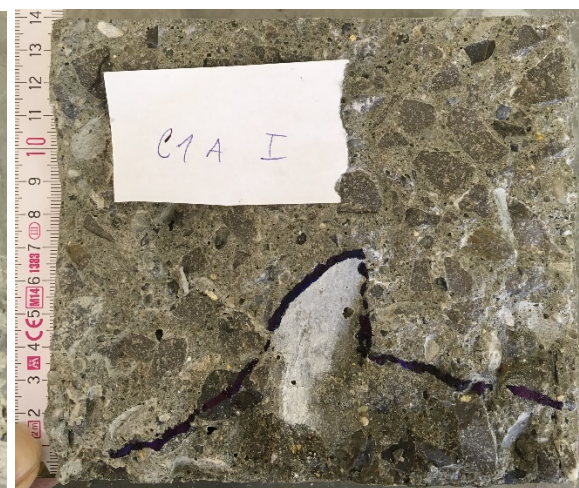
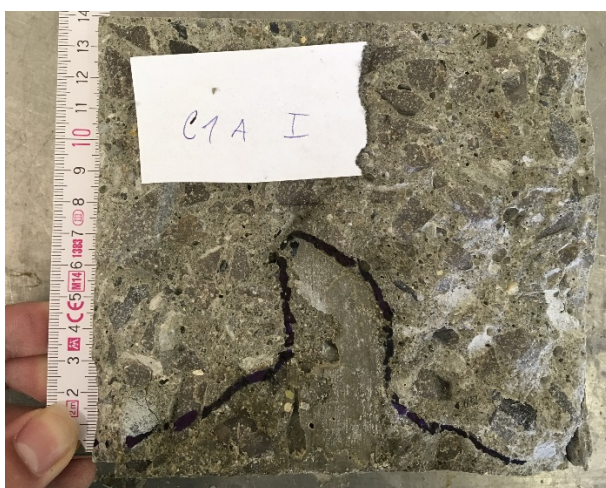
Obr. 88, 89: Průsaky tlakovou vodou vzorku X1A II– vlevo 70 mm, vpravo 75 mm. Na obou fotografiích lze vidět, že zasouvání spárové měřky do betonu nešlo vždy snadno. V tomto případě je zřejmá kolize s větším zrnem kameniva, na experiment tato situace však vliv nemá



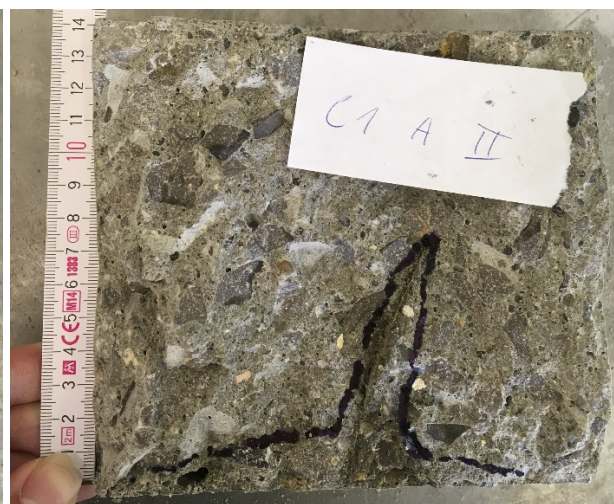
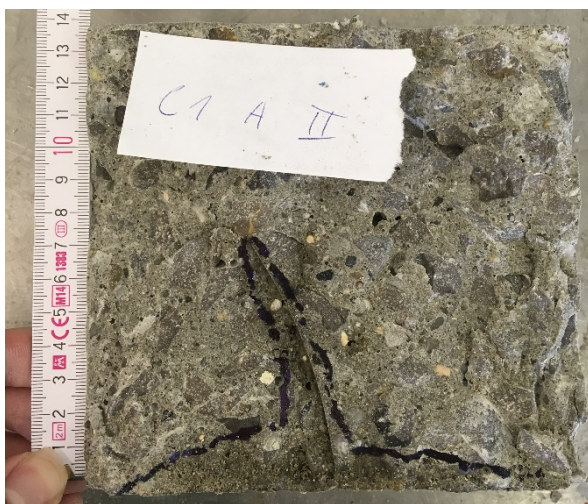
Obr. 90, 91: Průsaky tlakovou vodou vzorku X2A I– vlevo 75 mm, vpravo 80 mm



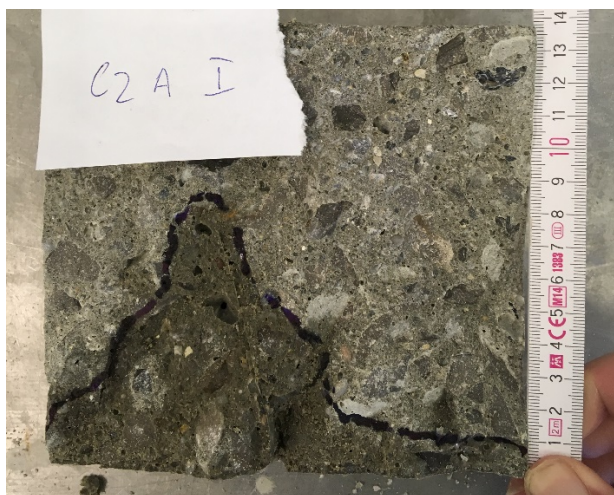
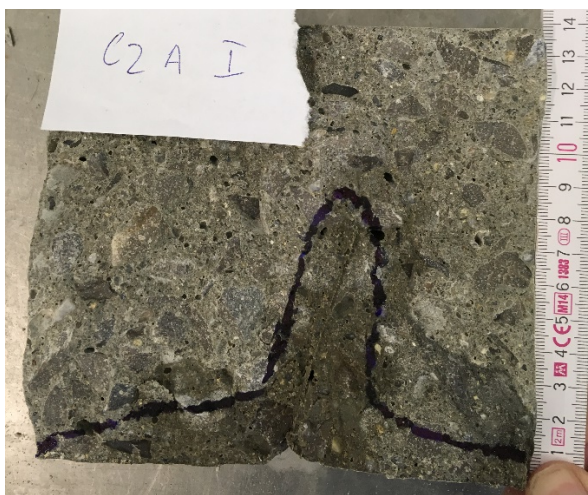
Obr. 92, 93: Průsaky tlakovou vodou vzorku X2A II– vlevo 80 mm, vpravo 80 mm



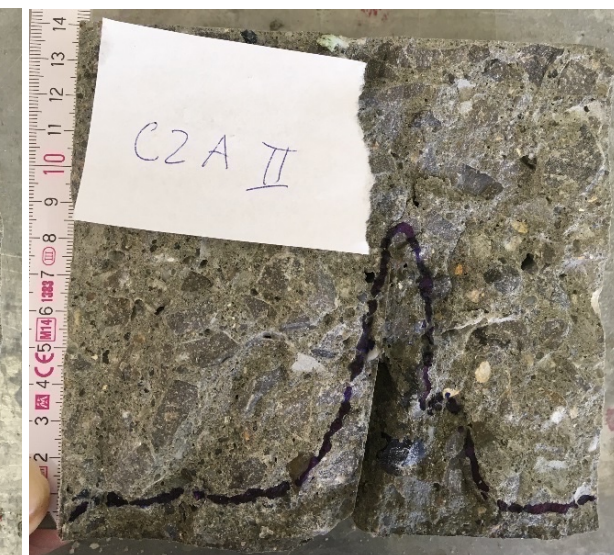
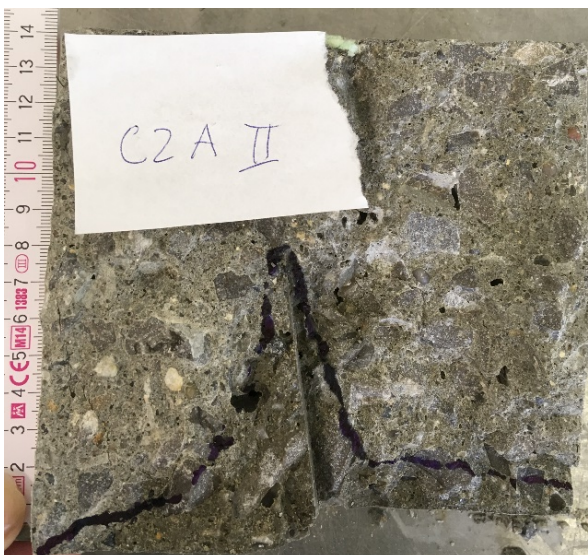
Obr. 94, 95: Průsaky tlakovou vodou vzorku C1A I– vlevo 70 mm, vpravo 70 mm. Na tomto vzorku byl otestován lom krychlí ve směru rovnoběžném se spárou, a to za účelem ověření správného přístupu k ostatním vzorkům. Poté, co by spára zarostla a lom by jí neprošel, byly výsledky zkreslené. Tento přístup byl tedy opuštěn a všechny ostatní vzorky byly lámány kolmo ke spáře.



Obr. 96, 97: Průsaky tlakovou vodou vzorku C1A II– vlevo 75 mm, vpravo 70 mm



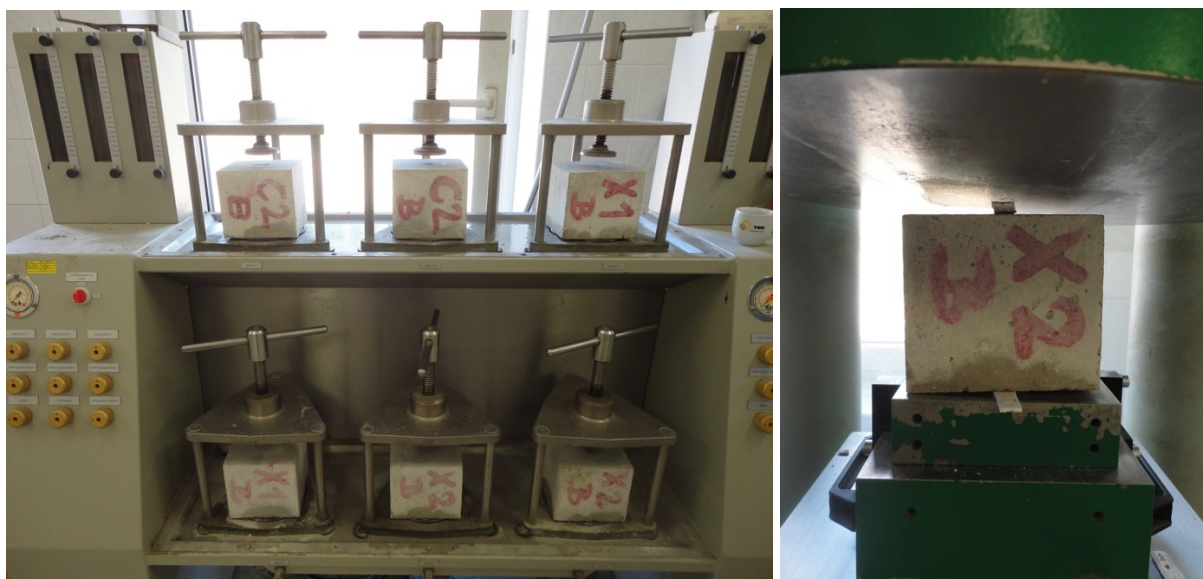
Obr. 98, 99: Průsaky tlakovou vodou vzorku C2A I– vlevo 85 mm, vpravo 85 mm



