



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

MOŽNOSTI HODNOCENÍ A PREDIKCE TRVANLIVOSTI BETONU

POSSIBILITIES OF EVALUATION AND PREDICTION OF DURABILITY OF CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Aneta Hošková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav stavebního zkušebnictví
Studentka: **Bc. Aneta Hošková**
Vedoucí práce: **Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Možnosti hodnocení a predikce trvanlivosti betonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat problematikou zkoušení a modelování trvanlivosti betonu: Volba vhodných testů betonu, celkový návrh experimentu, provedení laboratorních měření, vyhodnocení měření, zhotovení jednoduchého predikčního modelu, zhodnocení získaných dat.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Provedení rešerše na zadané téma.

Provedení laboratorního měření se zaměřením na trvanlivostní zkoušky na různých betonech.

Vyhodnocení získaných dat.

Zhotovení jednoduchého predikčního modelu trvanlivosti betonu z hlediska zvoleného stupně vlivu prostředí.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Odborné knihy, jako jsou např.:

Neville, A. M.: Properties of concrete.

Alexander, M.; Bentur, A.; Mindess, S.: Durability of Concrete: Design and Construction (Modern Concrete Technology).

Newman, J. ; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.

Malhotra, V. M.; Carino, N. J.: Handbook on Nondestructive Testing of Concrete.

Odborné články na dané téma, jako jsou např.:

Müller, H. S.; Haist, M.; Vogel, M.: Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime.

Georgescu, D.; Vacareanu, R.; Aldea, A.; Apostu, A.; Arion, C.; Girboveanu, A.: Assessment of the Sustainability of Concrete by Ensuring Performance during Structure Service Life.

Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k: ČSN EN 206+A2, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ASTM C666 / C666M – 15, řada ČSN EN 12390.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 25. 3. 2025

L. S.

prof. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou trvanlivosti betonu se zaměřením na karbonataci betonu a cyklické zmrazování a rozmrazování. V rámci práce byly provedeny dva experimenty. První experiment byl zaměřen na hodnocení dlouhodobého vývoje mechanických vlastností betonu, posouzení kvality povrchové vrstvy betonu a sledování vývoje karbonatace. Pro experiment byla využita tělesa, jež byla uložena po dobu přibližně 11 let v laboratorních podmínkách. Stanovené vlastnosti byly porovnány se známými výsledky ve stáří těles 28 dnů. Na tělesech byla stanovena hloubka přirozené karbonatace, která byla porovnána s vypočítanými hodnotami pomocí predikčních modelů implementovaných v programu FReET-D.

Druhý experiment byl zaměřen na posouzení vlivu počátečního stupně nasycení zkušebních těles na degradaci betonu při cyklickém zmrazování a rozmrazování. Zkoušce byla vystavena zkušební tělesa tří druhů betonu, jež se lišila počátečním stupněm nasycení. Míra poškození byla hodnocena pomocí nedestruktivních metod, konkrétně ultrazvukové a rezonanční metody, na jejichž základě byly stanoveny relativní moduly pružnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, karbonatace, mrazuvzdornost, trvanlivost, modelování karbonatace, dlouhodobé zrání betonu, cyklické zmrazování, povrchová vrstva betonu.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the durability of concrete, with a focus on carbonation and freeze–thaw resistance. Two experimental studies were conducted within the scope of the thesis. The first experiment focused on evaluating the long-term development of mechanical properties of concrete, assessing the quality of the concrete surface layer, and monitoring carbonation development. The experiment involved specimens that had been stored under laboratory conditions for approximately 11 years. The determined parameters were compared with reference values obtained at the age of 28 days. The depth of natural carbonation was measured and subsequently compared with values predicted using carbonation models implemented in the FReET-D program.

The second experiment aimed to determine the effect of the initial degree of saturation of test specimens on concrete degradation during freeze–thaw cycles. Test specimens made of three different concrete mixtures with varying initial saturation levels were subjected to freeze–thaw testing. The extent of damage was assessed using non-destructive methods, specifically ultrasonic and resonance methods, from which relative dynamic moduli of elasticity were calculated.

KEYWORDS

Concrete, carbonation, frost resistance, durability, carbonation modelling, long-term ageing, freeze-thaw cycles, concrete surface layer.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOŠKOVÁ, Aneta. *Možnosti hodnocení a predikce trvanlivosti betonu*. Diplomová práce. Dalibor KOCÁB (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2026.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci s názvem *Možnosti hodnocení a predikce trvanlivosti betonu* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 01. 2026

.....
Bc. Aneta Hošková

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Daliborovi Kocábovi, Ph.D. za poskytnuté podklady, cenné rady, přátelský přístup a ochotu během konzultací.

Dále děkuji Ing. Martině Sadílkové Šomodíkové, Ph.D. za podnětné připomínky k části, která se věnuje modelování karbonatace.

Poděkování patří rovněž prof. RNDr. Pavle Rovnaníkové CSc. za cenné rady ohledně probíhajících procesů v betonu při vysušování a cyklickém zmrazování a rozmrazování.

V neposlední řadě patří poděkování rodině a přátelům za podporu a pochopení během celého studia.

OBSAH

ÚVOD A CÍLE PRÁCE.....	11
TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1. TRVANLIVOST BETONU.....	13
2. KARBONATACE BETONU.....	15
3. MRAZUVZDORNOST BETONU.....	18
3.1. Procesy v betonu při zmrazování a rozmrazování.....	18
3.2. Faktory ovlivňující mrazuvzdornost betonu.....	20
4. PERFORMANCE-BASED PŘÍSTUPY.....	21
5. MODELÝ DEGRADACE BETONU.....	22
5.1. Modely karbonatce betonu.....	22
5.2. Carb1a a Carb1b.....	23
5.3. Carb2a a Carb2b.....	24
5.4. Carb3.....	24
5.5. Carb6.....	25
5.6. Carb7.....	25
5.7. Carb8a.....	26
PRAKTICKÁ ČÁST.....	29
1. Experiment č. 1 – karbonatce betonu.....	29
1.1. Popis experimentu.....	29
1.2. Receptury betonů a zkušební tělesa.....	29
1.3. Zkoušky betonu.....	31
1.4. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	57
2. EXPERIMENT Č. 2 – MRAZUVZDORNOST BETONU.....	82
2.1. Cíl a popis experimentu.....	82
2.2. Zkušební tělesa.....	83
2.3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	88
2.4. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	91
ZÁVĚR.....	97
POUŽITÉ ZDROJE.....	98
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	102
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	104
SEZNAM TABULEK.....	106

SEZNAM PŘÍLOH.....	108
A. FOTODOKUMENTACE Z EXPERIMENTU Č. 1 – KARBONATACE BETONU.....	109
B. FOTODOKUMENTACE Z EXPERIMENTU Č. 2 – MRAZUVZDORNOST.....	127
C. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENT Č. 1 – KARBONATACE	133
D. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ – EXPERIMENT Č. 2 MRAZUVZDORNOST.....	145

ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Trvanlivost betonu představuje klíčový aspekt návrhu a posuzování betonových konstrukcí, neboť významně ovlivňuje jejich životnost a náklady na údržbu v průběhu provozu. Vedle pevnostních charakteristik betonu hraje významnou roli také jeho odolnost vůči degradačním procesům způsobeným působením okolního prostředí. Správné pochopení mechanismů degradačních procesů umožňuje navrhovat betonové konstrukce v souladu s podmínkami prostředí, zpřesňovat modelování degradace betonu a v konečném důsledku přispívá k návrhu konstrukcí s dostatečnou trvanlivostí. Diplomová práce se zabývá karbonatací a mrazuvzdorností betonu.

Cílem bylo provést rešerši na téma trvanlivosti a degradace betonu, zejména karbonatáci a mrazuvzdornost.

V rámci diplomové práce byly provedeny dva experimenty. První experiment byl zaměřen na sledování dlouhodobého vývoje mechanických vlastností betonu, hodnocení kvality povrchové vrstvy a stanovení hloubky karbonatace na zkušebních tělesech, která byla po dobu zhruba 11 let uložena v laboratorních podmínkách. Zkušební tělesa byla vyrobena z různých druhů betonu lišících se množstvím cementu a použitím plastifikačních a provzdušňovacích přísad. U jednotlivých betonů byly známy jejich mechanické vlastnosti (pevnosti, moduly pružnosti) a vlastnosti povrchové vrstvy betonu ve stáří těles 28 dnů, což umožnilo jejich porovnání.

Data zjištěná z dlouhodobého sledování mechanických vlastností betonu mohou sloužit jako vstupní informace pro predikční modely degradace materiálu založené na metodách strojového učení. Tyto přístupy umožňují na základě experimentálně zjištěných parametrů, jako jsou pevnosti, moduly pružnosti, vlastnosti povrchové vrstvy nebo stáří betonu, modelovat časový vývoj degradačních procesů. Jednou z metod vhodných pro tento typ úloh je například Support Vector Machine, která je využívána jak pro regresní, tak i klasifikační úlohy v oblasti materiálového inženýrství a může přispět k přesnější predikci trvanlivosti materiálů. Toto modelování přesahuje rozsah diplomové práce.

V rámci experimentu byla dále na tělesech zjištěna hloubka přirozené karbonatace po 11 letech zrání a uložení v laboratorních podmínkách. Na základě vlastností betonu ve stáří 28 dnů byla modelována přirozená hloubka karbonatace v programu FReET-D a výsledky porovnány s hodnotami naměřenými na zkušebních tělesech. Zkušební tělesa byla také vystavena zrychlené karbonatáci v karbonatační komoře, přičemž byl sledován průběh nárůstu hloubky karbonatace u jednotlivých druhů betonu.

V druhém experimentu je cílem ověřit vliv počátečního stupně nasycení zkušebních těles na degradaci během cyklického zmrazování a rozmrazování betonu. V literatuře jsou popsány modely degradace betonu při cyklickém zmrazování a rozmrazování bez přítomnosti rozmrazovacích solí, do kterých vstupuje tzv. kritický stupeň nasycení.

Kritický stupeň nasycení představuje hodnotu nasycení, při jejímž překročení začíná docházet k poškození vnitřní struktury betonu. Pokud je stupeň nasycení nižší než tato kritická hodnota, k porušení betonu vlivem mrazu nedojde. Z tohoto důvodu jsou v experimentu zkoušce mrazuvzdornosti vystaveny vývrty z mrazuvzdorných betonů, které se liší počátečním stupněm nasycení.

Míra poškození zkušebních těles byla v průběhu zkoušky hodnocena pomocí nedestruktivních metod, konkrétně ultrazvukové a rezonanční metody. Ze zjištěné doby průchodu ultrazvuku a z naměřených vlastních frekvencí byly stanoveny relativní moduly pružnosti (RDM). Získané hodnoty byly porovnány jak mezi jednotlivými druhy betonů, tak především mezi sadami lišícími se počátečním stupněm nasycení.

TEORETICKÁ ČÁST

1. TRVANLIVOST BETONU

Jedním z důležitých kritérií při navrhování konstrukcí je vedle jejich účelu, spolehlivosti, bezpečnosti a hospodárnosti také jejich životnost. Životnost udává, po jakou dobu jsou materiály, prvky a systémy schopny si zachovávat užité a jiné vlastnosti na požadované úrovni při běžné údržbě, za daných podmínek provozu a působení okolního prostředí. Životnost je dána trvanlivostí materiálů nebo jednotlivých komponent, která představuje jejich schopnost dlouhodobě odolávat degradačním procesům vyvolaným vnějšími vlivy, ať už pocházejícími z okolního prostředí nebo z provozního zatížení [1].

Životnost betonových konstrukcí je tedy mimo jiné dána trvanlivostí betonu a výztuže. Nepříznivé vlivy z okolního prostředí lze rozdělit na mechanismy degradující přímo betonovou matici (např. cyklické zmrazování a rozmrazování) a mechanismy vedoucí ke korozi ocelové výztuže (zejména karbonatace betonu a působení chloridů).

Většina těchto procesů je vyvolána transportem látek (voda, CO₂, ionty) do mikrostruktury betonu. V případě karbonatace dochází ke snižování pH betonu vlivem působení CO₂ obsaženého v okolním prostředí. Koroze výztuže pak může začít probíhat v momentě, kdy karbonatace dosáhne hloubky, ve které se nachází výztuž. Tento časový úsek se definuje jako iniciační čas t_i , kterým lze stanovit dobu životnosti konstrukce $t_s = t_i$. Méně konzervativní přístup do výpočtu doby životnosti zahrnuje i propagační fázi t_p , během které dochází ke korozi výztuže, životnost pak lze vyjádřit vztahem $t_s = t_i + t_p$. Během koroze dochází ke zmenšování plochy výztuže a kritérium bezpečnosti tak lze definovat na základě limitního úbytku [2].

Naproti tomu u mrazuvzdornosti je trvanlivost limitována kumulativním porušením vnitřní struktury betonu vlivem expanze ledu, což vede k postupné ztrátě celistvosti a zhoršení mechanických vlastností.

Trvanlivost betonu tedy do značné míry závisí na propustnosti jeho povrchové vrstvy a na její schopnosti odolávat pronikání vody a agresivních látek, jako např. CO₂, chloridů, síranů apod [3].

Nepříznivé vlivy okolního prostředí zohledňují aktuálně platné normy, konkrétně ČSN EN 206+A2 [4] pomocí stupňů vlivu prostředí:

X0 – bez nebezpečí koroze nebo narušení

XC – koroze vlivem karbonatace

XD – koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody

XS – koroze vlivem chloridů z mořské vody

XF – působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich

XA – chemické působení.

Všechny stupně vlivu prostředí kromě X0 se dále dělí na další stupně, které blíže specifikují okolní vlivy. Okolní prostředí konstrukce je možné popsat pomocí více stupňů vlivu prostředí.

Jednotlivým stupňům vlivu prostředí odpovídají požadavky na složení betonu – vodní součinitel, obsah cementu, pevnostní třídu betonu a obsah vzduchu v betonu. Jako příklad jsou v Tab. 1 uvedeny požadavky pro odolnost vůči karbonaci. Stupeň vlivu prostředí také ovlivňuje tloušťku betonové krycí vrstvy výztuže [4].

Tab. 1 Požadavky na beton pro stupeň vlivu prostředí XC

	Max vodní souč. w/c	Min. pevnostní třída	Min. obsah cementu [kg/m ³]	Min. obsah vzduchu [%]
XC1	0,65	C20/25	260	-
XC2	0,60	C25/30	280	-
XC3	0,55	C30/37	280	-
XC4	0,50	C30/37	300	-

Otázka životnosti betonových konstrukcí v posledních letech nabývá na významu, zejména v souvislosti s požadavky na udržitelnost a optimalizaci nákladů během celého životního cyklu staveb.

2. KARBONATACE BETONU

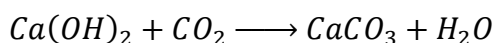
Karbonatace betonu je jedním z nejzásadnějších degradačních procesů, který se týká všech betonových konstrukcí v kontaktu se vzdušným prostředím. Je to chemický proces, při kterém dochází k reakci oxidu uhličitého (CO₂) se složkami cementového tmelu, což způsobuje snižování pH betonu.

Pokles alkality betonu je problematický zejména z hlediska ochrany ocelové výztuže před korozí. Na povrchu ocelové výztuže se v silně alkalickém prostředí vytváří pasivní vrstva oxidů, která brání reakci oceli s vodou a kyslíkem, a tím zabraňuje vzniku koroze. Takové prostředí beton představuje, neboť hodnota pH pórového roztoku nezkarbonatovaného betonu se pohybuje v rozmezí 12,6–13,5. Výztuž přestává být přirozeně chráněná v okamžiku, kdy pH pórového roztoku klesne pod hodnotu 9. Vlivem karbonatace může pH klesnout až na hodnotu 8,3 [5].

Pokud karbonatace dosáhne hloubky uložení výztuže, dochází vlivem sníženého pH k narušení pasivní vrstvy. Za přítomnosti kyslíku a vlhkosti pak může dojít k zahájení korozního procesu.

Pokles pH se identifikuje pomocí fenolftaleinového indikátoru, který se aplikuje na povrch betonu. Pokud beton zůstane bezbarvý, znamená to, že pH kleslo pod hodnotu 9. V opačném případě se beton zbarví do růžové až fialové barvy [6].

Celý proces začíná difúzí plynného CO₂ do pórové struktury betonu, kde je rozpuštěn v pórovém roztoku, a reaguje především s hydroxidem vápenatým za vzniku uhličitanu vápenatého. Touto reakcí klesá množství hydroxidu vápenatého, což je hlavní příčinou snížení alkality betonu. Tento proces lze popsat rovnicí [7]:



Oxid uhličitý reaguje i s dalšími složkami cementové matrice – CSH sloučeninami a dosud nezhydratovanými C₃S a C₂S.

Rychlost karbonatace betonu je dána rychlostí difúze oxidu uhličitého a jeho reaktivitou s betonem [7].

Proces karbonatace lze rozdělit do 4 stádií. V první fázi reaguje oxid uhličitý s hydroxidem vápenatým za vzniku uhličitanu vápenatého, jenž krystaluje v pórech ve formě kalcitu. Molární objem uhličitanu vápenatého je větší, dochází k zaplňování pórů cementového tmelu a snižuje se tak propustnost betonu.

Ve druhé fázi reaguje s CO₂ ostatní hydratační produkty, jako jsou hlinitany vápenaté a křemičitany. V cementovém tmelu se uhličitan vápenatý nachází ve formě jemnozrnných krystalů. Vlastnosti betonu zůstávají blízké původním hodnotám.

V další fázi uhličitan vápenatý rekrystalizuje do větších krystalů kalcitu a aragonitu a dochází ke zhoršení mechanických vlastností vlivem krystalizačních tlaků.

V poslední, čtvrté fázi prostupují velké krystaly celou vnitřní strukturou cementového tmelu a postupně dochází k jeho úplnému rozpadu [8].

Faktory ovlivňující karbonataci

Podstata karbonatace betonu je založena na difúzi plynného oxidu uhličitého z vnějšího prostředí do vnitřní struktury cementového tmelu. Odolnost betonu vůči karbonataci je tedy závislá na propustnosti povrchové vrstvy betonu. Ta je ovlivněna velikostí, tvarem a uspořádáním pórů. Pokud je v betonu menší množství pórů, difuze je nižší a proces karbonatace probíhá pomaleji. Pórová struktura je ovlivněna vodním součinitelem, použitým pojivem, kamenivem, hutněním a ošetřováním betonu.

Rychlost karbonatace je výrazně ovlivněna relativní vlhkostí prostředí. Při vysokých hodnotách relativní vlhkosti jsou póry betonu z velké části zaplněny vodou, což vede k omezení difúze oxidu uhličitého do mikrostruktury betonu. Při nízkých hodnotách relativní vlhkosti je naopak množství vody v pórovém systému nedostatečné pro průběh karbonatačních reakcí. Přítomnost vody je přitom pro karbonataci klíčová, neboť oxid uhličitý reaguje s hydroxidem vápenatým rozpuštěným v pórovém roztoku betonu.

Rychlost karbonatace je výrazně ovlivněna relativní vlhkostí prostředí. V literatuře je nejčastěji uváděno, že karbonatace probíhá nejrychleji při relativní vlhkosti přibližně 50–70 %, přičemž konkrétní optimální hodnota se může lišit v závislosti na podmínkách experimentu a složení betonu [5].

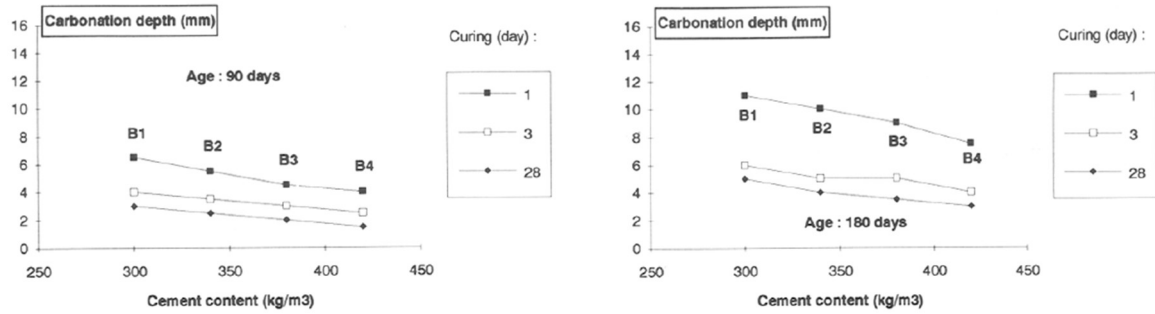
Se zvyšující se koncentrací oxidu uhličitého roste rychlost karbonatace, neboť do betonu proniká větší množství CO_2 . V přirozeném prostředí se objemová koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu pohybuje přibližně kolem 0,04 %. Pro experimentální hodnocení karbonatace betonu se proto často využívají metody zrychlené karbonatace, při nichž jsou zkušební vzorky vystaveny prostředí se zvýšenou koncentrací CO_2 . Postup zrychlené karbonatace popisuje norma ČSN EN 12390-12 [9], která stanovuje zkoušku při koncentraci 3 % CO_2 . V experimentální praxi však mohou být vzorky vystaveny i koncentracím kolem 90 %.

Ošetřování má významný vliv na odolnost betonu vůči karbonataci, protože ovlivňuje pórovou strukturu a stupeň hydratace cementu, a tím i množství materiálu náchylného ke karbonataci. Tento efekt je méně výrazný u běžného portlandského cementu než u betonů s příměsemi, u nichž probíhá hydratace pomaleji [10].

Rozdíly v průběhu karbonatace lze pozorovat také v závislosti na typu použitého cementu. Portlandský cement obvykle obsahuje vyšší množství hydroxidu vápenatého než směsné cementy, což může zpomalit postup karbonatace díky vyšší alkalické rezervě betonu. Na druhé straně může použití směsných cementů vést k hutnější mikrostruktuře cementové matrice, čímž se snižuje difúze oxidu uhličitého. Použití směsného cementu tedy nemusí nutně vést ke zhoršení odolnosti betonu vůči karbonataci [5].

Na Obr. 1 je znázorněna závislost hloubky karbonatace (zrychlenou metodou) na množství cementu (směsný cement s příměsí vápence) a délce ošetřování betonových

vzorků. Hloubka karbonatace klesá s rostoucím množstvím použitého cementu a také s přibývajícím dny ošetřování [11].



Obr. 1 Vliv ošetřování a množství cementu na hloubku karbonataci [11]

Na rychlost karbonatace má také vliv teplota. S rostoucí teplotou se karbonatace zrychluje, protože chemické reakce a difúze probíhají rychleji. Zároveň se však při vyšších teplotách snižuje rozpustnost portlanditu a CO_2 ve vodě [10].

3. MRAZUVZDORNOST BETONU

Důležitou materiálovou vlastností betonu, zejména u mostních objektů, je mrazuvzdornost. Rozlišujeme dva základní mechanismy porušení betonu při působení mrazu. Prvním je porušení vnitřní struktury, které je způsobeno zvětšováním objemu vody při zmrazování zhruba o 9 %. Rozpínání ledu může vést k narušení vnitřní struktury betonu a ke vzniku mikrotrhlin, které mají za následek zhoršení mechanických vlastností.

K porušení dochází zejména v důsledku vzniku vnitřních tahových napětí, která překračují tahovou pevnost cementové matrice a přechodové zóny mezi cementovou matricí a kamenivem.

Druhým mechanismem je povrchové poškození neboli odlupování (scaling), způsobené střídavým zmrazováním a rozmrazováním za přítomnosti solných roztoků. Stupeň poškození je vyjádřen hmotností odpadlého betonu z povrchové vrstvy [12].

Odolnost betonu proti zmrazování a rozmrazování při působení chemicky rozmrazovacích látek (CHRL) nebyla v rámci diplomové práce zkoušena, a proto tato problematika nebude dále rozebírána.

V obou výše uvedených případech je mrazuvzdornost ovlivněna pórovou strukturou betonu. Póry ve struktuře betonu vznikají z několika důvodů a lze je rozdělit podle jejich velikosti:

- gelové póry v cementové matrici o velikosti 1–10 nm,
- kapilární póry nepravidelného tvaru mezi zrnny hydratovaného cementu o velikosti 0,1–10 μm ,
- uzavřené póry vytvořené provzdušněním o velikosti 100–300 μm ,
- póry v zrnech kameniva,
- kaverny – nepravidelné dutiny vzniklé vlivem obsaženého vzduchu v čerstvém betonu [13].

Voda se v betonu nachází v kapilárních pórech, gelových pórech a jako chemicky vázaná, která nezamrzá. Voda v gelových pórech zamrzá až při velmi nízkých teplotách, přibližně $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za běžných klimatických podmínek se proto na mrazovém poškození betonu nepodílí. Degradaci betonu vlivem zmrazování tedy způsobuje voda obsažená v kapilárních pórech [5].

Množství pórů v betonu, kromě těch gelových, lze ovlivnit jeho složením, zejména vodním součinitelem (w/c), použitím provzdušňovacích přísad, které v betonu vytvoří uzavřené kulové póry, a také ošetřováním betonu v počátcích jeho tuhnutí a tvrdnutí [12].

3.1. Procesy v betonu při zmrazování a rozmrazování

Degradace vnitřní struktury betonu při zmrazování je způsobena zejména vznikem hydraulického tlaku, který souvisí se zvětšováním objemu vody při jejím přechodu do

pevné fáze přibližně o 9 %. Při zamrznání vody a jejím objemovém rozpínání je přebytečná voda vytlačována z pórů do okolních dutin. Rychlost proudění vody je ovlivněna rychlostí mrznutí a velikost vznikajícího hydraulického tlaku je dána odporem proudění, zejména propustností cementové matrice a délkou dráhy k dutinám schopným vytlačovanou vodu pojmout [5].

Při zmrazování dochází v pórové struktuře betonu rovněž k migraci nezmrzlé vody v důsledku rozdílů chemického potenciálu mezi oblastmi s různým stupněm zamrznutí. Tyto rozdíly vznikají v důsledku postupného růstu ledu v pórech a vedou k pohybu vody směrem k mrazové frontě, kde dochází k dalšímu růstu ledových těles a vzniku vnitřních tlaků [14].

Jakmile vznikající vnitřní tlaky překročí pevnost betonu v tahu, dochází ke vzniku mikrotrhlin a k postupnému poškozování vnitřní struktury betonu, které se vlivem opakovaných cyklů zmrazování a rozmrazování dále kumuluje [5].

Stupeň nasycení betonu vodou

Podle teorie kritického stupně nasycení dochází k významnému poškození betonu mrazem teprve tehdy, pokud je překročena určitá mezní hodnota nasycení pórového systému vodou. Tato kritická hodnota se obvykle pohybuje v rozmezí přibližně 78–91 %. Při nižším stupni nasycení je ve struktuře betonu dostatek volného prostoru na rozpínání ledu a vnitřní tlaky nedosahují hodnot vedoucích k porušení betonu. Jakmile však beton tuto hranici překročí, dochází k rychlému nárůstu poškození v důsledku opakovaného působení hydraulického tlaku, krystalizačního tlaku ledu a tlakových účinků spojených s migrací vody v pórové struktuře [5; 14].

Rychlost zmrazování a počet cyklů

Dalším významným faktorem ovlivňujícím mrazuvzdornost betonu je rychlost poklesu teploty a počet cyklů zmrazování a rozmrazování. Při rychlém zmrazování nemá voda v pórech dostatek času na migraci do větších dutin, což vede ke vzniku vyšších hydraulických tlaků a k intenzivnějšímu poškození vnitřní struktury betonu. Opakované cykly mrazu a tání způsobují kumulaci mikrotrhlin, jejich postupné rozšiřování a vzájemné propojování, což má za následek pokles pevnosti a zvýšení propustnosti betonu [14].

Současné poznatky potvrzují, že mrazové poškození betonu není výsledkem jediného degradačního mechanismu, ale kombinovaného působení objemové expanze ledu, hydraulického tlaku, krystalizačního tlaku a migrace vody v pórové struktuře. Tyto procesy se vzájemně ovlivňují a jejich účinek závisí na materiálovém složení betonu, jeho mikrostruktuře a expozičních podmínkách prostředí [14].

3.2. Faktory ovlivňující mrazuvzdornost betonu

Mrazuvzdornost betonu se odvíjí především od jeho pórové struktury, která je ovlivněna vodním součinitelem, druhem a vlastnostmi kameniva, ošetřováním betonu v počáteční fázi tuhnutí a tvrdnutí a případným provzdušněním betonové směsi [12].

Vliv pórové struktury a vodního součinitele

Jak již bylo zmíněno, porušení betonu je způsobeno rozpínáním vody při zamrznání v kapilárních pórech. Pro zvýšení mrazuvzdornosti betonu je tedy nezbytné omezit množství kapilárních pórů, čehož lze dosáhnout snížením vodního součinitele. Vodní součinitel lze snížit především použitím plastifikačních a superplastifikačních přísad, které zabraňují shlukování cementových zrn. Tím se zlepšuje zpracovatelnost betonové směsi a je možné dosáhnout požadované konzistence při nižším obsahu záměsové vody. Menší objem kapilárních pórů vede ke snížení propustnosti betonu pro vodu, a tím i ke zvýšení jeho mrazuvzdornosti [5; 14].

Provzdušnění

Významným opatřením ke zvýšení mrazuvzdornosti betonu je cílené provzdušnění pomocí provzdušňovacích přísad. Vlivem provzdušnění vznikají ve struktuře betonu uzavřené kulové póry o velikosti přibližně 100–300 μm . Tyto póry fungují jako expanzní prostory, do nichž může být při zmrazování vytlačována přebytečná voda, čímž dochází ke snížení hydraulických tlaků v cementové matrici. Účinnost provzdušnění není dána pouze celkovým obsahem vzduchu, ale především rozložením pórů a jejich vzájemnou vzdáleností, označovanou jako spacing faktor [5; 12].

Kamenivo

Mrazuvzdornost betonu je významně ovlivněna vlastnostmi použitého kameniva, a to jak z hlediska jeho fyzikálních charakteristik, tak z hlediska vnitřní struktury. Kamenivo s vysokou pórovitostí a otevřeným kapilárním systémem je náchylné ke kritickému nasycení vodou, což při opakovaném zmrazování a rozmrazování vede ke vzniku vnitřních tahových napětí a následnému porušení částic kameniva i přilehlé cementové matrice.

Vhodnost kameniva pro použití v mrazuvzdorném betonu je dále podmíněna jeho mineralogickým složením a homogenitou, neboť přítomnost slabých zrn, mikrotrhlin či vrstevnatých struktur může urychlit degradaci betonu v důsledku mrazových cyklů. Z tohoto důvodu je při návrhu betonu pro prostředí s účinkem mrazu nezbytné volit kamenivo s prokázanou mrazuvzdorností [5].

4. PERFORMANCE-BASED PŘÍSTUPY

Tradiční návrhové postupy dle současně platných norem zahrnují vliv okolního prostředí pomocí stupňů vlivu prostředí, jak již bylo zmíněno v kap. 1. Dodržením těchto požadavků však nemusí být vždy zaručena dostatečná trvanlivost betonu.

Preskriptivní přístupy tak poskytují obecný rámec pro návrh trvanlivých konstrukcí, avšak neumožňují explicitně posoudit časový vývoj degradačních procesů ani skutečnou dobu životnosti konstrukce. Z tohoto důvodu nemusí být splnění normových požadavků vždy dostatečným předpokladem pro dlouhodobou trvanlivost konstrukce.

Oproti tomu se rozvíjejí performance-based přístupy navrhování konstrukcí, které jsou založeny na hodnocení skutečného chování konstrukce v čase a na posuzování její schopnosti plnit požadované funkce po dobu projektované životnosti. Vycházejí z analýzy mezních stavů a z kvantifikace spolehlivosti konstrukce. Umožňují tak zohlednit variabilitu materiálových vlastností, zatížení i působení prostředí a vytvářejí rámec pro optimalizaci návrhu z hlediska bezpečnosti, trvanlivosti a nákladů životního cyklu.

V případě betonových konstrukcí je v těchto přístupech životnost často vymezena okamžikem iniciace koroze výztuže, který je podmíněn postupem degradačních procesů, jako je karbonatace betonu, pronikání chloridů nebo jiných agresivních látek. Tyto přístupy umožňují využití matematických modelů, které popisují rychlost a rozsah degradace v závislosti na vlastnostech betonu a podmínkách prostředí.

Součástí moderních performance-based přístupů je rovněž uplatnění pravděpodobnostních metod, jež zohledňují přirozený rozptyl materiálových vlastností a environmentálních vlivů. Přestože jsou tyto metody již obsaženy v mezinárodních doporučeních, jejich využití v běžné inženýrské praxi je zatím omezené. V kontextu hodnocení trvanlivosti betonových konstrukcí však představují významný nástroj pro návrh a posuzování jejich životnosti [2; 15].

5. MODELÝ DEGRADACE BETONU

Trvanlivost betonu není samostatnou materiálovou charakteristikou, kterou by bylo možné přímo stanovit jednorázovou zkouškou, a její hodnocení proto představuje komplexní problém. Je výsledkem vzájemného působení vlastností betonu, konstrukčního řešení a podmínek prostředí. Pro popis a posouzení tohoto časového vývoje jsou vyvíjeny matematické modely jednotlivých degradačních mechanismů, které umožňují kvantifikovat rychlost degradace a odhadnout její dopad na životnost konstrukce.

Jedním ze softwarů vyvinutých pro modelování degradace betonu je FReET-D (Feasible Reliability Engineering Tool for Degradation effects assessment), což je přidružený modul k pravděpodobnostnímu softwaru FReET (Feasible Reliability Engineering Tool) pro statistickou, citlivostní a spolehlivostní analýzu. Přidružený model FReET-D umožňuje modelovat šest degradačních procesů:

- karbonataci betonu,
- průnik chloridových iontů,
- korozi výztuže,
- střídavé zmrazování a rozmrazování,
- působení síranů,
- působení kyselin. [16; 17]

Diplomová práce se bude dále zabývat pouze modelováním karbonatace.

5.1. Modely karbonatace betonu

Modely karbonatace betonu jsou založeny na difúzi CO_2 do pórové struktury. Difúzi popisuje II. Fickův zákon [18]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

kde C je koncentrace difundující látky, x je vzdálenost od povrchu, t je čas difúze a D_{eff} je difúzní koeficient, který závisí na vlastnostech betonu a prostředí. Vztah mezi hloubkou zkarbonatované vrstvy betonu x_c a časem t lze pak vyjádřit funkcí:

$$x_c = A\sqrt{t} \text{ [18].}$$

Jednotlivé modely se odlišují vyjádřením parametru A , který zohledňuje složení betonu, okolní prostředí, jako např. relativní vlhkost, koncentraci CO_2 , nebo délku ošetřování betonu.

V programu FReET-D se nachází devět různých modelů karbonatace, z nichž některé jsou určeny pro beton z portlandského cementu, některé naopak pro směsné cementy. V rámci diplomové práce bylo použito šest modelů, jež jsou vhodné pro betony s portlandským cementem.

5.2. Carb1a a Carb1b

Tyto modely byly vyvinuty Papadakisem a kol. na základě zákona o zachování hmotnosti CO₂, Ca(OH)₂ a CSH. Obsahují 12 proměnných a jsou určeny pro betony s portlandským cementem. Jako jediný z použitých modelů zohledňují složení betonu – obsah cementu, vody a kameniva a jejich objemové hmotnosti. Nezahrnují však vliv teploty a ošetřování betonu, které rovněž ovlivňují proces karbonatace.

Hloubka karbonatace je vyjádřena takto:

$$x_c = \psi 0.35 \rho_c \frac{\left(\frac{w}{c} - 0.3\right)}{\left(1 + \frac{\rho_c w}{1000 c}\right)} f(RH) \sqrt{\left(1 + \frac{\rho_c w}{1000 c} + \frac{\rho_c a_{1,2,3}}{\rho_a c}\right) C_{CO_2} \frac{24}{44} 10^{-6} t},$$

kde x_c je hloubka karbonatace [mm] pro čas expozice t [roky], ρ_c, ρ_a jsou objemové hmotnosti cementu a kameniva [kg/m³], $w, c, a_{1,2,3}$ jsou množství vody, cementu a kameniva v 1 m³ betonu, RH je relativní vlhkost okolního prostředí [%], C_{CO_2} je koncentrace CO₂ v atmosféře [mg/m³] a ψ je faktor nejistoty modelu [-]. Množství kameniva v 1 m³ se spočítá podle rovnice:

$$a_{1,2,3} = a_1 + a_2 + a_3,$$

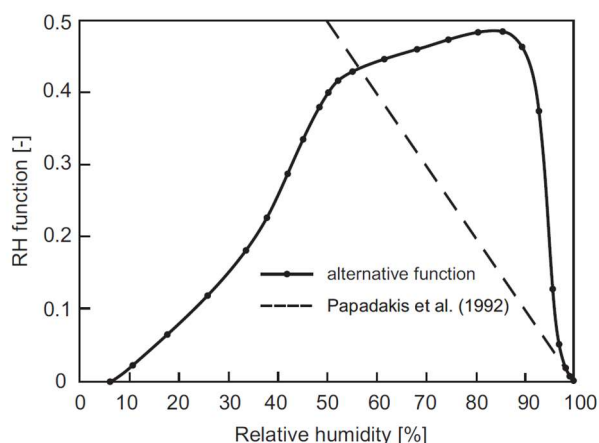
kde a_1, a_2, a_3 je množství kameniva I-III v 1 m³ betonu. Potom specifická objemová hmotnost ρ_a se spočítá:

$$\rho_a = \frac{a_{1,2,3}}{\frac{a_1}{\rho_{a_1}} + \frac{a_2}{\rho_{a_2}} + \frac{a_3}{\rho_{a_3}}},$$

Kde $\rho_{a_1}, \rho_{a_2}, \rho_{a_3}$ jsou objemové hmotnosti kameniva I-III [kg/m³].

Tento model má dvě modifikace, které se liší funkcí zohledňující vliv relativní vlhkosti. Model *Carb1a* totiž neposkytuje přesné hodnoty při vyšších hodnotách RH, což bylo překonáno v modelu *Carb1b*.

Na obrázku jsou znázorněny obě funkce zohledňující relativní vlhkost. Funkce zobrazená čárkovanou čarou je použita v původním modelu *Carb1a*. Funkce dosahuje maximální hodnoty RH do 50 %, pro vyšší vlhkosti pak neposkytuje uspokojivé výsledky, a proto je v modelu *Carb1b* použita funkce znázorněna plnou čarou, která poskytuje relevantní hodnoty i pro RH vyšší než 50 % [17].



Obr. 1 Typy funkce $f(RH)$ [17]

5.3. Carb2a a Carb2b

Tento empirický model vyvinutý Morinagou zahrnuje pouze 6 vstupních parametrů. Receptura betonu je zohledněna pouze pomocí vodního součinitele. Modely tak budou vhodné v případě, kdy není známo přesné složení betonu, a výsledné hodnoty jsou tedy spíše orientační. Funkce zohledňující RH jsou stejné jako v modelech *Carb1a* a *Carb1b*, viz Obr. 1. Rovnice se liší podle vodního součinitele:

for $w/c \leq 0.6$:

$$x_c \approx \psi 1650 \left(\frac{w}{c} - 0.38 \right) f(RH) \left(C_{CO_2} \cdot \frac{24}{44} \cdot 10^{-6} t \right)^{\frac{1}{2}},$$

for $w/c > 0.6$:

$$x_c \approx \psi 1650 \left(\frac{(w/c) - 0.25}{[1 + 2.6 (w/c)]^{\frac{1}{2}}} \right) f(RH) \left(C_{CO_2} \cdot \frac{24}{44} \cdot 10^{-6} t \right)^{\frac{1}{2}} \quad [17].$$

5.4. Carb3

Model Carb3 rovněž podle Morinagy zohledňuje vliv vodního součinitele, koncentrace CO_2 , a narozdíl od předchozího modelu *Carb2* také vliv teploty, která ovlivňuje rychlost chemických reakcí, a tedy rychlost karbonatace. Rovnice modelu se přitom mění v závislosti na tom, zda je hodnota vodního součinitele nižší nebo vyšší než 0,6:

for $0.383 \leq w/c \leq 0.6$:

$$x_c = \psi \sqrt{\frac{C_{CO_2} \cdot 8.205 \cdot 10^{-6} \cdot (T + 273.15)}{220}} \cdot 2.44 \cdot \\ \cdot R \cdot (1.391 - 0.0174 \cdot RH + 0.0217 \cdot T) \cdot \left(4.6 \cdot \frac{w}{c} - 1.76\right) \cdot \sqrt{t \cdot 365},$$

for $w/c > 0.6$:

$$x_c = \psi \sqrt{\frac{C_{CO_2} \cdot 8.205 \cdot 10^{-6} \cdot (T + 273.15)}{220}} \cdot 2.44 \cdot \\ \cdot R \cdot (1.391 - 0.0174 \cdot RH + 0.0217 \cdot T) \cdot \left(4.9 \frac{\left(\frac{w}{c} - 0.25\right)}{\sqrt{1.15 + 3\frac{w}{c}}}\right) \cdot \sqrt{t \cdot 365},$$

kde x_c je hloubka karbonatace [mm], pro čas expozice t [roky], RH je relativní vlhkost okolního prostředí [%], C_{CO_2} je koncentrace CO_2 v atmosféře [mg/m^3], R je poměr rychlosti karbonatace betonu s povrch. úpravou k rychlosti karbonatace betonu bez povrchové úpravy, T je teplota, w, c je množství vody a cementu [kg/m^3] a ψ je faktor nejistoty modelu [-] [17].