Obr. 100, 101: Průsaky tlakovou vodou vzorku C2A II– vlevo 80 mm, vpravo 85 mm

8.3. Průběh křivky průsaku v čase B

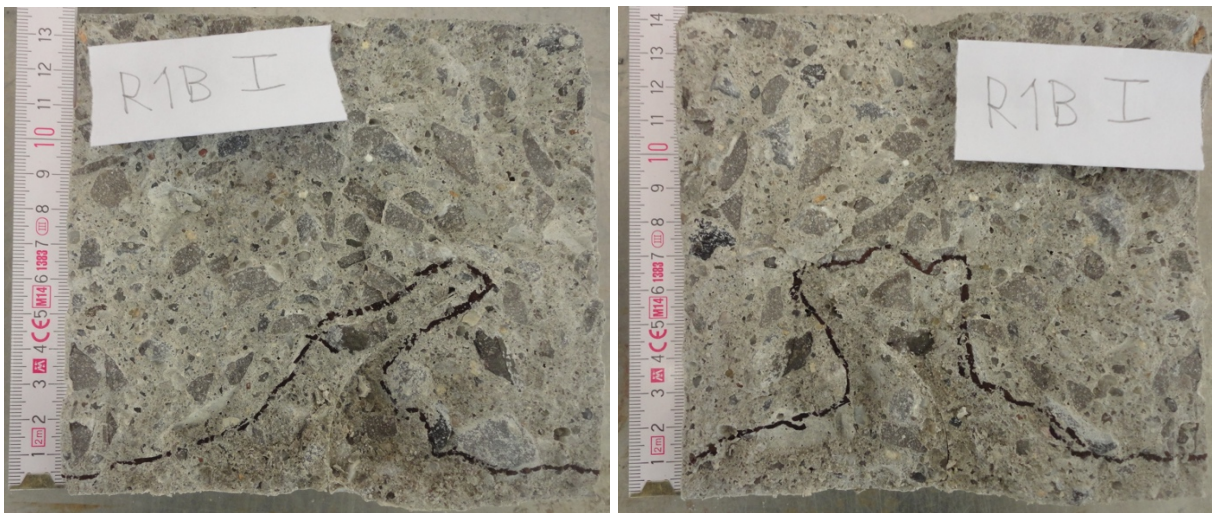
Dne 3.8.2018 a 6.8.2018 byla otestována část vyrobených vzorků určených pro testování v čase B – tedy ve stáří vzorků 3 měsíce. Rozdílné dny testování zapříčinil nedostatek míst na zatěžovací stoličce. Při testování v takovémto časovém horizontu je rozdíl 3 dnů zanedbatelný. Z rozlomených krychlí lze vidět, že spáry vytvořené spárovou měrkou tl. 0,2 mm mají většinou ideální tvar, zatímco spáry 0,1 mm jsou často s odkloněnou trajektorií od ideálního přímého stavu kvůli jejich vyšší poddajnosti v kombinaci s překážkami v podobě kameniva v betonu. Ani testování v čase B neprokázalo při vyhodnocování to, že by vytvořená spára zarostla.



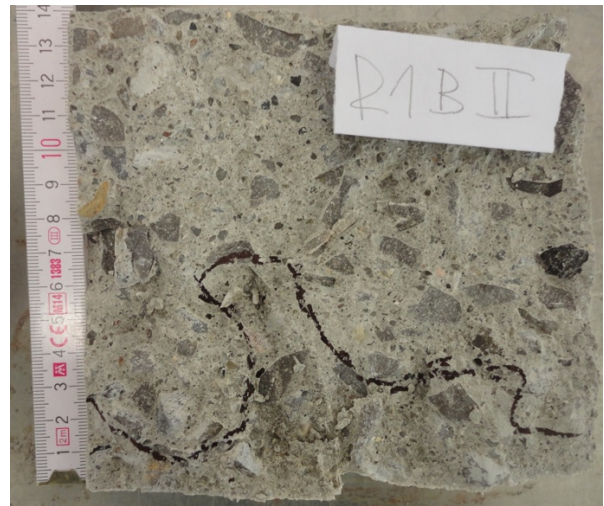
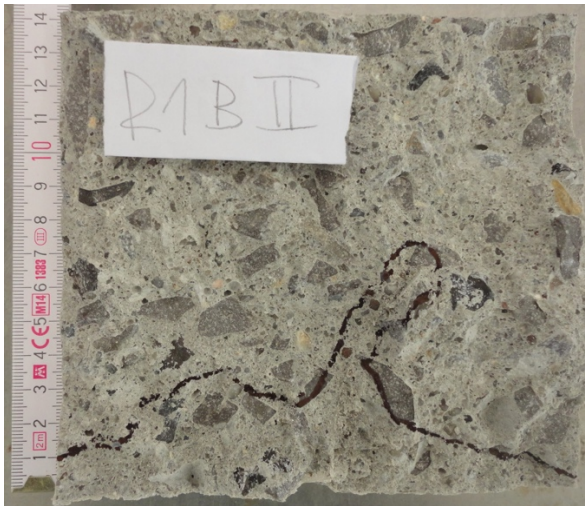
Obr. 102, 103: Vlevo vzorky testované dne 3.8.2018, vpravo princip rozlomení krychle v polovině působením příčného tahu



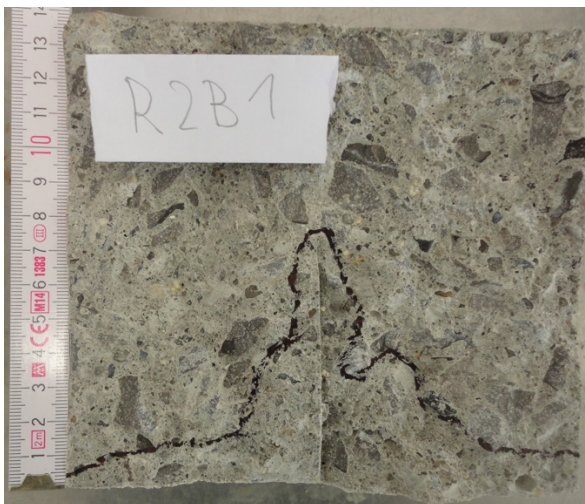
Obr. 104: Připravené vzorky na testování 6.8.2018 nasazené na stoličky zatížené vodním tlakem



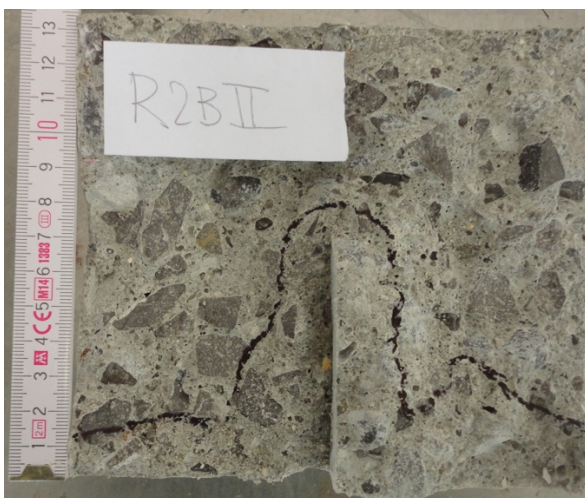
Obr. 105, 106: Průsaky tlakovou vodou vzorku R1B I – vlevo 65 mm, vpravo 70 mm



Obr. 107, 108: Průsaky tlakovou vodou vzorku R1B II– vlevo 75 mm, vpravo 70 mm



Obr. 109, 110: Průsaky tlakovou vodou vzorku R2B I– vlevo 75 mm, vpravo 80 mm



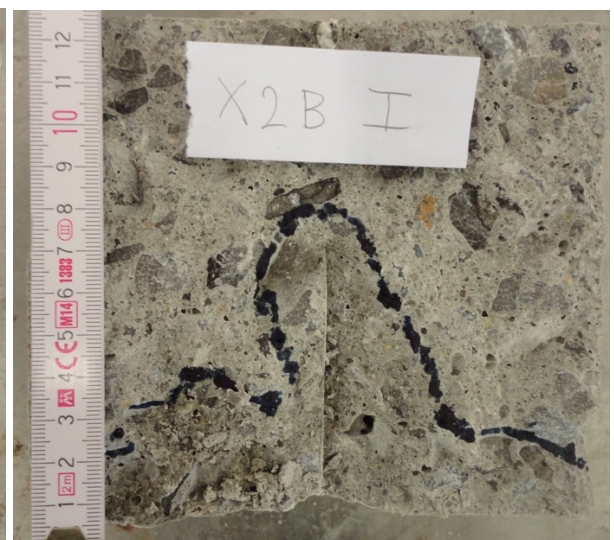
Obr. 111, 112: Průsaky tlakovou vodou vzorku R2B II– vlevo 80 mm, vpravo 85 mm



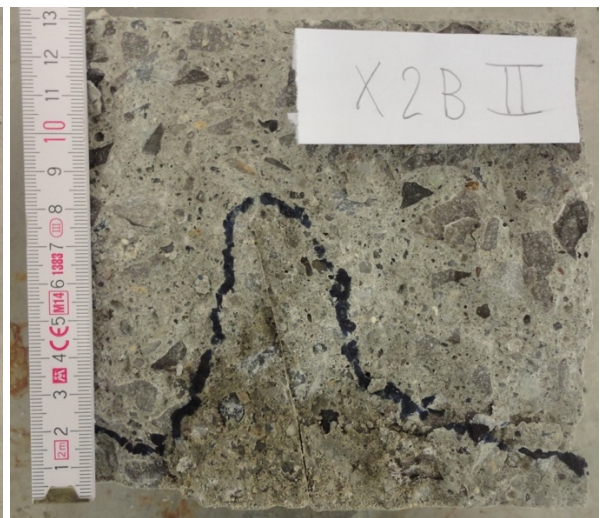
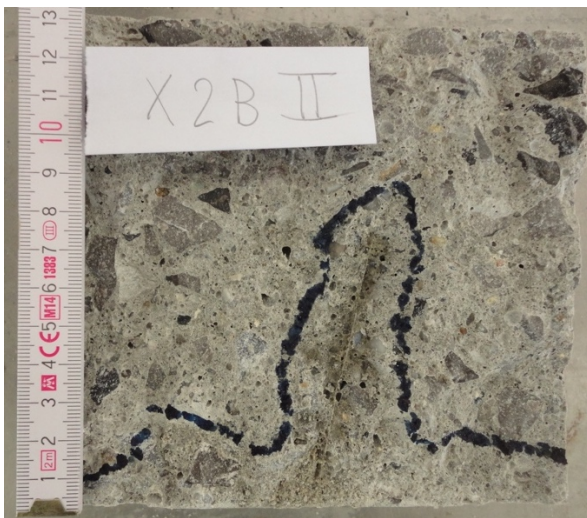
Obr. 113, 114: Průsaky tlakovou vodou vzorku X1B I– vlevo 75 mm, vpravo 85 mm



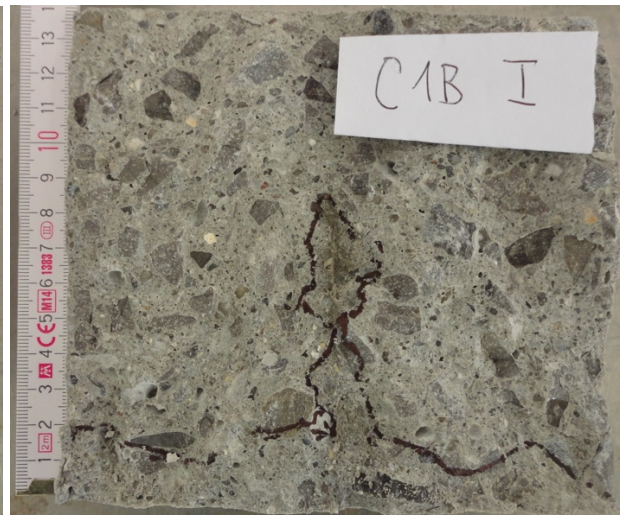
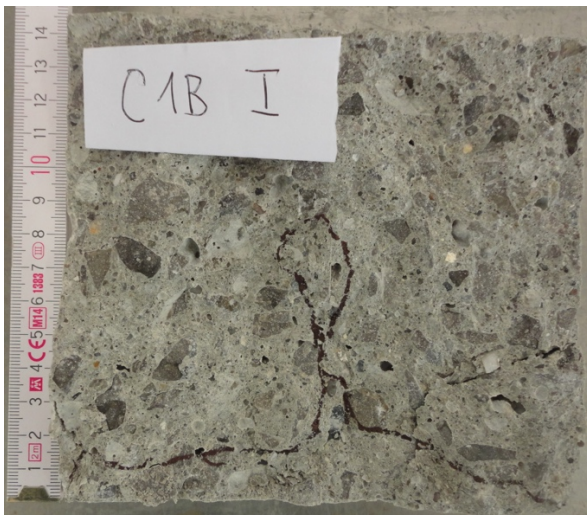
Obr. 115, 116: Průsaky tlakovou vodou vzorku X1B II– vlevo 85 mm, vpravo 85 mm



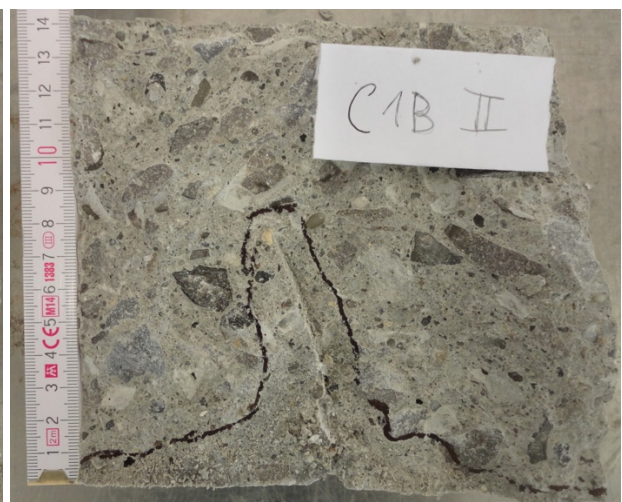
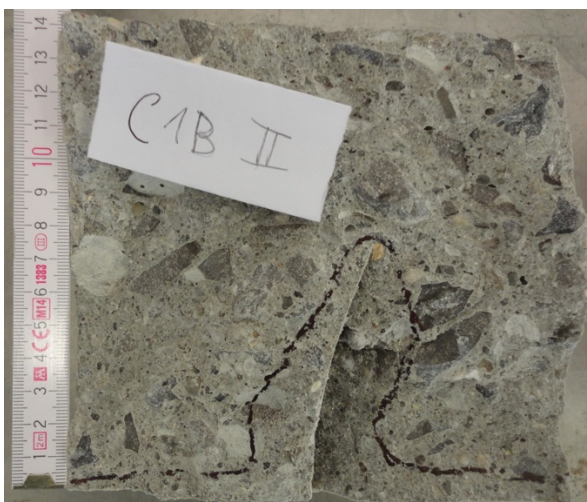
Obr. 117, 118: Průsaky tlakovou vodou vzorku X2B I– vlevo 85 mm, vpravo 85 mm



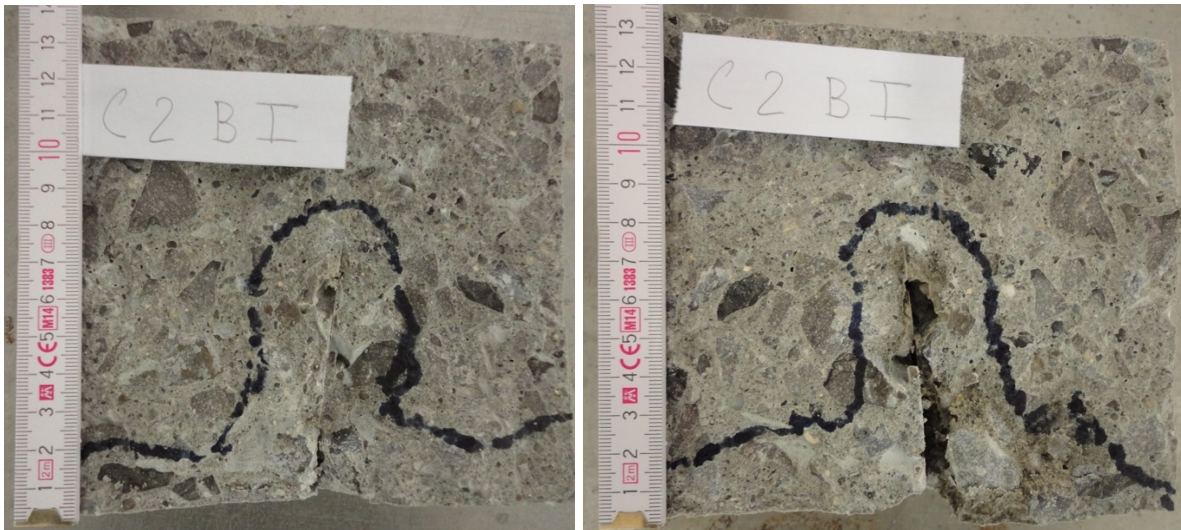
Obr. 119, 120: Průsaky tlakovou vodou vzorku X2B II– vlevo 90 mm, vpravo 85 mm



Obr. 121, 122: Průsaky tlakovou vodou vzorku C1B I– vlevo 85 mm, vpravo 85 mm. Na tomto vzorku je vidět jako na jediném z testovaných v čase B, že se možná začala spára zacelovat, lze tak usoudit podle zúženého místa kolem spáry vytvořené spárovou měrkou.



Obr. 123, 124: Průsaky tlakovou vodou vzorku C1B II– vlevo 80 mm, vpravo 85 mm



Obr. 125, 126: Průsaky tlakovou vodou vzorku C2B I– vlevo 90 mm, vpravo 90 mm. Na tomto vzorku lze vidět, že se ne vždy podařilo správně osadit spárovou měrku do krychle. V tomto konkrétním případě se vytvořila vzduchová bublina při celém jejím povrchu a vytvořená spára svou tloušťkou zcela neodpovídá předpokladu, jedná se tedy o neplatný vzorek.



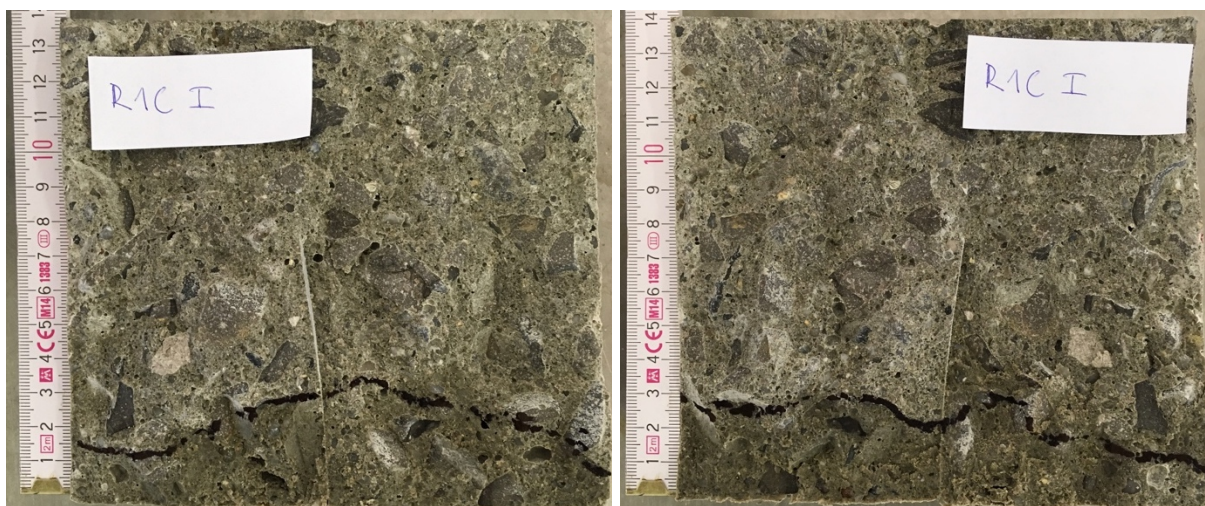
Obr. 127, 128: Průsaky tlakovou vodou vzorku C2B II– vlevo 80 mm, vpravo 80 mm. Tento vzorek byl původně rozlomen špatně – rovnoběžně se spárou. Naštěstí šla krychle bez problému rozdělit i ve směru kolmém ke spáře a křivku průsaku se tím povedlo zaznamenat i na tomto vzorku

8.4. Průběh křivky průsaku v čase C

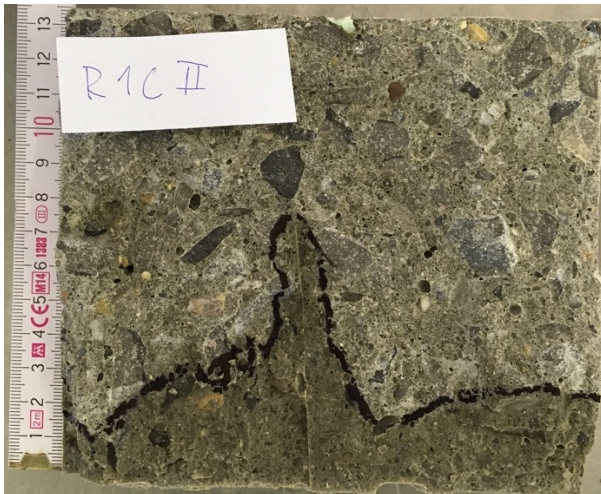
Dne 24.10.2018 a 30.10.2018 byla otestována část vyrobených vzorků určených pro testování v čase C – tedy ve stáří vzorků 6 měsíců. Rozdílné dny testování zapříčinil nedostatek míst na zatěžovací stoličce. Při testování na takovémto časovém horizontu je rozdíl 3 dnů zanedbatelný. Z rozlomených krychlí lze opět vidět, že spáry vytvořené spárovou měrkou tl. 0,2 mm mají většinou ideální tvar, zatímco spáry 0,1 mm jsou často s odkloněnou trajektorií od ideálního přímého stavu kvůli jejich vyšší poddajnosti v kombinaci s překážkami v podobě kameniva v betonu.

Testování v čase C prokázalo zacelení pouze jednoho vzorku. Konkrétně se jedná o vzorek R1C I. Průsak u tohoto vzorku nabyl normálního tvaru tak, jak bylo očekáváno dle předpokladu experimentu.

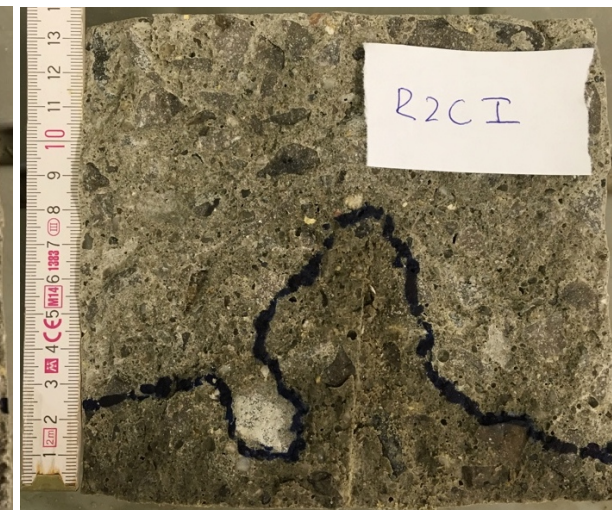
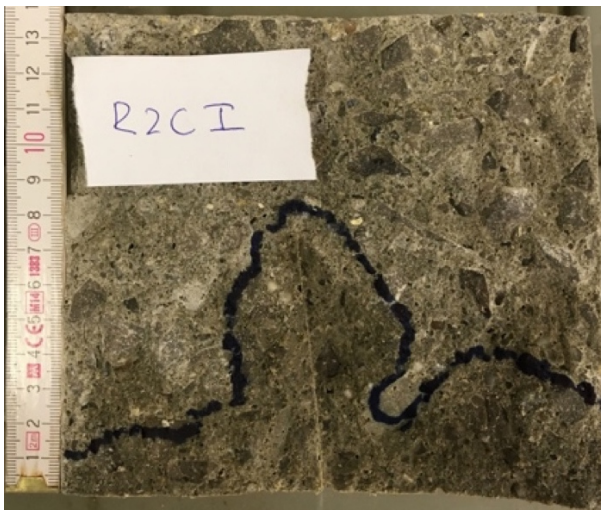
Drobnou komplikací se při testování posledních vzorků stal vzorek X2C II. Tento vzorek nešel z důvodu špatné povrchové úpravy zatěžované stěny vodním tlakem řádně utěsnit, a proto byl z testování tlakovou vodou vyřazen. Posloužil však dobře při ověření, zda se voda z běžného uložení, které vzorek nezatížilo vodním tlakem, dostala do celé hloubky vytvořené spáry. Vzorek byl v lisu rozštípnut stejně jako by byl po testování zkouškou průsaku tlakové vody a z obr. 143 a 144 je jasně vidět, že voda skutečně působila v plné hloubce spáry. Dále se podařilo při posledním testování pořídit přibližné snímky trhlin ve všech záměsích. Jasně se tak ukázalo, že průsak vody do trhliny není ani po 6 měsících testování náhodou, protože trhliny nebyly viditelně zaceleny.