5.5. Carb6

Tento jednodušší model, který vyvinuli Bob a Affana, zahrnuje typ cementu a pevnost betonu v tlaku. Jeho nevýhoda oproti předešlým modelům je ta, že všechny koeficienty jsou empirické. Hloubka karbonatace je dána vztahem:

$$x_c = \psi \cdot 150 \frac{r_{c,6} \cdot f(RH) \cdot r_{CO_2}}{f_c} \sqrt{t}$$

kde x_c je hloubka karbonatace [mm], pro čas expozice t [roky], f_c je pevnost betonu v tlaku [MPa], $f(RH)$ je vliv relativní vlhkosti, $r_{c,6}$ je součinitel typu cementu, r_{CO_2} je součinitel koncentrace CO_2 a ψ je faktor nejistoty modelu [-] [17].

5.6. Carb7

Tento model dle Kishitaniho jako jediný zohledňuje použití plastifikačních a provzdušňovacích přísad. Bere v potaz také druh cementu a kameniva. Nezhledňuje však vliv okolního prostředí, jako koncentraci CO_2 , relativní vlhkost nebo teplotu. Protože se rychlost karbonatace liší podle hodnoty vodního součinitele, byly odvozeny dva vztahy:

for $w/c < 0.6$:

$$x_c = \psi \frac{10 \cdot R [4.6 (w/c) - 1.76]}{\sqrt{7.2}} \cdot \sqrt{t},$$

for $w/c > 0.6$:

$$x_c = \psi \frac{10 \cdot [R (w/c) - 0.25]}{\sqrt{0.3 [1.15 + 3 (w/c)]}} \cdot \sqrt{t},$$

kde x_c je hloubka karbonatace [mm], pro čas expozice t [roky], w , c je množství vody a cementu [kg/m³], R je neutralizační faktor [-] a ψ je faktor nejistoty modelu [-].

Neutralizační faktor R je závislý na použitém typu cementu, kamenivu a přísadách, určí se ze vztahu:

$$R = r_{c,7} \cdot r_a \cdot r_s,$$

Kde $r_{c,7}$ je součinitel typu cementu [-], r_a je součinitel typu kameniva [-] a r_s je součinitel závislý na typu přísady [-] [17].

5.7. Carb8a

Jako poslední byl použit model Carb8a, což je komplexní model vyvinutý v rámci výzkumného projektu DURACRETE a byl implementován do *fib* Model Code. Pro jeho použití je nutné provést zkoušku zrychlené karbonatace (ACC test – Accelerated Carbonation Conditions), během které jsou zkušební tělesa ve stáří 28 dní umístěna do karbonatační komory s koncentrací CO₂ rovné 2 %, při teplotě 20 °C a RH = 65 %. Po 28 dnech se tělesa z komory vyjmou, rozlomí se a pomocí fenolftaleinového testu je změřena hloubka karbonatace.

$$x_c = \psi \sqrt{631 \cdot 10^{11} k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) C_{CO_2} \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{t} \cdot W}$$

kde x_c je hloubka karbonatace [mm], pro čas expozice t [roky], k_e je funkce prostředí zohledňující relativní vlhkost [-], k_c je součinitel zohledňující dobu ošetřování betonu [-], $R_{ACC,0}^{-1}$ je inverzní efektivní odolnost vůči karbonataci suchého betonu zahrnující schopnost betonu vázat CO₂ stanovená v čase t_0 za podmínek zrychlené karbonatace [(m²/s)(kg CO₂/m³)], k_t je regresní parametr zahrnující vliv metody zrychlené karbonatace [-], ε_t je chybový součinitel zohledňující nepřesnosti metody zrychlené karbonatace [(m²/s)(kg CO₂/m³)], C_{CO_2} je množství CO₂ v atmosféře [mg/m³], W je funkce počasí uvažující vliv mezoklimatických podmínek (např. orientaci konstrukce a související pravděpodobnost nárazového deště, dobu vlhkosti povrchu) a ψ je faktor nejistoty modelu [-][17].

Inverzní efektivní odolnost vůči karbonataci $R_{ACC,0}^{-1}$

Hodnota inverzní efektivní odolnosti $R_{ACC,0}^{-1}$ je stanovena na základě ACC testu:

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_c}{420} \right)^2$$

kde x_c je hloubka karbonatace na vzorcích po ACC testu.

Ve výpočtu se má uvažovat normální rozdělení inverzní efektivní odolnosti se směrodatnou odchylkou danou rovnicí:

$$s_x = 0,69 \cdot \left(\frac{m_x}{10^{-1}} \right)^{0,78} \cdot 10^{-11}.$$

Faktory upravující výsledky z ACC testu k_t a ε_t

Faktory k_t, ε_t byly zavedeny z důvodu transformace inverzní efektivní odolnosti získané z ACC testu $R_{ACC,0}^{-1}$ [(m²/s)(kg CO₂/m³)] na inverzní odolnost získanou za přírodních podmínek $R_{NAC,0}^{-1}$ [(m²/s)(kg CO₂/m³)]:

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t,$$

kde k_t je regresní parametr zahrnující vliv metody zrychlené karbonatace [-], ε_t je chybový součinitel zohledňující nepřesnosti metody zrychlené karbonatace [(m²/s)(kg CO₂/m³)].

Hodnoty faktorů byly kvantifikovány takto: k_t - normální rozdělení, $m = 1,25, s = 0,35$; ε_t - normální rozdělení, $m = 1 \cdot 10^{-11}, s = 0,15 \cdot 10^{-1}$.

Enviromentální funkce k_e

Tato funkce zahrnuje vliv relativní vlhkosti na difúzi, je dána rovnicí:

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^5}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^5} \right)$$

kde RH_{ref} je referenční hodnota RH = 65 % (dle ACC testu), RH_{real} je relativní vlhkost karbonatované vrstvy.

Funkce počasí W

Funkce počasí zahrnuje vliv mezo-klimatických podmínek, tedy množství srážek na povrch betonu:

$$W = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t} \right)^w$$

kde t_0 je referenční čas [roky] (dle ACC $t_0 = 0,0767$), w je exponent vlivu počasí [-], ToW je čas, po který je beton mokrá, p_{SR} je pravděpodobnost deště, parametr zahrnující směr větru během deště založeným na dat z nejbližší meteorologické stanice [-], b_w je exponent regrese [-] s normálním rozdělením, $m = 0,446, s = 0,163$.

Hodnota funkce ToW je dána vztahem:

$$ToW = \frac{t_w}{365}$$

kde t_w je průměrný počet deštivých dnů v roce.

Funkce vlivu ošetřování betonu k_c

Funkce vlivu ošetřování betonu k_c je dána vztahem:

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c}$$

kde t_c je doba ošetřování [dny], b_c je regresní exponent s normálním rozdělením $m = -0,567, s = 0,024$ [17].

PRAKTICKÁ ČÁST

1. EXPERIMENT Č. 1 – KARBONATACE BETONU

1.1. Popis experimentu

Cílem experimentu je ověření vývoje mechanických vlastností různých druhů betonů a posouzení kvality povrchové vrstvy betonu ve stáří zkušebních vzorků 10–12 let, přičemž tyto výsledky jsou porovnány s vlastnostmi ve stáří 28 dnů.

V diplomové práci byly využity modely pro modelování hloubky karbonatice implementované v programu FReET-D. Výsledné hodnoty hloubky karbonatice byly porovnány s naměřenými hloubkami na zkušebních tělesech, uložených po dobu zhruba 11 let v laboratorních podmínkách. V diplomové práci jsou použité modely pojmenovány stejně jako v programu FReET-D.

Zkušební tělesa byla vyrobena v rámci projektu GAČR 13-70188S Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu v letech 2013–2015. Po provedení veškerých zkoušek v tomto projektu byla zbylá nepoškozená tělesa uložena v laboratorních podmínkách při teplotě 20 ± 2 °C, relativní vlhkosti 60 ± 5 % a přirozené koncentraci CO₂. V rámci diplomové práce byly zjištěny aktuální mechanické vlastnosti betonu pomocí destruktivních i nedestruktivních metod. Tyto zkoušky byly provedeny i v rámci projektu, a proto je možné je nyní porovnat. Nakonec byla určena hloubka karbonatice jak vzniklá přirozeně během jejich uložení, tak hloubka karbonatice na tělesech, která byla vystavena zrychlené karbonataci ve zkušební komoře při koncentraci CO₂ 85–90 %. Naměřené hodnoty přirozené karbonatice byly poté porovnány s vypočítanými hodnotami pomocí šesti různých karbonatačních modelů popsanych v teoretické části.

1.2. Receptury betonů a zkušební tělesa

1.2.1. Receptury

V rámci projektu GAČR 13-70188S bylo navrženo 11 druhů betonu, které se mezi sebou lišily množstvím cementu a použitím superplastifikačních a provzdušňovacích přísad (viz Tab. 2). Označení jednotlivých receptur vychází z množství cementu a dávky použitých přísad. Referenční receptura obsahuje 250 kg cementu a žádné přísady a je označena písmenem R (neboli 0/0).

První číslo v označení udává počet dávek superplastifikační přísady. Druhé číslo vyjadřuje, kolikrát bylo do směsi přidáno 50 kg cementu navíc oproti receptuře R. Provzdušněné betony jsou navíc označeny písmenem P. Teoretické receptury betonů jsou uvedeny v Tab. 3.

Při návrhu receptur byla využita metoda návrhu experimentu (Design of Experiments, DOE), která umožňuje při použití relativně malého počtu receptur systematicky pokrýt a

vyhodnotit vliv množství cementu a použití plastifikačních a provzdušňovacích přísad na vlastnosti betonu [19].

Tab. 2 Přehled druhů betonu

Dávka cementu [kg]	Bez přísad	50 % přísad	100 % plastifikačních přísad	100 % plastif. a provzduš. přísad
250	R (0/0)	X	X	X
300	0/1	1/1	X	X
350	0/2	1/2	2/2	P2/2
400	0/3	1/3	2/3	P2/3

Tab. 3 Teoretické receptury betonů

Materiál	Druh betonu											
	R	0/1	0/2	0/3	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3	
	množství [kg]											
Cement CEM I 42.5 R (Mokrý)	250	300	350	400	300	350	400	350	400	350	400	
Přírodní těžené Drobné kamenivo 0-4 mm (Bratčice)	975	925	875	825	925	875	825	875	825	875	825	
Přírodní drcené hrubé kamenivo 4-8 mm (Olbramovice)	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	
Přírodní drcené hrubé kamenivo 8-16 mm (Olbramovice)	695	695	695	695	695	695	695	695	695	695	695	
Voda	záměsová	190	190	190	190	165	165	165	160	160	150	150
	v kamenivu	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
	celková	204	204	179	179	179	179	179	174	174	164	164
Superplastifikační přísada SVC 4035	0	0	0	0	0,75	0,88	1,00	1,75	2,00	1,75	2,00	
Provzdušňovací přísada Sika LPS A 94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,75	

1.2.2. Zkušební tělesa

Zkušební tělesa byla zhotovena v rámci projektu GAČR 13-70188S. Betonové směsi byly připravovány na stacionární věžové betonárně v betonárnách Bosonohy nebo Olbramovice, které jsou v současnosti součástí společnosti Heidelberg Materials.

Betonové směsi byly naloženy do autodomíchávače a převezeny k laboratoři v areálu betonárny, kde probíhala výroba zkušebních těles. V rámci projektu bylo vyrobeno větší množství zkušebních těles z důvodu provádění velkého množství zkoušek. Po jejich provedení byla zbývající tělesa uskladněna na Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT a následně využita v této diplomové práci.

Jedná se o zkušební tělesa ve tvaru krychlí s délkou hrany 150 mm, hranolů 100 × 100 × 400 mm a bloků o rozměrech 300 × 300 × 150 mm. Ze dvou krychlí každého betonu byly po provedení nedestruktivních zkoušek vyvrtány jádrové vývrty průměru 75 mm.

Tab. 4 Data výroby zkušebních těles

Bez přísad		50 % plastif. přísad		100 % plastif. přísad		100 % plast. a provzduš. přísad	
R	28.05.2013	X	X	X	X	X	X
0/1	16.07.2013	1/1	27.01.2014	X	X	X	X
0/2	04.09.2013	1/2	25.03.2014	2/2	23.07.2014	P2/2	08.12.2014
0/3	06.11.2013	1/3	12.05.2014	2/3	13.10.2014	P2/3	09.03.2015

1.3. Zkoušky betonu

1.3.1. Zkoušky provedené ve stáří těles 28 dní

Zkoušky ve stáří těles 28 dní byly provedeny v rámci projektu GAČR 13-70188S. Výsledky těchto zkoušek (Tab. 5) byly pro vypracování diplomové práce převzaty ze sborníku příspěvků vzniklého v rámci tohoto projektu [20]. Výsledky zkoušky statického modulu pružnosti byly převzaty z článku [21].

Jedná se o následující zkoušky:

- D – objemová hmotnost
- $f_{c,cube}$ – krychelná pevnost v tlaku
- $f_{ct,fl}$ – pevnost v tahu ohybem
- f_t – pevnost v prostém tahu povrchové vrstvy
- E_{dyn} , E_c – dynamický a statický modul pružnosti v tahu a tlaku
- h – hloubka průsaku tlakovou vodou
- k_T – součinitel propustnosti (zkouška Torrent Permeability Test, dále jen TPT).

U výsledků zkoušek jsou uvedeny průměrné hodnoty m_x , výběrové směrodatné odchyly s_x a variační koeficient V_x . Chybové úsečky v grafech mají velikost výběrové směrodatné odchyly.

Tab. 5 Vlastnosti betonů zjištěné v rámci projektu GAČR13-70188S [20; 21]

Beton	Parametr	D [kg/m ³]	f _{c,cube} [MPa]	f _{ct,fl} [MPa]	f _t [MPa]	E _{dyn} [GPa]	E _{c,s} [GPa]	h [mm]	k _T [*10 ⁻¹⁶ m ²]
R	m _x	2290	21,61	3,38	2,56	28,06	24,48	101,7	2,63
	s _x	13,05	0,34	0,07	0,61	0,58	0,86	10,4	1,311
	V _x	0,01	0,02	0,02	0,24	0,02	0,03	0,10	0,50
0/1	m _x	2310	33,27	3,92	1,68	29,03	25,33	34,0	0,12
	s _x	10,97	0,19	0,27	0,19	0,51	0,64	4,0	0,044
	V _x	0,00	0,01	0,07	0,11	0,02	0,03	0,12	0,35
0/2	m _x	2320	44,54	5,79	2,09	30,42	-	34,7	0,10
	s _x	8,62	0,49	0,02	0,26	0,58	-	4,9	0,034
	V _x	0,00	0,01	0,00	0,13	0,02	-	0,14	0,35
0/3	m _x	2330	55,77	5,53	4,07	31,53	-	24,3	0,05
	s _x	18,50	2,23	0,30	0,38	0,25	-	5,9	0,020
	V _x	0,01	0,04	0,05	0,09	0,01	-	0,24	0,42
1/1	m _x	2320	42,79	3,84	3,72	30,58	26,42	26,7	0,08
	s _x	8,08	0,84	0,27	0,38	0,56	0,77	4,0	0,034
	V _x	0,00	0,02	0,07	0,10	0,02	0,03	0,15	0,42
1/2	m _x	2330	50,84	4,86	3,58	31,21	27,63	22	0,06
	s _x	4,04	0,22	0,09	0,29	0,67	0,71	1,5	0,030
	V _x	0,00	0,00	0,02	0,08	0,02	0,03	0,07	0,47
1/3	m _x	2360	56,40	5,56	3,73	32,94	28,65	20,0	0,04
	s _x	1,73	2,21	0,38	0,52	0,67	0,87	3,0	0,008
	V _x	0,00	0,04	0,07	0,14	0,02	0,03	0,15	0,22
2/2	m _x	2340	52,25	5,60	3,53	31,27	27,47	18,3	0,07
	s _x	16,04	4,76	0,18	0,37	0,39	0,73	1,5	0,014
	V _x	0,01	0,09	0,03	0,10	0,01	0,03	0,08	0,20
2/3	m _x	2320	57,16	5,74	4,19	32,68	28,58	27,0	0,03
	s _x	6,24	1,68	0,06	0,40	1,26	0,94	7,0	0,007
	V _x	0,00	0,03	0,01	0,10	0,04	0,03	0,26	0,20
P2/2	m _x	2280	53,71	5,29	4,49	32,47	28,77	20,7	0,07
	s _x	30,99	0,92	0,11	0,46	0,81	0,95	0,6	0,027
	V _x	0,01	0,02	0,02	0,10	0,02	0,03	0,03	0,41
P2/3	m _x	2320	63,68	6,73	4,54	33,01	28,40	11,3	0,12
	s _x	15,95	1,40	0,27	0,40	0,66	0,58	1,5	0,018
	V _x	0,01	0,02	0,04	0,09	0,02	0,02	0,13	0,16

1.3.2. Provedené zkoušky ve stáří 10-12 let

V rámci diplomové práce byly na zkušebních tělesech ve stáří 10 – 12 let zjišťovány tyto veličiny:

- krychelná a válcová pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [22]
- pevnost v tahu ohybem dle ČSN EN 12390-5 [23]
- pevnost v příčném tahu dle ČSN EN 12390-6 [24]
- statický modul pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 [25]
- dynamický modul pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou dle ČSN 73 1371 [26] a rezonanční metodou dle ČSN 73 1372 [27]
- hloubka průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 [28]
- hloubka přirozené karbonatace po 11 letech v laboratorních podmínkách a po zrychlené karbonataci ve zkušební komoře
- vzduchová propustnost krycí vrstvy – Torrent Permeability Tester (TPT) provedená dle pokynů výrobce [29]
- pevnost betonu v tahu povrchové vrstvy odtrhovou zkouškou dle ČSN EN 1542 [30].

Pro zkoušky bylo k dispozici pro každý beton 9 krychlí, 3 hranoly, 2 bloky a 4 vývrty. Podrobné vyhodnocení zkoušek je uvedeno v přílohové části. Při vyhodnocování zkoušek nebylo striktně dodržováno zaokrouhlování dle příslušných norem.

Pevnost betonu v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku byla provedena jak na krychlích o délce hrany 150 mm, tak na válcích o průměru 75 mm a výšce 150 mm dle normy ČSN EN 12390-3 [22].

Tab. 6 Pevnosti betonu v tlaku stanovené na krychli

Krychle	a [mm]	b [mm]	F _c [kN]	f _c [MPa]	m _x [MPa]	s _x [MPa]	V _x [-]
R-7	149,95	150,99	785,8	34,71	32,18	2,19	0,07
R-8	149,83	149,02	687,8	30,81			
R-9	149,87	150,76	701,2	31,04			
0/1-7	149,98	150,15	1012,3	44,95	44,30	1,47	0,03
0/1-8	149,77	149,66	1015,9	45,32			
0/1-9	149,92	150,14	959,1	42,61			
0/2-7	149,90	150,84	1381,0	61,08	59,65	2,93	0,05
0/2-8	150,42	151,17	1279,9	56,29			
0/2-9	149,84	150,54	1389,3	61,59			
0/3-7	149,70	149,94	1369,0	60,99	62,38	2,29	0,04
0/3-8	149,75	150,55	1465,9	65,02			
0/3-9	150,43	151,40	1391,9	61,12			
1/1-7	149,83	150,65	1170,8	51,87	49,46	2,35	0,05
1/1-8	149,58	150,60	1062,7	47,18			
1/1-9	149,79	150,74	1114,0	49,34			
1/2-7	149,78	151,47	1259,0	55,50	55,18	1,58	0,03
1/2-8	149,69	151,10	1279,6	56,58			
1/2-9	149,83	151,14	1210,6	53,46			
1/3-7	149,84	150,74	1404,1	62,17	62,94	2,03	0,03
1/3-8	149,79	151,14	1477,2	65,25			
1/3-9	149,65	150,53	1383,4	61,41			
2/2-7	150,10	151,87	1345,8	59,04	60,49	3,51	0,06
2/2-8	150,15	150,94	1461,5	64,49			
2/2-9	149,93	150,80	1309,7	57,93			
2/3-7	150,03	150,59	1590,8	70,42	69,70	1,23	0,02
2/3-8	149,97	151,82	1554,5	68,28			
2/3-9	149,90	150,99	1593,4	70,40			
P2/2-7	149,92	151,01	1409,9	62,28	60,26	1,75	0,03
P2/2-8	150,08	151,13	1343,0	59,21			
P2/2-9	150,26	151,08	1345,8	59,28			
P2/3-7	149,96	150,65	1643,6	72,76	73,87	0,97	0,01
P2/3-8	149,87	150,55	1679,4	74,43			
P2/3-9	149,83	150,59	1679,3	74,43			

Tab. 7 Pevnosti betonu v tlaku stanovené na válcích

válec	d [mm]	L [mm]	F _c [kN]	f _c [MPa]	m _x [MPa]	s _x [MPa]	V _x [-]
R5-A	74,08	150,54	104,8	24,32	23,83	1,03	0,043
R5-B	74,13	140,99	104,8	24,29			
R6-A	74,10	150,09	96,1	22,28			
R6-B	74,14	133,37	105,5	24,44			
0/1-5-A	74,11	150,37	135,5	31,41	32,44	1,51	0,047
0/1-5-B	74,10	134,30	140,7	32,63			
0/1-6-A	74,17	150,18	134,8	31,20			
0/1-6-B	74,15	143,68	149,0	34,50			
0/2-5-A	73,91	139,48	189,7	44,22	47,98	3,72	0,077
0/2-5-B	74,05	150,76	221,3	51,39			
0/2-6-A	74,07	150,81	195,5	45,37			
0/2-6-B	74,10	142,34	219,7	50,95			
0/3-5-A	73,30	149,72	199,7	47,32	46,71	1,92	0,041
0/3-5-B	73,26	149,83	191,5	45,43			
0/3-6-A	73,28	150,16	189,5	44,94			
0/3-6-B	73,37	150,15	207,7	49,13			
1/1-5-A	73,36	149,88	164,8	38,99	38,75	1,75	0,045
1/1-5-B	73,31	149,94	172,9	40,97			
1/1-6-A	73,47	150,09	162,4	38,31			
1/1-6-B	73,43	150,36	155,6	36,75			
1/2-5-A	73,57	150,20	161,8	38,06	39,05	1,36	0,035
1/2-5-B	73,54	150,61	163,9	38,59			
1/2-6-A	73,56	149,99	163,6	38,50			
1/2-6-B	73,49	149,99	174,2	41,07			
1/3-5-A	73,69	150,07	166,4	39,02	42,31	3,33	0,079
1/3-5-B	73,56	150,01	188,3	44,31			
1/3-6-A	73,79	150,02	171,0	39,99			
1/3-6-B	73,68	150,25	195,8	45,92			
2/2-5-A	73,84	150,19	193,6	45,22	46,36	1,21	0,026
2/2-5-B	73,86	150,15	199,1	46,47			
2/2-6-A	74,01	150,05	196,8	45,75			
2/2-6-B	73,98	150,25	206,3	48,00			
2/3-5-A	73,95	150,23	206,4	48,06	50,14	1,82	0,036
2/3-5-B	73,90	150,33	214,5	50,01			
2/3-6-A	73,95	150,10	225,5	52,51			
2/3-6-B	73,85	150,29	214,1	49,99			
P2/2-5-A	73,92	150,28	196,1	45,70	45,70	2,99	0,065
P2/2-5-B	74,01	150,30	205,9	47,87			
P2/2-6-A	73,93	150,36	178,0	41,47			
P2/2-6-B	74,13	150,30	206,1	47,75			
P2/3-5-A	74,07	150,20	238,0	55,24	57,64	2,62	0,045
P2/3-5-B	74,11	150,39	248,3	57,57			
P2/3-6-A	74,12	150,06	243,5	56,44			
P2/3-6-B	74,21	150,08	265,1	61,29			



Obr. 2 Zkouška pevnosti betonu v tlaku

Pevnost v tahu ohybem

Zkouška pevnosti v tahu ohybem byla stanovena čtyřbodovým ohybem na hranolech o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm podle normy ČSN EN 12390-5 [23]. Hranolová tělesa byla k dispozici pouze pro 7 druhů betonu.



Obr. 3 Pevnost v tahu ohybem

Tab. 8 Pevnosti v tahu ohybem

hranol	b [mm]	h [mm]	L [mm]	F _{ct} [kN]	f _{ct,fl} [MPa]	m _x [MPa]	s _x [MPa]	V _x [-]
0/3-1	100,4	100,0	300	23,6	7,05	7,45	0,63	0,09
0/3-2	100,6	100,1	300	23,9	7,12			
0/3-3	100,4	99,9	300	27,3	8,18			
1/2-1	101,7	99,8	300	19,0	5,63	6,20	0,56	0,09
1/2-2	102,1	99,9	300	21,2	6,24			
1/2-3	101,4	100,5	300	23,0	6,74			
1/3-1	101,3	100,2	300	24,6	7,26	7,27	0,06	0,01
1/3-2	100,7	100,0	300	24,2	7,21			
1/3-3	101,8	100,0	300	24,9	7,34			
2/2-1	101,6	100,0	300	26,2	7,73	7,76	0,16	0,02
2/2-2	101,1	99,8	300	26,6	7,94			
2/2-3	101,6	100,2	300	25,9	7,62			
2/3-1	101,3	100,0	300	22,8	6,75	7,07	0,28	0,04
2/3-2	101,5	99,9	300	24,6	7,28			
2/3-3	100,6	100,0	300	24,1	7,19			
P2/2-1	100,4	100,0	300	24,5	7,32	7,57	0,23	0,03
P2/2-2	101,9	99,8	300	26,3	7,78			
P2/2-3	101,4	100,1	300	25,8	7,62			
P2/3-1	100,9	99,8	300	33,0	9,86	9,19	0,67	0,07
P2/3-2	100,2	99,9	300	28,4	8,52			
P2/3-3	100,7	100,2	300	31,0	9,20			

Pevnost v příčném tahu

Zkouška pevnosti betonu v příčném tahu byla provedena na zkušebních tělesech tvaru krychlí v souladu s normou ČSN EN 12390-6 [4]. Norma stanovuje jako referenční zkušební tělesa válce, avšak připouští rovněž použití krychlí. Při zkoušení krychlových těles jsou zpravidla dosaženy hodnoty pevnosti přibližně o 10 % vyšší než při zkoušení válců. Výsledné hodnoty pevnosti jsou dále ovlivněny rozměry zkušebních těles. Krychle s délkou hrany 150 mm, které byly použity v rámci této práce, vykazují nižší hodnoty pevnosti v porovnání s krychlemi o délce hrany 100 mm [4].

Tab. 9 Zkouška pevnosti v příčném tahu na krychli

krychle	L [mm]	D [mm]	F_t [kN]	f_{ct} [MPa]	m_x [MPa]
R-3	149,2	149,9	90,1	2,57	2,49
R-4	149,4	149,9	84,9	2,41	
0/1-3	150,5	149,9	106,4	3,00	2,99
0/1-4	149,7	150,3	105,0	2,97	
0/2-3	151,5	150,2	134,6	3,77	3,92
0/2-4	151,1	150,5	145,6	4,08	
0/3-3	150,0	149,8	128,2	3,63	3,61
0/3-4	150,7	154,9	131,3	3,58	
1/1-3	150,8	149,9	134,1	3,78	3,75
1/1-4	150,6	149,7	132,1	3,73	
1/2-3	150,8	150,0	123,3	3,47	3,49
1/2-4	151,7	149,9	125,4	3,51	
1/3-3	151,0	149,9	139,1	3,91	3,87
1/3-4	150,4	149,9	135,7	3,83	
2/2-3	150,4	149,8	143,2	4,05	3,80
2/2-4	151,2	150,3	127,2	3,56	
2/3-3	151,2	150,0	139,5	3,92	3,93
2/3-4	151,4	150,1	141,1	3,95	
P2/2-3	151,7	150,1	126,4	3,53	3,73
P2/2-4	151,6	150,1	140,0	3,92	
P2/3-3	151,0	149,9	150,4	4,23	4,28
P2/3-4	151,6	150,0	154,4	4,32	



Obr. 4 Zkouška pevnosti v příčném tahu na krychli

Hloubka průsaku tlakovou vodou

Hloubka průsaku tlakovou vodou byla u každého druhu betonu stanovena na dvou krychlích. Postup popisuje norma ČSN EN 12390-8 [28], podle které probíhá zkouška na krychlích starých nejméně 28 dnů ošetřovaných ve vodě. Nasáklá tělesa jsou upnuta do zařízení a nechá se na ně působit vodní tlak o velikosti 500 ± 50 kPa po dobu 72 ± 2 hodin. V rámci diplomové práce byla zkouška provedena na suchých krychlích, jež byly skladovány v laboratorních podmínkách (20 °C a $RH = 60\%$). Postup tak zcela neodpovídá normě.

Tab. 10 Hloubka průsaku tlakovou vodou na krychlích

krychle	h [mm]	m_x [mm]	krychle	h [mm]	m_x [mm]
R-3	136	129,0	1/3-3	84	79,0
R-4	122		1/3-4	74	
0/1-3	121	111,0	2/2-3	73	81,5
0/1-4	101		2/2-4	90	
0/2-3	97	96,5	2/3-3	61	53,5
0/2-4	96		2/3-4	46	
0/3-3	97	89,0	P2/2-3	59	62,5
0/3-4	81		P2/2-4	66	
1/1-3	71	79,5	P2/3-3	44	46,0
1/1-4	88		P2/3-4	48	
1/2-3	92	93,0			
1/2-4	94				



Obr. 5 Vlevo tělesa upnutá ve zkušebním zařízení, vpravo viditelná linie průsaku na boku krychle 0/1-3

Odtrhová zkouška

Zkouška pevnosti v tahu povrchové vrstvy byla provedena dle normy ČSN EN 1542 [30]. Pro každý výrobek je požadováno jedno zkušební těleso, na kterém se provede minimálně 5 zkoušek. V rámci diplomové práce byly pro každý beton využity dvě zkušební tělesa a na každém byly provedeny dvě odtrhové zkoušky, celkem tedy 4 zkoušky pro každý druh betonu.

Jádrovou vrtačkou byly vyvrtány vývrty do hloubky 15 ± 5 mm. Povrch těles se v místě vývrtů očistil ocelovým kartáčem. Z Obr. 6 je vidět, že povrch betonu R již nebyl tak kvalitní a při čištění kartáčem se začínal drobit. Stejně tak se dělo u betonu 0/1.



Obr. 6 Povrch bloku z betonu R při čištění ocelovým kartáčem

Očištěný odtrhový terč se přilepil na vyvrtaná jádra pomocí rychletuhnoucího dvousložkového epoxidového lepidla. Odtrhový terč se poté přitlačil, aby se odstranil vzduch a vyteklé lepidlo se pečlivě otřelo. Po vytvrzení lepidla bylo na odtrhové terče upevněno zařízení pro odtrhovou zkoušku. Zatěžovací napětí se plynule zvyšuje až do porušení rychlostí $0,05 \pm 0,01$ MPa/s. Velikost zatížení je zaznamenána spolu s typem porušení. Abnormální porušení, tedy takové, kdy je porušeno lepidlo, mají být vyřazena. Po porušení je stanovena hodnota středního průměru plochy porušení zkušebního tělesa pomocí posuvného měřítka.

Při odtrhové zkoušce byly pozorovány dva způsoby porušení. Prvním typem bylo porušení v betonu, které je patrné na Obr. 8 vpravo nahoře. Druhým typem bylo porušení na rozhraní mezi betonem a lepidlem, znázorněné na stejném obrázku dole.

Tento typ porušení je v Tab. 11 vyjádřen zlomkem udávajícím, na jaké ploše byla odtržena povrchová vrstva betonu a jakou část zaujímá samotné lepidlo. Např. poměr 30/70 znamená, že plocha terče je ze 30 % pokryta odtrženou tenkou povrchovou vrstvou betonu a ze 70 % je vidět pouze lepidlo. Velikosti síly u porušení na rozhraní se výrazně nelišily od sil při porušení v betonu, a proto byly do výpočtu pevnosti zahrnuty.

Tab. 11 Odrhová zkouška

vzorek	d ₁ [mm]	F ₁ [kN]	f _t [MPa]	porušení	d ₂ [mm]	F ₂ [kN]	f _t [MPa]	porušení	m _x [MPa]
R1	48,91	3,93	2,09	beton	48,70	3,93	1,92	beton	2,42
R2	48,65	4,90	2,64	beton	48,74	4,90	3,03	beton	
0/1-1	48,60	6,04	3,26	beton	48,61	6,04	3,09	70/30	3,09
0/1-2	48,85	6,34	3,38	beton	48,95	6,34	2,65	beton	
0/2-1	48,87	6,46	3,44	50/50	48,80	6,46	4,08	beton	3,74
0/2-2	48,89	7,23	3,85	beton	48,86	7,23	3,57	50/50	
0/3-1	48,73	8,90	4,77	30/70	49,03	8,90	3,95	beton	4,25
0/3-2	48,76	8,35	4,47	beton	49,02	8,35	3,81	beton	
1/1-1	48,88	7,23	3,85	beton	48,86	7,23	3,77	beton	3,10
1/1-2	48,75	4,13	2,21	beton	48,83	4,13	2,55	beton	
1/2-1	48,84	5,23	2,79	beton	48,88	5,23	2,44	beton	2,76
1/2-2	48,83	4,93	2,63	beton	48,91	4,93	3,17	beton	
1/3-1	48,82	6,64	3,55	beton	48,87	6,64	3,08	beton	3,39
1/3-2	48,85	6,90	3,68	70/30	48,87	6,90	3,27	beton	
2/2-1	48,71	6,64	3,56	beton	48,87	6,64	3,21	beton	3,80
2/2-2	48,82	8,39	4,48	beton	48,89	8,39	3,93	beton	
2/3-1	48,78	5,76	3,08	beton	49,06	5,76	2,74	beton	3,34
2/3-2	48,88	6,46	3,44	beton	48,75	6,46	4,11	50/50	
P2/2-1	48,79	6,39	3,42	beton	48,74	6,39	4,11	beton	3,81
P2/2-2	48,92	6,89	3,67	beton	49,02	6,89	4,03	beton	
P2/3-1	48,98	7,56	4,01	beton	48,97	7,56	3,81	beton	3,96
P2/3-2	48,83	8,02	4,28	beton	48,90	8,02	3,73	beton	



Obr. 7 Održené terče



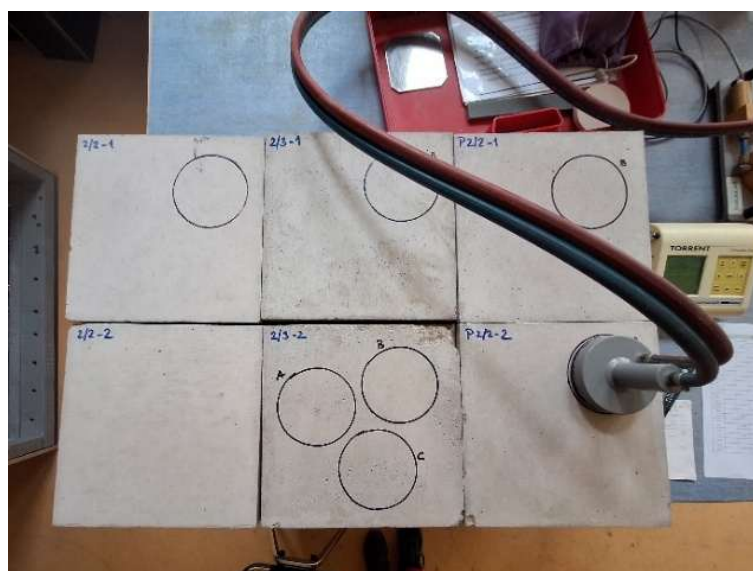
Obr. 8 Zkušební zařízení pro odtrhovou zkoušku vlevo

Zkouška TPT

Metoda Torrent Permeability Tester (dále jen TPT) je nedestruktivní diagnostická metoda vyvinutá pro stanovení vzduchové propustnosti krycí vrstvy betonu. Výsledkem zkoušky je součinitel vzduchové propustnosti k_T , na základě kterého lze beton zařadit do pěti kategorií od velmi dobré až po velmi špatnou. Zkouška spočívá ve vytvoření podtlaku v povrchové vrstvě betonu a sledování časového průběhu nárůstu tlaku v komoře přiložené k povrchu betonu. Na základě nárůstu tlaku je odvozen součinitel propustnosti k_T . Propustnost povrchové vrstvy je ovlivněna vlhkostí, a proto se naměřené hodnoty součinitele přepočítávají na srovnávací 3% vlhkost. Pro určení aktuální vlhkosti betonu se používá kapacitní vlhkoměr KAKASO a jím naměřené hodnoty se přepočítají na vlhkost pomocí kalibračních vztahů pro daný beton [31].



Obr. 9 Příklad přístroje TPT [32]



Obr. 10 Měření TPT na betonových blocích

Zkouška byla provedena na dvou blocích pro každý druh betonu a na každém bloku byla provedena tři měření. Pro jeden druh betonu tedy bylo zjištěno 6 hodnot součinitele vzduchové propustnosti k_T a hloubky L , do které se podařilo vytvořit požadovaný podtlak. Aktuální vlhkost bloků byla stanovena pomocí vlhkoměru KAKASO. Pro ověření naměřených hodnot byly následně tři vybrané bloky vysušeny a z jejich hmotností vypočtena jejich vlhkost. K tomuto ověření byly zvoleny bloky s nejvyšší, nejnižší a přibližně střední hodnotou vlhkosti zjištěnou pomocí vlhkoměru KAKASO. Výsledná vlhkost se pohybovala kolem 3 % (Tab. 12), a tak naměřené hodnoty součinitele vzduchové propustnosti nebyly přepočítávány pomocí kalibračních vztahů.

Tab. 12 Hmotnosti a vlhkosti bloků

blok	KAKASO			m _x	před vysušením	po vysušení	vlhkost [%]
	jednotlivé hodnoty						
R-1	47,4	48,4	47,9	47,7	29523,0	29007,0	1,78
	47,8	47,0	47,6				
1/3-2	71,9	68,5	71,6	66,6	31080,5	30114,0	3,21
	65,4	61,8	60,6				
2/3-2	77,9	83,8	86,7	83,2	31428,0	30493,0	3,07
	86,9	82,2	81,5				

Tab. 13 Vyhodnocení zkoušky TPT

Vzorek	k _T ×10 ⁻¹⁶ [m ²]						L [mm]					
	1. měření	2. měření	3. měření	m _x	s _x	V _x	1. měření	2. měření	3. měření	m _x	s _x	V _x
R-1	3,730	3,591	4,720	3,08	1,10	0,36	74,7	73,2	78,4	69,37	6,92	0,10
R-2	2,238	2,165	2,042				64,6	63,6	61,7			
0/1-1	2,273	1,265	1,340	1,67	0,37	0,22	65,1	54,6	56,3	58,47	3,60	0,06
0/1-2	1,608	1,672	1,852				57,4	58,6	58,8			
0/2-1	0,365	0,588	0,159	0,71	0,41	0,58	40,5	48,1	26,8	45,83	10,61	0,23
0/2-2	0,896	1,004	1,237				51,8	53,0	54,8			
0/3-1	0,222	0,341	0,550	0,74	0,48	0,65	31,5	39,1	47,4	46,77	9,93	0,21
0/3-2	1,366	0,691	1,272				57,6	49,5	55,5			
1/1-1	0,503	0,382	0,442	0,70	0,34	0,48	46,5	41,4	44,5	48,08	5,08	0,11
1/1-2	0,651	1,199	1,035				48,2	54,0	53,9			
1/2-1	0,442	0,371	0,299	0,50	0,18	0,36	43,8	40,8	37,6	44,28	4,65	0,10
1/2-2	0,522	0,550	0,805				45,4	47,6	50,5			
1/3-1	0,252	0,277	0,175	0,28	0,07	0,25	34,6	35,3	28,0	35,57	4,55	0,13
1/3-2	0,282	0,323	0,391				35,6	38,1	41,8			
2/2-1	0,376	0,345	0,449	0,45	0,07	0,16	41,1	39,4	45,0	44,37	3,34	0,08
2/2-2	0,477	0,507	0,526				46,4	46,7	47,6			
2/3-1	0,159	0,372	0,253	0,23	0,10	0,43	26,8	40,9	33,8	31,42	7,05	0,22
2/3-2	0,199	0,098	0,288				30,0	21,0	36,0			
P2/2-1	0,059	0,114	0,110	0,13	0,08	0,59	16,3	22,7	22,2	23,50	6,54	0,28
P2/2-2	0,278	0,138	0,084				35,4	24,9	19,5			
P2/3-1	0,076	0,145	0,158	0,13	0,04	0,27	18,5	26,2	27,3	24,72	3,69	0,15
P2/3-2	0,126	0,177	0,116				23,8	29,0	23,5			

Statický modul pružnosti

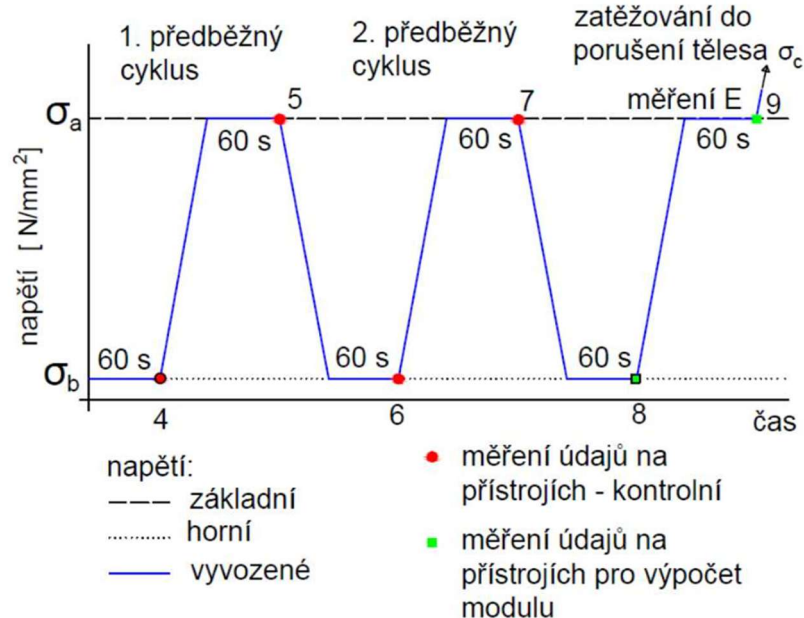
Zkouška statického modulu pružnosti byla provedena dle normy ČSN ISO 1920-10 [33] na vývrtech průměru 75 mm a délky 150 mm, které byly vyvrtány z krychlí o délce hrany 150 mm. Pro každý typ betonu byly vyvrtány čtyři vývrty ze dvou krychlí.