Obr. 129, 130: Průsaky tlakovou vodou vzorku R1C I – vlevo 35 mm, vpravo 35 mm



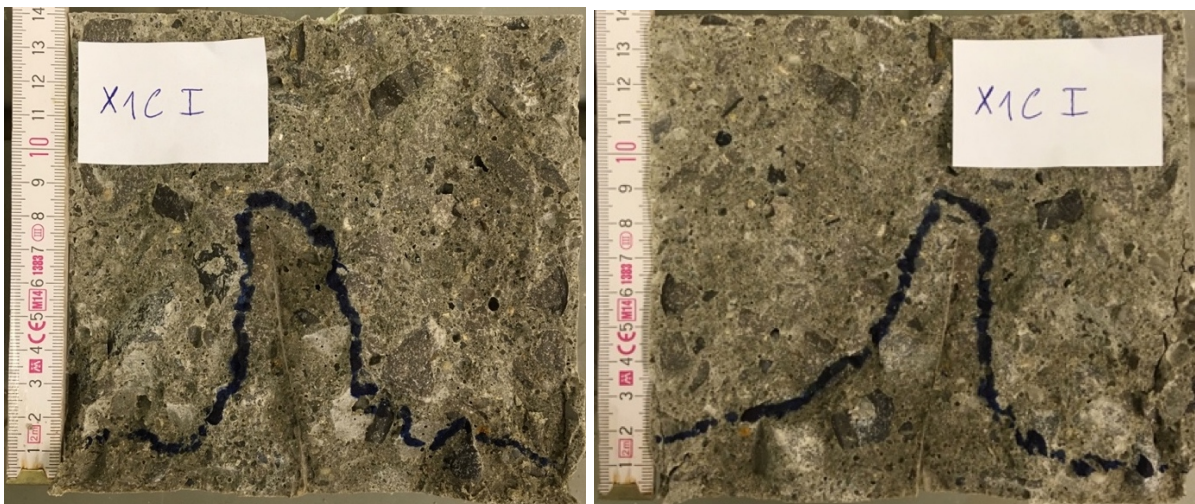
Obr. 131, 132: Průsaky tlakovou vodou vzorku R1C II– vlevo 75 mm, vpravo 75 mm



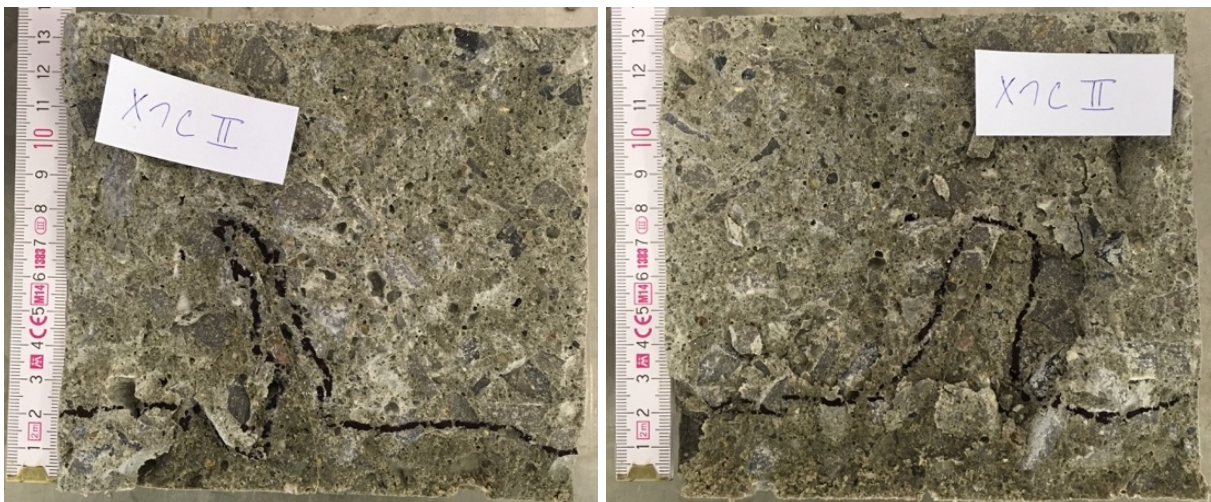
Obr. 133, 134: Průsaky tlakovou vodou vzorku R2C I– vlevo 85 mm, vpravo 80 mm



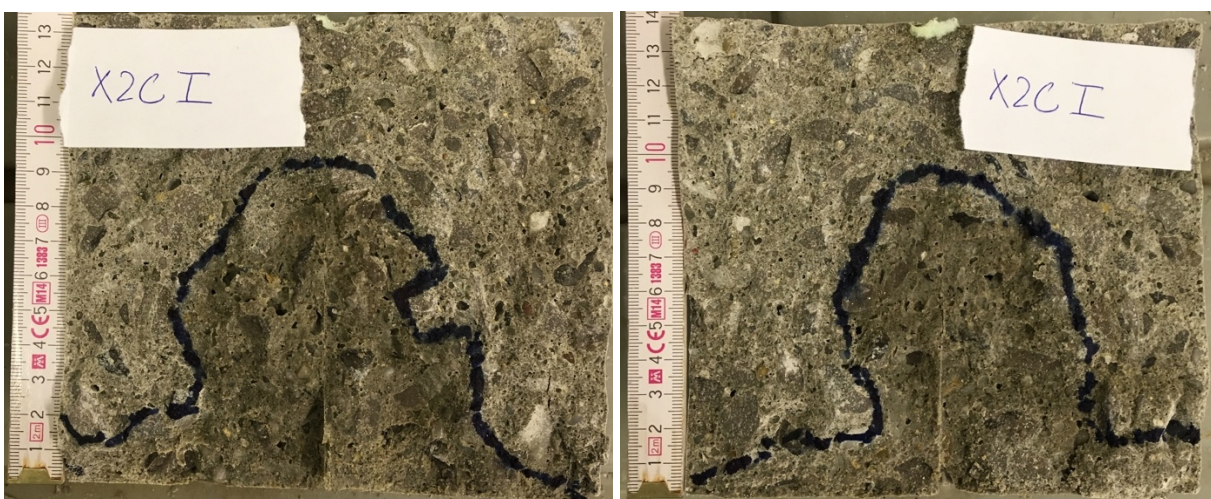
Obr. 135, 136: Průsaky tlakovou vodou vzorku R2C II– vlevo 85 mm, vpravo 90 mm



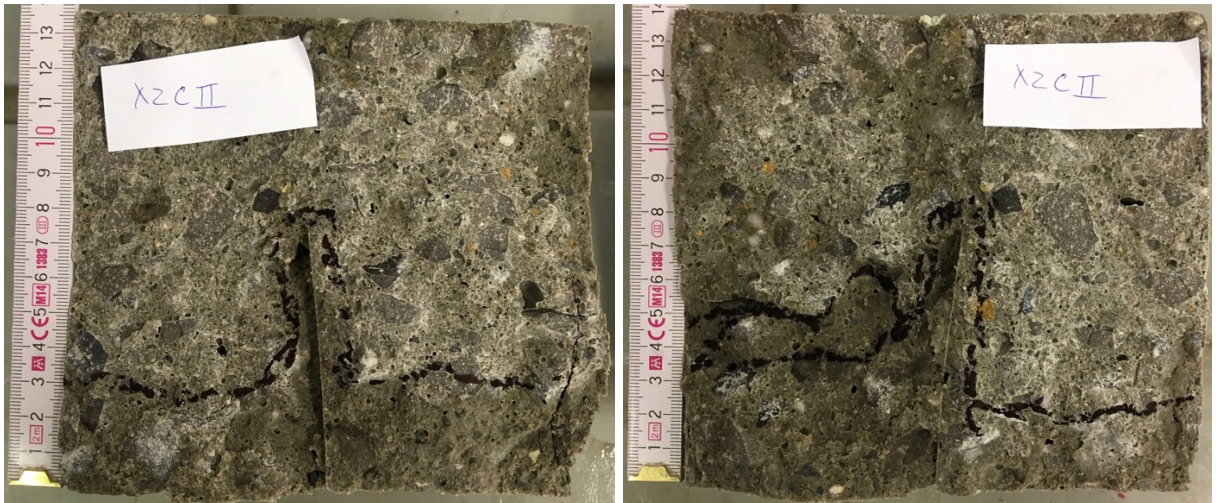
Obr. 137, 138: Průsaky tlakovou vodou vzorku X1C I– vlevo 85 mm, vpravo 85 mm



Obr. 139, 140: Průsaky tlakovou vodou vzorku X1C II– vlevo 80 mm, vpravo 80 mm



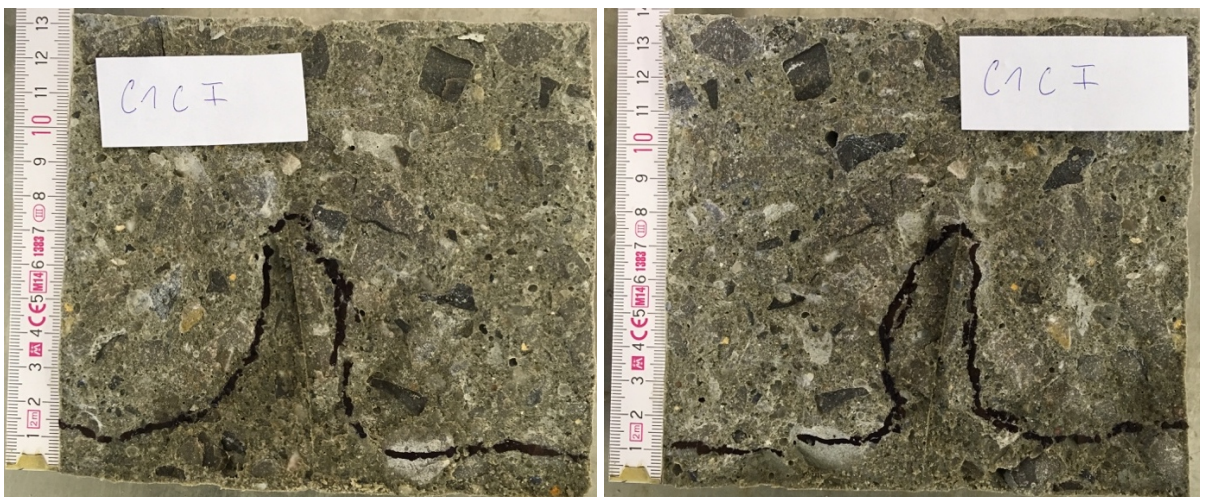
Obr. 141, 142: Průsaky tlakovou vodou vzorku X2C I– vlevo 85 mm, vpravo 90 mm



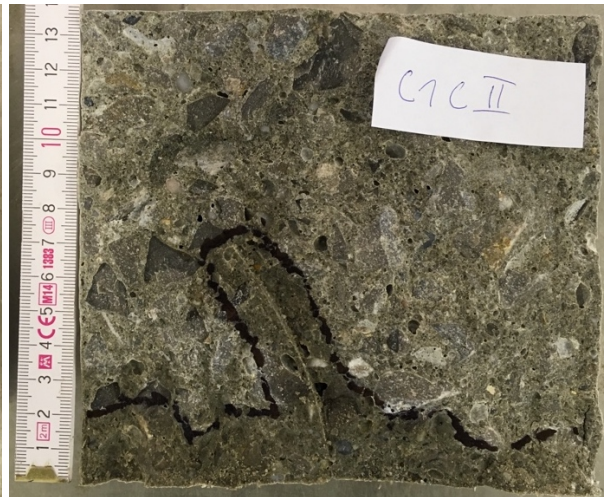
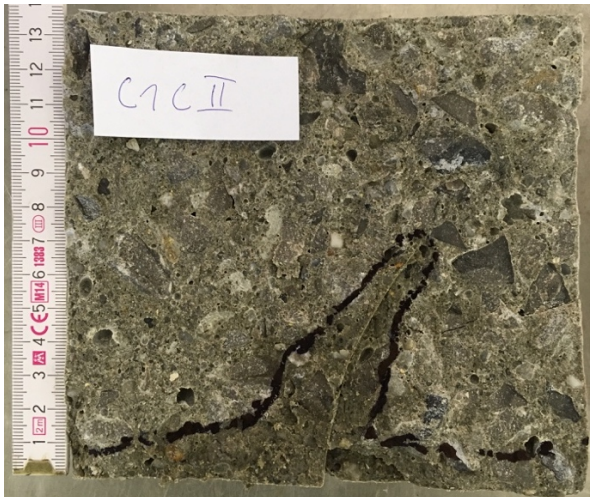
Obr. 143, 144: Průsaky vodou v běžném uložení vzorku X2C II– vlevo 80 mm, vpravo 80 mm



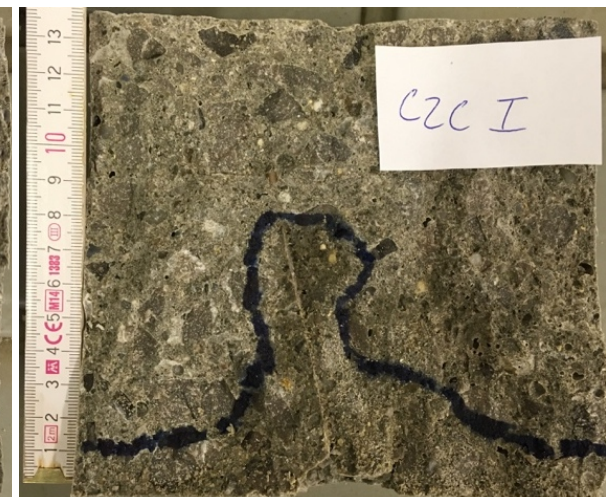
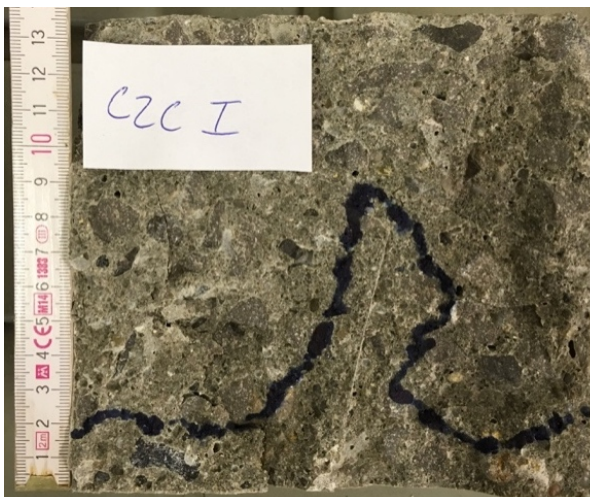
Obr. 145, 146: Vlevo označení vzorku, který nemohl být jako jediný otestován zatížením vodním tlakem kvůli špatně upravenému povrchu, který měl být vodním tlakem zatížen. Vpravo je vidět detail zatěžované strany.



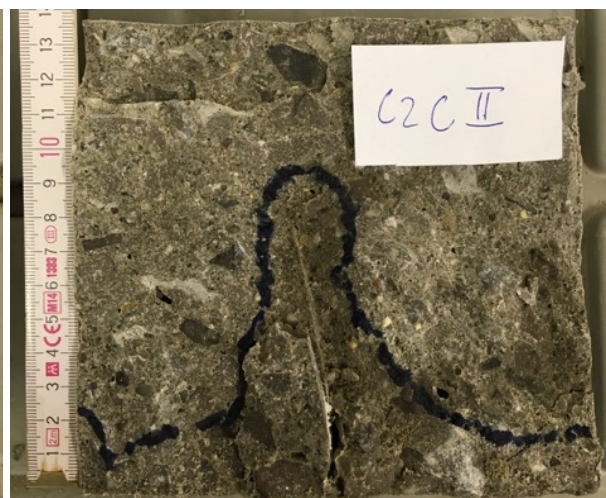
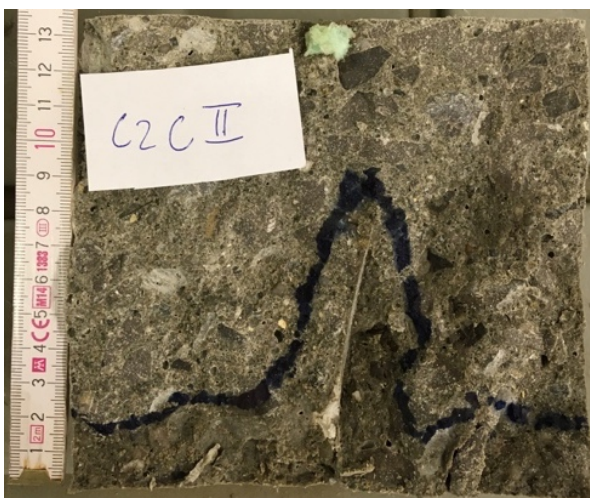
Obr. 147, 148: Průsaky tlakovou vodou vzorku CIC I– vlevo 75 mm, vpravo 75 mm



Obr. 149, 150: Průsaky tlakovou vodou vzorku C1C II– vlevo 75 mm, vpravo 75 mm



Obr. 151, 152: Průsaky tlakovou vodou vzorku C2C I– vlevo 85 mm, vpravo 80 mm



Obr. 153, 154: Průsaky tlakovou vodou vzorku C2C II– vlevo 85 mm, vpravo 90 mm

8.5. Vyhodnocení naměřených hodnot

V následujících tabulkách a grafech jsou shrnuty výsledky naměřené na vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou v čase A, B a C.

Tab. 12: Tabulka naměřených hodnot hloubek průsaků tlakovou vodou na vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou v čase A

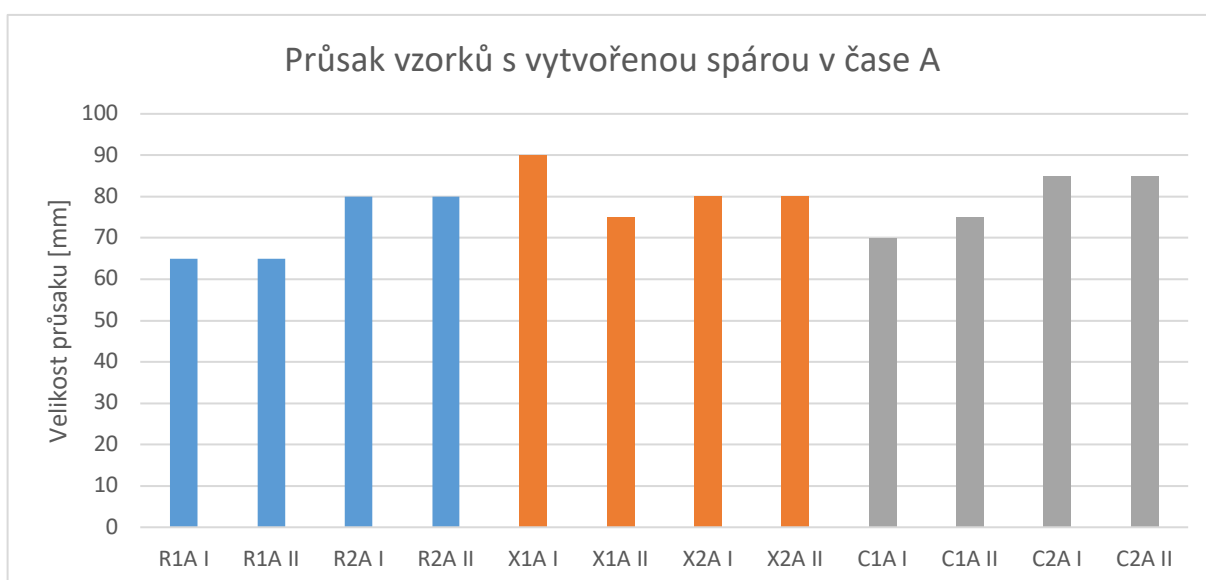
Čas A			
Vzorek		Průsak [mm]	Průměrný zaokrouhlený průsak [mm]
R1A	I	65	65
	II	65	
R2A	I	80	80
	II	80	
X1A	I	90	83
	II	75	
X2A	I	80	80
	II	80	
C1A	I	70	73
	II	75	
C2A	I	85	85
	II	85	

Tab. 13: Tabulka naměřených hodnot hloubek průsaků tlakovou vodou na vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou v čase B

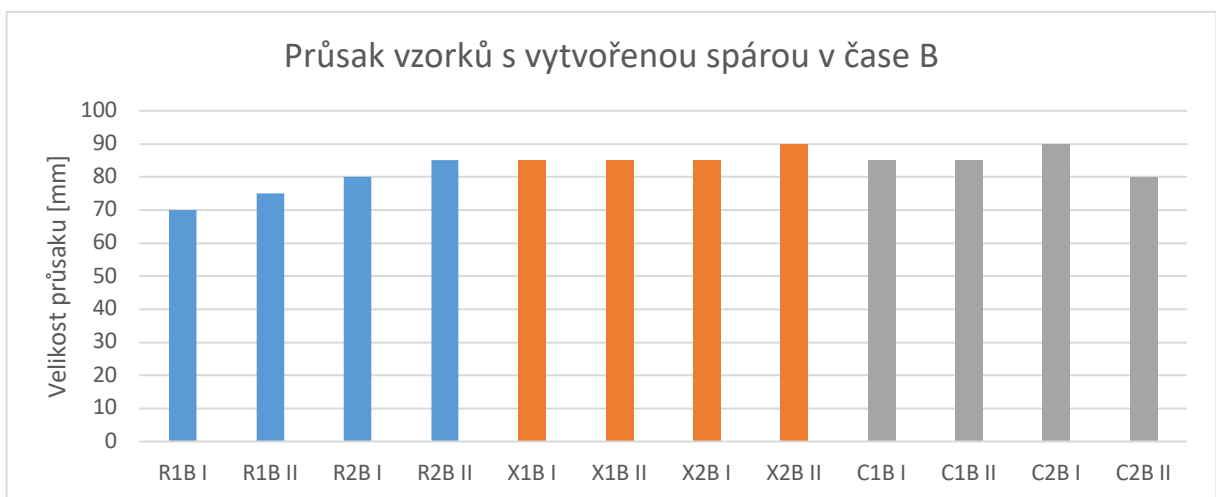
Čas B			
Vzorek		Průsak [mm]	Průměrný zaokrouhlený průsak [mm]
R1B	I	70	73
	II	75	
R2B	I	80	83
	II	85	
X1B	I	85	85
	II	85	
X2B	I	85	88
	II	90	
C1B	I	85	85
	II	85	
C2B	I	90	85
	II	80	