Na prvním vývrtnu byla stanovena pevnost v tlaku pro určení hodnot zatěžovacích napětí. Modul pružnosti byl pak stanoven na zbylých 3 vývrtech. Zkušební těleso bylo

umístěno do zkušebního lisu s osazenými tenzometry pro měření poměrných deformací. Pro vyvození základního napětí bylo těleso zatíženo silou 5 kN, což odpovídá napětí 1,16 MPa, po dobu 60 sekund. Napětí se poté zvyšovalo konstantní rychlostí až do hodnoty přibližně jedné třetiny válcové pevnosti v tlaku, kde bylo udržováno po dobu 60 sekund.

V tomto prvním zatěžovacím cyklu byly při základním i horním napětí odečteny hodnoty poměrného přetvoření z tenzometrů a byla provedena kontrola centrace, přičemž jednotlivá přetvoření se musela lišit o méně než 20 % od své průměrné hodnoty. Pokud centrace nevyhovovala, byla upravena a celý postup byl opakován. Po dosažení vyhovující centrace zkouška pokračovala druhým a třetím zatěžovacím cyklem, během nichž probíhalo měření poměrných deformací, ze kterých se vypočítal statický modul pružnosti.

Postup zkoušky je znázorněn na Obr. 11. Podrobné vyhodnocení statického modulu pružnosti je uvedeno v přílohové části.



Obr. 11 Průběh zkoušky statického modulu pružnosti dle normy [33] [34]



Obr. 12 Zkušební lis ALPHA 3-3000 S FORM+TEST během zkoušky statického modulu pružnosti



Obr. 13 Vlevo vývrt s osazenými elektronickými tenzometry Electronic Strain Transducer LD-DD1-2, vpravo zkušební lis ALPHA 3-3000 S FORM+TEST během zkoušky statického modulu pružnosti

Tab. 14 Statický modul pružnosti

E _c							
beton	m _x [GPa]	s _x [GPa]	V _x [-]	beton	m _x [GPa]	s _x [GPa]	V _x [-]
R	25,50	1,26	0,049	1/3	31,50	0,72	0,023
0/1	30,09	0,63	0,021	2/2	32,05	2,38	0,074
0/2	31,16	1,45	0,047	2/3	31,94	1,20	0,037
0/3	32,31	0,83	0,026	P2/2	29,37	1,14	0,039
1/1	29,39	0,89	0,030	P2/3	32,08	0,63	0,020
1/2	29,17	0,29	0,010				

Dynamický modul pružnosti stanovený ultrazvukovou impulzovou metodou

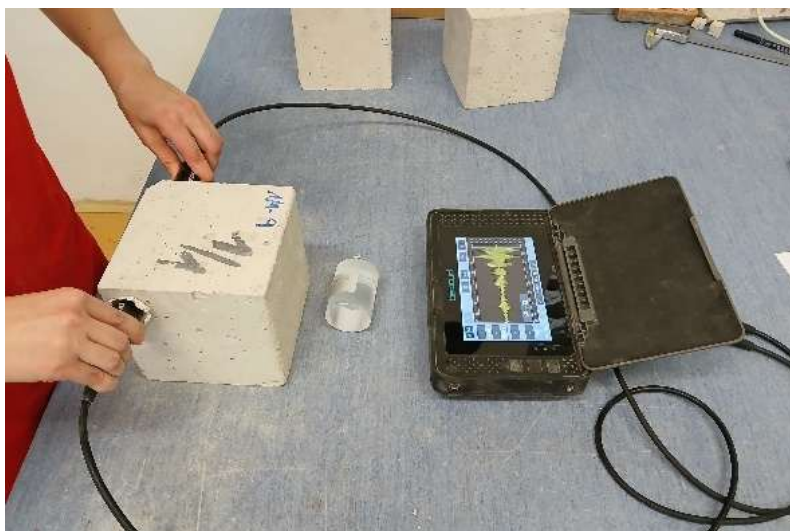
Dynamický modul pružnosti lze určit ultrazvukovou impulzovou metodou, jejíž metodika je popsána v normě ČSN 73 1371 [26]. Metoda je založena na stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění betonem, ze které lze určit dynamický modul pružnosti a další fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu – pevnost v tlaku, rovnoměrnost betonu, změny těchto vlastností v čase a také přítomnost trhlin a dutin v betonu.

Dynamický modul E_{cu} byl určen na různých tělesech, a to na 9 krychlích o délce hrany 150 mm, 4 vývrtech průměru 75 mm a délce 150 mm a 3 hranolech o rozměrech 100 × 100 × 400 mm, která byla k dispozici pouze pro 7 druhů betonu z celkových 11.

Při výpočtu modulu pružnosti byl uvažován Poissonův koeficient ν_{cu} roven 0,2, a tedy součinitel rozměrnosti prostředí $k_3 = 1,054$. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 15.



Obr. 14 Měření doby průchodu ultrazvuku na krychli



Obr. 15 Měření doby průchodu ultrazvuku na krychli

Tab. 15 Dynamické moduly pružnosti stanovené na krychlích, válcích a hranolech UZ metodou

beton	E_{cu} na krychlích			E_{cu} na vývrtech			E_{cu} na hranolech		
	m_x [GPa]	s_x [GPa]	V_x [-]	m_x [GPa]	s_x [GPa]	V_x [-]	m_x [GPa]	s_x [GPa]	V_x [-]
R	33,71	1,03	0,031	32,87	0,54	0,016	-	-	-
0/1	36,15	0,68	0,019	36,01	0,59	0,016	-	-	-
0/2	39,45	0,39	0,010	39,05	0,62	0,016	-	-	-
0/3	39,74	0,54	0,014	35,77	0,27	0,008	39,51	0,42	0,011
1/1	35,67	0,32	0,009	36,82	0,29	0,008	-	-	-
1/2	37,00	0,31	0,008	36,48	0,32	0,009	38,06	0,24	0,006
1/3	39,71	0,52	0,013	39,26	0,33	0,008	39,53	0,48	0,012
2/2	40,22	0,34	0,008	39,38	0,75	0,019	41,08	0,11	0,003
2/3	39,70	0,55	0,014	39,25	0,36	0,009	39,87	0,41	0,010
P2/2	37,42	0,67	0,018	37,08	0,40	0,011	38,64	0,40	0,010
P2/3	38,82	0,40	0,010	39,43	0,29	0,007	40,38	0,52	0,013

Dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou

Rezonanční metodou byl stanoven dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku a dynamický modul ve smyku dle normy ČSN 73 1372 [27] na čtyřech vývrtech se štíhlostí 2 a na třech hranolech se štíhlostí 4.

Na tělesech byly stanoveny vlastní frekvence podélného, příčného a krouživého kmitání a z nich vypočteny moduly pružnosti v tahu a tlaku z podélného kmitání E_{crL} , z příčného kmitání E_{crf} a z krouživého kmitání modul pružnosti ve smyku G_{cr} .

Tab. 16 Dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou na hranolech

beton	E _{crL}			E _{crf}			G _{cr}		
	m _x [GPa]	s _x [GPa]	V _x [-]	m _x [GPa]	s _x [GPa]	V _x [-]	m _x [GPa]	s _x [GPa]	V _x [-]
0/3	36,93	0,21	0,006	37,07	0,34	0,009	15,46	0,03	0,002
1/2	34,81	1,17	0,034	36,73	0,30	0,008	14,97	0,18	0,012
1/3	37,05	0,50	0,014	37,33	0,66	0,017	15,59	0,21	0,013
2/2	37,88	1,03	0,027	40,09	0,05	0,001	16,21	0,07	0,004
2/3	36,81	0,09	0,002	37,21	0,59	0,016	15,54	0,07	0,004
P2/2	35,37	0,96	0,027	37,72	0,82	0,022	15,12	0,33	0,022
P2/3	37,86	0,63	0,017	38,81	0,19	0,005	15,97	0,08	0,005

Tab. 17 Dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou na vývrtech

Beton	E _{crL}			E _{crf}			G _{cr}		
	m _x [GPa]	s _x [GPa]	V _x [-]	m _x [GPa]	s _x [GPa]	V _x [-]	m _x [GPa]	s _x [GPa]	V _x [-]
R	28,60	1,08	0,04	30,46	0,82	0,03	12,54	0,42	0,03
0/1	31,71	0,22	0,01	33,51	6,75	0,20	14,02	0,15	0,01
0/2	33,73	2,22	0,07	38,89	9,86	0,25	15,10	0,94	0,06
0/3	35,35	0,44	0,01	37,07	0,42	0,01	15,34	0,31	0,02
1/1	33,17	0,26	0,01	34,95	0,27	0,01	14,60	0,37	0,03
1/2	32,98	0,47	0,01	34,39	0,58	0,02	14,34	0,31	0,02
1/3	36,08	0,26	0,01	37,10	0,29	0,01	15,61	0,18	0,01
2/2	37,09	2,78	0,08	37,25	0,63	0,02	15,49	0,25	0,02
2/3	36,75	0,30	0,01	37,76	0,57	0,02	15,97	0,11	0,01
P2/2	33,62	0,65	0,02	34,83	1,26	0,04	14,71	0,31	0,02
P2/3	36,02	0,38	0,01	36,85	0,54	0,01	15,43	0,37	0,02

Hloubka přirozené karbonatace

Hloubka karbonatace betonu byla na zkušebních tělesech stanovena pomocí indikátoru na bázi fenolftaleinu. Po rozlomení tělesa byl na čerstvý lom nanesen roztok fenolftaleinu, který slouží k indikaci alkalického prostředí betonu. Nezkarbonatovaný beton s hodnotou pH vyšší než přibližně 9,5 se po aplikaci indikátoru zbarví do růžova až fialova, zatímco karbonatovaný beton, u něhož vlivem působení oxidu uhličitého došlo ke snížení pH pod tuto mez, zůstává bezbarvý.

Hloubka přirozené karbonatace byla stanovena na krychlích, hranolech a vývrtech. Krychle byly vyjmuty ze zařízení pro zkoušku tlakovou vodou, bezprostředně poté rozlomeny příčným tahem a byla stanovena jak hloubka průsaku, tak hloubka karbonatace. Na každé polovině krychle bylo provedeno měření hloubky karbonatace ve dvanácti bodech – tři hodnoty na každé straně. Celkem tak bylo pro jednu krychli získáno 24 hodnot hloubky karbonatace.

Hranoly byly rozlomeny v rámci zkoušky pevnosti v tahu ohybem a na každém z nich bylo změřeno také 24 hodnot.

Z dalších krychlí, jež byly zkoušeny jen nedestruktivně, byly vyvrtány jádrové vývrty a na každém vývrtnu bylo změřeno 6 hodnot hloubek karbonátace, 3 na horním a 3 na spodním okraji.

Průměrné hloubky karbonátace jsou uvedeny v Tab. 18 – Tab. 20. Veškeré naměřené hodnoty včetně fotografií všech těles jsou uvedeny v přílohové části.

Tab. 18 Hloubka karbonátace po 10-12 letech na krychlích

krychle	h [mm]	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]	krychle	h [mm]	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]
R-3	14,1	14,1	4,7	0,34	1/3-3	4,3	4,6	1,9	0,41
R-4	14,0				1/3-4	4,9			
0/1-3	11,2	11,4	3,1	0,27	2/2-3	5,4	5,4	2,3	0,43
0/1-4	11,7				2/2-4	5,4			
0/2-3	6,7	7,1	2,7	0,38	2/3-3	1,9	1,9	1,2	0,64
0/2-4	7,6				2/3-4	1,9			
0/3-3	5,4	5,3	4,5	0,86	P2/2-3	4,1	4,4	2,7	0,61
0/3-4	5,1				P2/2-4	4,7			
1/1-3	7,3	7,4	2,8	0,39	P2/3-3	2,8	3,0	1,4	0,47
1/1-4	7,4				P2/3-4	3,3			
1/2-3	5,3	5,3	2,0	0,38					
1/2-4	5,3								



Obr. 16 Krychle R-3 po stanovení současně hloubky průsaku tlakovou vodou (černá křivka) a hloubky karbonátace



Obr. 17 Krychle 1/2-3 po stanovení současně hloubky průsaku tlakovou vodou (černá křivka) a hloubky karbonatace

Tab. 19 Hloubka karbonatace po 10–12 letech na hranolech

Hranol	h [mm]	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]	Hranol	h [mm]	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]
0/3-1	4,5	4,4	2,0	0,45	2/3-1	2,1	2,1	1,9	0,89
0/3-2	4,9				2/3-2	2,1			
0/3-3	3,8				2/3-3	2,0			
1/2-1	7,0	5,8	2,0	0,35	P2/2-1	2,8	3,8	2,2	0,59
1/2-2	5,1				P2/2-2	2,7			
1/2-3	5,4				P2/2-3	5,9			
1/3-1	3,3	3,5	1,8	0,53	P2/3-1	0,4	0,5	0,7	1,55
1/3-2	3,2				P2/3-2	0,6			
1/3-3	3,8				P2/3-3	0,4			
2/2-1	5,1	4,4	1,9	0,44					
2/2-2	4,1								
2/2-3	4,0								



Obr. 18 Karbonatce na hranolech 0/3



Obr. 19 Karbonatce na hranolech P2/2

Tab. 20 Hloubka karbonatce po 10–12 letech na vývrtech

Vývrt	h [mm]	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]	Vývrt	h [mm]	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]
R-5	15,2	16,3	2,8	0,17	1/3-5	4,6	4,0	1,2	0,31
R-6	17,3				1/3-6	3,5			
0/1-5	12,1	12,0	2,2	0,19	2/2-5	3,9	4,0	1,4	0,35
0/1-6	11,8				2/2-6	4,0			
0/2-5	7,4	7,0	1,8	0,25	2/3-5	1,4	1,5	1,1	0,74
0/2-6	6,7				2/3-6	1,7			
0/3-5	6,7	6,3	1,7	0,28	P2/2-5	1,9	2,3	1,0	0,44
0/3-6	5,9				P2/2-6	2,7			
1/1-5	9,0	9,0	1,6	0,18	P2/3-5	0,7	0,8	0,7	0,83
1/1-6	9,1				P2/3-6	0,9			
1/2-5	7,3	6,8	1,2	0,18					
1/2-6	6,3								



Obr. 20 Karbonatace na vývrtech z krychlí 1/1



Obr. 21 Detail vývrty 1/1-6A a 1/1-B

Metoda zrychlené karbonatace

Zkouška zrychlené karbonatace spočívá v uložení zkušebních těles do karbonatační komory se zvýšenou koncentrací oxidu uhličitého po stanovenou dobu. Po uplynutí této doby jsou tělesa vyjmuta, rozlomena a po aplikaci roztoku fenolftaleinu je změřena hloubka karbonatace.

V rámci diplomové práce byla tělesa tvaru krychlí uložena do karbonatační komory s koncentrací CO_2 85–90 %. Dávkování CO_2 probíhalo každý den v čase od 9:00 do 9:10 z tlakové bomby s koncentrací CO_2 99 %. V případě otevření komory během zkoušky, například z důvodu vkládání nebo vyjímání jiných zkušebních těles, bylo po jejím uzavření provedeno dodatečné dávkování CO_2 po dobu 30 minut.

V karbonatační komoře byl po dobu dávkování CO_2 udržován mírný přetlak přibližně 1 kPa, zajištěný pomocí hadičky vyvedené z komory do nádoby s vodou, v níž byl konec

hadičky ponořen do hloubky 10 cm. Vzhledem k tomu, že karbonatační komora není hermeticky uzavřena, po ukončení dávkování tlak klesal k hodnotě atmosférického tlaku.

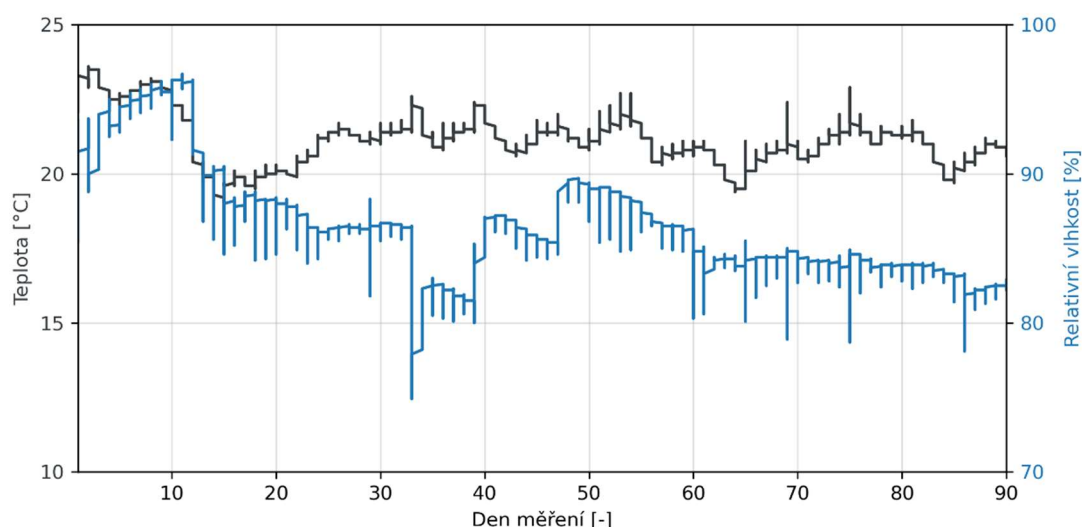
Tělesa byla rozdělena do dvou sad. Každá sada obsahovala jednu krychli pro každý druh betonu. První sada těles byla v komoře uložena po dobu 28 dnů a druhá po dobu 90 dnů. Hodnoty hloubky karbonatace jsou uvedeny v Tab. 21. Na Obr. 24 je znázorněn průběh teploty a relativní vlhkosti v karbonatační komoře v průběhu uložení zkušebních těles.



Obr. 22 Krychle uložené v karbonatační komoře



Obr. 23 Uzavřená karbonatační komora



Obr. 24 Průběh teploty a RH v karbonatační komoře

Tab. 21 Hloubka karbonatace po 28 dnech a po 90 dnech v karb. komoře

krychle	28 dní			90 dní		
	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]
R	54,3	4,5	0,08	75,0	0,0	0,00
0/1	29,1	5,3	0,18	35,7	5,1	0,14
0/2	14,6	3,1	0,21	16,3	4,1	0,25
0/3	11,0	5,2	0,48	10,2	3,7	0,36
1/1	21,3	4,6	0,22	20,1	3,7	0,19
1/2	15,3	7,8	0,51	14,1	2,6	0,18
1/3	6,9	2,8	0,41	6,7	2,7	0,41
2/2	8,9	2,5	0,28	10,6	2,9	0,28
2/3	2,6	1,8	0,68	4,7	3,2	0,69
P2/2	7,0	5,2	0,74	7,4	3,0	0,41
P2/3	2,0	1,3	0,65	3,0	1,8	0,61

Na Obr. 25 jsou zobrazena tělesa po 28 dnech v komoře, která jsou poskládána podle jejich receptur. V horní řadě jsou tělesa z receptur bez přísad seřazená podle množství cementu (R-0/3), v prostřední řadě jsou tělesa s jednou dávkou superplastifikačních přísad (1/1-1/3), ve spodní řadě jsou vzorky se dvěma dávkami superplastifikačních přísad (2/2 a 2/3) a poslední dvě tělesa v pravém rohu mají navíc provzdušňovací přísadu (P2/2 a P2/3).

Na Obr. 26 je zachycena hloubka karbonatace těles po 90 dnech v karbonatační komoře, přičemž tělesa jsou seřazena stejně jako na Obr. 25.



Obr. 25 Tělesa po 28 dnech v karbonatační komoře



Obr. 26 Tělesa po 90 dnech v karbonatační komoře

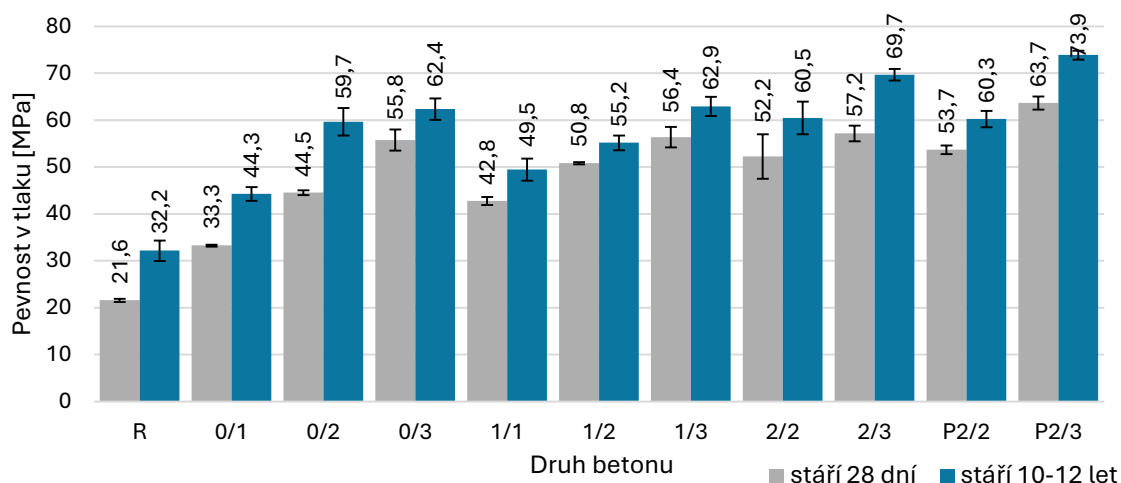
1.4. DISKUZE VÝSLEDKŮ

1.4.1. Zkoušky betonu

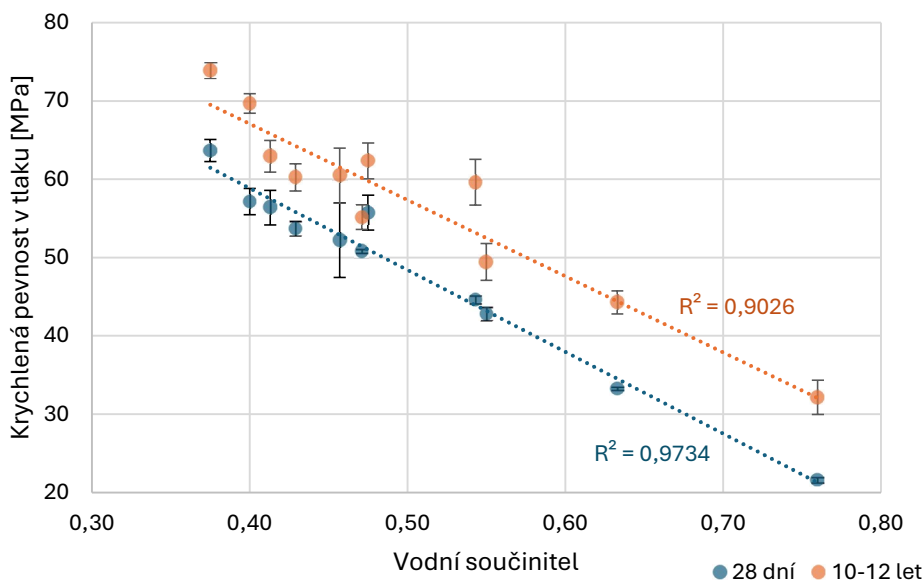
Krychelná pevnost betonu v tlaku

V grafu jsou porovnány krychelné pevnosti v tlaku různých druhů betonů ve stáří 28 dnů a ve stáří 10–12 let. U všech sledovaných druhů betonů je patrný očekávaný nárůst pevnosti v čase, který souvisí s dlouhodobým pokračováním hydratačních procesů cementu. Nejmenší nárůst nastal u betonu 1/2, a to o 4 MPa, tj. o 9 %, a největší u betonu 0/2, a to o 15 MPa, tj. o 34 %.

Z grafu na Obr. 28 je patrné, že pevnost v tlaku vykazuje výraznou lineární závislost na vodním součiniteli jak ve stáří 28 dnů, tak ve stáří 10–12 let.



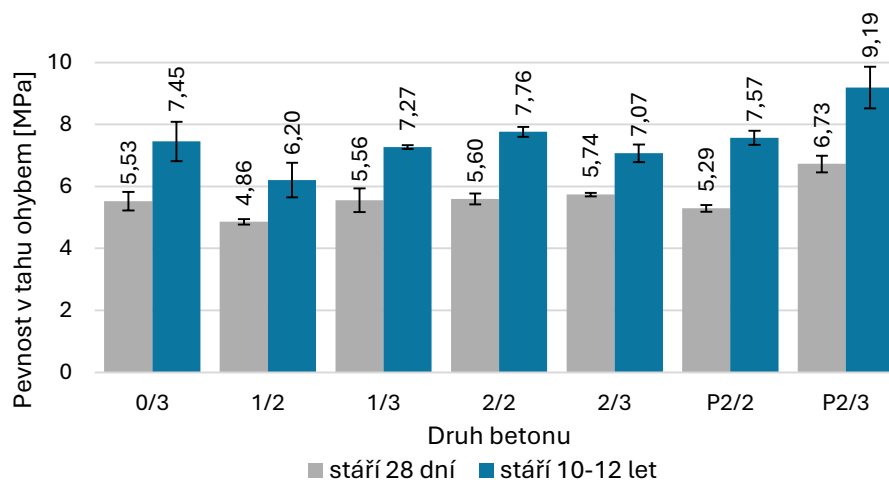
Obr. 27 Porovnání krychelné pevnosti v tlaku



Obr. 28 Závislost krychelných pevností v tlaku na vodním součiniteli

Porovnání tahových pevností

U všech zkoušených těles je pozorován nárůst pevnosti v tahu ohybem o 1,3 – 2,5 MPa.



Obr. 29 Porovnání pevnosti v tahu ohybem

Poměry tahových pevností

V následujících tabulkách Tab. 22 až Tab. 25 jsou uvedeny poměry tahových pevností. V Tab. 22 jsou porovnávány poměry pevnosti v příčném tahu a pevnosti v tahu za ohybu. Podle literatury [35] se tento poměr obvykle pohybuje kolem hodnoty 0,7. U všech zkoušených betonů však byla zjištěna nižší hodnota, přibližně 0,5. Poměry se pohybují v relativně úzkém rozmezí 0,47 – 0,56.

V Tab. 23 jsou uvedeny poměry krychelné pevnosti a pevnosti v tahu ohybem. Ve stáří betonu 28 dnů se pro beton R poměr rovná 6,4. Naopak nejvyšší vychází u betonu 1/1 roven 11,1. Ve stáří 10–12 let vychází poměry nižší. U betonu P2/3 je poměr roven 8,0. Nejvyšší hodnotu má beton 2/3, u kterého se rovná 9,9.

V Tab. 24 jsou porovnány poměry pevnosti v prostém tahu povrchové vrstvy betonu a pevnosti v tahu ohybem stanovené ve stáří vzorků 28 dnů, tak i ve stáří 10–12 let. Poměr 28denních pevností vychází u většiny betonů vyšší, v rozmezí 0,43 – 0,97. U těles starých 10–12 let se pohybuje od 0,43 do 0,57. U těchto poměrů je patrná vyšší variabilita než u poměrů pevností v příčném tahu a tahu ohybem.

V Tab. 25 jsou uvedeny poměry pevnosti v tahu povrchové vrstvy a krychelné pevnosti. Variabilita výsledků ve stáří 28 dnů je relativně vysoká. Nejvyšší (beton 0/2 – 21,3) a nejnižší hodnota (beton R – 8,4) se od sebe liší o 12,9. Po 10–12 letech jsou poměry více konzistentní a liší se maximálně o méně než 6,5.

Ačkoliv jsou výsledky v některých případech relativně konzistentní, nelze tahovou pevnost povrchové vrstvy považovat za univerzální ukazatel kvality povrchové vrstvy z hlediska její odolnosti vůči vlivům okolního prostředí. Zkouška je primárně využitelná pro posouzení soudržnosti a dostatečné tahové pevnosti důležité při sanacích konstrukcí, jako je zesilování apod.

Tab. 22 Poměr pevnosti v příčném tahu k pevnosti v tahu ohybem

stáří 10–12 let			
beton	příčný tah	tah ohybem	poměr
	f_{ct}	$f_{ct,fl}$	$f_{ct}/f_{ct,fl}$
0/3	3,6	7,4	0,48
1/2	3,5	6,2	0,56
1/3	3,9	7,3	0,53
2/2	3,8	7,8	0,49
2/3	3,9	7,1	0,56
P2/2	3,7	7,6	0,49
P2/3	4,3	9,2	0,47

Tab. 23 Poměr krychelné pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem

beton	stáří 28 dní			stáří 10–12 let		
	tah ohybem	krychelná	poměr	tah ohybem	krychelná	poměr
	$f_{ct,fl}$	$f_{c,cube}$	$f_{ct,fl}/f_c$	$f_{ct,fl}$	$f_{c,cube}$	$f_{ct,fl}/f_c$
R	3,4	21,6	6,4	-	32,2	-
0/1	3,9	33,3	8,5	-	44,3	-
0/2	5,8	44,5	7,7	-	59,7	-
0/3	5,5	55,8	10,1	7,4	62,4	8,4
1/1	3,8	42,8	11,1	-	49,5	-
1/2	4,9	50,8	10,5	6,2	55,2	8,9
1/3	5,6	56,4	10,1	7,3	62,9	8,7
2/2	5,6	52,2	9,3	7,8	60,5	7,8
2/3	5,7	57,2	10,0	7,1	69,7	9,9
P2/2	5,3	53,7	10,2	7,6	60,3	8,0
P2/3	6,7	63,7	9,5	9,2	73,9	8,0

Tab. 24 Poměr pevnosti v tahu ohybem k pevnosti v prostém tahu povrch. vrstvy

beton	stáří 28 dní			stáří 10–12 let		
	tah ohybem	odtrh. zk.	poměr	tah ohybem	odtrh. zk.	poměr
	$f_{ct,fl}$	f_t	$f_t/f_{ct,fl}$	$f_{ct,fl}$	f_t	$f_t/f_{ct,fl}$
R	3,4	2,6	0,76	-	2,42	-
0/1	3,9	1,7	0,43	-	3,09	-
0/2	5,8	2,1	0,36	-	3,74	-
0/3	5,5	4,1	0,74	7,4	4,3	0,57
1/1	3,8	3,7	0,97	-	3,1	-
1/2	4,9	3,6	0,74	6,2	2,8	0,44
1/3	5,6	3,7	0,67	7,3	3,4	0,47
2/2	5,6	3,5	0,63	7,8	3,8	0,49
2/3	5,7	4,2	0,73	7,1	3,3	0,47
P2/2	5,3	4,5	0,85	7,6	3,8	0,50
P2/3	6,7	4,5	0,67	9,2	4,0	0,43

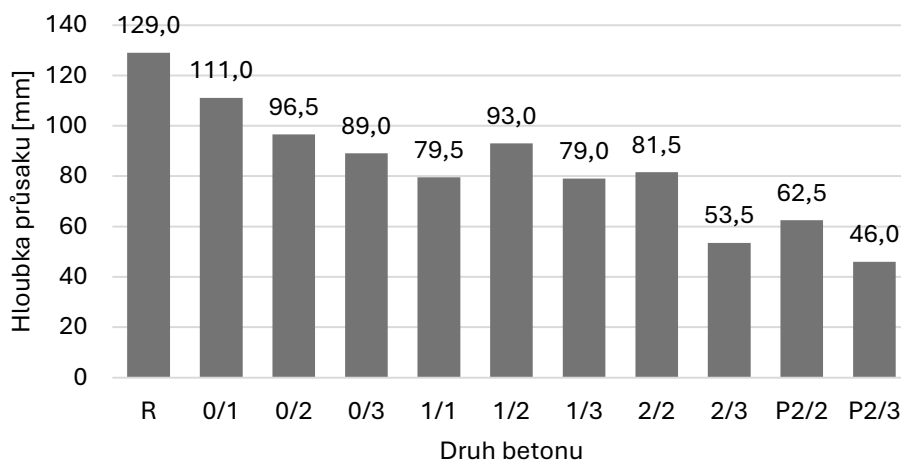
Tab. 25 Poměr tahové pevnosti povrchové vrstvy a krychelné pevnosti

beton	stáří 28 dní			stáří 10–12 let		
	odtrh. zk.	krychelná	poměr	odtrh. zk.	krychelná	poměr
	f_t	$f_{c,cube}$	f_t/f_c	f_t	$f_{c,cube}$	f_t/f_c
R	2,6	21,6	8,4	2,4	32,2	13,3
0/1	1,7	33,3	19,8	3,1	44,3	14,3
0/2	2,1	44,5	21,3	3,7	59,7	15,9
0/3	4,1	55,8	13,6	4,3	62,4	14,7
1/1	3,7	42,8	11,5	3,1	49,5	16,0
1/2	3,6	50,8	14,1	2,8	55,2	20,0
1/3	3,7	56,4	15,2	3,4	62,9	18,5
2/2	3,5	52,2	14,9	3,8	60,5	15,9
2/3	4,2	57,2	13,6	3,3	69,7	20,8
P2/2	4,5	53,7	11,9	3,8	60,3	15,8
P2/3	4,5	63,7	14,2	4,0	73,9	18,7

Hloubka průsaku tlakovou vodou

V rámci této diplomové práce byla hloubka průsaku tlakové vody stanovena na suchých zkušebních tělesech. Z tohoto důvodu není možné získané výsledky přímo porovnávat s výsledky zkoušek provedených na tělesech ve stáří 28 dnů, u nichž byl zkušební postup v souladu s příslušnou normou realizován na předem nasycených vzorcích. Odlišný stav vlhkosti zkušebních těles má zásadní vliv na mechanismus pronikání vody do betonové vnitřní struktury a významně ovlivňuje výslednou hloubku průsaku.

Z naměřených hodnot je patrné, že suché vzorky vykazují větší hloubku průsaku než vzorky předem nasycené. Tento jev lze vysvětlit kombinovaným působením tlakové vody a kapilárních sil v pórové struktuře cementové matrice, které u suchých vzorků podporují nasávání vody do betonu. Naopak u nasycených vzorků jsou póry již zaplněny vodou, což eliminuje kapilární nasávání a zároveň zvyšuje hydraulický odpor proti dalšímu pronikání vody. V důsledku toho dochází k omezení rychlosti i hloubky průsaku tlakové vody [36].



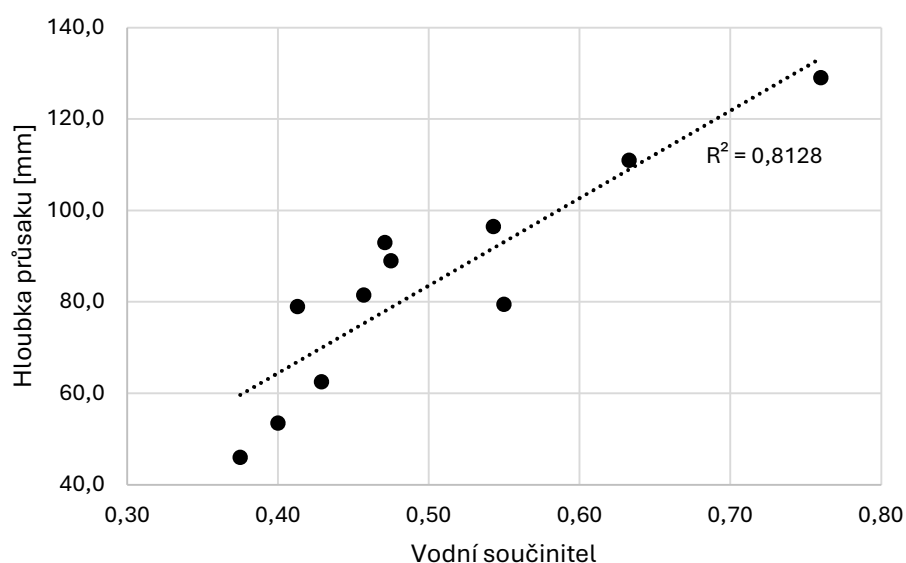
Obr. 30 Porovnání hloubky průsaku ve stáří 10–12 let

Tab. 26 Hloubka průsaku tlakovou vodou

beton	h [mm]	
	28 dní	10-12 let
R	102	129
0/1	34	111
0/2	35	97
0/3	24	89
1/1	27	80
1/2	22	93
1/3	20	79
2/2	18	82
2/3	27	54
P2/2	21	63
P2/3	11	46

Z Obr. 32 je patrná relativně vysoká lineární závislost průsaku tlakovou vodou na vodním součiniteli.

Obr. 31 Porovnání hloubky průsaku tlakovou vodou na vzorcích starých 10-12 let



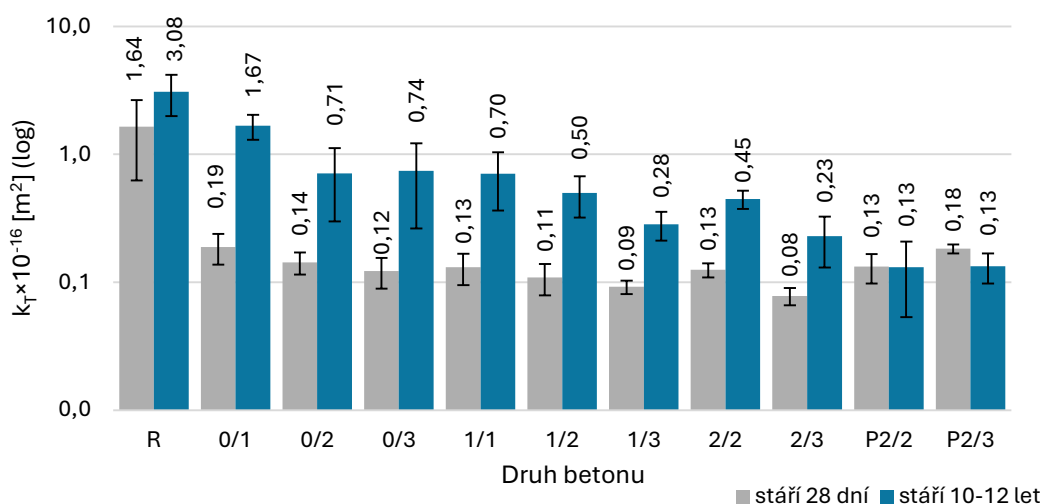
Obr. 32 Závislost hloubky průsaku tlakovou vodou na vodním součiniteli u vzorků starých 10–12 let

Zkouška TPT

U většiny betonů je po 10–12 letech kvalita povrchové vrstvy srovnatelná. Změna třídy kvality nastala u betonů 0/1, 1/3 a 2/3, u kterých došlo ke zhoršení kvality, tedy zvýšení propustnosti povrchové vrstvy.