Tab. 14: Tabulka naměřených hodnot hloubek průsaků tlakovou vodou na vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou v čase C

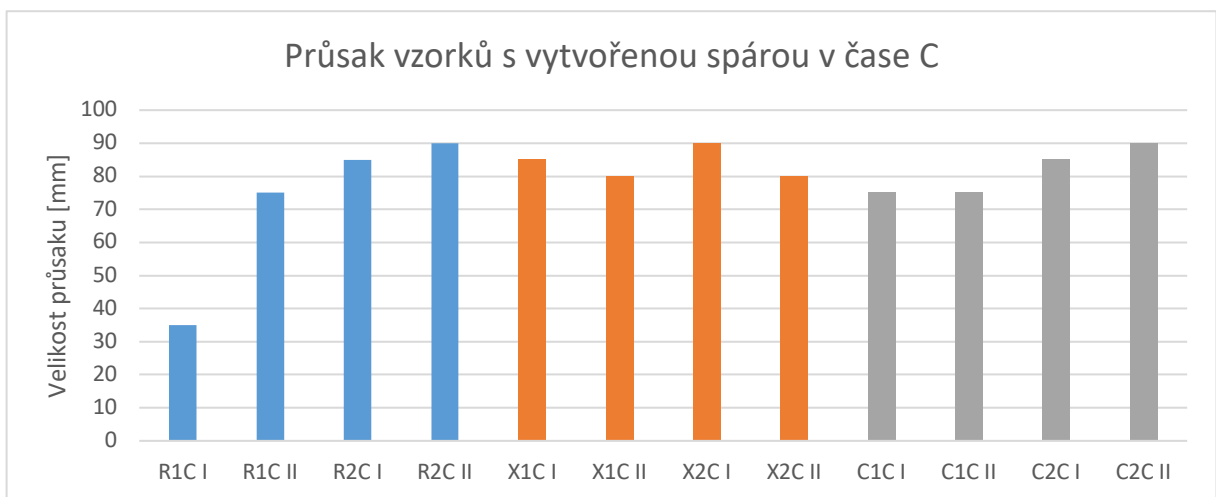
Čas C			
Vzorek		Průsak [mm]	Průměrný zaokrouhlený průsak [mm]
R1C	I	35	55
	II	75	
R2C	I	85	88
	II	90	
X1C	I	85	83
	II	80	
X2C	I	90	85
	II	80	
C1C	I	75	75
	II	75	
C2C	I	85	88
	II	90	



Obr. 155: Graf zobrazující naměřené hodnoty průsaků tlakovou vodou na betonových vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou v čase A



Obr. 156: Graf zobrazující naměřené hodnoty průsaků tlakovou vodou na betonových vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou v čase B



Obr. 157: Graf zobrazující naměřené hodnoty průsaků tlakovou vodou na betonových vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou v čase C

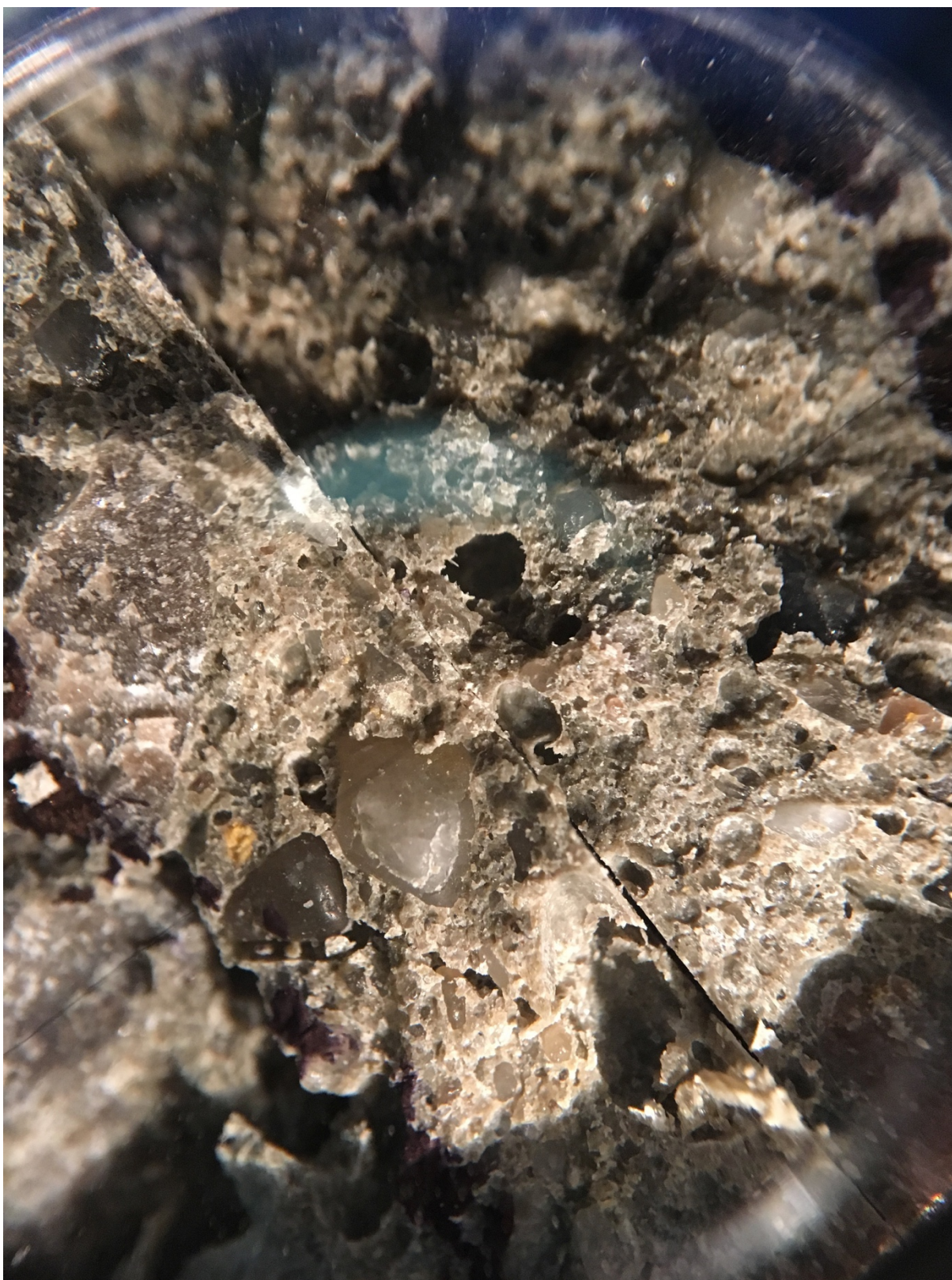
Výsledky experimentu, Měření hloubky průsaku tlakovou vodou na vzorcích se spárou vytvořenou spárovou měrkou, lze vidět v tabulkách 12, 13, 14 a v grafech viz obr. 155, 156, 157. Z naměřených hodnot je patrné, že jediný vzorek, na kterém se zacelila vytvořená spára byl R1C I. V případě zacelení spáry byly očekávané naměřené hloubky průsaku přibližně 30 mm. Pouze vzorek R1C I se této hodnotě přibližuje, a to naměřenou hloubkou průsaku 35 mm. Na jiných vzorcích nebylo zacelení spáry prokázáno. Z obrázků 129 a 130 je vidět, že spára prokazatelně zarostla, protože se do ní nedostala voda při zkoušce průsaku tlakovou vodou. Vyhodnocení tohoto experimentu pomocí tabulek a grafů není vypovídající tak, jako vizuální prohlídka fotografií vzorků. Z fotografií je vždy na první pohled vidět, zda spára zarostla či nezarostla, respektive zda byla matrice, kterou spára zarostla dostatečně pevná na to, aby odolala zatížení tlakovou vodou.

8.6. Fotografie spár v čase testování C foceně s 10 násobným zvětšením

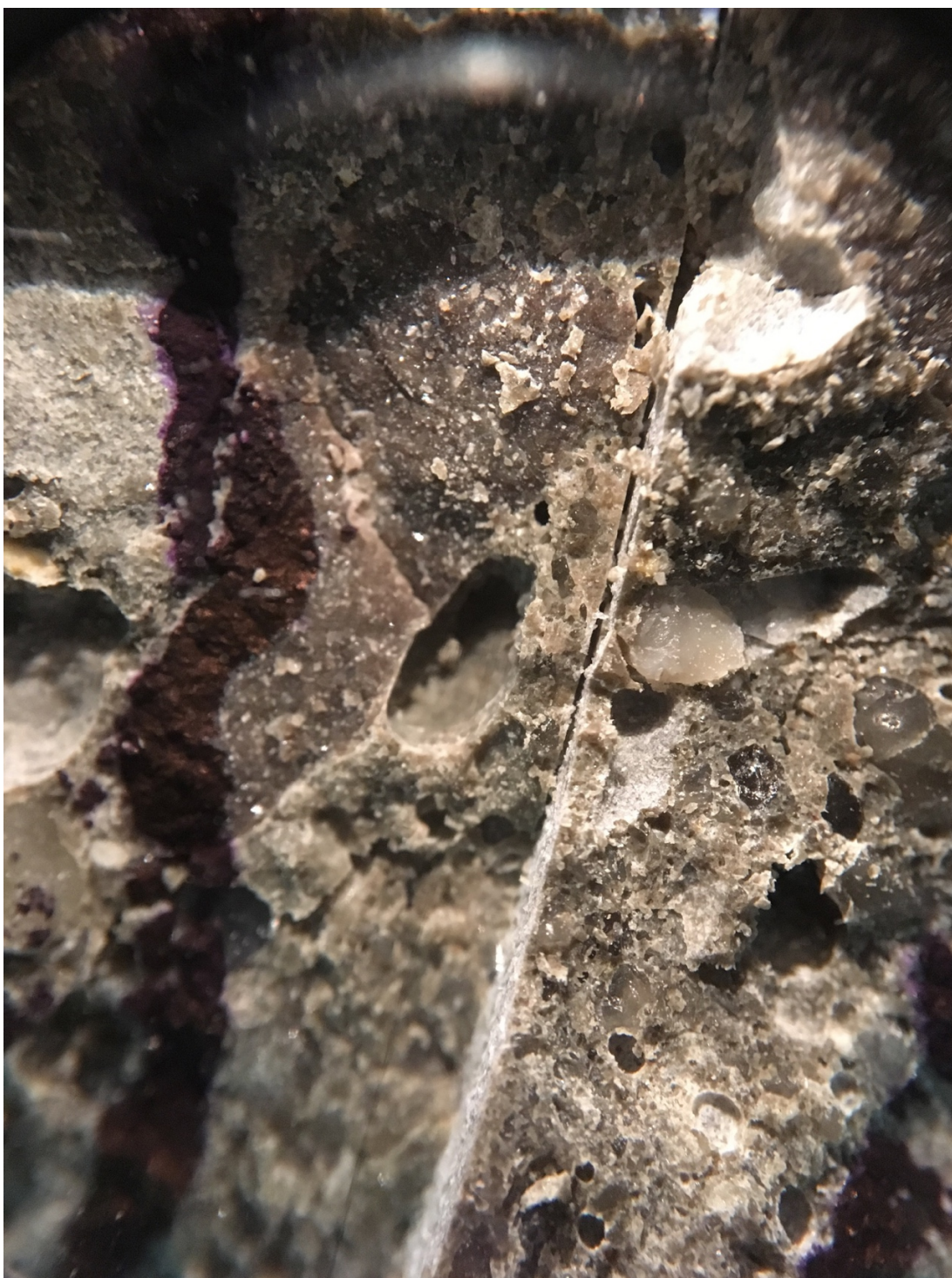


Obr. 158: Fotografie nezarostlé spáry na vzorku RIC II zaznamenaná díky lupě s desetinásobným zvětšením.

Z obr. 158 je vidět, že v tomto konkrétním místě došlo k zacelování spáry, protože oproti ostatním pořízeným snímkům se ve spáře vyskytují krystalické útvary.



Obr. 159: Fotografie nezarostlé spáry na vzorku X1C II zaznamenaná díky lupě s desetinásobným zvětšením.



Obr. 160: Fotografie nezarostlé spáry na vzorku CIC II zaznamenaná díky lupě s desetinásobným zvětšením.

Na obr. 160 je patrné, že v jeho horní části spára zacelená není, zatímco ve spodní ano. Je tedy zřejmé, že k zacelování spáry docházet začalo, ale vzhledem k tomu, že byla šířka vloženého plechu 25 mm, tak v každé konkrétní vzdálenosti od zatěžované strany krychle mohla spára zarůstat na šířce 25 mm s jinou úspěšností. Místo, kde se zarůstání tolik nezdařilo, se stalo cestou pro tlakovou vodu, aby se dostala do dalších částí spáry.

9. Nedestruktivní zkouška pozorování zacelení trhliny v čase

9.1. Příprava vzorků

Souběžně s několika zkouškami ztvrdlého betonu proběhla dne 23.4.2018 i příprava a testování vzorků s trhlinou. Výroba vzorků pro nedestruktivní zkoušku proběhla následovně. Do standardních krychlí o hraně $a=150$ mm, které zrály po dobu 28 dní, byla úhlovou bruskou vyřezána do jedné stěny drážka konstantní šířky 2 mm a hloubky přibližně 30 až 40 mm. Bylo ustoupeno od varianty vytvoření trhliny v lisu, protože nebylo možné vytvořit v lisu trhlínu bez toho, aby byla krychle příliš mechanicky poškozena a její dvě poloviny dobře držely u sebe.



Obr. 161: Příprava vzorku pro doplňkovou nedestruktivní zkoušku

Do takto vytvořené spáry byla vložena krátká tyč o průměru nepatrně větším, než byla tloušťka spáry. Záměrem celé přípravy byla snaha o vytvoření řízené trhliny, která nebude konstantní tloušťky a půjde pokud možno přibližně středem zkušební krychle. Krychle s vloženou tyčí na spáře byla uložena do lisu pro zkoušení pevnosti v tlaku. Lis byl nastaven na nejmenší možnou rychlost zatěžování, během kterého byl vizuálně kontrolován vývoj trhliny. Jakmile se objevila vizuálně zřetelná trhlina, zatěžování bylo zastaveno a zkušební krychle byla přesunuta do stolice pro zatěžování vodním tlakem. Zde byla ručně dotažena tak,

aby vznikla vlasová trhlina. Poté byla vyjmuta tyč, díky které docházelo k řízenému rozvoji trhliny. Krychle byla postavena do zatěžovací stolice tak, že zatížení vodním tlakem probíhalo z opačné strany, než byl vytvořen zářez úhlovou bruskou. Celé měření, jak již bylo řečeno, je nedestruktivní. Porovnávanou hodnotou v čase je výška, ze které vytéká z trhliny voda. Označení výšky proběhlo na jednotlivých vzorcích různých záměsí. Po zaměření byla krychle vrácena do vodního uložení, aby byly betonu dány co nejlepší podmínky pro samohojení trhliny. Předpokládalo se, že v čase se bude místo výtoku zvyšovat, případně, že voda přestane vytékat úplně.



Obr. 162, 163: Vlevo zkušební krychle po zatížení v lisu, vpravo jemné ruční přitěžování na stolici pro zkoušku průsaku pro vznik požadované šířky trhliny

9.2. Průběh zkoušky alternativní nedestruktivní metody zacelení trhliny

Alternativní metoda zacelení trhliny se bohužel již při prvním testování neuviedla jako nejvýhodnější. Myšlenka experimentu byla správná, ale bohužel pozdější realizace ukázala nedostatek v podobě pevnosti vytvořené spáry v betonu. Následkem přípravy trhliny je zkušební krychle v její polovině zcela porušena, a to přes celou její výšku. Při utahování vzorků do zatěžovací stolice se muselo postupovat skutečně velmi opatrně – při vyšším

utažení vzorků hrozilo úplné porušení krychle a spáry. Několik vzorků bylo takto bohužel zničeno, protože neustály upevňování.

Další problém nastal při samotném zatěžování vodním tlakem. Při zatížení tlakovou vodou se uvnitř krychle vytvořil tlak natolik velký, že už tak pevnostně oslabenou krychli roztrhl. Zkombinováním těchto problémů jsme bohužel přišli o několik vzorků. Při dalším testování nebyl opomenut ani fakt, že krychle může být testováním poničena, aniž by si toho kdokoliv vizuálně či zvukově všiml. Přitlačením v zatěžovací stoličce vzniká na úrovni spáry jistá deformace, která může, ač nepozorovaně, ovlivnit výsledky. Stejně tak vpuštěná tlaková voda má efekt úplně stejný, snaží se roztrhnout krychli na dvě poloviny, o čemž jsme se sami přesvědčili. Pokud se krychle přímo neroztrhne, tak uvnitř spáry s jistotou vznikají síly, které vyvolávají deformace vedoucí pravděpodobně k rozšíření trhliny. Vzhledem k tomu, že se obě tyto komplikace velmi citlivě dotýkají testování trhliny, bylo nutné přistupovat k závěrečnému vyhodnocení s nadhledem. Výsledky jednotlivých vzorků nejsou vzájemně porovnatelné, protože v samotné trhlince je velká neurčitost. Vzhledem k tomu, že se jedná o nedestruktivní zkoušku, tak testování probíhalo porovnáváním jednoho vzorku se sebou samým v různých časech testování.

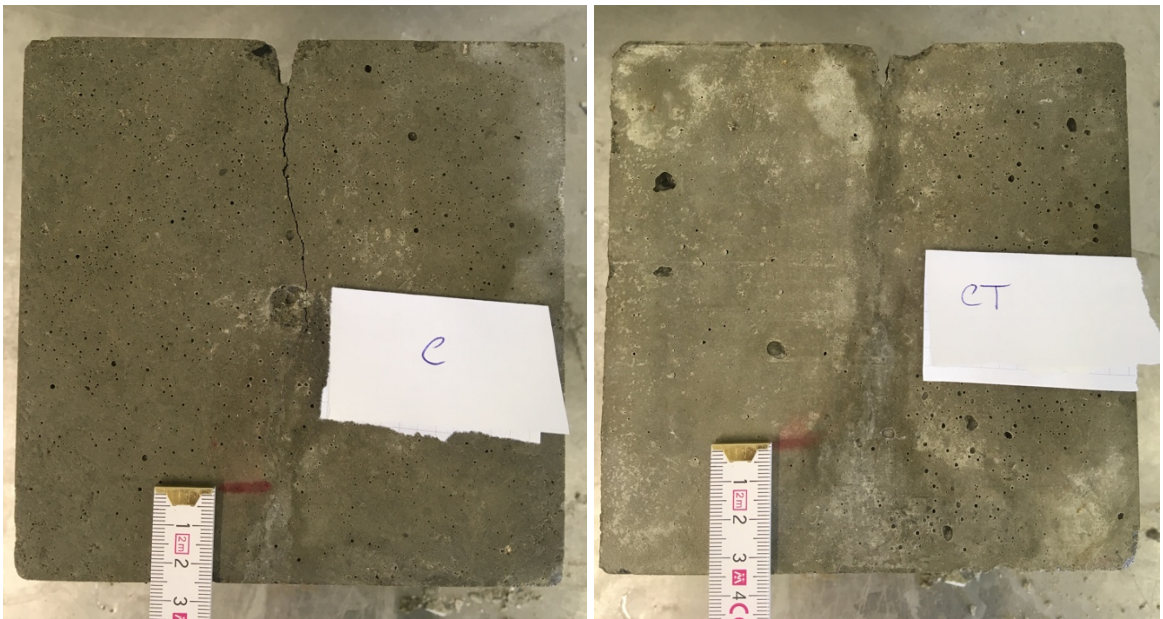
9.3. Dokumentace výšky výtoku tlakové vody z krychlí v čase A



Obr. 164, 165: Vlevo zkušební krychle s naměřenou výškou výtoku 36 mm, vpravo zkušební krychle s naměřenou výškou výtoku 48 mm, obě krychle jsou ze záměsi REF



Obr. 166: Zkušební krychle s naměřenou výškou výtoku 16 mm, krychle je ze záměsi XYP



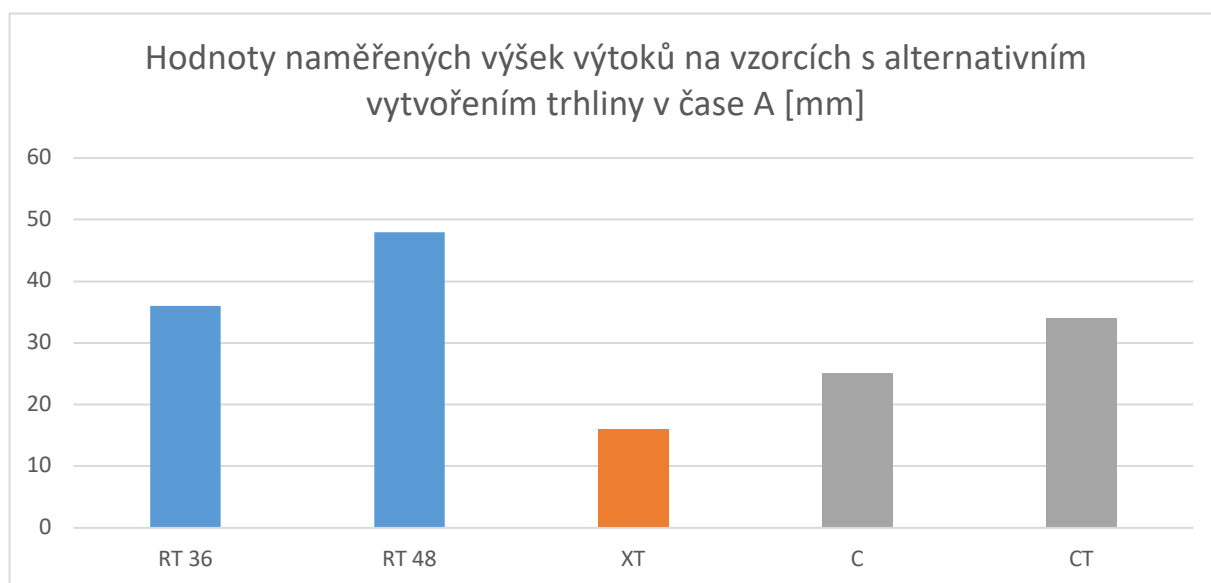
Obr. 167, 168: Vlevo zkušební krychle s naměřenou výškou výtoku 25 mm, vpravo zkušební krychle s naměřenou výškou výtoku 34 mm, obě krychle jsou ze záměsi CEM

9.4. Shrnutí naměřených hodnot výšek výtoku na vzorcích s alternativním vytvořením trhliny

Dále jsou uvedeny výsledky pouze pro ty zkušební vzorky, které ustály celý proces výroby a zatěžování tlakovou vodou.

Tab. 15: Tabulka naměřených hodnot výšek výtoku na vzorcích s trhlinou vytvořenou alternativním způsobem v čase A

Čas A	
Vzorek	Průsak [mm]
RT 36	36
RT 48	48
XT	16
C	25
CT	34



Obr. 169: Graf zobrazující naměřené hodnoty výšek výtoku na vzorcích s alternativním vytvořením trhliny v čase A

Testování proběhlo v časech A, B i C, avšak pouze v čase A se daly naměřit požadované hodnoty výšek výtoků ze strany krychle. V pozdějších časech již ze stran nic nevytékalo a tím pádem nejsou časy B a C zdokumentovány. Tento alternativní experiment lze uzavřít tvrzením, že vytvořené trhliny zarostly již po 3 měsících.