Tab. 27 Porovnání výsledků zkoušky TPT

k_T [$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$]						
beton	t = 28 dní			t = 10-12 let		
	m_x	s_x	kvalita	m_x	s_x	kvalita
R	1,64	1,02	špatná	3,08	1,10	špatná
0/1	0,19	0,05	střední	1,67	0,37	špatná
0/2	0,14	0,03	střední	0,71	0,41	střední
0/3	0,12	0,03	střední	0,74	0,48	střední
1/1	0,13	0,04	střední	0,70	0,34	střední
1/2	0,11	0,03	střední	0,50	0,18	střední
1/3	0,09	0,01	dobrá	0,28	0,07	střední
2/2	0,13	0,02	střední	0,45	0,07	střední
2/3	0,08	0,01	dobrá	0,23	0,10	střední
P2/2	0,13	0,03	střední	0,13	0,08	střední
P2/3	0,18	0,01	střední	0,13	0,04	střední



Obr. 33 Porovnání součinitele propustnosti k_T

Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti ve stáří vzorků 28 dnů byl stanoven dle normy ČSN EN 12390-13 [37] metodou B. V rámci diplomové práce však byla zkouška provedena dle normy ČSN ISO 1920-10 [33].

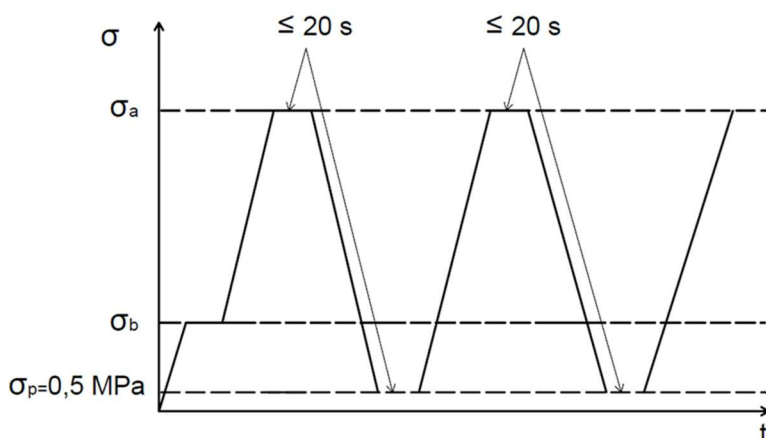
Postupy dle jednotlivých norem se od sebe liší hodnotou spodního napětí, dobou udržování jednotlivých napětí a také rychlostí zatěžování. Postup dle ČSN ISO 1920-10 [33] byl popsán v kap. 1.3.2. Postup dle ČSN EN 12390-13 [37] je naznačen na obr. 20. Zkušební vzorek je před zahájením zkoušky centrálně umístěn do zkušebního lisu s osazenými měřicími přístroji pro záznam deformací. Vzorek je nejprve zatížen na úroveň jmenovitého spodního napětí, které se udržuje po co nejkratší dobu, nejvýše však 20 sekund, a následně se vynulují měřicí přístroje.

V prvním zatěžovacím cyklu je napětí zvyšováno rychlostí $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s až na úroveň jmenovitého horního napětí. Tato hodnota je udržována po dobu nejvýše 20 sekund. Na konci tohoto intervalu jsou zaznamenány deformace a stanovena jejich průměrná hodnota. Následně je napětí stejnou rychlostí sníženo na úroveň spodního napětí, které je opět krátkodobě udržováno, a jsou zaznamenány odpovídající deformace.

Druhý zatěžovací cyklus probíhá shodným způsobem jako cyklus první. Naměřené deformace při horním napětí slouží zároveň ke kontrole správné centrace vzorku, přičemž rozdíly deformací na jednotlivých měřicích liniích nesmí překročit předepsaný limit. V případě jeho překročení je nutné zkoušku přerušit, upravit uložení vzorku a zkoušku opakovat.

Ve třetím zatěžovacím cyklu je napětí opět zvyšováno ze spodní úrovně na jmenovité horní napětí stejnou rychlostí a s obdobným krátkodobým udržením napětí. Deformace zaznamenané v tomto cyklu jsou použity pro výpočet statického modulu pružnosti.

Po dokončení měření modulu pružnosti je u zkušebního vzorku stanovena pevnost v tlaku.

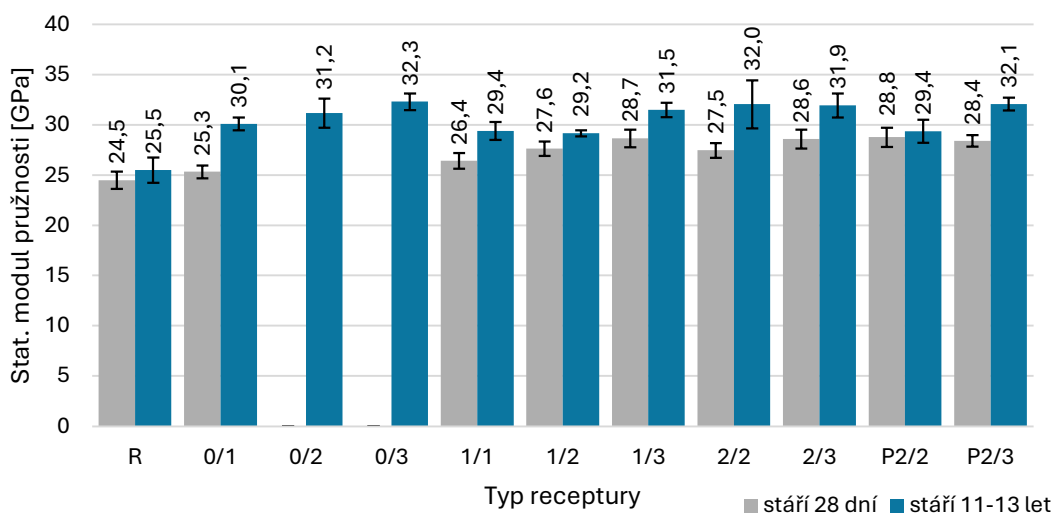


Obr. 34 Průběh zkoušky statického modulu pružnosti dle ČSN EN 12390-13 – metoda B [37] [38]

Dle článku [39] se výsledky stanovené metodou popsanou v [33] a metodou B podle [37] statisticky významně neliší a výsledky je tedy možné porovnávat.

Kromě odlišné metody byly také moduly pružnosti stanoveny na tělesech s odlišnou štíhlostí. Tělesa pro stanovení statického modulu pružnosti ve stáří 28 dnů byla dlouhá 200 mm (štíhlost 2,67), v diplomové práci byla použita tělesa délky 150 mm (štíhlost 2,0). Tento rozdíl by však neměl mít na výsledné hodnoty modulů pružnosti zásadní vliv. Výsledky na betonech 0/2 a 0/3 ve stáří 28 dnů nebyly pro vypracování diplomové práce k dispozici.

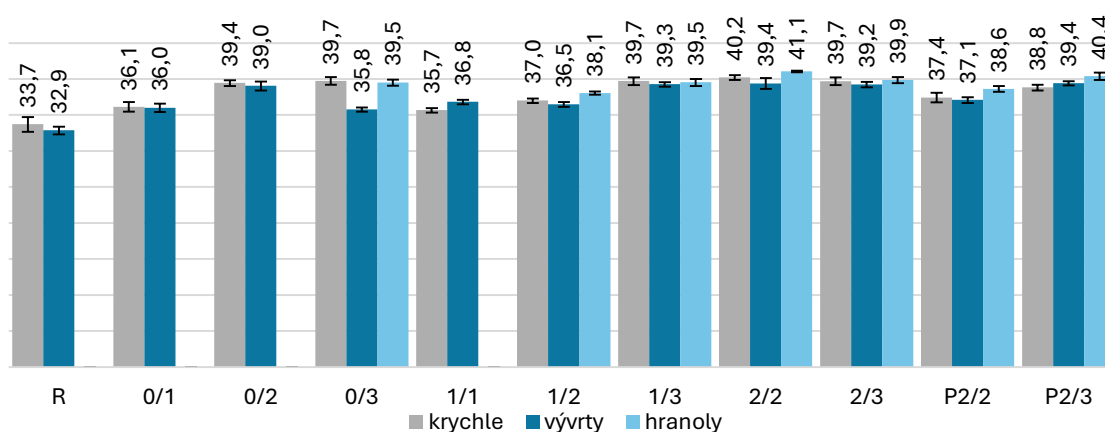
Na Obr. 35 jsou porovnány hodnoty statického modulu pružnosti. U všech druhů betonu došlo k nárůstu statického modulu pružnosti. K největšímu nárůstu došlo u betonu 0/1 o 19 %, k nejmenšímu u betonu R a P2/2 o 2–4 %.



Obr. 35 Porovnání statických modulů pružnosti

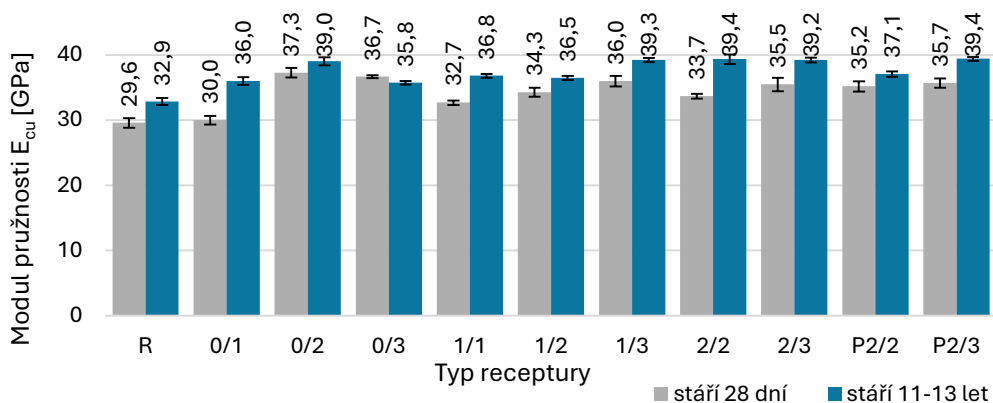
Dynamický modul pružnosti stanovený ultrazvukovou metodou

Dynamický modul pružnosti stanovený UZ byl stanoven na krychlich, vývrtech a hranolech. Z grafu je patrné, že výsledné hodnoty jsou u většiny betonů srovnatelné. Rozdíly hodnot jsou u všech betonů kromě 0/3 menší než 2 GPa, což odpovídá zhruba 5 %. U betonu 0/3 je hodnota zjištěná na vývrtech menší o 3,7 GPa než na hranolu, což je zhruba 10 %. Tento rozdíl už je celkem značný a není zcela jasné, čím je to způsobeno. Hodnoty na krychli a hranolu jsou však prakticky stejné. Hranolová tělesa nebyla k dispozici pro všechny druhy betonů, proto hodnoty u betonů R, 0/1, 0/2 a 1/1 v grafu chybí.



Obr. 36 Srovnání Ecu stanovených na různých tělesech UZ metodou

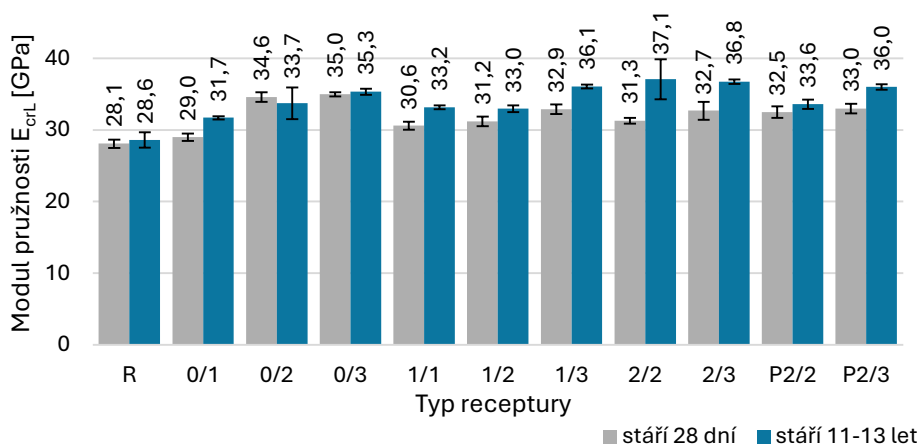
Na obr. 23 jsou porovnány hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného UZ na vývrtech ve stáří těles 28 dní a 10-12 let. Nárůst hodnot může být způsoben pokračujícím zráním betonu během 11 let uskladnění a rozdílnou vlhkostí vzorků. Ve stáří 10-12 let měla tělesa pravděpodobně nižší vlhkost, a tak výsledné dynamické moduly vycházejí nižší.



Obr. 37 Porovnání E_{cu} stanovených na vývrtech

Dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou

Hodnoty dynamických modulů pružnosti stanovených rezonanční metodou ve stáří vzorků 10–12 let vycházejí u některých druhů betonu srovnatelně jako ve stáří 28 dnů. Nejvyšší nárůst nastal u betonu 2/2 o 4,1 MPa. Relativně malý nárůst u většiny druhů betonů je dán rozdílnou vlhkostí vzorků, která má vliv na výsledné dynamické moduly pružnosti stanovené z vlastních frekvencí i z doby průchodu UZ. Čím nižší je vlhkost vzorku, tím nižší vycházejí dynamické moduly [40]. Hodnoty modulů pružnosti stanovené ultrazvukovou a rezonanční metodou vzájemně korespondují.



Obr. 38 Porovnání E_{crL}

Hloubka přirozené karbonatice

Stanovené hloubky karbonatice na krychlích a hranolech se výrazně neliší. U většiny druhů betonu jsou rozdíly průměrných hodnot do 1 mm, kromě betonu P2/3, u kterého je průměrná hloubka karbonatice na krychli vyšší o zhruba 2 mm.

V případě vývrťů vycházejí průměrné hloubky karbonatice vyšší než na krychlích. Vývrty byly vrtány z boku krychlí (kolmo na směr hutnění), na kterých je většinou hloubka karbonatice vyšší než na dně nebo vrchu krychle. Výsledky na tělesech viz Tab. 18 – Tab. 20.

Hloubka karbonatace po zrychlené karbonataci

V karbonatační komoře byly uloženy dvě sady vzorků, první na 28 dnů a druhá na 90 dnů. Každá z nich obsahovala jednu krychli pro každý druh betonu. Přehled vývoje hloubky karbonatace je uveden v Tab. 28 a na následujících grafech na Obr. 42 – Obr. 44. Barevné plochy na grafech u jednotlivých průběhů značí velikost výběrové směrodatné odchylky s_x .

Tab. 28 Vývoj hloubky karbonatace během zrychlené karbonataci

beton	R			0/1			0/2		
doba	0 dní	28 dní	90 dní	0 dní	28 dní	90 dní	0 dní	28 dní	90 dní
m_x [mm]	14,1	54,3	75,0	11,4	29,1	35,7	7,1	14,6	16,3
s_x [mm]	4,7	4,5	0	3,1	5,3	5,1	2,7	3,1	4,1
beton	0/3			1/1			1/2		
doba	0 dní	28 dní	90 dní	0 dní	28 dní	90 dní	0 dní	28 dní	90 dní
m_x [mm]	5,3	11,0	9,6	7,4	21,3	20,1	5,3	13,2	14,1
s_x [mm]	4,5	5,2	3,7	2,8	4,6	3,7	2,0	2,9	2,6
beton	1/3			2/2			2/3		
doba	0 dní	28 dní	90 dní	0 dní	28 dní	90 dní	0 dní	28 dní	90 dní
m_x [mm]	4,6	6,9	6,7	5,4	8,9	10,6	1,9	2,6	4,7
s_x [mm]	1,9	2,8	2,7	2,3	2,5	2,9	1,2	1,8	3,2
beton	P2/2			P2/3					
doba	0 dní	28 dní	90 dní	0 dní	28 dní	90 dní			
m_x [mm]	4,4	7,0	7,4	2,4	2,2	3,0			
s_x [mm]	2,7	5,2	3,0	1,1	1,4	1,8			

Z výsledků je patrné, že po 28 dnech rychlost karbonatace klesla z důvodu snížení difúze, což je způsobeno zaplňováním pórové struktury vlivem tvorby uhličitanu vápenatého.

U betonu 1/2 po 28 dnech v karbonatační komoře byla v jednom místě na krychli hloubka karbonatace výrazně vyšší než na zbytku krychle, viz Obr. 39. Tyto odlehle hodnoty byly pro výpočet průměru a výběrové směrodatné odchylky vyřazeny.

Krychle z betonu R po 90 dnech byly zcela zkarbonatované celé, viz Obr. 41, takže hloubka karbonatace na větším tělese ze stejného betonu by mohla dosáhnout i vyšších hodnot.



Obr. 39 Hloubka karbonatace po 28 dnech v karb. komoře – beton 0/2



Obr. 40 Hloubka karbonatace po 90 dnech v karb. komoře – beton 0/2



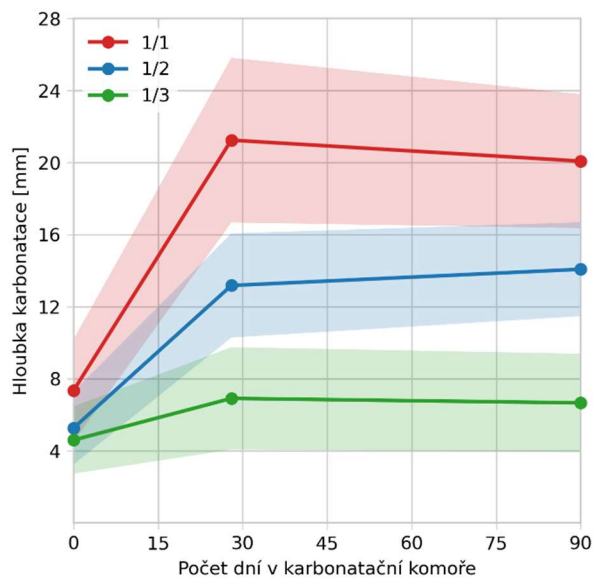
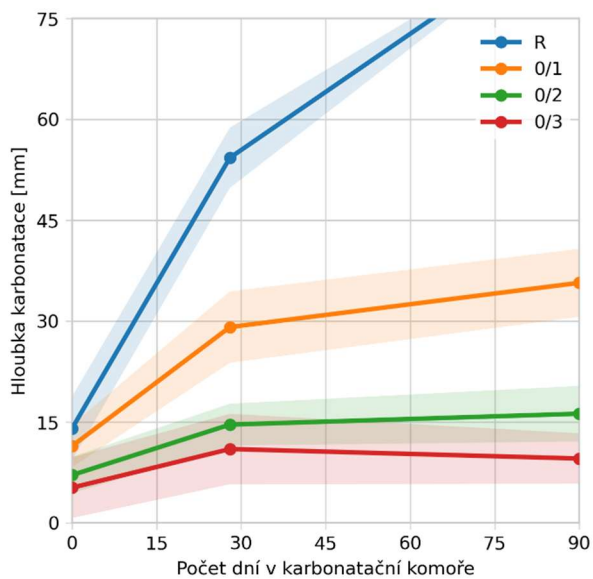
Obr. 41 Hloubka karbonatace po 90 dnech v karb. komoře – beton R

Na Obr. 42 až Obr. 44 jsou porovnány nárůsty hloubky karbonatace během zkoušky zrychlené karbonatace. Záměrně je na prvním grafu jiné měřítko osy y než u ostatních grafů, aby byl vidět průběh karbonatace na vzorcích z betonu R a 0/1. Pro porovnání ostatních grafů mezi sebou jsou měřítka osy y shodná.

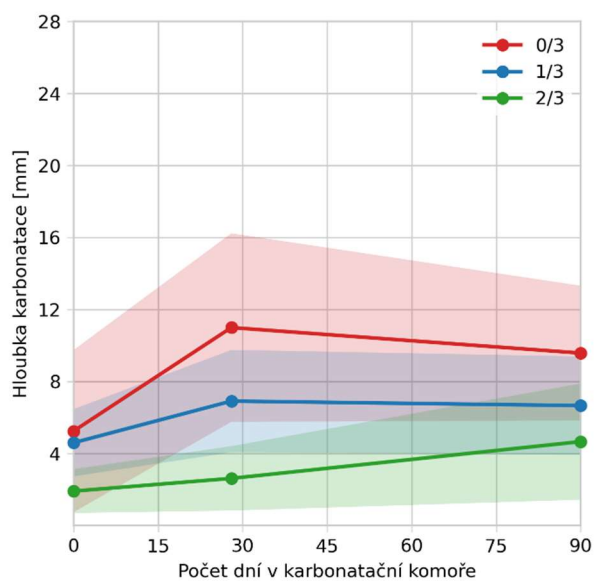
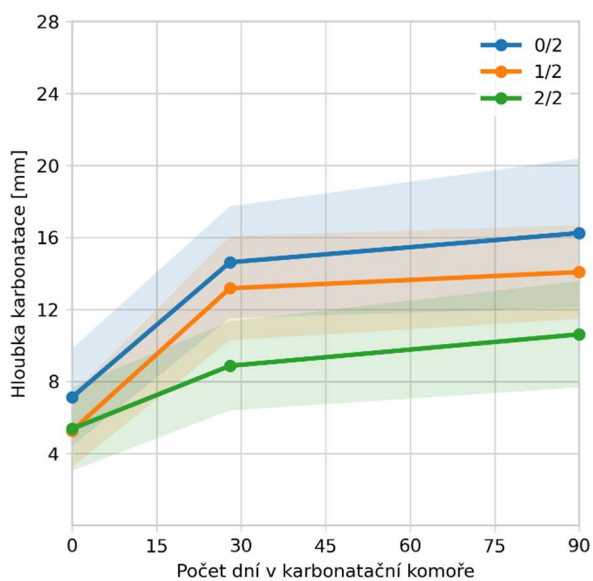
Z levého grafu na Obr. 42 je patrný zásadní vliv zvýšení obsahu cementu, a tím i snížení vodního součinitele na hloubku karbonatace. Nejvýraznější rozdíl nastal mezi betony R a 0/1 s vodními součiniteli 0,76 a 0,63. U betonu R je hloubka karbonatace minimálně dvojnásobná oproti betonu 0/1. Krychle R byly zcela zkarbonatované, a tak nebyla zjištěna přesná hloubka karbonatace. Na pravém grafu jsou znázorněny průběhy u betonů s nejvyšší dávkou cementu a jednou dávkou plastifikačních přísad. Po 28 dnech se už hloubka karbonatace prakticky nezvyšuje, což je dáno snížením difúze vlivem zaplňování pórů vznikajícím CaCO_3 během karbonatace.

Na Obr. 43 je znázorněn vliv plastifikačních přísad, jejichž použitím se snížil vodní součinitel. U betonů 0/2, 1/2 a 2/2 je vidět jen mírný nárůst mezi 28 a 90 dny v karbonatační komoře. Stejně tak u betonů 0/3, 1/3 a 2/3, u kterých je vidět, že hloubka karbonatace zůstává zhruba stejná, zejména u 0/3 a 1/1.

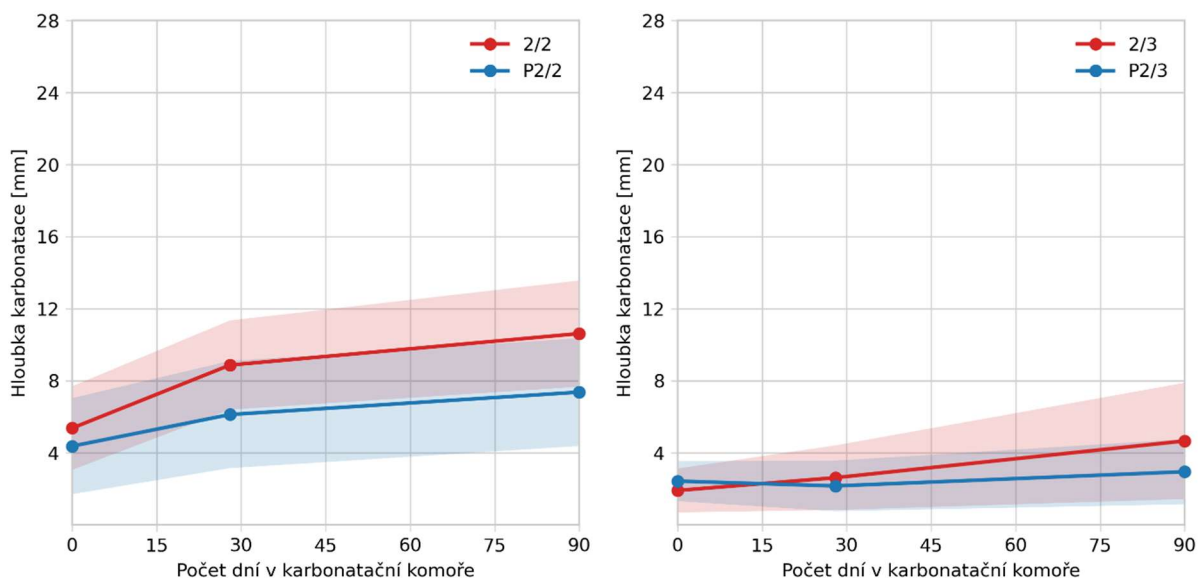
Poslední graf srovnává betony bez a s obsahem provzdušňovací přísady. Receptury se liší přidáním provzdušňovací přísady a mírně se liší i vodní součinitel. U neprovzdušněných betonů 2/2 a 2/3 se w/c rovná hodnotám 0,46 a 0,40, u provzdušněných P2/2 a P2/3 činí 0,43, resp. 0,38. Hloubka karbonatace provzdušněných betonů vychází nižší než u neprovzdušněných. Nejmenší nárůst je vidět u betonu P2/3, u něho se hloubka liší zhruba o 1 mm.



Obr. 42 Porovnání vývoje hloubky karbonatce během zrychlené karbonatce



Obr. 43 Porovnání vývoje hloubky karbonatce během zrychlené karbonatce, vliv plastifikačních přísad



Obr. 44 Porovnání vývoje hloubky karbonatice během zrychlené karbonatice, vliv provzdušňovacích přísad

1.4.2. Modelování karbonatice

Pro modelování karbonatice byl použit program FReET-D, který slouží k modelování degradace betonu a betonářské výztuže. Jedná se o přidružený modul k pravděpodobnostnímu softwaru FReET.

Hloubka karbonatice byla stanovena pomocí pravděpodobnostního výpočtu s 10 000 simulacemi. Pro generování simulací byla použita metoda Latin Hypercube Sampling s výběrem středních hodnot intervalů (LHS – mean).

Vstupní hodnoty do modelů

Zkušební vzorky byly uloženy v laboratorním prostředí po dobu 11 let při teplotě 20 ± 2 °C, relativní vlhkosti $RH 60 \pm 5$ % a přirozené koncentraci CO_2 , která byla uvažována hodnotou 400 ppm, což odpovídá $731,86 \text{ mg/m}^3$. Ve všech betonech byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R, jehož objemová hmotnost je 3100 kg/m^3 , a tato kameniva:

- písek 0/4 (Bratčice) s objemovou hmotností 2580 kg/m^3 ,
- šterk 4/8 (Olbramovice) s objemovou hmotností 2680 kg/m^3 ,
- šterk 8/16 (Olbramovice) s objemovou hmotností 2680 kg/m^3 .

Ve všech modelech byl uvažován faktor nejistoty modelu roven 1.

V Tab. 29 je uvedeno množství vody (w), cementu (c), kameniva (a_1, a_2, a_3) v kg na 1 m^3 betonu. V dalších tabulkách jsou uvedeny použité hodnoty a rozdělení vstupních hodnot pro jednotlivé modely.

Tab. 29 Množství vody, cementu a kameniva v betonu [kg/m³]

	R	0/1	0/2	0/3	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
w/c	0,76	0,63	0,54	0,48	0,55	0,47	0,41	0,46	0,40	0,43	0,38
w	190	190	190	190	165	165	165	160	160	150	150
c	250	300	350	400	300	350	400	350	400	350	400
a ₁ (0/4)	975	925	875	825	925	875	825	875	825	875	825
a ₂ (4/8)	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
a ₃ (8/16)	695	695	695	695	695	695	695	695	695	695	695

Carb1

Model *Carb1* je vhodný pro betony z portlandského cementu. Do modelu vstupuje 12 proměnných, které jsou uvedeny v tabulce s uvažovanými hodnotami a rozdělení. Pro výpočet byly použity obě jeho varianty *Carb1a* a *Carb1b*, jež se liší funkcí vyjadřující vliv relativní vlhkosti, viz Obr. 1.

Tab. 30 Vstupní hodnoty do modelů *Carb1a* a *Carb1b*

veličina	ozn.	MJ	rozdělení	m _x	s _x	V _x
čas	t	roky	det.	11	-	-
koncentrace CO ₂	C _{CO2}	mg/m ³	norm.	731,86	87,82	0,12
relativní vlhkost	RH	%	rovnom.	60,00	2,89	0,05
obsah cementu	c	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
obsah vody	w	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
obsah kameniva 0/4	a ₁	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
obsah kameniva 4/8	a ₂	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
obsah kameniva 8/16	a ₃	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
obj. hm. kameniva 0/4	ρ _{a,1}	kg/m ³	norm.	3100	62	0,02
obj. hm. kameniva 4/8	ρ _{a,2}	kg/m ³	norm.	2580	51,6	0,02
obj. hm. kameniva 8/16	ρ _{a,3}	kg/m ³	norm.	2680	53,6	0,02
faktor nejistoty modelu	ψ	-	det.	1,0	-	-

Carb2

Model *Carb2* zahrnuje 6 proměnných a jeho dvě varianty *Carb2a* a *Carb2b* se liší rozdílnými funkcemi vyjadřujícími vliv relativní vlhkosti okolí stejně jako u modelu *Carb1*.

Tab. 31 Vstupní hodnoty do modelů *Carb2a* a *Carb2b*

veličina		MJ	rozdělení	m _x	s _x	V _x
čas	t	roky	det.	11	-	-
koncentrace CO ₂	C _{CO2}	mg/m ³	norm.	731,86	87,82	0,12
relativní vlhkost	RH	%	rovnom.	60	2,89	0,05
obsah cementu	c	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
obsah vody	w	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
faktor nejistoty modelu	ψ	-	det.	1,0	-	-

Carb3

Model *Carb3* zohledňuje vodní součinitel a jeho formulace se mění podle toho, zda je hodnota vodního součinitele nižší nebo vyšší než 0,6.

V modelu se nachází součinitel R , který vyjadřuje poměr rychlosti karbonatace betonu s povrchovou úpravou k rychlosti karbonatace bez povrchové úpravy. Zkoušené betonové vzorky neměly žádnou povrchovou úpravu, a tak se má tento součinitel uvažovat roven 1. V případě povrchových úprav však hodnoty ještě nebyly stanoveny.

Tab. 32 Vstupní hodnoty do modelů *Carb2a* a *Carb2b*

veličina		MJ	rozdělení	m_x	s_x	V_x
čas	t	roky	det.	11	-	-
koncentrace CO ₂	C_{CO_2}	mg/m ³	norm.	731,86	87,82	0,12
relativní vlhkost	RH	%	rovnom.	60	2,89	0,05
teplota	T	° C	rovnom.	20	1,16	0,06
obsah cementu	c	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
obsah vody	w	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
poměr karb. rychlosti povrch. mat.	R	-	det.	1,0	-	-
faktor nejistoty modelu	ψ	-	det.	1,0	-	-

Carb6

Model *Carb6* je závislý na pevnosti betonu v tlaku, relativní vlhkosti a koncentraci CO₂ v okolním prostředí.

Uvažované hodnoty pevnosti betonu v tlaku jsou uvedeny v Tab. 33.

Součinitel $r_{c,6}$ je závislý na typu cementu a jeho doporučené hodnoty jsou od 0,8 do 1,2. Podrobněji však není popsáno, jakou hodnotu zvolit pro různé typy cementu. V modelu byla tedy pro portlandský cement zvolena hodnota 0,8.

Hodnota součinitele r_{CO_2} má být rovna 1 pro koncentraci CO₂ 0,03 % (550 mg/m³ CO₂), nebo 2 pro koncentraci 0,1 % (1833 mg/m³ CO₂). Jeho hodnota byla uvažována 1,2 pro 731,9 mg/m³ CO₂.

Jako poslední do modelu vstupuje funkce závislá na relativní vlhkosti $f(RH)$, jež nabývá hodnot od 0,3 do 1. Pro beton permanentně mokrá je rovna 0,3 a pro beton ve vnitřním prostředí je dána hodnota 1. Vzhledem k tomu, že vzorky byly uloženy po celou dobu v prostředí s RH 60 % \pm 5 %, byla hodnota $f(RH)$ zvolena 0,9.

Tab. 33 Krychelné pevnosti betonu v tlaku ve 28 dnech [MPa]

beton	R	0/1	0/2	0/3	1/1	½	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
$f_{c,mean}$	21,6	33,3	44,5	55,8	42,8	50,8	56,4	52,2	57,2	53,7	63,7

Tab. 34 Vstupní hodnoty pro model Carb6

veličina		MJ	rozdělení	m_x	s_x	V_x
čas	t	roky	det.	11	-	-
vliv koncentrace CO ₂	r_{CO_2}	-	det.	1,2	-	-
vliv rel. vlhkosti	$f(RH)$	-	det.	0,9	-	-
součinitel typu cementu	$r_{c,6}$	-	det.	0,8	-	-
pevnost v tlaku	f_c	-	norm.	dle receptury		0,12
faktor nejistoty modelu	ψ	-	det.	1,0	-	-

Carb7

Model Carb7 zohledňuje typ cementu součinitelem $r_{c,7}$, typ kameniva součinitelem r_a a jako jediný z použitých modelů také vliv plastifikačních nebo provzdušňovacích přísad pomocí součinitele r_s . Poslední proměnnou, která ovlivňuje výslednou hodnotu hloubky karbonatace, je vodní součinitel.

Hodnota $r_{c,7}$ je uvažována ve výpočtu hodnotou 0,7, která odpovídá portlandskému cementu s rychlým nárůstem pevnosti.

Součinitel r_a byl zvolen roven 1, ačkoliv tato hodnota odpovídá říčnímu písku/šterku. Pro lomový šterk není hodnota uvedena.

Součinitel r_s je roven 1 pro betony bez přísad, při použití plastifikační přísady je roven 0,4 a pro provzdušňovací přísady 0,6. Betony P2/2 a P2/3 však obsahují jak plastifikační, tak provzdušňovací přísadu. Pro takový případ není součinitel definován, a tak byla hodnota uvažována také 0,4.

Tab. 35 Hodnoty součinitelů v modelu Carb7

beton	R	0/1	0/2	0/3	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
$r_{c,7}$	0,6										
r_a	1,0										
r_s	1	1	1	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Tab. 36 Vstupní hodnoty do modelu Carb7

veličina		MJ	rozdělení	m_x	s_x	V_x
čas	t	roky	det.	11	-	-
obsah cementu	c	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
obsah vody	w	kg/m ³	norm.	dle receptury		0,03
součinitel typu cementu	$r_{c,7}$	-	det.	0,6	-	-
součinitel typu kameniva	r_a	-	det.	1,0	-	-
součinitel typu přísady	$r_{c,s}$	-	det.	dle receptury		-
faktor nejistoty modelu	ψ	-	det.	1,0	-	-

Carb8

Model Carb8a je nejkomplexnější z použitých modelů a zahrnuje nejenom vliv ošetřování betonu, množství srážek, ale hlavně hloubku karbonatace na zkušebních vzorcích podrobených zrychlené karbonataci. Ze zjištěné hloubky karbonatace se vypočte inverzní efektivní odolnost vůči karbonataci $R_{ACC,0}^{-1}$ a pomocí součinitelů se přepočte na inverzní efektivní odolnost vůči přirozené karbonataci $R_{NAC,0}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že v rámci diplomové práce nebyly k dispozici betonové vzorky staré 28 dnů, které by mohly být vystaveny zkoušce zrychlené karbonataci, byly použity orientační hodnoty dle Tab. 37. Použité hodnoty pro jednotlivé betony jsou uvedeny v Tab. 38.

Tab. 37 Hodnoty $R_{ACC,0}^{-1}$ podle použitého cementu a vodního součinitele [17]

$R_{ACC,0}^{-1}$ [10^{-11} (m ² /s)/(kg CO ₂ /m ³)]	ω_{eqv} ¹					
	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
<i>cement type</i>						
CEM I 42,5 R	n.d. ²	3.1	5.2	6.8	9.8	13.4
CEM I 42,5 R + FA ($k = 0.5$)	n.d. ²	0.3	1.9	2.4	6.5	8.3
CEM I 42,5 R + SFA ($k = 2.0$)	3.5	5.5	n.d. ²	n.d. ²	16.5	n.d. ²
CEM III/B 42,5 NW HS NA	n.d. ²	8.3	16.9	26.6	44.3	80.0

¹ equivalent water/cement ratio, considering FA or SFA with the respective k -value.

² n.d. - inverse effective carbonation resistance $R_{ACC,0}^{-1}$ has not been determined for these concrete mixes

Tab. 38 Použité hodnoty funkce $R_{ACC,0}^{-1}$ [17]

	R	0/1	0/2	0/3	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
v/c	0,76	0,63	0,54	0,48	0,55	0,47	0,41	0,46	0,40	0,43	0,38
$R_{ACC,0}^{-1} - m_x$	-	-	9,20	6,16	9,80	5,84	3,52	5,52	3,10	4,36	-
$R_{ACC,0}^{-1} - s_x$	-	-	3,90	2,85	4,09	2,73	1,84	2,62	1,67	2,18	-

Tab. 39 Vstupní hodnoty do modelu Carb8a

veličina		MJ	rozdělení	m_x	s_x	V_x
čas	t	roky	det.	11	-	-
koncentrace CO ₂	C_{CO2}	mg/m ³	norm.	731,9	87,82	0,12
relativní vlhkost	RH	%	rovnom.	60,0	2,886	0,05
Regresní exponent inv. funkce	b_c	-	norm.	0	-	-
doba ošetřování	t_c	-	det.	7	-	-
inv. funkce odolnosti karb.	$R_{(ACC,0)^{-1}}$	(m ² /s)/(kg/m ³)	norm.	dle receptury		0,48
regresní parametr funkce $R_{(ACC,0)^{-1}}$	k_t	-	det.	1	0,28	0,28
vliv chyby funkce $R_{(ACC,0)^{-1}}$	ε_t	-	det.	0	-	-
počet dní deště	t_w	dny	det.	0	-	-
pravděp. prudkého deště	p_{SR}	dny	det.	0	-	-
exp. regrese funkce počasí	b_w	-	norm.	0,446	0,163	0,365
faktor nejistoty modelu	ψ	-	det.	1	-	-

Výsledky hloubky karbonatace z modelů

Beton R	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	14,1	4,7	0,3	-	-
Carb1a	13,7	1,50	0,11	-0,4	-3
Carb1b	15,1	1,26	0,08	1,0	7
Carb2a	12,9	1,37	0,11	-1,2	-8
Carb2b	14,2	1,14	0,08	0,1	1
Carb3	14,6	1,56	0,11	0,5	3
Carb6	20,2	2,54	0,13	6,1	43
Carb7	6,7	0,54	0,08	-7,4	-52
Carb8a	-	-	-	-	-

Beton 0/1	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	11,4	3,10	0,27	-	-
Carb1a	10,2	1,19	0,12	-1,2	-10
Carb1b	11,3	1,04	0,09	-0,1	-1
Carb2a	10,3	1,16	0,11	-1,1	-10
Carb2b	11,3	0,99	0,09	-0,1	-1
Carb3	11,6	1,31	0,11	0,2	2
Carb6	13,1	1,65	0,13	1,7	15
Carb7	4,8	0,82	0,17	-6,6	-58
Carb8a	-	-	-	-	-

Beton 0/2	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	7,1	2,7	0,4	-	-
Carb1a	7,6	0,95	0,12	0,5	7
Carb1b	8,4	0,87	0,10	1,3	18
Carb2a	7,1	1,21	0,17	0,0	0
Carb2b	7,9	1,22	0,15	0,8	11
Carb3	8,0	1,37	0,17	0,9	12
Carb6	9,9	1,75	0,18	2,8	40
Carb7	5,5	0,77	0,14	-1,6	-23
Carb8a	8,1	2,26	0,28	1,0	14

Beton 0/3	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	5,3	4,5	0,8	-	-
Carb1a	5,6	0,78	0,14	0,3	5
Carb1b	6,1	0,74	0,12	0,8	16
Carb2a	4,2	0,97	0,23	-1,1	-21
Carb2b	4,6	1,01	0,22	-0,7	-13
Carb3	4,6	1,10	0,24	-0,7	-13
Carb6	7,8	0,98	0,13	2,5	48
Carb7	3,2	0,69	0,22	-2,1	-40
Carb8a	5,2	1,77	0,34	-0,1	-1

Beton 1/1	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	7,4	2,8	0,4	-	-
Carb1a	8,3	1,0	0,1	0,9	12
Carb1b	9,2	0,9	0,1	1,8	24
Carb2a	7,4	1,2	0,2	0,0	1
Carb2b	8,2	1,2	0,1	0,8	11
Carb3	8,3	1,4	0,2	0,9	12
Carb6	10,2	1,3	0,1	2,8	38
Carb7	2,1	0,9	0,4	-5,3	-71
Carb8a	8,3	2,3	0,3	0,9	12

Beton 1/2	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	5,3	2,00	0,38	-	-
Carb1a	5,8	0,82	0,14	0,5	9
Carb1b	6,4	0,78	0,12	1,1	20
Carb2a	4,0	0,96	0,24	-1,3	-24
Carb2b	4,4	1,01	0,23	-0,9	-17
Carb3	4,4	1,08	0,25	-0,9	-17
Carb6	8,6	1,08	0,13	3,3	62
Carb7	1,2	0,27	0,22	-4,1	-77
Carb8a	6,6	1,88	0,29	1,3	24

Beton 1/3	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	4,6	1,90	0,41	-	-
Carb1a	3,8	0,66	0,17	-0,8	-17
Carb1b	4,2	0,67	0,16	-0,4	-8
Carb2a	1,4	0,78	0,54	-3,2	-69
Carb2b	1,6	0,85	0,54	-3,0	-66
Carb3	1,5	0,89	0,59	-3,1	-67
Carb6	7,7	0,97	0,13	3,1	68
Carb7	0,4	0,24	0,58	-4,2	-91
Carb8a	5,3	1,55	0,29	0,7	15

Beton 2/2	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	5,4	2,30	0,43	-	-
Carb1a	5,4	0,79	0,15	0,0	0
Carb1b	5,9	0,76	0,13	0,5	10
Carb2a	3,4	0,91	0,27	-2,0	-37
Carb2b	3,7	0,96	0,26	-1,7	-31
Carb3	3,7	1,03	0,28	-1,7	-31
Carb6	8,4	1,05	0,13	3,0	55
Carb7	1,0	0,27	0,26	-4,4	-81
Carb8a	6,4	1,85	0,29	1,0	18

Beton 2/3	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	1,9	1,2	0,63	-	-
Carb1a	3,5	0,61	0,18	1,6	82
Carb1b	3,8	0,62	0,16	1,9	101
Carb2a	0,9	0,75	0,84	-1,0	-53
Carb2b	1,0	0,82	0,84	-0,9	-48
Carb3	0,9	0,85	0,97	-1,0	-54
Carb6	7,6	0,96	0,13	5,7	302
Carb7	0,2	0,23	0,96	-1,7	-87
Carb8a	5,0	1,45	0,29	1,6	82

Beton P2/2	m _x [mm]	s _x [mm]	V _x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	3,8	2,22	0,59	-	-
Carb1a	4,6	0,73	0,16	0,8	20
Carb1b	5,0	0,72	0,14	1,2	33
Carb2a	2,1	0,82	0,39	-1,7	-44
Carb2b	2,4	0,89	0,38	-1,4	-38
Carb3	2,3	0,93	0,41	-1,5	-39
Carb6	8,1	1,02	0,13	4,3	114
Carb7	0,6	0,25	0,39	-3,2	-83
Carb8a	5,8	1,68	0,29	2,0	52

Beton P2/3	m_x [mm]	s_x [mm]	V_x [-]	chyba [mm]	chyba [%]
Reálná	3,0	1,44	0,47	-	-
Carb1a	2,7	0,58	0,22	-0,4	-12
Carb1b	3,0	0,60	0,20	-0,1	-3
Carb2a	-	-	-	-	-
Carb2b	-	-	-	-	-
Carb3	-	-	-	-	-
Carb6	6,9	0,86	0,13	3,8	125
Carb7	-	-	-	-	-
Carb8a	-	-	-	-	-

U betonu P2/3 ($w/c = 0,38$) chybějí výsledky modelů *Carb2a*, *Carb2b*, *Carb3* a *Carb7*. Tyto modely neposkytují relevantní výsledky pro betony s tak nízkým vodním součinitelem.

Nejméně přesné hodnoty dává model *Carb7*. U všech druhů betonu vyšly hloubky karbonatace u tohoto modelu výrazně menší než reálné hodnoty, v některých případech se liší až o zhruba 90 %. Model příliš snižuje výsledky při použití cementu s rychlým nárůstem pevnosti a přísad. Na základě těchto výsledků lze říci, že se model nehodí ani pro přibližné zjištění hloubky karbonatace, a v případě nedostatku informací o betonu je lepší použít jiný model.

Modely *Carb1a* a *Carb1b* poskytují relativně uspokojivé hodnoty. Výsledné hodnoty se ve většině případů liší zhruba o 1 mm nebo méně, s výjimkou betonu 1/1, u kterého je chyba 1,8 mm u modelu *Carb1b*, a beton 2/3, u kterého je chyba 1,9 mm také u varianty *Carb1b*.

Přesnost modelů *Carb2a* a *Carb2b* je u většiny betonů zhruba srovnatelná, největší chyby jsou u betonů 1/3 a P2/3, u kterých se výsledky liší o zhruba 3 mm.

Varianty modelů *Carb1* a *Carb2* se liší použitou funkcí závislou na RH, viz Obr. 1. Z průběhu těchto funkcí je patrné, že se výsledné hodnoty hloubky karbonatace obou variant modelů nebudou zásadně lišit, což výsledky potvrzují. Nelze říci, že by jedna z funkcí $f(RH)$ byla vhodnější při $RH = 60\%$. Na základě výsledků lze říci, že modely *Carb1a* a *Carb1b* a *Carb2a* a *Carb2b* jsou vhodné pro přibližné zjištění hloubky karbonatace.

Model *Carb3* poskytuje hodnoty podobné jako *Carb2*. Jeho chybovost se pohybuje zhruba od 0 do 3 mm.

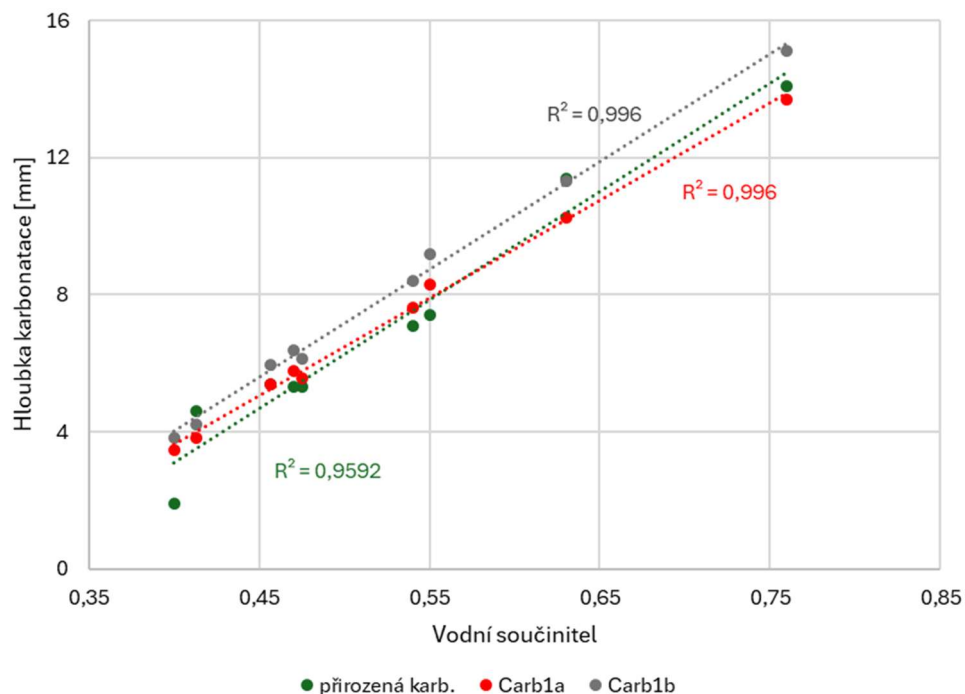
Výsledné hodnoty z modelu *Carb8a* se liší o 0–2 mm, což je dáno tím, že byly použity orientační hodnoty funkce $R_{ACC,0}^{-1}$.

Na následujících grafech je znázorněna závislost hloubky karbonatace na vodním součiniteli. Do grafů nebyly zahrnuty provzdušněné betony P2/2 a P2/3. Z Obr. 45 a Obr. 46 je patrné, že se výsledné hodnoty z obou variant modelů zásadně neliší. U modelu *Carb1* se reálným hodnotám spíše přibližovala varianta *Carb1a*, u modelu *Carb2* zase spíše varianta *Carb2b*.

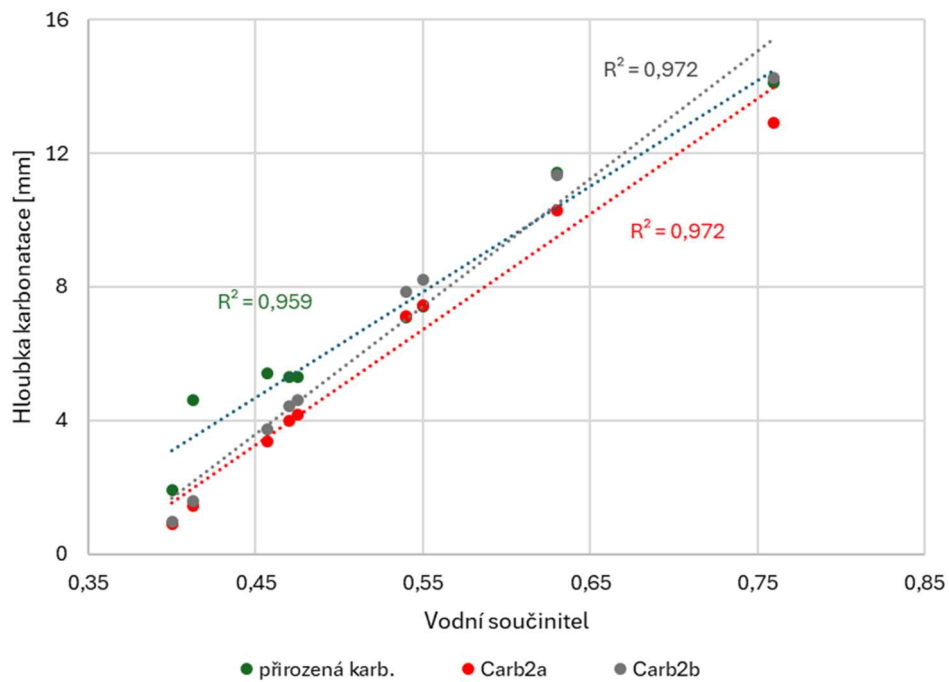
Na Obr. 47 je zobrazen model *Carb3*, o kterém lze říci, že u betonů s nižším vodním součinitelem hloubku karbonatace spíše podhodnocuje.

Z modelu *Carb6* u všech betonů vyšla hodnota hloubky karbonatace vyšší než naměřené skutečné hodnoty, zatímco u modelu *Carb7* je to přesně naopak. Z tohoto modelu vyšly hloubky karbonatace výrazně nižší než skutečné.

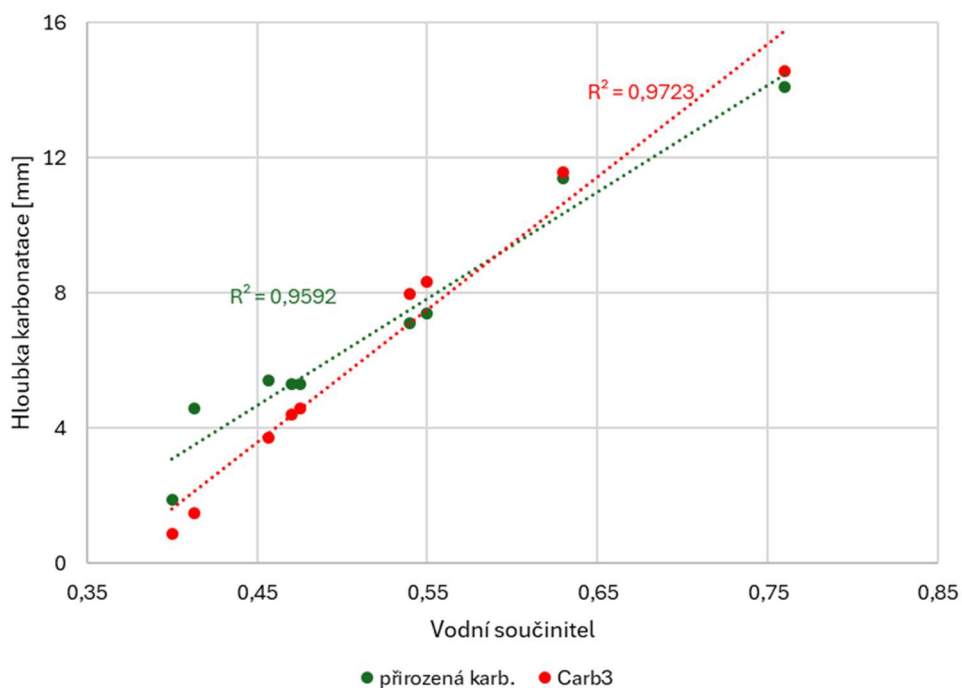
Model *Carb8a* ve většině případů poskytoval vyšší hodnoty než zjištěné na zkušebních tělesech, což je pravděpodobně dáno tím, že byly použity přibližné hodnoty $R_{ACC,0}^{-1}$.



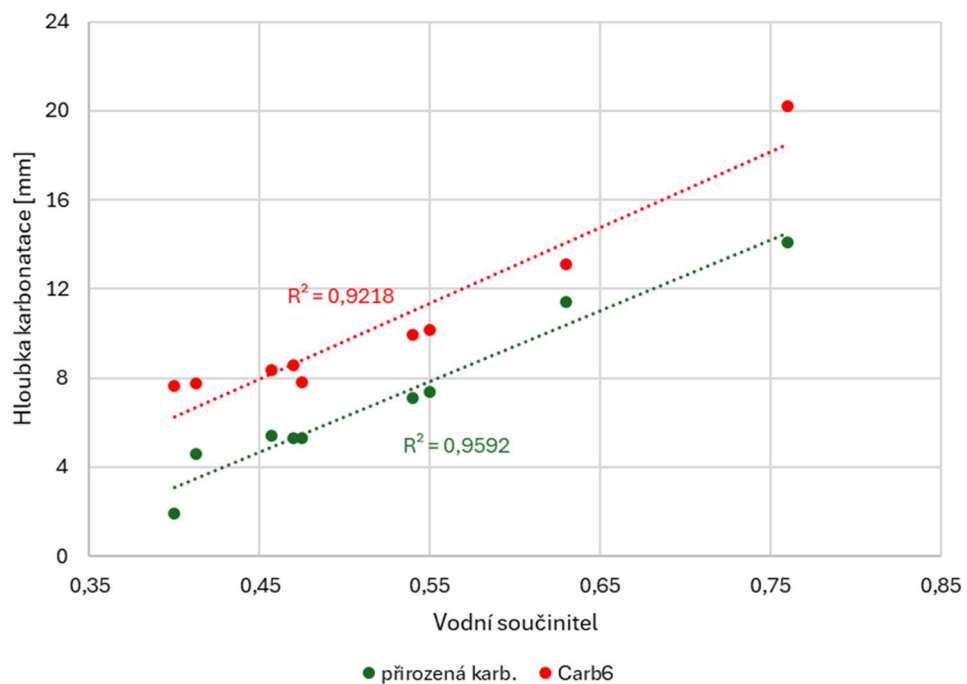
Obr. 45 Porovnání hloubky karbonatace modelu *Carb1a* a *Carb1b* v závislosti na vodním součiniteli



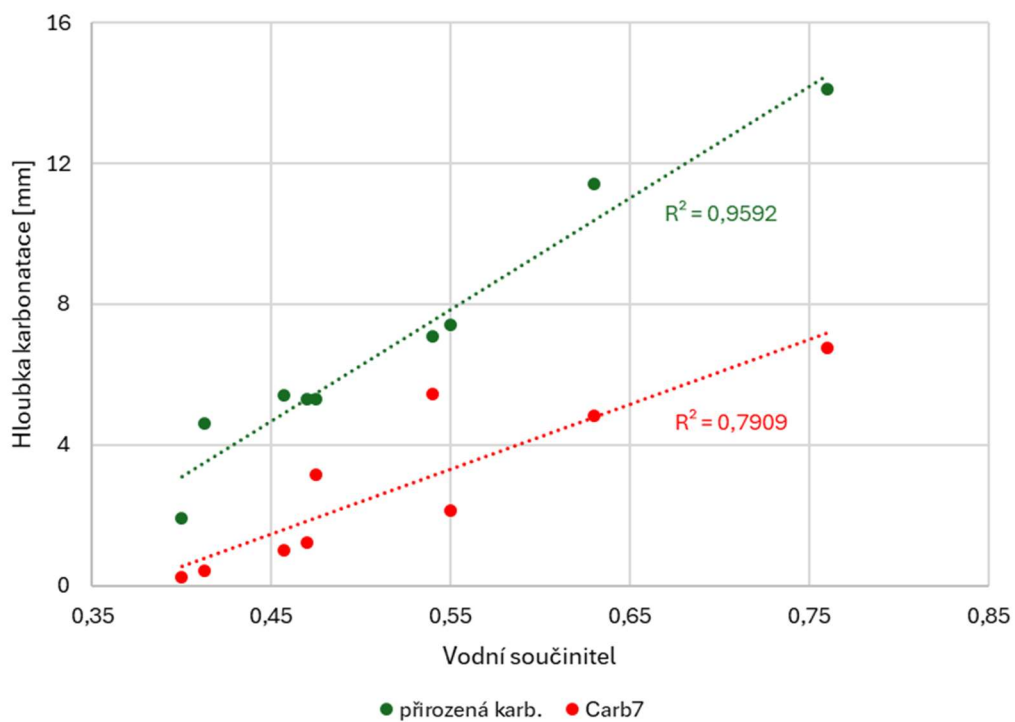
Obr. 46 Porovnání hloubky karbonátce modelu Carb2a a Carb2b v závislosti na vodním součiniteli



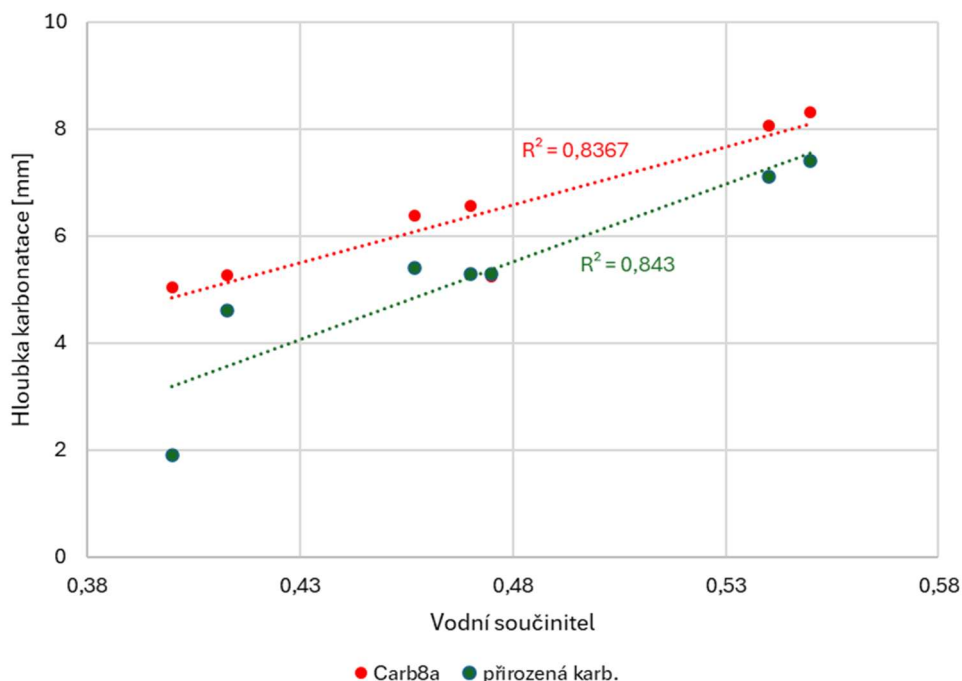
Obr. 47 Porovnání hloubky karbonátce modelu Carb3 v závislosti na vodním součiniteli



Obr. 48 Porovnání hloubky karbonátce modelu Carb6 v závislosti na vodním součiniteli



Obr. 49 Porovnání hloubky karbonátce modelu Carb7 v závislosti na vodním součiniteli



Obr. 50 Porovnání hloubky karbonatace modelu Carb7 v závislosti na vodním součiniteli

Výpočet hodnot $R_{ACC,0}^{-1}$

Ze zjištěné přirozené hloubky karbonatace byly vypočítány hodnoty funkce $R_{ACC,0}^{-1}$ pro jednotlivé betony dle vztahu:

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_c}{\sqrt{2 \cdot C_s \cdot t}} \right)^2$$

kde x_c je hloubka karbonatace [mm], C_s je koncentrace CO_2 [kg/m³], t je čas ACC testu, zde uvažována doba skladování vzorků [s].

Spočtené hodnoty $R_{ACC,0}^{-1}$ (Tab. 40) by se daly využít při návrhu konstrukcí ze stejných betonů pro posouzení trvanlivosti.

Tab. 40 Výsledné hodnoty R_{ACC}^{-1}

$R_{ACC}^{-1} [10^{-11}(\text{m}^2/\text{s})/(\text{kg}/\text{m}^3)]$					
beton	m_x	s_x	beton	m_x	s_x
R	38,96	12,01	1/3	4,19	2,11
0/1	25,78	8,70	2/2	5,69	2,68
0/2	10,04	4,17	2/3	0,72	0,54
0/3	5,43	2,58	P2/2	3,79	1,95
1/1	10,65	4,37	P2/3	1,84	1,11
1/2	5,47	2,60			

2. EXPERIMENT Č. 2 – MRAZUVZDORNOST BETONU

2.1. Cíl a popis experimentu

Cílem experimentu bylo ověřit vliv počáteční vlhkosti betonu na jeho mrazuvzdornost. Betonová zkušební tělesa s různou počáteční vlhkostí byla podrobena zkoušce mrazuvzdornosti dle normy ČSN 73 1322 [41].

Jedním z metodických omezení zkoušek mrazuvzdornosti dle současně platných norem je skutečnost, že zkušební tělesa jsou v průběhu zkoušky rozmrazována ve vodě. Během rozmrazování dochází k nasáknutí těles vodou, v důsledku čehož se postupně stírá rozdíl v jejich počáteční vlhkosti. Tato skutečnost významně omezuje možnost jednoznačného posouzení vlivu počátečního nasycení betonu na jeho mrazuvzdornost.

Z tohoto důvodu by se jako vhodnější jevílo rozmrazovat tělesa na vzduchu. Takový postup je však spojen s dalšími komplikacemi. Při rozmrazování na vzduchu dochází k úniku vlhkosti z betonu vlivem odpařování, a proto by pro zachování konstantní vlhkosti těles bylo nutné např. jejich zabalení do nepropustné fólie.

Ačkoliv norma [41] pro hodnocení degradace betonu vlivem mrazu uvádí primárně stanovení pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku, pro sledování degradace betonu v průběhu cyklování jsou vhodnější nedestruktivní metody – ultrazvuková a rezonanční. V případě zabalených těles by však bylo provedení těchto zkoušek obtížné, u stanovení doby průchodu UZ až téměř nemožné.

Dalším omezením by byla délka jednotlivých cyklů. Rozmrazování na vzduchu probíhá výrazně pomaleji než rozmrazování ve vodě, což by vedlo k podstatnému prodloužení celkové doby zkoušky.

Z výše uvedených důvodů byla zkušební tělesa rozmrazována ve vodě v souladu s postupem popsáním v normě [41]. Alternativní přístup založený na rozmrazování těles na vzduchu přesahuje rámec této práce a může být předmětem samostatného navazujícího výzkumu.

Zkoušce cyklického zmrazování a rozmrazování byla vystavena zkušební tělesa ze tří druhů betonu, které se lišily složením. Z každého druhu betonu bylo k dispozici 21 těles, která byla rozdělena do 7 sad. Jednotlivé sady se lišily počátečním stupněm nasycení.

Zkouška se skládala ze 100 cyklů, jeden cyklus trval 6 hodin, z toho 4 hodiny probíhalo zmrazování a 2 hodiny rozmrazování. Během zkoušky byly sledovány změny dynamického modulu pružnosti betonu pomocí ultrazvukové a rezonanční metody. Po každých 25 cyklech se vzorky zvážily, změřila se doba průchodu ultrazvuku a určily se vlastní frekvence. Na závěr byly porovnány mechanické vlastnosti jednotlivých typů betonu, a především rozdíly mezi vzorky s různým stupněm nasycení vodou.

2.2. Zkušební tělesa

Zkoušce mrazuvzdornosti byly vystaveny vývrty ze tří druhů betonů, které jsou označeny písmeny A, B a C. Všechny betony jsou mrazuvzdorné, ale liší se pevnostní třídou, stupněm vlivu prostředí, použitým cementem a provzdušněním:

Beton A – C55/67 XF1, CEM I 42,5 R

Beton B – C30/37 XF4, CEM II/A-S 42,5R, provzdušněný

Beton C – C80/95 XF4, CEM I 42,5 R.

Betony A a C byly vyrobeny pro experiment v rámci disertační práce zabývající se ocelovými sloupy vyplněnými betonem [42]. Beton B byl vyroben pro experiment v rámci projektu GAČR 22-19812S "Vliv plynného a dopravou vyvolaného znečištění na trvanlivost železobetonových konstrukcí".

Ze všech betonových směsí byly vyrobeny betonové bloky odlité do plastových nádob. Data jejich výroby jsou uvedeny v Tab. 41. Tyto bloky zrály ve venkovních podmínkách do října 2024, kdy z nich byly vyvrtány vývrty průměru 75 mm. Vývrty byly následně skladovány v laboratorních podmínkách a v červenci 2025 byly nařezány na přibližně stejné délky. Poté byly opět ponechány v laboratorních podmínkách po dobu zhruba tří týdnů, a poté byl zahájen experiment.

Zkušební tělesa každého betonu byla náhodně rozdělena do sedmi sad po třech tělesech. U všech těles byly změřeny doby průchodu UZ a zjištěny vlastní frekvence.

Ještě ten den bylo ověřeno, že se jednotlivé sady od sebe významně neliší. K ověření byl použit test ANOVA se vstupními hodnotami dynamických modulů pružnosti stanovených z podélných frekvencí. Na hladině významnosti 0,05 nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly mezi sadami. Výsledné p-hodnoty testu ANOVA:

Beton A – 0,762

Beton B – 0,485

Beton C – 0,552.

Tab. 41 Datum výroby betonových bloků, ze kterých byly odvrtány vývrty

	datum výroby
beton A	září 2021
beton B	říjen 2022
beton C	listopad 2021



Obr. 51 Vrtání vývrtů z betonových bloků

2.2.1. Příprava těles

Po ověření, že se jednotlivé sady od sebe statisticky významně neliší, se začala upravovat vlhkost jednotlivých sad. Stejně sady všech betonů byly ukládány do sušárny, resp. do vodní lázně vždy současně. Cílem bylo dosáhnout těchto teoretických stupňů nasycení:

0 – vysušená tělesa

0 (N) – nejdříve nasycená, potom vysušená

20 – nasycení z 20 %

40 – nasycení z 40 %

60 – nasycení z 60 %

80 – nasycení z 80 %

100 – plně nasycená.

Tělesa sad 0 byla po dobu 30 dnů uložena v sušárně při 50 °C a následně dosušena při teplotě 105 °C do dosažení úplného vysušení. Ostatní sady byly uloženy ve vodní lázni do dosažení plného nasycení. U těles byla průběžně sledována hmotnost a po jejím ustálení byla vytažena tělesa sad 0 (N), která poté byla vysušena při teplotě 105 °C po dobu jednoho týdne. Tím byla stanovena nasákavost jednotlivých betonů. Do začátku zkoušky mrazuvzdornosti byla sada 0 (N) ponechaná v sušárně při 50 °C.

Sady 20, 40, 60 a 80 byly po plném nasycení a zjištění nasákavosti přemístěny z vodní lázně do sušárny při teplotě 50 °C, kde byly uloženy po různě dlouhou dobu pro dosažení

předpokládaného stupně nasycení. Jednotlivé sady byly uloženy v sušárně při teplotě 50 °C po dobu:

Sada 20 – 9 dní

Sada 40 – 5 dní

Sada 60 – 3 dny

Sada 80 – 2 dny.

Vlhkosti sad jsou uvedené v Tab. 43.

Po skončení zkoušky mrazuvzdornosti a provedení nedestruktivních zkoušek byla tělesa vysušena v sušárně při 105 °C. U sad 0 a 0(N), které byly před cyklováním vysušeny také při 105 °C lze srovnat hmotnosti vysušených těles před a po zkoušce mrazuvzdornosti. Dalo by se předpokládat, že výsledné hmotnosti budou stejné či velmi podobné. Hodnoty se však liší u betonu B o zhruba 0,3 % (sada 0) a 0,2 % (sada 0(N)), u betonu C zhruba o 0,8 % (sada 0) a 0,5 % (sada 0 (N)), viz Tab. 42. Vzorky betonu A prvních dvou sad se po 100 cyklech rozpadly, a tak není možné jejich hmotnosti porovnat.

Jedním z možných vysvětlení pozorovaného poklesu hmotnosti je uvolnění malého množství vody obsažené v gelových pórech C-S-H gelu při opětovném vysušení po zkoušce mrazuvzdornosti. Tato voda se při vysušování pravděpodobně uvolnila vlivem vzniklého porušení na mikro až nano úrovni během zkoušky mrazuvzdornosti. Tato porušení jsou tak malá, že se neprojeví poklesem mechanických vlastností betonu, jejich výskyt však lze zaznamenat např. pomocí měření akustických emisí, jak dokazuje článek [43].

U sady 0(N) je pokles hmotnosti menší, což může souviset s tím, že před prvním vysušováním při 105 °C byla zkušební tělesa plně nasycena na rozdíl od sady 0. V plně nasyceném betonu nebyl volný prostor pro rozpínání vodní páry vzniklé vysušováním, a tak mohlo dojít k výraznějšímu porušení vnitřní struktury. Vlivem porušení mohlo dojít k uvolnění většího množství vody z gelových pórů než u částečně nasyceného betonu. Při opětovném vysušení při 105 °C po zkoušce mrazuvzdornosti se tak u sady 0(N) uvolnilo menší množství další vody z gelových pórů, protože se již uvolnila při prvním vysušení. Jedná se však pouze o hypotézu, kterou by bylo nutné ověřit samostatným experimentem.

U vysokopevnostního betonu C byl zaznamenán vyšší rozdíl hmotnosti než u obyčejného betonu B, což může být způsobeno hutnějším cementovým tmelem. Vlivem hutnější struktury tak nemuselo dojít při prvotním vysušení k uvolnění veškeré vody a ta se uvolnila až po vzniku mikrotrhlin po zkoušce mrazuvzdornosti.

Jedná se však pouze o hypotézu, kterou by bylo nutné ověřit pomocí doplňkových experimentálních metod zaměřených na změny mikrostruktury cementového tmelu a vazby vody, například termogravimetrickou analýzou (TGA), nukleární magnetickou rezonancí (NMR) nebo mikroskopickými metodami [43].

Tento pokles hmotnosti byl odečten ze zjištěných vlhkostí po zkoušce mrazuvzdornosti. Byly odečteny hodnoty zjištěné na sadě 0(N), protože tato sada byla před vysušením

nasyčena. Stejně tak všechny sady byly po skončení zkoušky pravděpodobně vysoce nasyčeny kvůli rozmrazování ve vodě.

Vzhledem k tomu, že se sada 0(N) betonu A rozpadla před koncem zkoušky, byla změna hmotnosti odhadnuta a uvažována hodnotou 0,3 %.

Tab. 42 Porovnání hmotností vysušených těles před a po zkoušce mrazuvzdornosti

beton	sada	těleso	m_D 17.10.	m_D 4.12.	změna [%]
B	0	B01	1301,03	1296,96	0,3
		B02	1294,99	1290,41	0,4
		B03	1250,23	1246,08	0,3
	0 (N)	B04	1265,44	1263,03	0,2
		B05	1296,92	1294,55	0,2
		B06	1274,45	1272,16	0,2
C	0	C01	2017,47	2001,98	0,8
		C02	2044,65	2025,74	0,9
		C03	2031,58	2015,40	0,8
	0 (N)	C04	2022,31	2012,81	0,5
		C05	2036,10	2026,69	0,5
		C06	2031,33	2022,15	0,5

Tab. 43 Vlhkosti jednotlivých sad před zkouškou mrazuvzdornosti

beton A			beton B			beton C		
sada	vlhkost [%]	skut. stupeň nasycení [%]	sada	vlhkost [%]	skut. stupeň nasycení [%]	sada	vlhkost [%]	skut. stupeň nasycení [%]
20	1,6	33	20	1,5	28	20	2,3	48
40	2,3	49	40	2,3	44	40	2,8	59
60	3,4	71	60	3,2	61	60	3,3	70
80	4,4	93	80	5,0	94	80	3,9	84
100	4,8	100	100	5,3	100	100	4,7	100

2.2.2. Laboratorní měření a zkoušení těles

Zkouška mrazuvzdornosti vzorků probíhala v programovatelném automatickém zařízení KD20 od firmy EKOFROST s.r.o. Vzorky všech sad a druhů betonu se vešly do zkušebního zařízení najednou a byly náhodně rozmístěny se střídáním různých druhů betonu a stupňů nasycení.

Po každých 25 cyklech byla tělesa vyjmuta z mrazicího zařízení, osušena, zvážena a nedestruktivními metodami byly zjištěny hodnoty dynamických modulů pružnosti betonu. Pomocí ultrazvukové impulzové metody dle normy [44] byly na každém tělese změřeny 3 hodnoty doby průchodu impulzu. Rezonanční metodou dle normy [27] byly

zjištěny vlastní frekvence podélného a příčného kmitání. Pro zjištění míry degradace byly z naměřených hodnot spočítány relativní moduly pružnosti (dále RDM):

RDM_{UPTT} – stanovený ultrazvukovou metodou [%]

RDM_{FL} – stanovený rezonanční metodou [%].



Obr. 52 Zjišťování vlastních frekvencí rezonanční metodou

Vlastnosti betonů

Betony A a C byly použity v dizertační práci [42], v rámci které byly zjišťovány pevnosti betonu v tlaku a statický modul pružnosti ve stáří vzorků 28 dnů. Objemová hmotnost betonů byla stanovena ve stáří zhruba 60 dní.

Tab. 44 Vlastnosti betonů ve stáří 28 dní [42]

BETON A – C55/67			m_x	s_x	V_x
pevnost v tlaku	f_c	[MPa]	72,8	1,33	0,0183
statický modul pružnosti	E_c	[GPa]	38,9	0,100	0,0026
obj. hm. ztvrdlého betonu	D	[kg/m ³]	2460	19,5	0,0079

BETON B – C30/37			m_x	s_x	V_x
pevnost v tlaku	f_c	[MPa]	56,9	0,35	0,0062
statický modul pružnosti	E_c	[GPa]	30,8	1,110	0,0360
obj. hm. ztvrdlého betonu	D	[kg/m ³]	2306	5,2	0,0023

BETON C – C80/95			m_x	s_x	V_x
pevnost v tlaku	f_c	[MPa]	108,2	2,67	0,0247
statický modul pružnosti	E_c	[GPa]	34,2	0,961	0,0281
obj. hm. ztvrdlého betonu	D	[kg/m ³]	2370	14,3	0,0060

2.3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Moduly pružnosti E_{crL} , E_{crf} a E_{cu} před zkouškou mrazuvzdornosti

Tab. 45 Dynamické moduly pružnosti stanovené na tělesech před zahájením úpravy jejich vlhkosti

	BETON A			BETON B			BETON C		
	m_x	s_x	V_x	m_x	s_x	V_x	m_x	s_x	V_x
E_{crL} [GPa]	43,82	1,04	0,024	35,21	0,58	0,016	40,59	1,39	0,034
E_{crf} [GPa]	45,30	1,02	0,022	37,52	0,55	0,015	41,77	0,92	0,022
E_{cu} [GPa]	51,23	1,45	0,028	40,33	0,58	0,014	44,15	0,56	0,013

Relativní moduly pružnosti v průběhu zkoušky mrazuvzdornosti

Norma ČSN 73 1322 [41] udává, že je beton mrazuvzdorný do takého počtu cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti neklesne pod 75 %. Tato hodnota však platí v případě, kdy je ke sledování porušení zkušebních těles využita zkouška pevnosti v tahu ohybem. Při použití nedestruktivních metod tato norma nestanovuje přijatelný pokles RDM. V článku [45] je uvedeno, že ultrazvuková a rezonanční metoda je méně citlivá na vznikající porušení vnitřní struktury, a autoři doporučují použít hodnoty 85–90 %. Ovšem článek [46] porovnává výsledky zkoušky mrazuvzdornosti na tělesech vyrobených odlitím do formy a na vývrtech z konstrukce. Z výsledků v tomto článku je patrné, že zejména nemrazuvzdorné betony vykazují vyšší porušení vlivem zmrazování a rozmrazování v případě použití vývrťů. Pro vystihnutí chování betonu v konstrukci tedy dává smysl mez 85–90 % v případě nedestruktivních metod snížit. V rámci diplomové práce byla tedy zjednodušeně použita hodnota 75 % jak pro rezonanční, tak ultrazvukovou metodu.

Tab. 46 RDM_{FL} v průběhu cyklování

RDM_{FL} [%]						
beton	sada	0 cyklů	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů
A	0	100	16,6	2,7	0,7	-
	0 (N)	100	8,7	1,3	-	-
	20	100	19,8	3,2	0,5	-
	40	100	35,8	19,1	12,0	-
	60	100	66,6	45,2	25,9	10,0
	80	100	91,7	73,4	61,0	32,0
	100	100	52,9	43,9	39,3	25,7
B	0	100	108,8	111,1	112,4	101,4
	0 (N)	100	98,3	94,0	82,9	62,5
	20	100	102,6	104,9	102,7	88,8
	40	100	102,6	104,7	106,5	106,1
	60	100	100,8	103,4	105,1	105,4
	80	100	98,8	100,4	100,8	101,6
	100	100	97,0	97,4	98,1	98,0
C	0	100	81,1	38,9	17,2	2,5
	0 (N)	100	91,1	21,6	6,1	0,5
	20	100	99,8	95,0	76,7	43,2
	40	100	100,1	101,9	98,0	53,8
	60	100	99,8	100,7	102,1	100,9
	80	100	101,0	99,9	100,8	100,1
	100	100	96,2	96,1	96,1	95,5

Tab. 47 RDM_{UPTT} v průběhu cyklování

RDM_{UPTT} [%]						
beton	sada	0 cyklů	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů
A	0	100	28,5	5,4	-	-
	0 (N)	100	12,3	0,2	-	-
	20	100	28,2	10,6	-	-
	40	100	46,3	30,1	16,7	-
	60	100	73,1	60,7	42,5	19,5
	80	100	93,0	83,6	74,7	54,3
	100	100	66,7	59,4	53,9	45,0
B	0	100	109,1	110,8	108,3	99,4
	0 (N)	100	109,9	108,7	95,3	82,2
	20	100	108,7	111,4	108,5	98,2
	40	100	102,6	104,4	104,6	106,0
	60	100	99,8	101,3	100,7	103,3
	80	100	97,9	100,1	98,4	101,4
	100	100	94,4	95,1	94,9	95,8
C	0	100	91,0	59,1	29,8	7,6
	0 (N)	100	89,7	35,7	14,9	0,4
	20	100	98,6	98,6	82,0	65,6
	40	100	98,0	101,1	97,0	79,7
	60	100	97,3	99,7	99,3	99,1
	80	100	99,3	100,3	99,8	100,4
	100	100	97,5	100,5	99,5	98,3

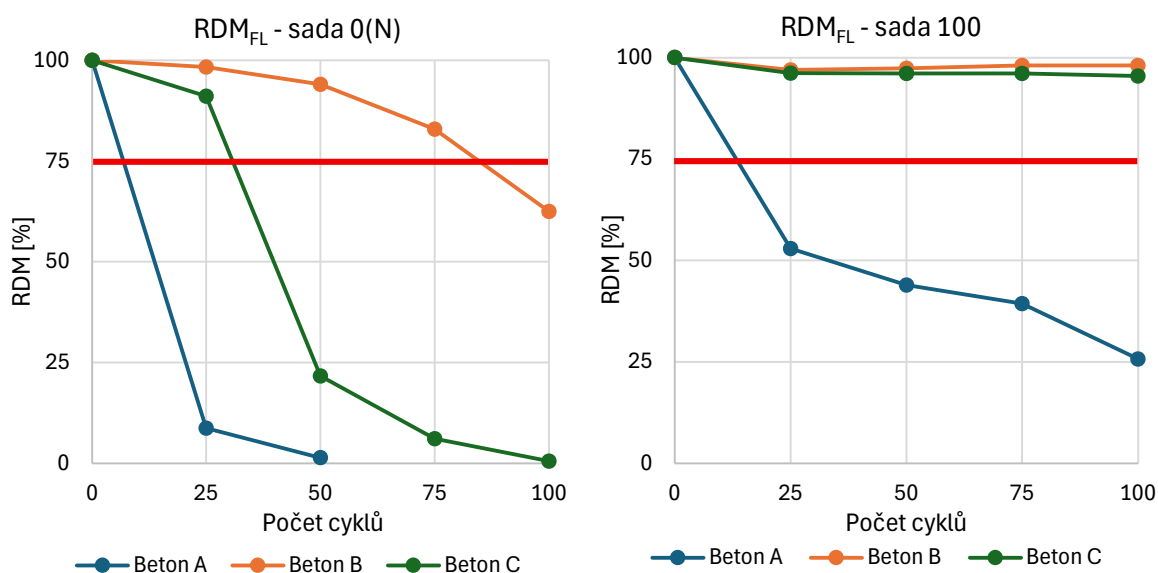
2.4. DISKUZE VÝSLEDKŮ

2.4.1. Porovnání mrazuvzdornosti jednotlivých betonů

Z naměřených dat je na první pohled patrné, že nejlépe odolával mrazu beton B. Jedná se totiž o provzdušněný beton, ve kterém se vlivem provzdušňovací přísady nacházejí mikroskopické uzavřené vzduchové póry. Díky nim se voda při zmrazování má kam rozpínat a v betonu tak nevznikají velké krystalizační tlaky, které by jinak způsobovaly trhliny nebo odlupování betonu. RDM_{FL} u sady 0(N), která vykazovala největší porušení, klesl na 62,5 %. U betonu B vycházejí u vysušených sad 0 a 0 (N) a sad s nízkým stupněm nasycení 20 a 40 hodnoty RDM nad 100 %, protože jejich vlhkost se v průběhu zkoušky zvýšila, a to ovlivnilo hodnoty vlastních frekvencí a dobu průchodu UZ.