10. Závěr

Nejdůležitějším bodem, který by zde měl být zmíněn je, že výsledky, kterých bylo dosaženo, nejsou v souladu s předpoklady experimentu. Na vzorcích se spárou vytvořenou pomocí spárové měrky nedošlo s výjimkou jednoho vzorku ani po šesti měsících k samovolnému zacelení tenké spáry. Odchylným vzorkem byla krychle R1C – spára šířky 0,1 mm v záměsí referenčního betonu v čase testování 6 měsíců. Tento vzorek byl jediným, u kterého se při vyhodnocování výsledků zkoušky průsaku tlakovou vodou prokázalo, že vytvořená spára zarostla krystalickou maticí, která nabyla takových mechanických vlastností, že odolala tlaku 0,5 MPa, což je tlak, kterým mají být zkušební vzorky testovány dle normy ČSN EN 12390–8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou [9].

Zkouška alternativní nedestruktivní metody zacelení trhliny, která byla alternativou hlavního experimentu, prokázala, že vytvořené trhliny na zkušebních krychlích zarostly již po 3 měsících. Nelze přesně změřit šířku trhliny, která zarostla. Na základě vyhodnocení však lze říci, že efekt samohojení se úspěšně projevil u všech testovaných záměsí.

Mimo hlavní část experimentu byly provedeny i doprovodné zkoušky jak na čerstvém, tak na ztvrdlém betonu. V případě zájmu o podrobné výsledky běžných zkoušek – pevnosti v tlaku, hloubky průsaku tlakovou vodou, nasákavosti a dalším – si autor dovoluje odkázat na jeho bakalářskou práci „Krystalizační přísady a odolnost betonu proti působení tlakové vody“ [3], jejíž obsah je věnován této problematice v celém jejím rozsahu.

Bez ohledu na to, jak dopadly výsledky tohoto experimentu, je nutné brát ohled na to, že experimenty, které se problematikou zarůstání trhliny v betonu či v cementové maltě zabývaly dříve, přistupovaly ke vzorkům velmi opatrně. Rozhodně nelze mluvit o tom, že by někdo zatížil zkušební vzorky s vytvořenou trhlinou tlakovou vodou. Většinou měření probíhalo na bázi měření průtoku netlakové vody skrz zarůstající trhlinu v čase. Tento experiment však nebyl zaměřen na to, jakou rychlostí trhlina zarůstá, ale na otázku, zda a popřípadě jak rychle se v trhlině vytváří struktura schopná odolat účinkům tlakové vody. Hodnocení se zúžilo na jednoduché „ano“ – spára zarostla krystalickou maticí natolik pevnou, že odolala tlaku vody 0,5 MPa nebo „ne“ – krystalická matrice, kterou spára zarostla, nenabyla dostatečných mechanických vlastností na to, aby odolala vodnímu tlaku 0,5 MPa, což se projevilo viditelným průsakem kolem vytvořené spáry po rozpůlení vzorku.

Je otázkou, proč experiment dopadl právě takto. První myšlenkou je, že v testovaných krychlích kvůli technologickému postupu tvorby spáry vznikly ve skutečnosti spáry větší než předpokládané šířky. Na některých vzorcích se po rozloupnutí dalo spatřit, že spára vytvořená po vytažení spárové měrky není ideálně hladká, ale že v ní jsou místy malé vzduchové

bublínky. Přes tyto kaverny pak mohlo dojít k protečení vody do spáry kolem materiálu nově vzniklého ve spáře díky samohojícímu efektu.

Zmíněný jev může být zapříčiněn postupem umístění spárové měrky do betonu. Aplikovaný postup začal plněním formy lehce pod okraj, tak aby se do ní ještě dal vložit polystyrenový čtverec s otvorem pro zasunutí spárové měrky. Polystyren se do formy ukládal za účelem uhlazení a srovnání budoucí zatěžované stěny vodním tlakem. Skrz spáru v polystyrenu byla osazena spárová měrka. Její osazení však nemělo vždy hladký průběh. Spárová měrka během něj musela být někdy povytažena nahoru a opět sunuta dolů kvůli přítomnosti větších zrn kameniva v betonové směsi. Tento problém se týkal zejména spárové měrky s vyšší poddajností, tedy měrky tloušťky 0,1 mm. Následkem této aplikace se mohly ve spáře vytvořit vzduchové bublinky, které mohly zarůstání a těsnost spáry výrazně ovlivnit.

Řešením tohoto problému by mohlo být postupné hutnění betonové směsi při již osazené spárové měrce tak, že by se například po třetinách ukládal do formy beton s drženou spárovou měrkou uprostřed a po každé třetině byl vibrován tak, aby se podařilo maximálně eliminovat vzduch, který se do spáry může dostat. Možná by pomohlo jen přesunout vibrování až na konec postupu a to tak, že by byla forma s hutněným betonem vibrována včetně spárové měrky.

Dalším faktem, který nelze opomenout, je skutečnost, že vytvořená spára nevznikla v důsledku tahového poškození materiálu, jak trhliny běžně vznikají, ale vytažením spárové měrky. Povrch vzniklý po vytažení této měrky má strukturu odlišnou od běžné trhliny. U trhliny je povrch nerovný z podstaty jejího vytvoření a zároveň je její povrch složen jak z kameniva, tak pojiva. U spáry vytvořené v tomto experimentu je povrch rovný a hladký, přičemž je složen pouze ze zatvrdlého pojiva.

Je otázkou, která z variant je pro zarůstání trhliny, potažmo spáry příznivější. Pro zacelení spáry může být výhodou jak konstantní šířka spáry, tak složení jejích stěn. Celý povrch je tvořen pojivem s potenciálem samohojení, nevyskytují se zde zrna kameniva, která k samohojení nepřispívají. Výsledky experimentu však tuto teoretickou výhodu neprokázaly. Naopak je možné, že na hladkém povrchu spáry nebyl dostatek nezhydratovaných cementových zrn pro účinný průběh samohojení.

Poslední domněnkou je pozorování, které proběhlo na několika vzorcích. Lze spatřit, že spára nebyla u některých vzorků zarostlá rovnoměrně v tom smyslu, že byla více zarostlá na okraji prvku než v jeho hloubce. Z toho lze vyvodit hypotézu, že distribuce vody do prvku nebyla rovnoměrná a do hloubky se nedostal dostatek vody k tomu, aby bylo umožněno samohojení. Tento jev byl však viděn jen zřídka.

Z výše zmíněných možných nedostatků experimentu lze vyvodit návrhy na potenciální úpravy pro provádění experimentu v budoucnosti.

První variantou je snížení vodního tlaku v zatěžovací stolici, kterým jsou vzorky testovány. Mohlo by se tím předejít narušení krystalické matrice novotvarů ve spáře a voda by se nemusela dostat do zarostlé spáry.

Druhou variantou by bylo pokračování v testování krychlí vyříznutých z ohýbaných trámů tak, jako se dělo v kapitole č. 4 Vývoj postupu pro vytvoření trhliny definované šířky. Zatěžování vzorku vodním tlakem by proběhlo až po vizuálním posouzení toho, že trhlina zarostla. Krychle s vizuálně zarostlou trhlinou by se osadila do zatěžovací stolice. Pokud by z ní po zatížení tlaková voda neunikala, bylo by možno přistoupit ke zkoušce bez nutnosti umělého utěsnění. Pokud by voda stále unikala, dále by se čekalo na zahojení trhliny až do doby úspěšného výsledku testu těsnosti. Poté by bylo možné nechat vzorek zatížený 72 hodin tlakem 0,5 MPa v souladu s normou. Po jeho rozpůlení by bylo možné porovnat jeho průsak s průsakem vzorku bez trhliny stejné záměsi. Z tohoto srovnání by bylo zřejmé, zda krystalická matrice vytvořená danou betonovou směsí nabyla dostatečné pevnosti a hustoty proti zatížení tlakovou vodou o velikosti 0,5 MPa. Tato varianta experimentu se autorovi této práce zdá jako nejpoužitelnější navzdory tomu, že od ní bylo na počátku ustoupeno, protože předpokládané výsledky realizovaného experimentu byly odlišné od výsledků skutečných a realizovaný experiment nedopadl dle očekávání.

Účinnost a použití krystalizačních přísad je v betonářské obci tématem, na které není stále ještě ucelený názor. Experiment provedený v této práci bohužel nedokázal prokázat ani vyvrátit, zda je beton s krystalizační přísadou po vzniku trhlín schopen tyto trhliny zacelit důkladněji a rychleji než beton bez krystalizačních přísad nebo s přidaným cementem. Nelze tak ani posoudit, zda je krystalizační přísada přínosem pro odolnost proti průniku tlakové vody do zahojeného betonu. Autor této diplomové práce bude rád, pokud se některý z námětů na zlepšení experimentu, který je zmíněn v závěru, stane inspirací pro vznik obdobného experimentu a podaří se díky tomu dosáhnout dalších výsledků, které pomohou objasnit účinnost krystalizačních přísad.

11. Literatura

- [1] Roig-Flores, M.; Moscato, S.; Serna, P.; Ferrara, L. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815003700>. Citováno dne 31.10.2018.
- [2] Sisomphon, K.; Copuroglu, O.; Koenders, E. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512000133>. Citováno dne 31.10.2018.
- [3] Kovář, J. *Krystalizační přísady a odolnost betonu proti působení tlakové vody*. Citováno dne 31.10.2018.
- [4] ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [5] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [6] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [7] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [8] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [9] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [10] ČSN EN ISO/IEC 17025. *Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [11] Pazderka, J. Vliv krystalizačních příměsí na pevnost betonu v tlaku. *BETON 2010* (3).
- [12] Kropáček, M.; Šafrata, J. Vliv sekundární krystalizace na vlastnosti betonu. *BETON 2015* (2).
- [13] *Bezpečnostní list Xypex Admix*; Xypex Chemical Corporation: Česká republika, 2009. Citováno dne 31.10.2018.

-
- [14] Technický list Sika WT-200 P, 2013. Sika.
<http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/a332c247-3123-340c-b93e-51dd3d1d8de4/Sika%20WT-200%20P.pdf>. Citováno dne 31.10.2018.
- [15] Prospekt řady Sika WT, 2013. Sika.
<http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/d37c11dd-4232-3aca-bc7a-a07d7267ae4e/rada%20Sika%20WT%20-%20prospekt.pdf>. Citováno dne 18.4.2017.
- [16] Technický list Balchem Waterizol Admix, 2013. Balchem.
http://www.balchem.cz/pdf/technicka_karta_waterizol_admix.pdf. Citováno dne 18.4.2017.
- [17] Technický list Redrock Krystal Mix. Redrock construction. http://www.redrock-cz.com/katalog/produkty/pdf/Krystal_MIX.pdf. Citováno dne 18.4.2017.
- [18] Technické informace H krystal mix, 2013. ARTESA capillary dry.
<http://www.artesacd.cz/produkty/h-krystal-mix>. Citováno dne 18.4.2017.
- [19] Technický list Maxseal Super Admix. DRIZORO CZ. http://www.drizoro-cz.cz/documents/MAXSEAL_SUPER_ADMIX.pdf. Citováno dne 18.4.2017.
- [20] *Technický list Xypex Admix C-1000 (NF)*; Xypex Chemical Corporation: Česká republika.
- [21] *Prohlášení o vlastnostech Xypex Admix*; Xypex Chemical Corporation: Česká republika, 2016.
- [22] ČSN EN 934-2+A1. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označení a značení štítkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [23] Caggiano, A.; Etse, G.; Ferrara, L.; Krelani, V. Zero-thickness interface constitutive theory for concrete self-healing effects
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794916312883>. Citováno dne 31.10.2018.
- [24] Van Tittelboom, K.; Wang, J.; Araújo, M.; Snoeck, D.; Gruyaert, E.; Debbaut, B.; Derluyn, H.; Cnudde, V.; Tsangouri, E.; Van Hemelrijck, D.; De Belie, N. Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815308576>. Citováno dne 31.10.2018.
- [25] Ho Ahn, T.; Kishi, T. Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures.
<http://j-act.org/headers/171.pdf>. Citováno dne 31.10.2018.