U betonu A, se část vzorků rozpadla ještě před koncem zkoušky. Po 75 cyklech se rozpadla dvě tělesa sady 0 a všechna tři tělesa sady 0(N). Po 100 cyklech byla neměřitelná veškerá tělesa ze sad 0, 0(N), 20 a 40. I u zbylých sad je však porušení betonu značné. RDM_{FL} z podélné frekvence klesl po 100 cyklech na pouhých 10, 32 a 26 % u sad 60, 80 a 100.

U betonu C jsou nejméně porušené sady 60, 80 a 100, u nichž došlo k poklesu RDM pouze o jednotky procent. Sady 20 a 40 vykazují po 100 cyklech zhruba poloviční hodnoty RDM_{UPTT} , konkrétně 66 a 80 %. Sady 0 a 0(N) jsou po 100 cyklech zcela porušeny a výsledné relativní moduly pružnosti se blíží nule.



Obr. 53 Porovnání RDM_{FL} jednotlivých betonů z podélné frekvence sad 0(N) a 100

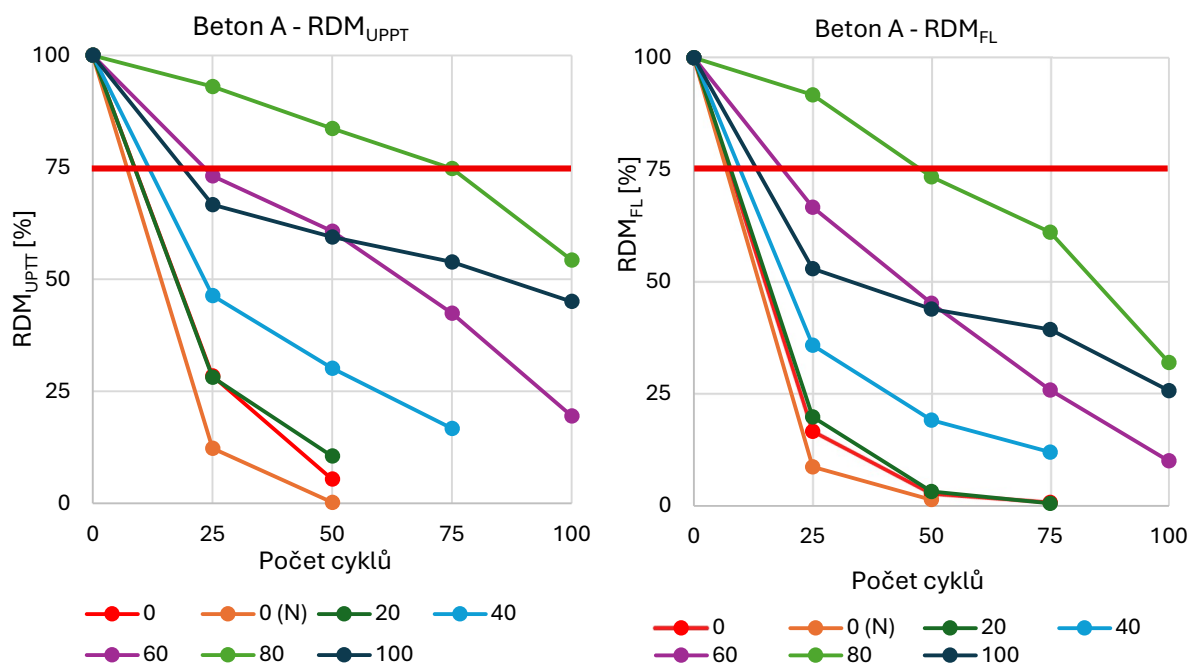
Porovnání těles s různým počátečním stupněm nasycení

Z naměřených dat je vidět, že nejhůře dopadla sada 0 (N) u všech betonů. U této sady vychází moduly pružnosti nižší než u sady 0 (pouze vysušené vzorky), což bude pravděpodobně způsobeno procesem vysušování těles. Vysušení totiž způsobuje vznik

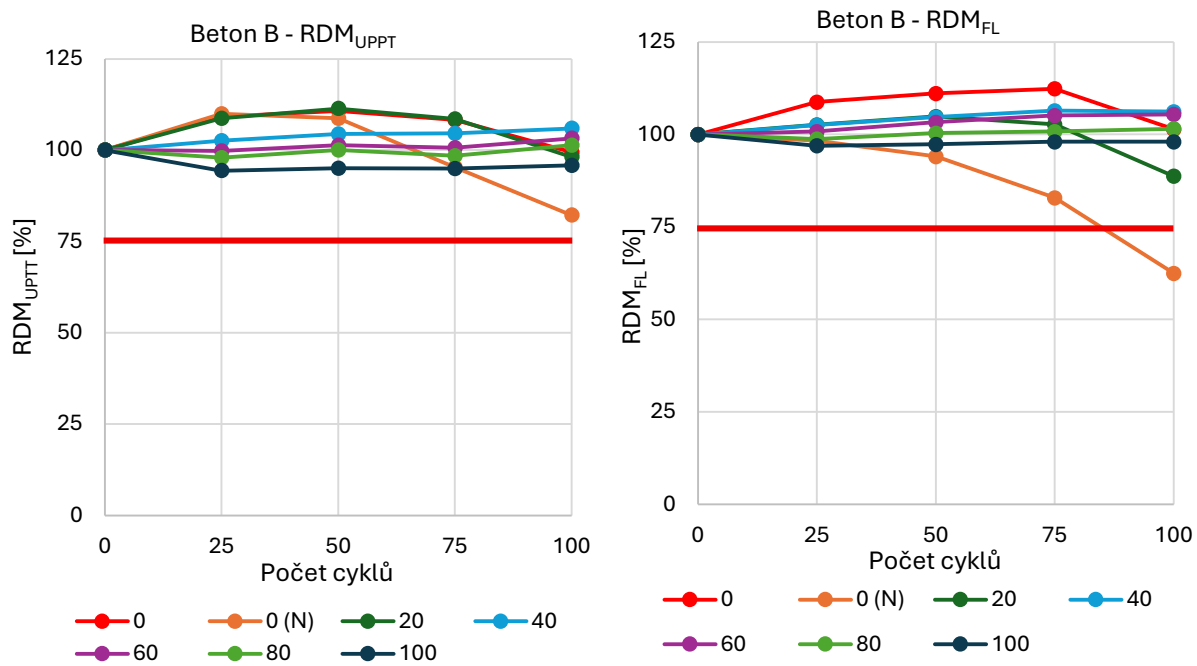
mikrotrhlin v betonu. Čím rychleji (při vyšších teplotách) je těleso vysušováno, tím více trhlin v betonu vznikne. Mikrotrhliny zvyšují propustnost betonu, umožňují rychlejší pronikání vody, a těleso tak pojme vody více a její zmrznutí způsobí další porušení betonu [47].

Nejvyšších hodnot modulů po 100 cyklech dosahovaly sady s vysokým stupněm nasycení, tedy sady 80 a 100. Když pomineme vysušené sady 0 a 0(N), tak u betonu A a C vykazují nejvyšší porušení sady 20 a 40. Nejméně porušené naopak byly sady s vysokým stupněm nasycení, tedy sady 80 a 100. Je možné, že při vysušování při 50 °C také došlo k mírnému porušení vnitřní struktury betonu, a proto sady 20 a 40 vykazují nižší RDM. Jedná se však pouze o domněnku, kterou by bylo nutné ověřit dalším výzkumem.

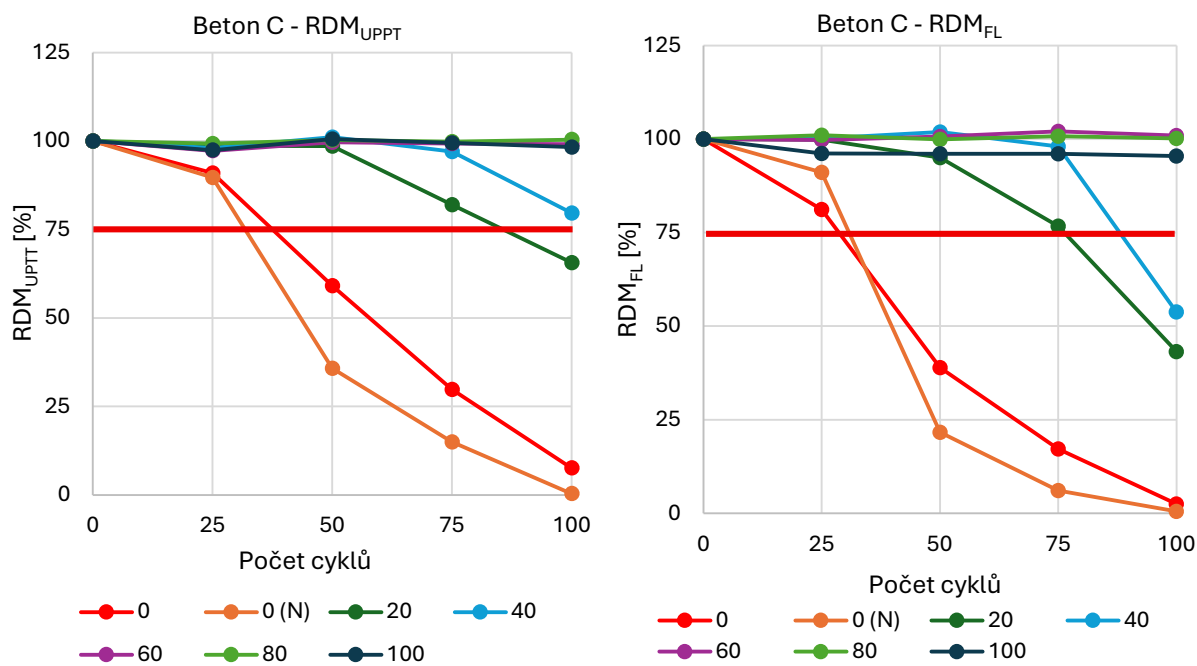
Beton C vykazuje největší rozdíly v naměřených modulu pružnosti po ukončení zkoušky. Sady 60 a 80 nevykazují zásadní porušení vnitřní struktury. RDM se u nich pohybuje kolem 100 %. U sady 100 je pokles také minimální, pouze o 5 %. Zatímco u sad 1–4 je pozorován postupný pokles modulů pružnosti. Tělesa sad 1 a 2 jsou prostoupena trhlinami natolik, že jsou sotva měřitelná a jejich RDM je blízké 0 %. Za to sady 4 a 5 se pohybují kolem 50 %.



Obr. 54 Porovnání RDM jednotlivých sad betonu A



Obr. 55 Porovnání RDM jednotlivých sad betonu B



Obr. 56 Porovnání RDM jednotlivých sad betonu C

2.4.2. Vizuální zhodnocení porušení těles

Po 50 cyklech už je u některých těles z betonu A a C viditelné narušení materiálu, viz Obr. 57 – Obr. 59. Nejvíce trhlin je možné pozorovat na tělesech z betonu A, zejména na sadě 0 a 0 (N), což jsou tělesa, která byla na začátku experimentu vysušená, respektive nejdříve nasycená a poté vysušená při teplotě 105 °C.

Na Obr. 58 je zachyceno těleso A01 porušené trhlinami tloušťky zhruba 0,2 – 0,4 mm. Nejvýraznější porušení betonu A bylo očekáváno, protože se jedná o beton třídy XF1, oproti betonu B a C, které jsou třídy XF4.

Na Obr. 57 jsou zachycena všechna tělesa z betonu A potom, co byla vyjmuta z mrazicího zařízení a ponechala se chvíli oschnout. Je viditelné, že tělesa sad 0, 0(N) a 20 byla více nasáklá vodou a zůstávala déle mokrá na povrchu na rozdíl od ostatních těles. To vypovídá o výraznějším porušení těles. Tělesa jsou na obrázku seřazena postupně po řadách od levého horního rohu, kde se nachází těleso č. 1.

Na vzorcích betonu B se nevyskytovaly výrazné trhliny, což je dáno tím, že se jedná o provzdušněný beton.

Vzorky betonu C jsou také prostoupeny sítí mikrotrhlin, opět zejména sady 0 a 0(N). Trhliny jsou však menších šířek a celkově jich je méně než u betonu A.



Obr. 57 Tělesa betonu A po vyjmutí z mrazicího zařízení po 50 cyklech



Obr. 58 Vlevo těleso A01 po 50 cyklech, vpravo A10 po 50 cyklech



Obr. 59 Těleso A21 po 50 cyklech, C02 po 50 cyklech

Po 75 cyklech se už většina těles sad 1 a 2 z betonu A rozpadla a byla tedy neměřitelná a vyřazena pro další zmrazování, nerozpadlé zůstalo pouze A02. Tělesa ostatních sad jsou výrazně prostoupena trhlinkami, viz Obr. 60.



Obr. 60 Rozpadlé těleso A01 po 75 cyklech, A14 po 75 cyklech

ZÁVĚR

V diplomové práci byla provedena rešerše zaměřená na trvanlivost betonu a jeho degradační mechanismy, zejména karbonataci a mrazuvzdornost.

V rámci prvního experimentu byly zjištěny mechanické vlastnosti různých druhů betonů, posouzena kvalita povrchové vrstvy a stanovena hloubka karbonatace betonu na zkušebních tělesech starých zhruba 11 let. Zjištěné hodnoty byly porovnány s vlastnostmi ve stáří 28 dnů.

Na zkušebních tělesech byla stanovena hloubka přirozené karbonatace po uložení v laboratorních podmínkách po dobu 10–12 let a hloubka karbonatace po zrychlené karbonataci v karbonatační komoře po dobu 28 a 90 dnů. Naměřené hodnoty přirozené karbonatace byly porovnány s vypočítanými hodnotami pomocí vybraných modelů karbonatace, které jsou implementovány v programu FReET-D. Z porovnání výsledků vyplynulo, že nejpřesnější odhad hloubky karbonatace poskytovaly modely *Carb1a* a *Carb1b* vyvinuté Papadakisem a kol., jejichž výsledky se u všech zkoušených betonů lišily od experimentálně zjištěných hodnot o méně než 2 mm. Naopak nejméně přesné výsledky poskytoval jednoduchý model *Carb7* vyvinutý Kishitanim a kol., u něhož byly hodnoty hloubky karbonatace ve všech případech významně podhodnoceny.

Z naměřených hodnot hloubky přirozené karbonatace byly stanoveny hodnoty inverzní funkce odolnosti vůči karbonataci $R_{ACC,0}^{-1}$ pro jednotlivé druhy betonů. Tato funkce vstupuje do modelu *Carb8*, který je uveden ve fib Model Code. Představuje z použitých modelů nejkompexnější přístup k predikci karbonatace. Stanovené hodnoty mohou být využity jako vstupní parametry pro další modelování degradace betonu při použití stejných receptur v odlišných podmínkách prostředí.

V druhém experimentu bylo hlavním cílem posoudit vliv počátečního stupně nasycení na mrazuvzdornost betonu. Bylo provedeno jak porovnání jednotlivých sad, tak i jednotlivých druhů betonu.

Z výsledných dat je patrné, že při vysušování těles při 105 °C dochází k jistému porušení vnitřní struktury betonu. Toto porušení se bezprostředně neprojeví ve výsledcích z ultrazvukové a rezonanční metody. Beton však poté vykazuje menší odolnost vůči degradaci vlivem zmrazování a rozmrazování.

Ze stanovených hodnot RDM u betonu B je patrné, že u mrazuvzdorného betonu počáteční stupeň nasycení nemá na degradaci betonu vliv. Mrazuvzdorný beton odolává zmrazovacím cyklům i při plném nasycení.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Navrhování konstrukcí dle ISO 16204 – stanovení životnosti betonových konstrukcí s ohledem na karbonataci. *IMateriály.cz* [online]. 2020-03-19 [cit. 2026-01-16]. Dostupné z: https://imaterialy.cz/rubriky/beton/navrhovani-konstrukci-dle-iso-16204-stanoveni-zivotnosti-betonovych-konstrukci-s-ohledem-na-karbonataci_47846-html/
- [2] ŠOMODÍKOVÁ, M. a DOLEŽEL, J. Životnost betonových konstrukcí: matematické modelování degradačních procesů dle TP 175, ISO 16204 a fib Model Code. *Beton*. 2022, (4), 74-79. ISSN 1211-0885.
- [3] KOMÁRKOVÁ, Tereza, Monika KRÁLÍKOVÁ a Pavel KOVÁCS. Application of computed tomography in comparison with the standardized methods for determining the permeability of cement-composite structures. *Materiali in tehnologije*. 2015, 49(4), 587-595. ISSN 1580-2949. Dostupné z: <https://doi.org/10.17222/mit.2014.194>
- [4] ČSN EN 206+A2 (732403) Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [5] NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. 5. vyd. Harlow: Pearson Education Limited, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.
- [6] CHINCHÓN-PAYÁ, S., ANDRADE, C. a CHINCHÓN, S. Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. *Cement and Concrete Research* [online]. 2016, 82, 87-91 [cit. 2026-01-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461500304X>
- [7] STEFFENS, A., DINKLER, D. a AHRENS, H.. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. *Cement and Concrete Research* [online]. 2002, 2002-06-01, 32(6), 935-941 [cit. 2025-12-31]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884602007287>
- [8] CHROMÁ, Markéta. *Studium a modelování karbonatace betonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012, 143 s. Disertační práce. Vedoucí práce prof. Ing. Jaromír Havlica.
- [9] ČSN EN 12390-12 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023.
- [10] VON GREVE-DIERFELD, S. a kol. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Materials and Structures* [online]. 2020, 53, článek 136 [cit. 2025-12-31]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-020-01558-w>
- [11] BALAYSSAC, J. P., DÉTRICHÉ, Ch. H. a GRANDET, J. Effects of curing upon carbonation of concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 1995, 9(2), 91-95. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095006189500001V?via%3Dihub>
- [12] TEPLÝ, B. a ROVNANÍK, P. Účinky mrazu na beton / Effects of frost attack on concrete. *Materiály in Technologije*. 2007, (4), 42-45. ISSN 1580-2949.

- [13] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. Praha: ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [14] GUO, J., SUN, W., XU, Y., LIN, W. a JING, W. *Damage Mechanism and Modeling of Concrete in Freeze-Thaw Cycles: A Review*. 2022, 12(9) Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/buildings12091317>
- [15] HRABOVÁ, K., VYMAZAL, T. a Iveta BUČILOVÁ, I. Navrhování konstrukcí dle ISO 16204 – stanovení životnosti betonových konstrukcí s ohledem na karbonataci. *iMaterialy.cz*. Dostupné z: https://imaterialy.cz/rubriky/beton/navrhovani-konstrukci-dle-iso-16204-stanoveni-zivotnosti-betonovych-konstrukci-s-ohledem-na-karbonataci_47846-html/
- [16] ČERVENKA CONSULTING. *FReET-D: Program documentation. Part 2, Deterioration Module User Manual, version 1.4*. 2017.
- [17] ČERVENKA CONSULTING. *FReET-D: Program documentation. Part 1, Deterioration Modul Manual: Theory, version 1.4*. 2017.
- [18] ŠMERDA, Z. *Životnost betonových staveb*. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1999. ISBN 80-902697-8-8.
- [19] MISÁK, P., STAVAR, T., ROZSYPALOVÁ, I., KOCÁB, D. a PÖSSL, P. Statistical view of evaluating concrete-surface-layer permeability tests in connection with changes in concrete formula. *Materiali in Tehnologije*. 2017, 51(3), 379-385. ISSN 1580-2949. Dostupné z: <https://doi.org/10.17222/mit.2015.223>
- [20] *Trvanlivost 2015 sborník příspěvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Ústav stavebního zkušebnictví, 2015. ISBN 978-80-214-5245-9.
- [21] HALAMOVÁ, R., KOCÁB, D. a VYMAZAL, T. The influence of concrete composition on its modulus of elasticity: Comparison of experiment and values from Eurocode 2. In: *Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. Praha, Czech Technical University in Prague 2018, pp. 1-7.
- [22] *ČSN EN 12390-3 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [23] *ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [24] *ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2024.
- [25] *ČSN ISO 1920-10 (731319) Zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [26] *ČSN 73 1371 (731371) Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [27] *ČSN 73 1372 (731372) Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [28] *ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.

- [29] PROCEQ SA. *Permeability Tester TORRENT: Operating instructions*. Schwerzenbach: Proceq SA. [rok vydání neuveden] [online]. [cit. 2026-01-16]. Dostupné z: https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Torrent_Operating%20Instructions_English_high.pdf.
- [30] ČSN EN 1542 *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí: zkušební metody. Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [31] KUCHARCZYKOVÁ, B., MISÁK, P. a VYMAZAL, T. Determination and Evaluation of the Air Permeability Coefficient using Torrent Permeability Tester. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2010, 46(3), 226–233. Dostupné z: <https://doi.org/10.1134/S1061830910030113>
- [32] SCREENING EAGLE. *Torrent* [online]. [cit. 2025-12-31]. Dostupné z: <https://www.screeningeagle.com/en/products/torrent>
- [33] ČSN ISO 1920-10 (731319) *Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [34] ALEXA, Martin. *Ověření vývoje modulu pružnosti a pevnosti v tlaku betonu v čase*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [35] POPOVICS, S. *Strength and related properties of concrete: a quantitative approach*. New York: Wiley, 1998. ISBN 978-0-471-14903-3.
- [36] SADATI, S. a TAYLOR, P. *Evaluation of Penetrating Sealers for Concrete: Literature Review*. Technical report. Ames (Iowa): National Concrete Pavement Technology Center, 2019 [online]. [cit. 2026-01-08]. Dostupné z: https://www.cptechcenter.org/wp-content/uploads/2022/05/concrete_penetrating_sealers_eval_lit_rvw_w_cvr.pdf
- [37] ČSN EN 12390-13 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [38] HALAMOVÁ, R. *Problematika zjišťování statického modulu pružnosti betonu v konstrukcích*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [39] KOCÁB, D., MISÁK, P., CIKRLE, P., KOMÁRKOVÁ, T. a MORAVCOVÁ, B. Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13. *Beton*. 2014, 3(74).
- [40] KOCÁB, D., KRÁLÍKOVÁ, M., CIKRLE, P., MISÁK, P. a KUCHARCZYKOVÁ, B. Experimental analysis of the influence of concrete curing on the development of its elastic modulus over time. *Materiali in tehnologije*. 2017, 51(4), 657–665. ISSN 1580-2949. Dostupné z: <https://doi.org/10.17222/mit.2016.248>
- [41] ČSN 73 1322 *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Vydavatelství ÚNM, 1968.
- [42] BUKOVSKÁ, Pavla. *Ocelové sloupy kruhového průřezu vyplněné betonem vyšších pevností*. Brno, 2024. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [43] TOPOLÁŘ, L., KOCÁB, D., PAZDERA, L. a VYMAZAL, T. Analysis of Acoustic Emission Signals Recorded during Freeze-Thaw Cycling of Concrete. *Materials*. 2021, 14(5), článek 1230. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma14051230>

- [44] ČSN 73 1371 (731371) *A Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [45] KOCÁB, D., VYMAZAL, T., KOMÁRKOVÁ, T. a LISOVSKÝ, M. Methods for evaluation of freeze-thaw resistance of concrete and their comparison. In: *Special Concrete and Composites 2021. AIP Conference Proceedings*. 2021, 2322, článek 030012. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0063186>
- [46] ALEXA, M., KOCÁB, D., VYMAZAL, T. a LISZTWAN, D. Determination of frost resistance of concrete on specimens acquired from a structure vs. produced in a laboratory. In: *Special Concrete and Composites 2021. AIP Conference Proceedings*. 2021, 2322, článek 030015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0136986>
- [47] WU, Z., WONG, H. S. a BUENFELD, N. R. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. *Cement and Concrete Research*. 2017, 98, 136–154. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.006>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

a, b, L	rozměry zkušebních těles
a ₁ , a ₂ , a ₃	množství kameniva v betonové směsi
c	obsah cementu v betonové směsi
Ca(OH) ₂	hydroxid vápenatý
CaCO ₃	uhličitan vápenatý
C _{CO2}	konzentrace CO ₂
CO ₂	oxid uhličitý
D	objemová hmotnost
d	průměr
E _c	statický modul pružnosti v tahu a tlaku
E _{crf}	dynamický modul pružnosti stanovený z vlastní příčné frekvence
E _{crL}	dynamický modul pružnosti stanovený z vlastní podélné frekvence
E _{cu}	dynamický modul pružnosti stanovený ultrazvukovou metodou
E _{dyn}	dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku
f(RH)	funkce zahrnující vliv relativní vlhkosti
f _c	válcová pevnost v tlaku
F _c	zatěžovací síla při zkoušce pevnosti betonu v tlaku
f _{c,cube}	krychelná pevnost v tlaku
F _{ct}	zatěžovací síla při zkoušce pevnosti tahu ohybem
f _{ct,fl}	pevnost v tahu ohybem
f _t	pevnost v prostém tahu povrchové vrstvy
F _t	zatěžovací síla při zkoušce pevnosti v příčném tahu
G _{cr}	modul pružnosti ve smyku
GPa	gigapascal
h	hloubka průsaku tlakovou vodou
H ₂ O	voda
CHRL	chemicky rozmrazovací látky
kN	kilonewton
k _T	součinitel propustnosti ze Torrent Permeability Test
m	metr
mm	milimetr
MPa	megapascal
m _x	průměrná hodnota
R	poměr rychlosti karbonatace betonu s povrch. úpravou k rychlosti karb. betonu bez povrch. úpravy
R _{ACC,0⁻¹}	Inverzní efektivní odolnost vůči karbonataci
RDM _{FL}	relativní dynamický modul pružnosti stanovený z vlastní podélné frekvence

RDM_{UPPT}	relativní dynamický modul pružnosti stanovený ultrazvukovou metodou
RH	relativní vlhkost
S_x	výběrová směrodatná odchylka
T	teplota
t	čas
t_i	iniciační čas
t_p	propagační čas
TPT	Torrent Permeability Test
t_s	životnost konstrukce
V_x	variační koeficient
w	obsah vody v betonové směsi
x_c	hloubka karbonatace
ρ	objemová hmotnost
ψ	faktor nejistoty modelu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Typy funkce $f(RH)$ [17].....	24
Obr. 2 Zkouška pevnosti betonu v tlaku.....	36
Obr. 3 Pevnost v tahu ohybem	36
Obr. 4 Zkouška pevnosti v příčném tahu na krychli	38
Obr. 5 Vlevo tělesa upnutá ve zkušebním zařízení, vpravo viditelná linie průsaku na boku krychle 0/1-3	39
Obr. 6 Povrch bloku z betonu R při čištění ocelovým kartáčem	40
Obr. 7 Odtržené terče	41
Obr. 8 Zkušební zařízení pro odtrhovou zkoušku vlevo	42
Obr. 9 Přístroj TPT [32]	43
Obr. 10 Měření TPT na betonových blocích.....	43
Obr. 11 Průběh zkoušky statického modulu pružnosti dle normy [33] [34].....	45
Obr. 12 Zkušební lis ALPHA 3-3000 S FORM+TEST během zkoušky statického modulu pružnosti.....	46
Obr. 13 Vlevo vývrt s osazenými elektronickými tenzometry Electronic Strain Transducer LD-DD1-2, vpravo zkušební lis ALPHA 3-3000 S FORM+TEST během zkoušky statického modulu pružnosti	46
Obr. 14 Měření doby průchodu ultrazvuku na krychli	47
Obr. 15 Měření doby průchodu ultrazvuku na krychli	48
Obr. 16 Krychle R-3 po stanovení současně hloubky průsaku tlakovou vodou (černá křivka) a hloubky karbonatace	50
Obr. 17 Krychle 1/2-3 po stanovení současně hloubky průsaku tlakovou vodou (černá křivka) a hloubky karbonatace	51
Obr. 18 Karbonatace na hranolech 0/3	52
Obr. 19 Karbonatace na hranolech P2/2	52
Obr. 20 Karbonatace na vývrtech z krychlí 1/1	53
Obr. 21 Detail vývrtu 1/1-6A a 1/1-B.....	53
Obr. 22 Krychle uložené v karbonatační komoře	54
Obr. 23 Uzavřená karbonatační komora	54
Obr. 24 Průběh teploty a RH v karbonatační komoře.....	55
Obr. 25 Tělesa po 28 dnech v karbonatační komoře	56
Obr. 26 Tělesa po 90 dnech v karbonatační komoře	56
Obr. 27 Porovnání krychelné pevnosti v tlaku	57
Obr. 28 Závislost krychelných pevností v tlaku na vodním součiniteli.....	57
Obr. 29 Porovnání pevnosti v tahu ohybem	58
Obr. 30 Porovnání hloubky průsaku ve stáří 10–12 let	60

Obr. 31 Porovnání hloubky průsaku tlakovou vodou na vzorcích starých 10-12 let.....	61
Obr. 32 Závislost hloubky průsaku tlakovou vodou na vodním součiniteli u vzorků starých 10–12 let	61
Obr. 33 Porovnání součinitele propustnosti k_T	62
Obr. 34 Průběh zkoušky statického modulu pružnosti dle ČSN EN 12390-13 – metoda B [37] [38]	63
Obr. 35 Porovnání statických modulů pružnosti	64
Obr. 36 Srovnání E_{cu} stanovených na různých tělesech UZ metodou	64
Obr. 37 Porovnání E_{cu} stanovených na vývrtech.....	65
Obr. 38 Porovnání E_{crL}	65
Obr. 39 Hloubka karbonatace po 28 dnech v karb. komoře – beton 0/2	67
Obr. 40 Hloubka karbonatace po 90 dnech v karb. komoře – beton 0/2	67
Obr. 41 Hloubka karbonatace po 90 dnech v karb. komoře – beton R.....	68
Obr. 42 Porovnání vývoje hloubky karbonatace během zrychlené karbonatace.....	69
Obr. 43 Porovnání vývoje hloubky karbonatace během zrychlené karbonatace, vliv plastifikačních přísad.....	69
Obr. 44 Porovnání vývoje hloubky karbonatace během zrychlené karbonatace, vliv provzdušňovacích přísad.....	70
Obr. 45 Porovnání hloubky karbonatace modelu Carb1a a Carb1b v závislosti na vodním součiniteli	78
Obr. 46 Porovnání hloubky karbonatace modelu Carb2a a Carb2b v závislosti na vodním součiniteli	79
Obr. 47 Porovnání hloubky karbonatace modelu Carb3 v závislosti na vodním součiniteli	79
Obr. 48 Porovnání hloubky karbonatace modelu Carb6 v závislosti na vodním součiniteli	80
Obr. 49 Porovnání hloubky karbonatace modelu Carb7 v závislosti na vodním součiniteli	80
Obr. 50 Porovnání hloubky karbonatace modelu Carb7 v závislosti na vodním součiniteli	81
Obr. 51 Vrtání vývrtů z betonových bloků	84
Obr. 52 Zjišťování vlastních frekvencí rezonanční metodou.....	87
Obr. 53 Porovnání RDM_{FL} jednotlivých betonů z podélné frekvence sad 0(N) a 100.....	91
Obr. 54 Porovnání RDM jednotlivých sad betonu A	92
Obr. 55 Porovnání RDM jednotlivých sad betonu B.....	93
Obr. 56 Porovnání RDM jednotlivých sad betonu C.....	93
Obr. 57 Tělesa betonu A po vyjmutí z mrazícího zařízení po 50 cyklech	94
Obr. 58 Vlevo těleso A01 po 50 cyklech, vpravo A10 po 50 cyklech	95

Obr. 59 Těleso A21 po 50 cyklech, C02 po 50 cyklech.....	95
Obr. 60 Rozpadlé těleso A01 po 75 cyklech, A14 po 75 cyklech.....	96

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Požadavky na beton pro stupeň vlivu prostředí XC.....	14
Tab. 2 Přehled druhů betonu.....	30
Tab. 3 Teoretické receptury betonů.....	30
Tab. 4 Data výroby zkušebních těles.....	31
Tab. 5 Vlastnosti betonů zjištěné v rámci projektu GAČR13-70188S [20; 21].....	32
Tab. 6 Pevnosti betonu v tlaku stanovené na krychli.....	34
Tab. 7 Pevnosti betonu v tlaku stanovené na válcích.....	35
Tab. 8 Pevnosti v tahu ohybem.....	37
Tab. 9 Zkouška pevnosti v příčném tahu na krychli.....	38
Tab. 10 Hloubka průsaku tlakovou vodou na krychlích.....	39
Tab. 11 Odtrhová zkouška.....	41
Tab. 12 Hmotnosti a vlhkosti bloků.....	44
Tab. 13 Vyhodnocení zkoušky TPT.....	44
Tab. 14 Statický modul pružnosti.....	47
Tab. 15 Dynamické moduly pružnosti stanovené na krychlích, válcích a hranolech UZ metodou.....	48
Tab. 16 Dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou na hranolech.....	49
Tab. 17 Dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou na vývrtech.....	49
Tab. 18 Hloubka karbonatace po 10-12 letech na krychlích.....	50
Tab. 19 Hloubka karbonatace po 10-12 letech na hranolech.....	51
Tab. 20 Hloubka karbonatace po 10-12 letech na vývrtech.....	52
Tab. 21 Hloubka karbonatace po 28 dnech a po 90 dnech v karb. komoře.....	55
Tab. 22 Poměr pevnosti v příčném tahu k pevnosti v tahu ohybem.....	59
Tab. 23 Poměr krychelné pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem.....	59
Tab. 24 Poměr pevnosti v tahu ohybem k pevnosti v prostém tahu povrch. vrstvy.....	59
Tab. 25 Poměr tahové pevnosti povrchové vrstvy a krychelné pevnosti.....	60
Tab. 26 Hloubka průsaku tlakovou vodou.....	61
Tab. 27 Porovnání výsledků zkoušky TPT.....	62
Tab. 28 Vývoj hloubky karbonatace během zrychlené karbonataci.....	66
Tab. 29 Množství vody, cementu a kameniva v betonu [kg/m ³].....	71
Tab. 30 Vstupní hodnoty do modelů Carb1a a Carb1b.....	71
Tab. 31 Vstupní hodnoty do modelů Carb2a a Carb2b.....	71
Tab. 32 Vstupní hodnoty do modelů Carb2a a Carb2b.....	72

Tab. 33 Krychelné pevnosti betonu v tlaku ve 28 dnech [MPa]	73
Tab. 34 Vstupní hodnoty pro model Carb6.....	73
Tab. 35 Hodnoty součinitelů v modelu Carb7	73
Tab. 36 Vstupní hodnoty do modelu Carb7	74
Tab. 37 Hodnoty $RACC, 0 - 1$ podle použitého cementu a vodního součinitele [17].....	74
Tab. 38 Použité hodnoty funkce $RACC, 0 - 1$ [17]	74
Tab. 39 Vstupní hodnoty do modelu Carb8a.....	75
Tab. 40 Výsledné hodnoty $RACC - 1$	81
Tab. 41 Datum výroby betonových bloků, ze kterých byly odvrtány vývrty.....	83
Tab. 42 Porovnání hmotností vysušených těles před a po zkoušce mrazuvzdornosti	86
Tab. 43 Vlhkosti jednotlivých sad před zkouškou mrazuvzdornosti	86
Tab. 44 Vlastnosti betonů ve stáří 28 dní [42]	87
Tab. 45 Dynamické moduly pružnosti stanovené na tělesech před zahájením úpravy jejich vlhkosti	88
Tab. 46 RDM_{FL} v průběhu cyklování	89
Tab. 47 RDM_{UPTT} v průběhu cyklování	90

SEZNAM PŘÍLOH

A. FOTODOKUMENTACE Z EXPERIMENTU Č. 1 – KARBONATACE BETONU	109
B. FOTODOKUMENTACE Z EXPERIMENTU Č. 2 – MRAZUVZDORNOST	127
C. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ – EXPERIMENT Č. 1 KARBONATACE	133
D. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ – EXPERIMENT Č. 2 MRAZUVZDORNOST ..	145

A. FOTODOKUMENTACE Z EXPERIMENTU Č. 1 – KARBONATACE BETONU



Obr.A. 1 Vrtání vývrtů z krychlí



Obr.A. 2 Vyvrtané vývrty z krychlí



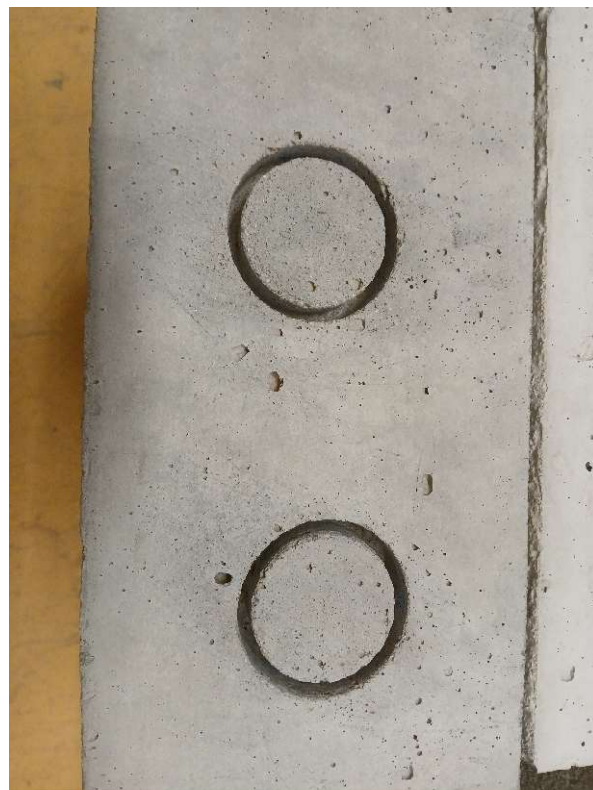
Obr.A. 3 Vývrty s krychlemi



Obr.A. 4 Zkušební krychle



Obr.A. 5 Vrtání těles na odtrhovou zkoušku



Obr.A. 6 Vyvrtané vývrty na blocích R vlevo a 1/3



Obr.A. 7 Održené terče



Obr.A. 8 Měření koncentrace CO₂ v karbonatační komoře

Hloubka přirozené karbonátace na trámech



Obr. A. 1 Hranoly 0/3



Obr. A. 2 Hranoly 1/2



Obr. A. 3 Hranoly 1/3



Obr. A. 4 Hranoly 2/2



Obr. A. 5 Hranoly 2/3



Obr. A. 6 Hranoly P2/2

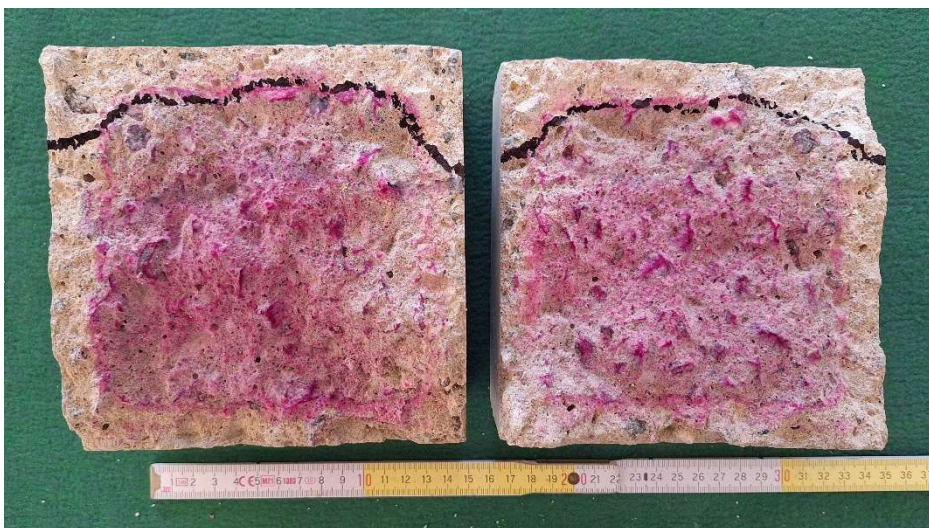


Obr. A. 7 Hranoly P2/3

Hloubka přirozené karbonatce a hloubka průsaku tlakovou vodou na krychlích



Obr. A. 8 Krychle R-3



Obr. A. 9 Krychle R-4



Obr. A. 10 Krychle 0/1-3



Obr. A. 11 Krychle 0/1-4



Obr. A. 12 0/2-3



Obr. A. 13 Krychle 0/2-4



Obr. A. 14 Krychle 0/3-3



Obr. A. 15 Krychle 0/3-4



Obr. A. 16 Krychle 1/1-3



Obr. A. 17 Krychle 1/1-4



Obr. A. 18 Krychle 1/2-3



Obr. A. 19 Krychle 1/2-4



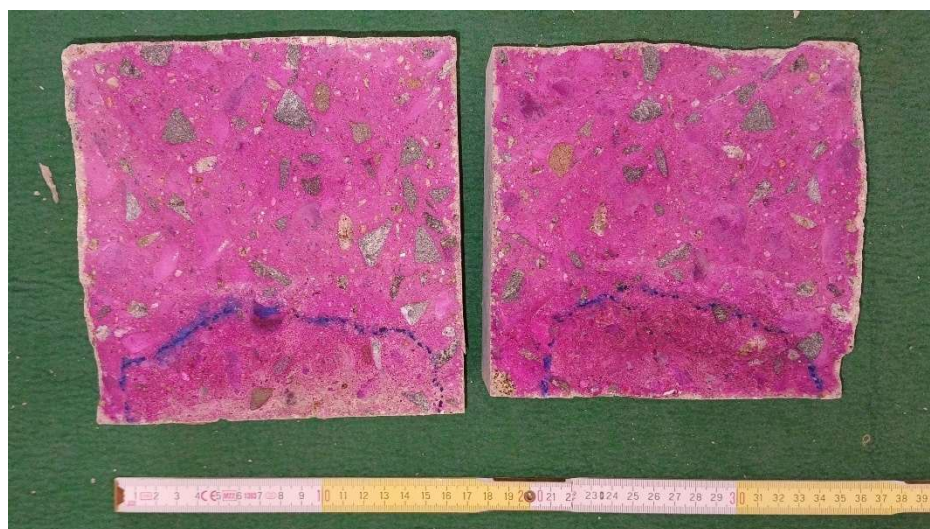
Obr. A. 20 Krychle 1/3-3



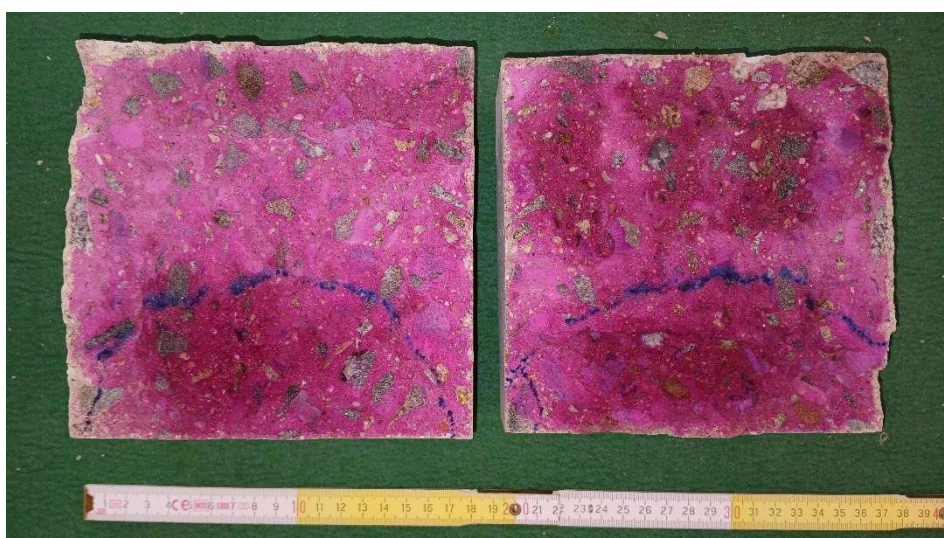
Obr. A. 21 Krychle 1/3-4



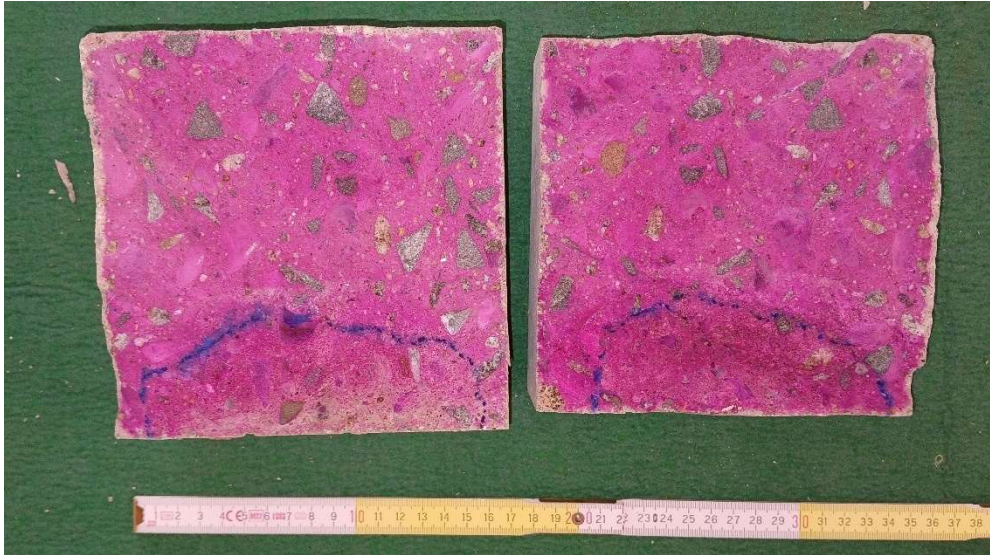
Obr. A. 22 Krychle 2/2-3



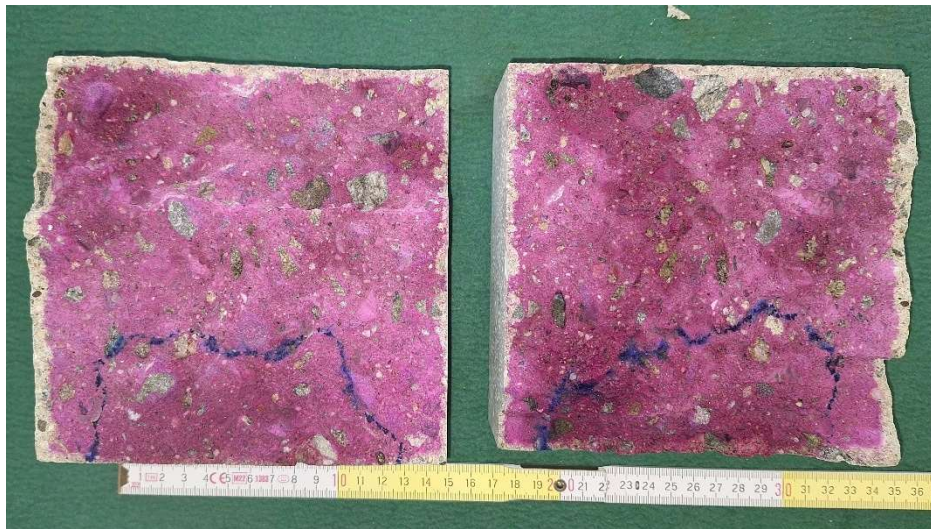
Obr. A. 23 Krychle 2/2-4



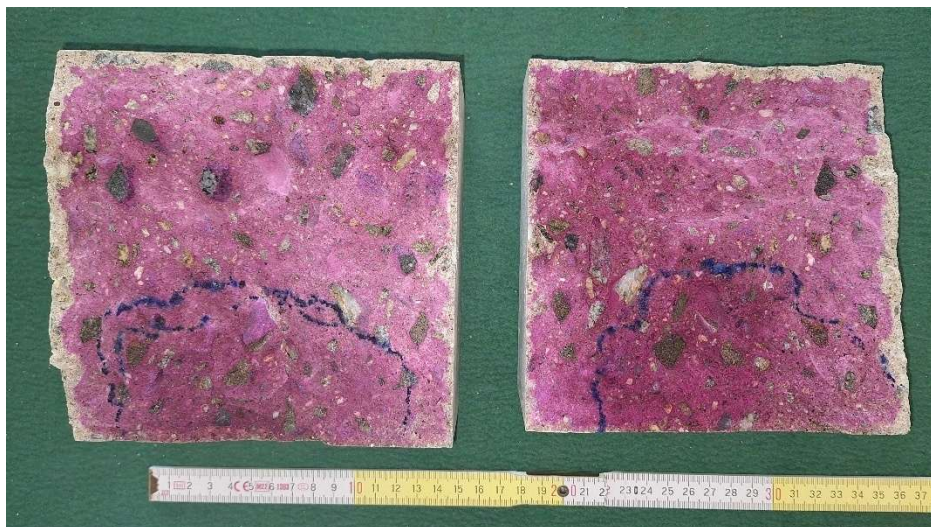
Obr. A. 24 Krychle 2/3-3



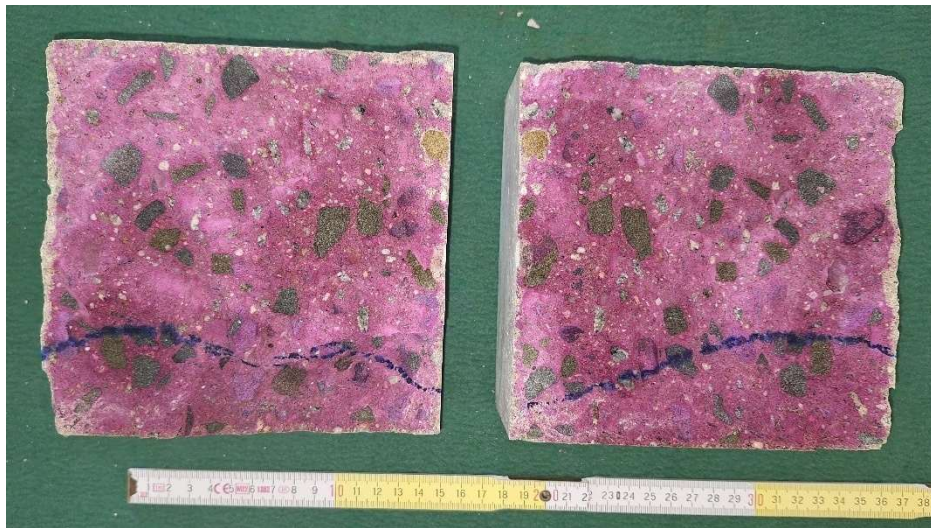
Obr. A. 25 Krychle 2/3-4



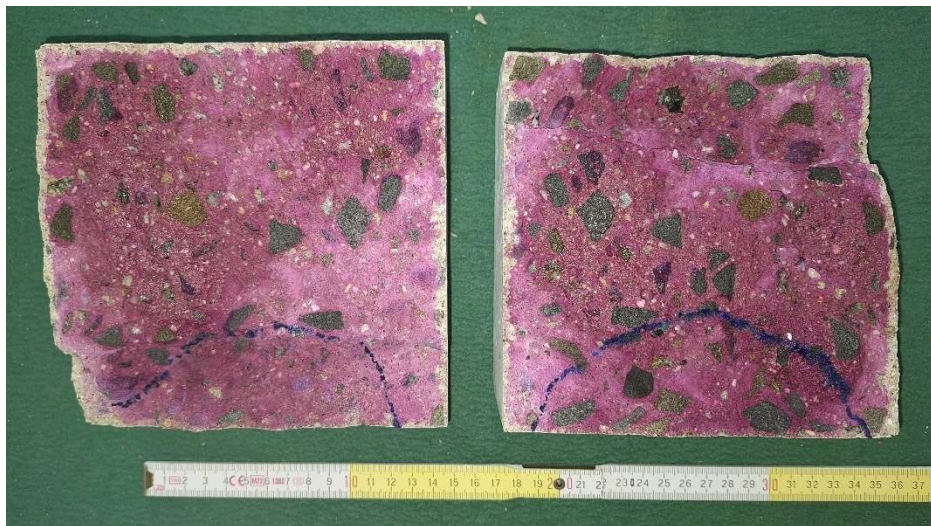
Obr. A. 26 Krychle P2/2-3



Obr. A. 27 Krychle P2/2-4



Obr. A. 28 Krychle P2/3-3



Obr. A. 29 Krychle P2/3-4

Karbonatace na vývrtech



Obr. A. 30 Vývrty z krychlí R5 a R6



Obr. A. 31 Vývrty z krychlí 0/1-5 a 0/1-6



Obr. A. 32 Vývrty z krychlí 0/2-5 a 0/2-6



Obr. A. 33 Vývrty z krychlí 0/3-5 a 0/3-6



Obr. A. 34 Vývrty z krychlí 1/1-5 a 1/1-6



Obr. A. 35 Vývrty z krychlí 1/2-5 a 1/2-6



Obr. A. 36 Vývrty z krychlí 1/3-5 a 1/3-6



Obr. A. 37 Vývrty z krychlí 2/2-5 a 2/2-6



Obr. A. 38 Vývrty z krychlí 2/3-5 a 2/3-6



Obr. A. 39 Vývrty z krychlí P2/2-5 a P2/2-6



Obr. A. 40 Vývrty z krychlí P2/3-5 a P2/3-6

B. FOTODOKUMENTACE Z EXPERIMENTU Č. 2 – MRAZUVZDORNOST



Obr.A. 9 Vrtání vývrťů

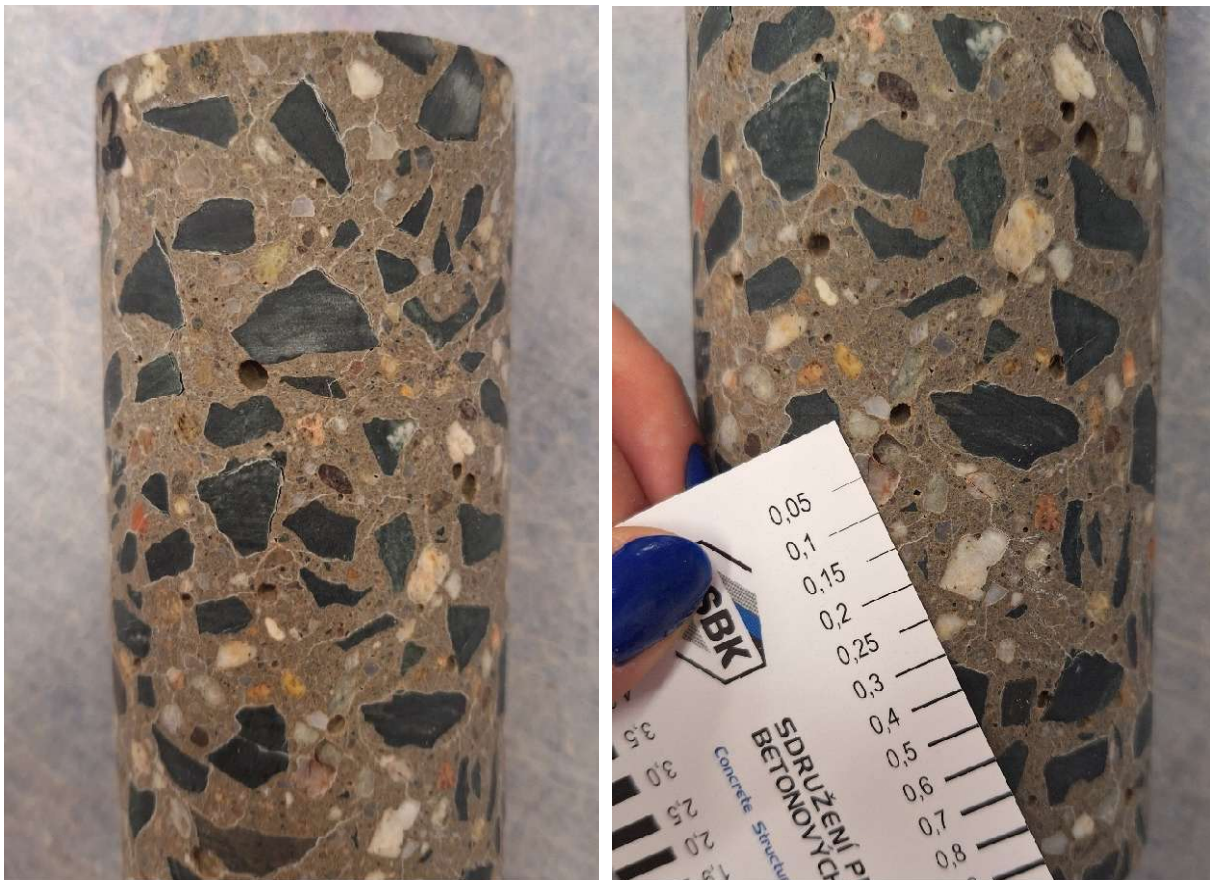


Obr.A. 10 Blok s odvrtnými vývrťy

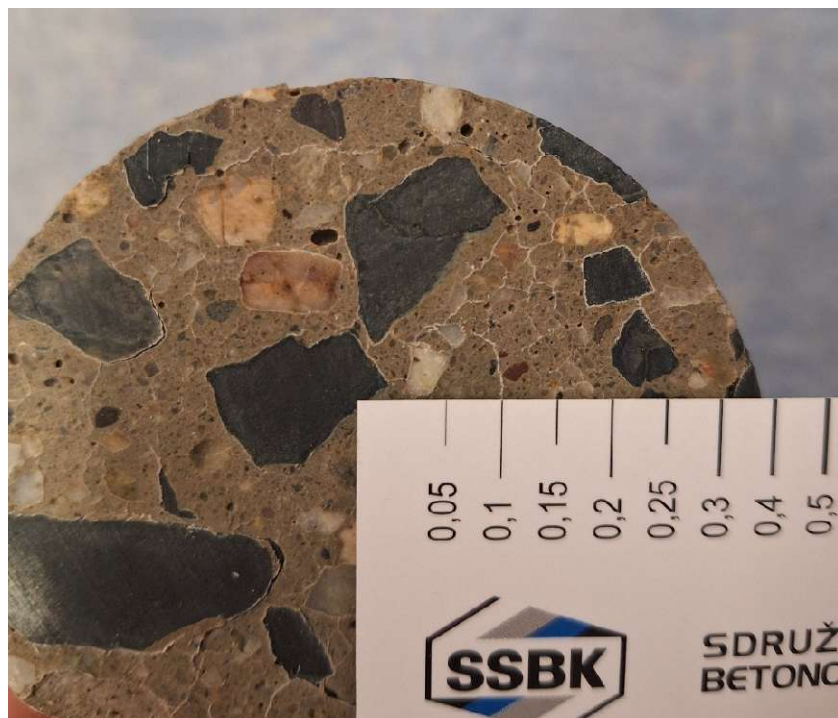


Obr.A. 11 Řezání vývrtů na přibližně stejné délky

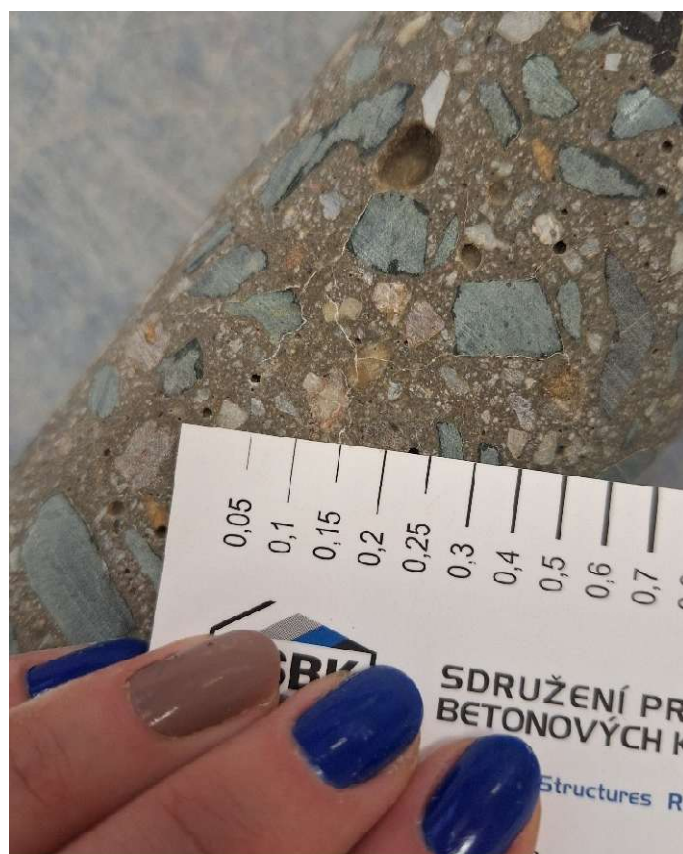
Porušení vývrtů po 50 cyklech



Obr.A. 12 Vývrt A03 po 50 cyklech



Obr.A. 13 Vývrt A06 po 50 cyklech



Obr.A. 14 Vývrt A21 po 50 cyklech



Obr.A. 15 Vývrtý C02 vlevo a C04 vpravo po 50 cyklech

Porušení vývrtů po 75 cyklech



Obr.A. 16 Vývrt A02 po 75 cyklech



Obr.A. 17 Vývrt A12 po 75 cyklech



Obr.A. 18 Vývrty C01 a C03 po 75 cyklech



Obr.A. 19 Vývrt C06 po 75 cyklech

C. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ – EXPERIMENT Č. 1 KARBONATAČE

Statické moduly pružnosti

Tab.A. 1 Vyhodnocení statického modulu pružnosti E_c

vzorek	d [mm]	F_a [kN]	$\Delta l_{1,a}$ [mm]	$\Delta l_{2,a}$ [mm]	F_b [kN]	$\Delta l_{1,b}$ [mm]	$\Delta l_{2,b}$ [mm]	Δl_1 [mm]	Δl_2 [mm]	prům Δl [mm]	$\Delta \epsilon$ [-]	$\Delta \sigma$ [MPa]	E_c [GPa]	
R5-B	74,13	35	0,02	0,03	5	0,002	0,006	0,015	0,021	0,018	2,6E-04	7,0	26,9	25,5
R6-A	74,10	35	0,02	0,02	5	0,004	0,004	0,020	0,020	0,020	2,8E-04	7,0	24,5	
R6-B	74,14	35	0,03	0,02	5	0,007	0,002	0,021	0,018	0,019	2,8E-04	6,9	25,1	
0/1-5B	74,1	45	0,03	0,02	5	0,005	0,002	0,022	0,020	0,021	3,0E-04	9,3	30,8	30,1
0/1-6A	74,2	45	0,03	0,02	5	0,005	0,003	0,023	0,020	0,022	3,1E-04	9,3	29,8	
0/1-6B	74,2	45	0,02	0,03	5	0,003	0,005	0,018	0,026	0,022	3,1E-04	9,3	29,7	
0/2-5B	74,0	60	0,03	0,04	5	0,003	0,003	0,025	0,032	0,028	4,1E-04	12,8	31,4	31,2
0/2-6A	74,1	60	0,03	0,03	5	0,004	0,004	0,030	0,030	0,030	4,3E-04	12,8	29,6	
0/2-6B	74,1	60	0,03	0,04	5	0,003	0,004	0,023	0,032	0,027	3,9E-04	12,8	32,5	
0/3-5-B	73,3	60	0,03	0,03	5	0,004	0,001	0,029	0,026	0,027	3,9E-04	13,0	33,3	32,3
0/3-6-A	73,3	60	0,03	0,03	5	0,004	0,005	0,030	0,028	0,029	4,1E-04	13,0	31,7	
0/3-6-B	73,4	60	0,03	0,04	5	0,002	0,005	0,027	0,030	0,028	4,1E-04	13,0	32,0	
1/1-5-B	73,3	55	0,03	0,03	5	0,003	0,004	0,028	0,027	0,027	3,9E-04	11,8	30,2	29,4
1/1-6-A	73,5	55	0,03	0,04	5	0,003	0,004	0,027	0,031	0,029	4,1E-04	11,8	28,4	
1/1-6-B	73,4	55	0,03	0,04	5	0,003	0,005	0,025	0,030	0,028	4,0E-04	11,8	29,6	
1/2-5-B	73,5	55	0,03	0,03	5	0,003	0,004	0,026	0,030	0,028	4,0E-04	11,8	29,5	29,2
1/2-6-A	73,6	55	0,03	0,04	5	0,003	0,005	0,025	0,032	0,028	4,0E-04	11,8	29,1	
1/2-6-B	73,5	55	0,03	0,04	5	0,002	0,006	0,023	0,034	0,029	4,1E-04	11,8	28,9	
1/3-5-B	73,6	55	0,03	0,03	5	0,003	0,004	0,024	0,030	0,027	3,8E-04	11,8	30,9	31,5
1/3-6-A	73,8	60	0,04	0,03	5	0,004	0,001	0,031	0,024	0,028	4,0E-04	12,9	32,3	
1/3-6-B	73,7	60	0,03	0,03	5	0,004	0,004	0,029	0,029	0,029	4,1E-04	12,9	31,3	
2/2-5-B	73,9	65	0,03	0,04	5	0,002	0,005	0,029	0,034	0,032	4,5E-04	14,0	31,0	32,0
2/2-6-A	74,0	65	0,03	0,04	5	0,003	0,005	0,026	0,031	0,028	4,0E-04	13,9	34,8	
2/2-6-B	74,0	65	0,03	0,04	5	0,003	0,006	0,031	0,034	0,032	4,6E-04	14,0	30,3	
2/3-5-B	73,9	70	0,04	0,04	5	0,004	0,004	0,033	0,034	0,034	4,8E-04	15,2	31,6	31,9
2/3-6-A	73,9	70	0,04	0,04	5	0,004	0,003	0,032	0,036	0,034	4,9E-04	15,1	31,0	
2/3-6-B	73,8	70	0,04	0,03	5	0,005	0,003	0,034	0,030	0,032	4,6E-04	15,2	33,3	
P2/2-5-B	74,0	65	0,03	0,04	5	0,003	0,006	0,026	0,038	0,032	4,6E-04	13,9	30,5	29,4
P2/2-6-A	73,9	65	0,04	0,04	5	0,004	0,003	0,033	0,034	0,033	4,8E-04	14,0	29,4	
P2/2-6-B	74,1	65	0,03	0,04	5	0,003	0,006	0,030	0,039	0,035	4,9E-04	13,9	28,2	
P2/3-5-B	74,1	80	0,03	0,05	5	0,001	0,006	0,032	0,044	0,038	5,4E-04	17,4	32,1	32,1
P2/3-6-A	74,1	80	0,04	0,04	5	0,005	0,003	0,039	0,035	0,037	5,3E-04	17,4	32,7	
P2/3-6-B	74,2	80	0,04	0,05	5	0,003	0,006	0,036	0,041	0,039	5,5E-04	17,3	31,5	

Dynamické moduly pružnosti z rezonanční metody

Tab.A. 2 Dynamické moduly pružnosti stanovené rezonanční metodou na vývrtech

vývrt	f_L [Hz]	f_r [Hz]	f_t [Hz]	E_{crL} [GPa]	$E_{crL} - m_x$	i	i/L	C_1	E_{crf} [GPa]	$E_{crf} - m_x$
R5-A	11734	7326	7638	28,9	28,60	18,5	0,12	2,103	30,6	30,46
R5-B	12963	8490	8662	27,4		18,5	0,14	2,478	29,8	
R6-A	11993	7434	7940	30,0		18,5	0,12	2,103	31,5	
R6-B	12596	8026	8414	28,2		18,5	0,13	2,287	29,9	
0/1-5-A	12478	7714	8296	31,9	31,71	18,5	0,12	2,103	33,2	34,01
0/1-5-B	12984	8220	8576	31,7		18,5	0,13	2,287	34,5	
0/1-6-A	13998	7423	7617	-		-	-	-	-	
0/1-6-B	13998	9126	9374	31,5		18,5	0,14	2,478	34,4	
0/2-5-A	12990	8230	8751	30,4	33,73	18,5	0,13	2,287	31,4	35,67
0/2-5-B	13049	8091	8673	35,3		18,5	0,12	2,103	37,3	
0/2-6-A	12790	7908	8436	34,6		18,5	0,12	2,103	36,4	
0/2-6-B	13480	8608	9158	34,6		18,5	0,13	2,287	37,6	
0/3-5-A	13114	8048	8533	35,3	35,35	18,3	0,12	2,103	36,8	37,07
0/3-5-B	13146	8080	8673	35,9		18,3	0,12	2,103	37,7	
0/3-6-A	12974	7994	8576	34,9		18,3	0,12	2,103	36,9	
0/3-6-B	13038	7994	8651	35,3		18,3	0,12	2,103	36,9	
1/1-5-A	12510	7714	8210	32,8	33,17	18,3	0,12	2,103	34,6	34,95
1/1-5-B	12726	7843	8414	33,3		18,3	0,12	2,103	35,2	
1/1-6-A	12510	7725	8317	33,1		18,4	0,12	2,103	35,0	
1/1-6-B	12586	7735	8447	33,4		18,4	0,12	2,103	35,1	
1/2-5-A	12295	7552	8210	32,4	32,98	18,4	0,12	2,103	33,8	34,39
1/2-5-B	12575	7714	8242	33,5		18,4	0,12	2,103	35,1	
1/2-6-A	12489	7649	8113	33,0		18,4	0,12	2,103	34,1	
1/2-6-B	12553	7718	8350	33,0		18,4	0,12	2,103	34,5	
1/3-5-A	12941	7908	8522	35,9	36,08	18,4	0,12	2,103	36,9	37,10
1/3-5-B	13168	8037	8641	36,5		18,4	0,12	2,103	37,5	
1/3-6-A	13028	7994	8630	35,9		18,4	0,12	2,103	37,1	
1/3-6-B	13125	7994	8576	36,0		18,4	0,12	2,103	36,8	
2/2-5-A	13081	8113	8587	36,0	37,09	18,5	0,12	2,103	38,0	37,25
2/2-5-B	13877	7984	8533	41,3		18,5	0,12	2,103	37,5	
2/2-6-A	13006	8026	8651	35,5		18,5	0,12	2,103	36,9	
2/2-6-B	12866	7886	8393	35,6		18,5	0,12	2,103	36,6	
2/3-5-A	13222	8059	8705	37,1	36,75	18,5	0,12	2,103	37,8	37,76
2/3-5-B	13092	8026	8641	36,4		18,5	0,12	2,103	37,6	
2/3-6-A	13038	7940	8587	36,6		18,5	0,12	2,103	37,1	
2/3-6-B	13157	8113	8684	36,8		18,5	0,12	2,103	38,5	
P2/2-5-A	12812	7822	8457	33,2	33,62	18,5	0,12	2,103	33,9	34,83
P2/2-5-B	12834	7972	8501	34,6		18,5	0,12	2,103	36,5	
P2/2-6-A	12618	7681	8360	33,2		18,5	0,12	2,103	33,8	
P2/2-6-B	12747	7897	8425	33,5		18,5	0,12	2,103	35,1	
P2/3-5-A	13211	8080	8554	35,7	36,02	18,5	0,12	2,103	36,5	36,85
P2/3-5-B	13340	8210	8835	36,1		18,5	0,12	2,103	37,4	
P2/3-6-A	13286	8134	8673	36,5		18,5	0,12	2,103	37,2	
P2/3-6-B	13308	8145	8716	35,7		18,6	0,12	2,103	36,3	

Tab.A. 3 Dynamické moduly pružnosti stanovené rezonanční metodou na hranolech

hranol	f_L [Hz]	f_f [Hz]	f_t [Hz]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
0/3-1	5051	2198	2999	37,15	37,43	15,49
0/3-2	5038	2192	3005	36,73	36,84	15,46
0/3-3	5045	2186	2999	36,91	36,95	15,43
1/2-1	4949	2157	2963	35,65	36,07	15,12
1/2-2	4922	2157	2951	35,31	36,02	15,01
1/2-3	9647	6549	5893	33,47	38,12	14,77
1/3-1	5063	2216	3028	37,02	37,50	15,66
1/3-2	5081	2210	3023	37,57	37,91	15,76
1/3-3	5033	2186	2999	36,57	36,59	15,36
2/2-1	5081	2216	3052	38,17	39,14	16,27
2/2-2	5110	2210	3046	38,73	39,13	16,24
2/2-3	10087	6740	6109	36,73	42,00	16,13
2/3-1	5021	2180	3011	36,71	36,81	15,62
2/3-2	5039	2216	3005	36,87	37,82	15,51
2/3-3	5039	2192	3005	36,84	37,01	15,50
P2/2-1	5009	2204	3011	35,9	37,09	15,35
P2/2-2	5033	2192	3017	35,9	36,29	15,27
P2/2-3	9962	6649	6009	34,3	39,77	14,74
P2/3-1	5140	2222	3046	38,26	38,14	15,89
P2/3-2	5134	2216	3058	38,18	37,88	16,04
P2/3-3	10319	6873	6225	37,14	40,42	15,99

Dynamické moduly pružnosti z ultrazvukové metody

Tab.A. 4 Dynamické moduly pružnosti stanovené ultrazvukovou metodou na vývrtech

vývrt	v			v_prům	Ec	mx	sx
R5-A	3970,6	3878,3	3901,0	3916,6	32,11	32,87	0,54
R5-B	4072,2	3942,8	4017,0	4010,7	33,19		
R6-A	4060,3	3987,7	3990,3	4012,8	33,30		
R6-B	4110,3	3996,7	4022,4	4043,2	32,89		
0/1-5-A	4227,3	4230,3	4281,5	4246,4	36,88	36,01	0,59
0/1-5-B	4207,3	4210,4	4105,1	4174,3	35,75		
0/1-6-A	4097,3	4119,7	4165,4	4127,5	35,80		
0/1-6-B	4210,0	4170,8	4263,5	4214,8	35,60		
0/2-5-A	4386,2	4345,2	4304,9	4345,4	39,38	39,05	0,62
0/2-5-B	4408,2	4408,2	4395,3	4403,9	39,75		
0/2-6-A	4296,6	4308,9	4284,4	4296,6	38,62		
0/2-6-B	4261,7	4249,0	4274,5	4261,7	38,44		
0/3-5-A	4390,5	4377,6	4429,4	4399,2	35,89	35,77	0,27
0/3-5-B	4419,6	4380,8	4355,4	4385,3	36,08		
0/3-6-A	4352,3	4365,0	4377,7	4365,0	35,46		
0/3-6-B	4429,1	4326,9	4364,7	4373,6	35,65		
1/1-5-A	4128,9	4174,9	4245,9	4183,2	36,75	36,82	0,29
1/1-5-B	4223,7	4235,6	4284,0	4247,8	37,18		
1/1-6-A	4146,0	4134,6	4180,6	4153,7	36,47		
1/1-6-B	4153,5	4199,9	4223,5	4192,3	36,87		
1/2-5-A	4149,2	4037,6	4149,2	4112,0	36,12	36,48	0,32
1/2-5-B	4114,9	4183,5	4183,5	4160,6	36,42		
1/2-6-A	4109,3	4225,1	4132,0	4155,4	36,49		
1/2-6-B	4132,0	4166,4	4285,4	4194,6	36,89		
1/3-5-A	4287,6	4312,2	4299,9	4299,9	39,65	39,26	0,33
1/3-5-B	4360,6	4298,1	4237,4	4298,7	38,87		
1/3-6-A	4261,9	4335,8	4310,9	4302,9	39,18		
1/3-6-B	4330,0	4419,1	4292,9	4347,3	39,35		
2/2-5-A	4328,1	4404,3	4417,2	4383,2	40,32	39,38	0,75
2/2-5-B	4217,7	4327,1	4302,3	4282,4	39,21		
2/2-6-A	4349,3	4287,1	4374,6	4337,0	39,48		
2/2-6-B	4208,7	4185,2	4330,0	4241,3	38,52		
2/3-5-A	4267,8	4367,0	4304,4	4313,1	39,39	39,25	0,36
2/3-5-B	4199,0	4307,3	4357,2	4287,9	38,90		
2/3-6-A	4135,0	4363,4	4276,4	4258,2	39,00		
2/3-6-B	4318,7	4343,6	4318,7	4327,0	39,70		
P2/2-5-A	4257,1	4245,1	4293,6	4265,2	36,63	37,08	0,40
P2/2-5-B	4140,4	4186,5	4294,1	4207,0	36,99		
P2/2-6-A	4200,0	4235,5	4247,5	4227,7	37,11		
P2/2-6-B	4294,3	4245,8	4294,3	4278,1	37,60		
P2/3-5-A	4315,9	4417,5	4391,7	4375,0	39,07	39,43	0,29
P2/3-5-B	4410,3	4410,3	4489,3	4436,6	39,74		
P2/3-6-A	4374,8	4413,4	4336,8	4375,0	39,57		
P2/3-6-B	4466,5	4388,2	4401,0	4418,6	39,34		

Tab.A. 5 Dynamické moduly pružnosti stanovené ultrazvukovou metodou na hranolech

hranol	V_{UZ1} [m/s]	V_{UZ2} [m/s]	V_{UZ3} [m/s]	v [m/s]	E_{cu} [GPa]	m_x [GPa]	s_x [GPa]
0/3-1	4501,3	4407,2	4368,8	4425,8	39,98	39,51	0,42
0/3-2	4478,7	4356,8	4337,9	4391,1	39,24		
0/3-3	4425,1	4371,9	4386,3	4394,4	39,29		
1/2-1	4337,5	4249,9	4337,5	4308,3	38,01	38,06	0,24
1/2-2	4378,8	4230,5	4275,7	4295,0	37,85		
1/2-3	4395,2	4235,6	4309,2	4313,3	38,31		
1/3-1	4455,8	4368,2	4401,9	4408,6	39,45	39,53	0,48
1/3-2	4511,6	4383,3	4388,1	4427,6	40,05		
1/3-3	4435,7	4377,5	4358,4	4390,5	39,11		
2/2-1	4489,1	4454,4	4499,1	4480,9	40,95	41,08	0,11
2/2-2	4529,7	4430,1	4484,3	4481,4	41,13		
2/2-3	4506,0	4397,0	4526,4	4476,5	41,15		
2/3-1	4489,1	4319,6	4519,5	4442,8	40,34	39,87	0,41
2/3-2	4402,4	4359,2	4446,5	4402,7	39,62		
2/3-3	4420,2	4357,6	4444,8	4407,5	39,64		
P2/2-1	4466,4	4298,8	4364,3	4376,5	38,33	38,64	0,40
P2/2-2	4483,2	4295,4	4399,4	4392,7	38,50		
P2/2-3	4465,3	4385,6	4375,8	4408,9	39,08		
P2/3-1	4492,4	4413,2	4477,3	4461,0	40,45	40,38	0,52
P2/3-2	4512,7	4403,5	4355,6	4424,0	39,84		
P2/3-3	4559,4	4446,2	4476,5	4494,0	40,86		

Tab.A. 6 Dynamické moduly pružnosti stanovené ultrazvukovou metodou na krychlích

krychle	v [km/s]			v prům [km/s]	Ecu [GPa]	mx [GPa]	sx [GPa]
R-1	4234,6	3903,8	4073,5	4,071	33,06	33,71	1,03
R-2	4356,0	3943,3	4028,1	4,109	33,69		
R-3	4355,8	3964,0	4038,8	4,120	33,86		
R-4	4163,3	3965,1	3986,2	4,038	32,54		
R-5	4140,6	3923,8	3986,4	4,017	32,20		
R-6	4304,3	4037,5	4184,1	4,175	34,79		
R-7	4423,3	4030,9	4200,3	4,218	35,50		
R-8	4342,8	3932,4	4093,6	4,123	33,92		
R-9	4331,4	3943,8	4072,4	4,116	33,80		
O/1-1	4433,7	4186,0	4306,3	4,309	37,07	36,15	0,68
O/1-2	4285,3	4189,5	4273,1	4,249	36,06		
O/1-3	4381,6	4221,1	4306,0	4,303	36,97		
O/1-4	4314,4	4014,4	4241,2	4,190	35,06		
O/1-5	4361,3	4121,7	4336,1	4,273	36,46		
O/1-6	4358,4	4176,8	4130,9	4,222	35,60		
O/1-7	4411,0	4120,2	4285,0	4,272	36,45		
O/1-8	4279,1	4160,3	4328,6	4,256	36,17		
O/1-9	4283,4	4164,4	4199,4	4,216	35,49		
O/2-1	4475,3	4435,7	4396,8	4,436	39,83	39,45	0,39
O/2-2	4474,6	4383,0	4395,9	4,418	39,50		
O/2-3	4459,5	4318,5	4420,1	4,399	39,17		
O/2-4	4505,4	4287,2	4452,1	4,415	39,45		
O/2-5	4474,0	4382,7	4395,5	4,417	39,49		
O/2-6	4478,6	4262,9	4387,2	4,376	38,76		
O/2-7	4487,9	4332,2	4382,9	4,401	39,20		
O/2-8	4614,1	4334,9	4411,1	4,453	40,14		
O/2-9	4499,7	4330,6	4420,1	4,417	39,48		
O/3-1	4457,4	4392,1	4405,0	4,418	39,68	39,74	0,54
O/3-2	4432,9	4406,9	4526,4	4,455	40,35		
O/3-3	4468,7	4364,4	4364,4	4,399	39,34		
O/3-4	4461,6	4370,6	4409,1	4,414	39,60		
O/3-5	4440,4	4375,4	4362,7	4,393	39,22		
O/3-6	4433,9	4356,5	4394,9	4,395	39,27		
O/3-7	4536,2	4351,6	4508,9	4,466	40,53		
O/3-8	4524,2	4417,4	4430,5	4,457	40,39		
O/3-9	4437,5	4322,7	4424,4	4,395	39,26		
1/1-1	4239,4	4122,6	4312,7	4,225	35,95	35,67	0,32
1/1-2	4249,2	4121,1	4285,5	4,219	35,84		
1/1-3	4242,4	4125,5	4242,4	4,203	35,58		
1/1-4	4204,9	4135,2	4264,8	4,202	35,55		
1/1-5	4278,6	4194,7	4242,2	4,238	36,18		
1/1-6	4196,1	4126,7	4243,6	4,189	35,34		
1/1-7	4293,1	4161,9	4208,7	4,221	35,89		
1/1-8	4178,1	4166,4	4189,8	4,178	35,16		
1/1-9	4219,4	4160,8	4219,4	4,200	35,52		
1/2-1	4328,2	4159,9	4291,0	4,260	37,07	37,00	0,31
1/2-2	4284,0	4200,3	4247,7	4,244	36,80		
1/2-3	4231,8	4172,8	4367,5	4,257	37,03		
1/2-4	4305,2	4220,3	4268,4	4,265	37,16		
1/2-5	4278,1	4147,8	4290,4	4,239	36,71		
1/2-6	4341,9	4195,9	4341,9	4,293	37,66		
1/2-7	4328,8	4114,7	4279,3	4,241	36,75		

1/2-8	4313,7	4169,5	4301,3	4,261	37,10		
1/2-9	4293,1	4161,9	4256,5	4,237	36,68		
1/3-1	4607,1	4378,1	4456,3	4,480	40,93	39,71	0,52
1/3-2	4523,6	4290,3	4365,3	4,393	39,35		
1/3-3	4484,4	4341,4	4444,5	4,423	39,90		
1/3-4	4502,1	4308,0	4383,6	4,398	39,44		
1/3-5	4540,0	4305,2	4380,7	4,409	39,63		
1/3-6	4470,6	4379,1	4341,0	4,397	39,42		
1/3-7	4446,1	4343,0	4406,9	4,399	39,45		
1/3-8	4525,4	4329,2	4431,7	4,429	39,99		
1/3-9	4388,6	4337,7	4440,7	4,389	39,28		
2/2-1	4491,0	4424,8	4504,5	4,473	40,77	40,22	0,34
2/2-2	4472,7	4355,7	4526,7	4,452	40,38		
2/2-3	4482,8	4339,9	4456,1	4,426	39,92		
2/2-4	4436,7	4309,2	4503,3	4,416	39,74		
2/2-5	4420,9	4344,1	4527,8	4,431	40,00		
2/2-6	4488,0	4370,3	4528,7	4,462	40,57		
2/2-7	4467,1	4388,7	4507,4	4,454	40,43		
2/2-8	4442,3	4377,6	4468,8	4,430	39,98		
2/2-9	4488,8	4333,1	4502,3	4,441	40,19		
2/3-1	4505,4	4374,1	4412,6	4,431	40,08	39,70	0,55
2/3-2	4384,8	4372,1	4449,7	4,402	39,57		
2/3-3	4474,8	4435,1	4422,0	4,444	40,32		
2/3-4	4450,6	4385,5	4517,6	4,451	40,46		
2/3-5	4404,4	4417,4	4378,7	4,400	39,53		
2/3-6	4425,1	4286,0	4360,8	4,357	38,77		
2/3-7	4438,6	4438,6	4386,7	4,421	39,91		
2/3-8	4410,7	4359,4	4423,7	4,398	39,49		
2/3-9	4434,9	4307,5	4395,9	4,379	39,16		
P2/2-1	4334,2	4272,5	4108,6	4,238	36,06	37,42	0,67
P2/2-2	4385,2	4260,7	4372,4	4,339	37,80		
P2/2-3	4343,9	4331,4	4318,9	4,331	37,66		
P2/2-4	4308,5	4333,4	4371,3	4,338	37,77		
P2/2-5	4409,6	4345,7	4345,7	4,367	38,28		
P2/2-6	4319,9	4222,5	4332,4	4,292	36,97		
P2/2-7	4370,7	4295,6	4307,9	4,325	37,55		
P2/2-8	4375,5	4300,3	4350,1	4,342	37,85		
P2/2-9	4342,8	4220,8	4293,1	4,286	36,87		
P2/3-1	4343,5	4356,1	4356,1	4,352	38,50	38,82	0,40
P2/3-2	4344,3	4421,2	4331,8	4,366	38,74		
P2/3-3	4365,0	4429,6	4429,6	4,408	39,50		
P2/3-4	4347,5	4335,0	4335,0	4,339	38,27		
P2/3-5	4309,8	4398,2	4398,2	4,369	38,80		
P2/3-6	4392,4	4366,8	4354,1	4,371	38,84		
P2/3-7	4397,5	4371,9	4436,5	4,402	39,39		
P2/3-8	4356,7	4344,1	4356,7	4,352	38,51		
P2/3-9	4355,5	4381,0	4381,0	4,373	38,86		

Tab.A. 7 Hloubka přirozené karbonátace ve stáří vzorků 10-12 let na krychlích [mm]

krychle	dno krychle			bok krychle			vrch krychle			bok krychle			m_x	m_x	s_x	V_x
R-3	10	15	9	10	12	15	14	16	18	18	19	16	14,1	14,1	4,7	0,3
	8	7	18	16	18	17	18	16	16	9	14	9				
R-4	16	7	7	10	7	9	18	19	21	20	18	19	14,0			
	7	6	15	22	18	20	18	17	17	11	7	8				
0/1-3	8	6	10	19	11	12	15	14	15	13	6	11	11,2	11,4	3,1	0,3
	9	5	7	8	6	11	18	15	15	11	11	12				
0/1-4	11	8	9	11	15	8	11	13	12	12	10	14	11,7			
	10	8	12	11	15	11	14	11	14	13	16	12				
0/2-3	6	6	4	5	4	7	6	8	9	11	6	8	6,7	7,1	2,7	0,4
	3	6	4	8	9	6	14	9	9	7	3	2				
0/2-4	8	10	6	4	9	6	14	9	9	7	3	2	7,6			
	6	10	6	6	9	8	9	8	11	7	6	9				
0/3-3	3	2	2	4	3	9	8	4	22	4	2	3	5,4	5,3	4,5	0,9
	5	1	1	4	3	1	4	9	21	5	2	7				
0/3-4	1	6	4	7	8	9	8	12	5	2	1	3	5,1			
	4	5	1	2	1	2	6	4	10	12	5	5				
1/1-3	5	7	8	8	9	13	11	10	8	4	2	2	7,3	7,4	2,8	0,4
	8	5	4	3	5	2	10	11	11	10	11	9				
1/1-4	7	8	8	10	11	9	9	8	7	10	2	3	7,4			
	7	7	8	4	3	7	7	8	9	9	7	9				
1/2-3	4	5	4	7	9	6	6	8	6	3	1	3	5,3	5,3	2,0	0,4
	4	6	3	1	2	5	5	9	8	8	7	7				
1/2-4	3	3	4	7	7	5	7	5	4	6	9	6	5,3			
	6	3	2	6	4	7	4	5	6	6	6	5				
1/3-3	4	4	2	3	4	4	4	6	5	4	6	9	4,3	4,6	1,9	0,4
	3	5	3	6	6	5	4	4	3	3	4	3				
1/3-4	4	4	3	3	3	2	5	7	10	6	5	6	4,9			
	3	6	4	7	6	9	6	7	4	2	3	2				
2/2-3	4	8	5	5	10	6	5	12	5	2	4	3	5,4	5,4	2,3	0,4
	4	7	5	2	1	2	3	12	6	7	6	5				
2/2-4	4	3	3	7	6	4	5	5	6	3	6	8	5,4			
	4	4	4	8	5	6	6	6	4	7	7	8				
2/3-3	0	4	2	1	1	0	3	3	1	3	1	2	1,9	1,9	1,2	0,6
	0	1	2	2	2	3	6	3	2	1	3	0				
2/3-4	1	3	1	1	2	1	4	3	2	2	1	3	1,9			
	1	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	0				
P2/2-3	2	3	2	4	8	5	5	7	5	3	2	1	4,1	4,4	2,7	0,6
	1	3	1	4	6	5	8	7	6	2	6	2				
P2/2-4	2	3	5	4	8	6	5	10	10	2	1	1	4,7			
	3	4	2	2	1	2	11	7	6	7	7	3				
P2/3-3	2	1	3	4	2	3	2	4	3	1	2	1	2,5	2,4	1,1	0,5
	1	5	3	2	2	1	3	4	2	3	1	4				
P2/3-4	1	2	2	4	2	3	3	3	3	2	1	2	2,4			
	2	3	1	2	1	1	3	3	4	3	5	2				

Tab.A. 8 Hloubka přirozené karbonátace ve stáří vzorků 10-12 let na hranolech [mm]

hranoly	dno			bok			vrch			bok			m_x	m_x	s_x	V_x
0/3-1	4	3	2	3	2	4	5	8	5	7	5	4	4,5	4,4	2,0	0,45
	2	2	5	4	10	5	8	7	4	4	2	2				
0/3-2	5	5	0	5	6	5	4	6	4	8	8	7	4,9			
	4	0	4	7	9	5	5	4	5	5	3	4				
0/3-3	5	5	2	4	2	1	5	5	6	3	3	4	3,8			
	3	5	4	4	6	2	5	5	4	2	3	2				
1/2-1	6	6	6	10	7	9	8	8	6	8	6	5	7,0			
	7	6	6	5	6	6	5	8	8	10	9	7				
1/2-2	3	2	3	6	7	7	7	7	6	8	4	4	5,1			
	5	2	3	1	5	6	5	7	6	7	6	5				
1/2-3	3	4	7	1	7	7	6	6	6	4	5	8	5,4			
	3	5	4	4	6	4	5	5	6	8	11	4				
1/3-1	3	2	3	4	5	4	4	5	4	5	3	1	3,3			
	3	0	2	2	1	2	5	3	4	3	5	7				
1/3-2	4	2	2	3	3	4	6	4	5	4	1	2	3,2			
	3	5	1	0	0	1	4	6	6	5	4	2				
1/3-3	3	1	2	3	4	5	6	9	5	4	2	3	3,8			
	2	3	1	4	2	4	4	8	7	5	3	2				
2/2-1	4	3	4	3	2	3	6	4	6	7	4	7	5,1			
	5	2	5	7	6	8	5	5	7	6	5	8				
2/2-2	0	5	3	2	6	4	8	6	6	5	2	1	4,1			
	4	3	5	5	4	3	6	5	4	6	2	3				
2/2-3	2	4	3	4	3	2	7	3	4	5	6	2	4,0			
	2	4	0	3	7	5	4	8	5	5	7	2				
2/3-1	0	1	2	2	1	1	5	3	4	5	3	2	2,1			
	0	0	1	3	3	0	4	5	2	3	0	1				
2/3-2	3	0	0	2	1	0	3	3	5	3	5	4	2,1			
	0	2	1	5	3	0	4	3	2	2	0	0				
2/3-3	0	0	0	0	6	1	5	3	4	0	1	5	2,0			
	0	1	0	0	1	3	4	5	2	1	0	6				
P2/2-1	0	0	1	3	2	4	4	7	4	4	0	2	2,8			
	2	1	1	4	1	2	4	5	5	3	3	4				
P2/2-2	2	1	0	3	4	6	4	4	2	3	1	2	2,7			
	7	0	2	3	2	0	3	4	3	4	3	2				
P2/2-3	7	8	6	7	7	5	7	6	6	6	3	4	5,9			
	8	6	6	5	4	4	6	6	8	7	5	5				
P2/3-1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0,4			
	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1				
P2/3-2	0	1	0	0	0	0	1	1	3	1	0	0	0,6			
	0	0	0	0	0	2	3	1	1	0	0	0				
P2/3-3	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	1	0	0,4			
	0	0	0	0	2	0	1	0	1	0	1	0				

Tab.A. 9 Hloubka přirozené karbonátace ve stáří vzorků 10-12 let na vývrtech z krychlí [mm]

vývrt	horní okraj			dolní okraj			m_x	m_x	s_x	V_x
R5-A	15	9	19	15	16	17	15,2	16,3	2,8	0,17
	14	12	16	18	15	16				
R6-A	18	17	14	21	17	19	17,3			
	14	14	21	18	16	19				
0/1-5-A	14	10	14	11	9	10	12,1	12,0	2,2	0,19
	14	12	15	13	12	11				
0/1-6-A	13	11	9	16	9	9	11,8			
	10	12	16	10	13	14				
0/2-5-A	9	8	5	9	7	8	7,4	7,0	1,8	0,25
	7	10	7	8	5	6				
0/2-6-A	11	5	7	6	4	8	6,7			
	5	9	7	7	6	5				
0/3-5-A	6	6	8	9	5	6	6,7	6,3	1,7	0,28
	7	5	6	9	6	7				
0/3-6-A	7	6	10	6	4	5	5,9			
	6	8	7	5	2	5				
1/1-5-A	9	6	9	9	6	10	9,0	9,0	1,6	0,18
	10	9	10	12	8	10				
1/1-6-A	10	7	8	9	12	9	9,1			
	8	10	7	10	8	11				
1/2-5-A	6	10	8	8	6	8	7,3	6,8	1,2	0,18
	7	5	8	7	8	7				
1/2-6-A	7	8	6	5	6	6	6,3			
	7	6	7	6	5	6				
1/3-5-A	4	7	4	3	5	4	4,6	4,0	1,2	0,31
	4	5	6	4	6	3				
1/3-6-A	4	3	4	5	4	5	3,5			
	3	2	3	4	3	2				
2/2-5-A	6	5	3	5	3	2	3,9	4,0	1,4	0,35
	4	5	4	3	4	3				
2/2-6-A	3	4	2	3	4	4	4,0			
	6	8	3	3	3	5				
2/3-5-A	2	1	0	2	1	1	1,4	1,5	1,1	0,74
	2	1	0	4	1	2				
2/3-6-A	2	3	1	1	2	1	1,7			
	3	2	4	1	0	0				
P2/2-5-A	3	2	1	2	1	4	1,9	2,3	1,0	0,44
	2	1	1	3	1	2				
P2/2-6-A	2	4	3	3	1	4	2,7			
	2	3	2	2	3	3				
P2/3-5-A	0	1	0	0	1	0	0,7	0,8	0,7	0,83
	1	0	1	1	1	2				
P2/3-6-A	2	1	2	1	0	0	0,9			
	1	1	1	1	0	1				

HLOUBKA KARBONATACE PO ZKOUŠCE ZRYCHLENÉ KARBONATACE

Tab.A. 10 Hloubka karbonatice na krychlích po 28 dnech v karbonatační komoře [mm]

krychle	dno			bok			vrch			bok			m_x	s_x	V_x
R-1	56	48	63	53	49	55	55	51	56	54	52	59	54,3	4,47	0,08
	54	48	55	54	49	56	67	53	58	53	50	55			
0/1-1	24	28	18	23	32	29	23	25	37	34	31	36	29,1	5,30	0,18
	27	29	24	34	31	31	38	36	28	31	29	21			
0/2-1	12	10	12	11	16	17	16	19	12	13	18	14	14,6	3,10	0,21
	12	15	9	19	15	16	14	20	17	19	13	12			
0/3-1	6	9	9	7	16	7	20	10	15	9	11	6	11,0	5,23	0,48
	12	8	5	7	11	9	9	27	14	13	18	6			
1/1-1	17	19	16	21	27	25	18	23	29	23	18	16	21,3	4,57	0,22
	18	12	21	17	22	26	25	30	19	21	27	20			
1/2-1	10	12	9	10	16	15	13	16	40	12	19	10	13,2	2,89	0,22
	11	11	14	11	17	14	38	16	14	17	14	9			
1/3-1	4	9	5	8	7	5	7	11	5	10	4	9	6,9	2,84	0,41
	6	4	3	2	10	6	13	5	6	7	9	11			
2/2-1	6	10	11	7	7	12	7	16	8	10	8	9	8,9	2,47	0,28
	9	11	10	6	8	8	6	10	7	7	13	7			
2/3-1	1	0	1	1	2	3	3	6	4	3	3	4	2,6	1,79	0,68
	1	0	1	3	2	5	7	3	4	3	1	2			
P2/2-1	4	2	1	9	4	6	8	6	27	11	6	7	6,1	2,97	0,49
	3	1	5	5	8	9	8	5	12	8	4	9			
P2/3-1	1	0	1	3	1	1	6	3	2	3	1	1	2,2	1,40	0,65
	1	2	2	3	1	1	3	5	3	2	3	3			

Tab.A. 11 Hloubka karbonatce na krychlích po 90 dnech v karbonatační komoře [mm]

krychle	dno			bok			vrch			bok			m_x	s_x	V_x
R-1	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75,0	0	0
	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75			
0/1-1	36	31	29	34	34	42	34	39	44	28	31	38	35,7	5,05	0,14
	37	33	32	29	31	41	44	37	43	34	33	43			
0/2-1	12	23	21	18	12	14	16	15	20	16	10	17	16,3	4,13	0,25
	11	19	24	16	11	23	18	15	16	19	10	14			
0/3-1	7	16	9	7	5	7	11	12	17	7	7	9	9,6	3,74	0,39
	7	17	9	9	6	9	11	16	13	6	6	7			
1/1-1	19	22	18	20	18	24	24	24	22	15	17	19	20,1	3,72	0,19
	13	22	16	18	19	15	24	27	23	26	17	20			
1/2-1	12	15	14	17	11	16	15	18	15	15	9	11	14,1	2,60	0,18
	14	13	16	9	11	15	17	17	16	13	17	12			
1/3-1	4	3	4	7	13	7	7	12	8	8	4	6	6,7	2,73	0,41
	3	3	5	5	10	5	7	10	7	6	7	9			
2/2-1	8	12	11	8	11	14	8	13	10	8	7	13	10,6	2,95	0,28
	12	16	17	8	7	12	13	8	12	9	12	6			
2/3-1	5	1	2	7	6	4	7	4	3	6	4	2	4,7	3,23	0,69
	2	2	4	2	6	4	2	16	3	4	6	10			
P2/2-1	7	4	8	5	5	4	6	13	10	12	7	5	7,4	2,99	0,41
	7	4	10	8	10	6	6	15	9	6	5	5			
P2/3-2	0	0	1	3	6	4	2	3	3	3	1	5	3,0	1,81	0,61
	1	1	2	3	2	5	3	4	6	4	6	3			

D. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ – EXPERIMENT Č. 2 MRAZUVZDORNOST

Tab.A. 12 Moduly pružnosti vývrtů přirozeně vlhkých

vývrt	f_L	f_f	E_{crL}		E_{crf}		v_L			E_{cu}	
	[Hz]	[Hz]	[GPa]		[GPa]		[km/s]			[GPa]	
A01	12406	7227	42,1	43,7	45,3	46,0	4,8	4,8	4,8	49,5	51,3
A02	12850	7372	45,4		47,4		4,9	4,9	4,9	52,4	
A03	12628	7188	43,7		45,2		4,9	4,8	4,9	52,0	
A04	12657	7188	44,4	43,9	45,5	45,2	4,9	4,8	4,8	51,2	51,0
A05	12435	7111	42,4		44,0		4,7	4,8	4,8	48,9	
A06	12705	7227	44,9		46,1		4,9	4,8	4,9	52,8	
A07	12599	7227	43,9	44,2	46,0	45,9	4,9	4,9	4,8	51,2	51,9
A08	12792	7256	45,4		46,3		4,9	5,0	4,9	53,4	
A09	12522	7198	43,2		45,4		4,8	4,9	4,9	51,1	
A10	12802	7217	45,2	44,4	45,8	45,1	5,0	4,9	4,9	53,6	52,0
A11	12715	7188	44,9		45,6		4,9	4,9	4,9	52,9	
A12	12551	7111	43,0		43,9		4,8	4,8	4,8	49,5	
A13	12493	7237	42,8	43,5	45,6	45,1	4,8	4,8	4,8	50,9	50,9
A14	12522	7130	42,7		43,9		4,7	4,7	4,8	49,0	
A15	12734	7217	44,9		45,8		4,9	4,8	5,0	52,8	
A16	12705	7217	44,5	44,1	45,6	45,5	4,9	4,8	4,9	51,6	51,0
A17	12638	7285	44,0		46,6		4,8	4,9	4,9	51,8	
A18	12638	7130	43,9		44,4		4,8	4,8	4,7	49,8	
A19	12580	7150	43,0	43,0	43,9	44,3	4,8	4,7	4,8	49,4	50,5
A20	12531	7217	43,0		45,3		4,8	4,9	4,8	50,8	
A21	12599	7111	42,9		43,5		4,9	4,9	4,9	51,3	
B01	14500	9326	35,6	35,1	37,7	37,9	4,5	4,5	4,6	41,7	40,9
B02	14260	9402	34,2		37,9		4,5	4,4	4,5	40,9	
B03	15065	9913	35,5		38,0		4,5	4,4	4,4	40,1	
B04	14967	9804	36,0	35,8	38,8	38,0	4,5	4,5	4,4	40,8	40,5
B05	14598	9239	36,1		37,2		4,5	4,4	4,4	40,8	
B06	14652	9543	35,4		38,0		4,4	4,4	4,5	39,9	
B07	14424	9326	35,0	35,0	37,5	37,5	4,5	4,5	4,4	40,5	40,0
B08	14707	9576	35,2		37,5		4,4	4,4	4,4	39,6	
B09	14424	9337	35,0		37,7		4,4	4,4	4,4	39,8	
B10	14424	9163	36,4	35,4	38,2	37,8	4,4	4,4	4,4	40,0	40,2
B11	14565	9554	34,2		37,1		4,5	4,5	4,4	40,4	
B12	14130	8989	35,7		38,1		4,4	4,4	4,5	40,4	
B13	14620	9522	34,8	35,2	37,3	36,8	4,4	4,4	4,4	39,9	40,3
B14	14543	9196	35,5		36,4		4,5	4,5	4,5	41,0	
B15	14326	9098	35,4		36,9		4,4	4,5	4,4	40,1	
B16	14304	9250	34,9	34,9	37,6	37,4	4,4	4,4	4,5	40,4	40,4
B17	14848	9685	34,8		36,8		4,5	4,5	4,5	41,2	
B18	14446	9359	35,0		37,6		4,4	4,4	4,3	39,6	
B19	15217	10109	35,0	34,9	37,5	37,2	4,5	4,4	4,4	40,4	40,0
B20	14554	9533	34,5		37,3		4,4	4,4	4,4	39,6	
B21	15109	9837	35,3		36,9		4,4	4,4	4,5	39,9	
C01	10097	5034	41,5	39,1	42,2	42,3	4,6	4,6	4,6	44,4	44,2
C02	9190	4976	35,1		43,0		4,6	4,6	4,6	44,5	
C03	9923	4937	40,6		41,6		4,6	4,6	4,6	43,8	
C04	10000	4976	41,1	40,9	42,1	41,9	4,6	4,6	4,6	44,2	44,1
C05	9855	4879	40,5		41,4		4,6	4,6	4,6	43,7	
C06	9952	4947	41,2		42,3		4,6	4,6	4,6	44,3	

C07	10039	4957	41,6	41,1	42,2	41,8	4,6	4,6	4,6	44,8	44,3
C08	9903	4908	40,4		41,1		4,6	4,6	4,6	43,6	
C09	9971	4928	41,4		42,0		4,6	4,6	4,6	44,6	
C10	9865	4899	40,7	41,0	41,8	42,2	4,6	4,6	4,6	44,2	44,4
C11	9952	4966	40,7		42,1		4,6	4,6	4,6	44,0	
C12	10019	4995	41,5		42,7		4,6	4,6	4,6	45,0	
C13	9923	4947	40,8	40,9	42,2	41,7	4,6	4,6	4,6	44,5	44,3
C14	9990	4947	41,5		42,4		4,6	4,6	4,6	44,3	
C15	9971	4947	40,4		40,7		4,6	4,6	4,6	44,2	
C16	9971	4947	41,1	41,1	42,1	41,9	4,6	4,6	4,6	44,5	44,3
C17	10077	4986	41,4		41,5		4,6	4,6	4,6	43,8	
C18	9942	4957	40,8		42,0		4,6	4,6	4,6	44,5	
C19	9874	4908	40,7	40,1	41,8	40,6	4,6	4,6	4,6	44,2	43,4
C20	9903	4908	40,7		41,7		4,6	4,6	4,6	43,9	
C21	9990	4976	38,9		38,4		4,6	4,6	4,6	42,3	

Tab.A. 13 Dynamické moduly vývrtů před zkouškou mrazuvzdornosti - 0 cyklů

	f _L	f _F	EcrL		Ecrf		vL			Ecu,UZ	
	[Hz]	[Hz]	[GPa]		[GPa]		[km/s]			[GPa]	
A01	11504	6544	35,1	36,6	36,1	36,97	4,5	4,5	4,5	42,3	44,74
A02	11983	6765	38,4		38,8		4,7	4,7	4,7	46,5	
A03	11695	6516	36,4		36,0		4,6	4,7	4,6	45,4	
A04	11177	6448	33,5	33,2	35,5	34,43	4,3	4,3	4,4	39,8	39,63
A05	10899	6295	31,5		33,4		4,2	4,2	4,2	37,2	
A06	11350	6343	34,7		34,4		4,5	4,4	4,3	41,9	
A07	12194	6938	40,5	40,5	41,7	40,67	4,7	4,7	4,8	48,3	48,96
A08	12319	6880	41,4		41,0		4,8	4,9	4,8	50,5	
A09	12079	6755	39,6		39,4		4,8	4,7	4,8	48,1	
A10	12271	6755	41,2	40,0	39,8	38,79	4,8	4,9	4,9	51,6	50,63
A11	12146	6717	40,6		39,6		4,9	4,9	5,0	53,0	
A12	11887	6554	38,2		37,0		4,6	4,7	4,7	47,3	
A13	12031	6755	39,8	40,5	39,9	40,39	4,8	4,8	4,7	50,2	50,76
A14	12031	6727	39,6		39,2		4,7	4,7	4,8	49,1	
A15	12329	6909	42,2		42,1		4,9	4,8	5,0	53,0	
A16	12501	7082	43,6	43,4	44,4	45,12	4,9	4,9	4,9	52,8	52,63
A17	12568	7216	44,0		46,3		5,0	4,9	4,9	53,7	
A18	12357	7110	42,5		44,7		4,9	4,8	4,8	51,3	
A19	12827	7379	45,6	45,9	47,8	48,34	5,0	5,0	5,1	55,8	56,57
A20	12827	7379	46,0		48,3		5,0	5,1	5,0	56,5	
A21	12942	7465	46,2		48,9		5,1	5,1	5,2	57,4	
B01	13626	8554	30,6	30,5	31,0	31,14	4,3	4,3	4,4	37,5	36,10
B02	13658	8640	30,6		31,2		4,3	4,2	4,3	36,1	
B03	14068	9104	30,2		31,3		4,1	4,2	4,2	34,7	
B04	13809	8964	29,8	29,2	31,5	30,70	4,1	4,0	4,1	32,9	32,50
B05	13237	8435	28,8		30,1		4,0	4,2	4,0	32,7	
B06	13432	8662	28,9		30,5		4,0	4,0	4,0	31,9	
B07	14036	8921	32,7	32,7	33,8	34,02	4,3	4,3	4,2	37,0	36,69

B08	14295	9223	32,8		34,3		4,3	4,2	4,3	36,8	
B09	14004	8921	32,5		33,9		4,2	4,2	4,2	36,2	
B10	14068	8835	34,4		35,3		4,4	4,5	4,4	40,5	
B11	14219	9083	32,4	33,8	33,4	34,64	4,4	4,4	4,4	39,5	40,12
B12	13906	8662	34,4		35,2		4,4	4,4	4,4	40,3	
B13	14522	9191	34,4		34,9		4,5	4,5	4,5	41,8	
B14	14284	8932	34,4	34,4	34,4	34,40	4,5	4,5	4,6	42,3	42,02
B15	14090	8716	34,3		33,9		4,5	4,5	4,5	42,0	
B16	14489	9126	36,3		37,1		4,6	4,5	4,6	43,4	
B17	14996	9676	36,7	36,4	38,0	37,58	4,6	4,6	4,6	44,7	43,49
B18	14565	9299	36,1		37,6		4,5	4,5	4,5	42,3	
B19	15993	10645	39,5		42,6		4,7	4,7	4,7	46,6	
B20	15393	10070	39,5	39,2	42,6	42,54	4,7	4,8	4,8	47,5	46,89
B21	15633	10441	38,7		42,5		4,7	4,7	4,8	46,6	
C01	9333	4528	34,2		33,0		4,3	4,4	4,4	38,3	
C02	9218	4499	34,2	33,9	34,0	33,09	4,4	4,3	4,4	38,5	38,23
C03	9141	4422	33,3		32,3		4,3	4,3	4,3	37,9	
C04	9554	4710	36,2		36,4		4,4	4,4	4,4	38,9	
C05	9439	4614	35,8	36,2	35,7	36,02	4,4	4,4	4,4	38,7	38,80
C06	9554	4652	36,6		36,0		4,4	4,4	4,4	38,8	
C07	9525	4614	36,8		36,0		4,5	4,5	4,5	41,6	
C08	9353	4566	35,4	36,3	34,9	35,64	4,4	4,4	4,4	40,1	40,93
C09	9468	4604	36,6		36,0		4,5	4,5	4,5	41,1	
C10	9362	4537	36,2		35,4		4,5	4,5	4,5	41,9	
C11	9535	4604	37,0	36,9	35,8	36,02	4,5	4,5	4,5	41,3	41,78
C12	9554	4662	37,3		36,8		4,5	4,5	4,5	42,2	
C13	9516	4662	37,3		37,3		4,5	4,5	4,5	42,1	
C14	9564	4710	37,8	37,4	38,2	37,23	4,5	4,5	4,5	42,3	42,03
C15	9564	4671	37,0		36,1		4,5	4,5	4,5	41,7	
C16	9707	4767	39,0		39,1		4,5	4,5	4,5	42,9	
C17	9765	4835	38,9	38,7	39,1	39,07	4,5	4,5	4,5	42,3	42,59
C18	9621	4777	38,2		39,0		4,5	4,5	4,5	42,6	
C19	9947	4978	41,6		43,3		4,5	4,6	4,6	44,2	
C20	9947	4998	41,3	41,0	43,6	42,32	4,5	4,6	4,5	43,5	43,37
C21	10101	5065	40,0		40,1		4,6	4,6	4,6	42,5	

Tab.A. 14 Dynamické moduly pružnosti po 25 cyklech

	f _L	f _F	EcrL		Ecrf		vL			Ecu,UZ	
	[Hz]	[Hz]	[GPa]		[GPa]		[km/s]			[GPa]	
A01	3926	2579	4,3	6,47	5,9	7,70	2,1	2,1	2,2	10,0	13,52
A02	6026	3567	10,2		11,3		3,0	2,9	3,0	19,7	
A03	4177	2553	4,9		5,8		2,1	2,5	2,0	10,9	
A04	3288	2140	3,1	3,05	4,1	3,99	1,2	1,5	1,5	4,3	5,12
A05	3145	2077	2,8		3,8		1,9	1,3	1,5	5,4	
A06	3423	2113	3,3		4,0		1,4	1,8	1,5	5,6	
A07	6394	3621	11,6	8,31	11,8	9,28	2,8	2,7	2,8	17,1	14,24
A08	4172	2747	4,9		6,8		2,1	2,2	2,0	9,9	
A09	5469	3213	8,4		9,3		2,8	2,6	2,6	15,7	
A10	7232	4256	14,7	14,80	16,3	16,00	3,1	3,3	3,2	23,3	24,20
A11	7828	4468	17,4		18,0		3,6	3,4	3,6	27,8	
A12	6640	3932	12,3		13,7		3,1	3,2	3,1	21,5	
A13	9150	5201	23,5	27,52	24,1	28,03	3,9	4,0	4,0	34,6	37,73
A14	10264	5808	29,3		29,7		4,2	4,3	4,2	39,7	
A15	10264	5808	29,8		30,3		4,1	4,2	4,2	38,9	
A16	11829	6710	39,4	40,15	40,2	41,48	4,8	4,7	4,8	50,8	49,42
A17	12253	7077	42,2		44,9		4,9	4,8	4,7	51,8	
A18	11756	6641	38,8		39,3		4,6	4,4	4,5	45,7	
A19	9526	5231	25,2	24,37	24,1	22,15	4,1	4,2	4,1	37,9	37,80
A20	9000	4636	22,7		19,1		4,0	4,1	4,0	36,6	
A21	9542	5142	25,2		23,3		4,2	4,3	4,2	38,9	
B01	14167	9218	34,7	34,69	37,6	37,52	4,5	4,4	4,4	41,4	41,22
B02	14167	9256	34,4		37,5		4,4	4,4	4,5	41,3	
B03	14795	9731	35,0		37,4		4,4	4,4	4,4	41,0	
B04	13719	9167	30,9	30,12	34,6	33,92	4,2	4,2	4,3	38,1	37,52
B05	13256	8756	30,3		34,0		4,2	4,3	4,3	38,1	
B06	13154	8808	29,1		33,1		4,2	4,2	4,2	36,4	
B07	14218	9218	34,8	34,73	37,4	37,31	4,5	4,5	4,4	41,6	41,33
B08	14436	9410	34,6		37,0		4,4	4,5	4,4	41,0	
B09	14231	9218	34,8		37,5		4,5	4,4	4,4	41,4	
B10	14231	9192	36,1	35,57	39,2	38,39	4,5	4,5	4,5	42,8	42,26
B11	14449	9449	34,4		37,1		4,5	4,5	4,5	41,5	
B12	14051	8974	36,1		38,8		4,5	4,4	4,5	42,5	
B13	14692	9551	35,9	35,34	38,4	37,95	4,5	4,4	4,5	42,0	42,74
B14	14192	9256	34,6		37,6		4,5	4,6	4,6	43,5	
B15	14192	9115	35,5		37,9		4,6	4,5	4,5	42,8	
B16	14436	9410	36,4	36,02	39,8	38,84	4,5	4,6	4,5	43,0	42,68
B17	14808	9679	35,4		37,6		4,5	4,6	4,5	43,0	
B18	14538	9436	36,3		39,1		4,5	4,5	4,5	42,1	
B19	15615	10474	37,6	38,04	41,2	41,43	4,6	4,6	4,6	44,1	44,26
B20	15179	9936	38,4		41,5		4,6	4,6	4,6	44,6	
B21	15500	10333	38,0		41,6		4,6	4,6	4,6	44,1	
C01	8592	4415	30,4	28,85	32,9	31,65	4,2	4,2	4,2	36,8	36,49

C02	7969	4150	26,8		30,3		4,1	4,1	4,1	36,0	
C03	8373	4277	29,3		31,7		4,2	4,2	4,1	36,7	
C04	9065	4577	34,2	34,63	36,1	36,55	4,1	4,1	4,1	36,0	36,59
C05	9065	4577	34,7		36,9		4,2	4,3	4,2	37,5	
C06	9112	4577	35,0		36,7		4,1	4,1	4,2	36,3	
C07	9504	4819	37,7	37,24	40,3	39,60	4,5	4,5	4,5	42,2	41,50
C08	9331	4738	36,3		38,7		4,4	4,3	4,4	40,8	
C09	9481	4773	37,8		39,8		4,5	4,4	4,4	41,5	
C10	9423	4773	37,4	37,66	40,0	40,07	4,4	4,4	4,4	41,6	41,77
C11	9423	4819	36,9		40,0		4,5	4,4	4,4	41,3	
C12	9619	4819	38,6		40,2		4,5	4,5	4,4	42,4	
C13	9458	4819	37,4	37,81	40,4	40,60	4,4	4,4	4,4	41,2	41,41
C14	9596	4865	38,6		41,3		4,5	4,5	4,4	42,0	
C15	9562	4888	37,5		40,1		4,4	4,4	4,4	41,0	
C16	9723	4888	39,4	39,36	41,4	41,44	4,5	4,5	4,5	42,6	42,57
C17	9781	4949	39,3		41,2		4,5	4,5	4,5	42,5	
C18	9735	4922	39,4		41,7		4,5	4,5	4,5	42,7	
C19	9735	4922	39,8	39,41	42,3	41,50	4,6	4,5	4,5	42,8	42,27
C20	9804	4946	40,2		42,7		4,5	4,5	4,5	42,9	
C21	9873	5027	38,3		39,5		4,5	4,5	4,5	41,1	

Tab.A. 15 Dynamické moduly pružnosti po 50 cyklech

	f_L	f_R	EcrL		Ecrf		vL			Ecu	
	[Hz]	[Hz]	[GPa]		[GPa]		[km/s]			[GPa]	
A01	688	297	0,1	1,09	0,1	1,67	0,2	0,2	0,2	0,1	2,66
A02	3228	2302	2,9		4,7		1,6	2,1	1,9	7,8	
A03	807	450	0,2		0,2		0,2	0,2	0,2	0,1	
A04	1249	841	0,4	0,47	0,6	0,58	0,2	0,2	0,2	0,1	0,10
A05	1453	798	0,6		0,6		0,2	0,2	0,2	0,1	
A06	1147	764	0,4		0,5		0,2	0,2	0,2	0,1	
A07	1674	1181	0,8	1,34	1,3	2,06	1,5	1,4	1,5	4,9	5,38
A08	1674	1181	0,8		1,3		1,5	1,4	1,4	4,5	
A09	2922	2013	2,4		3,6		1,9	1,5	1,9	6,8	
A10	5318	2999	8,0	7,97	8,1	8,13	2,6	2,8	2,5	15,7	15,89
A11	6529	3682	12,1		12,3		2,9	3,1	3,2	20,9	
A12	3682	2127	3,8		4,0		2,2	2,2	2,3	11,1	
A13	7590	4124	16,2	18,68	15,2	17,88	3,6	3,6	3,7	29,4	31,39
A14	8516	4718	20,2		19,6		3,9	3,8	3,8	33,1	
A15	8329	4574	19,6		18,8		3,8	3,7	3,8	31,7	
A16	10604	5896	31,7	32,22	31,1	31,95	4,4	4,5	4,4	44,1	44,48
A17	11114	6163	34,8		34,1		4,6	4,6	4,6	46,6	
A18	10350	5859	30,1		30,7		4,3	4,5	4,4	42,7	
A19	8396	4342	19,6	20,24	16,6	18,16	3,9	3,8	3,9	33,2	33,74
A20	7959	4294	17,8		16,4		3,9	3,6	3,7	31,3	
A21	9184	4937	23,3		21,5		4,2	3,9	4,1	36,7	

B01	14362	9436	35,6		39,5		4,6	4,4	4,5	42,6	
B02	14482	9425	36,0	35,45	38,9	39,23	4,5	4,5	4,5	42,6	41,90
B03	14733	9971	34,8		39,3		4,4	4,4	4,4	40,5	
B04	13903	9348	31,7		36,0		4,3	4,3	4,4	39,1	
B05	13117	8518	29,7	28,84	32,2	32,65	4,2	4,2	4,2	37,0	37,12
B06	12199	8343	25,1		29,7		4,0	4,1	4,1	35,2	
B07	14416	9228	35,8		37,5		4,4	4,5	4,5	42,2	
B08	14580	9523	35,3	35,53	37,9	37,69	4,5	4,5	4,5	42,5	42,37
B09	14362	9228	35,5		37,6		4,5	4,5	4,5	42,4	
B10	14362	9228	36,8		39,6		4,6	4,6	4,5	43,8	
B11	14711	9632	35,7	36,34	38,6	39,27	4,5	4,5	4,6	43,2	43,06
B12	14110	9064	36,5		39,6		4,5	4,5	4,5	42,3	
B13	14755	9589	36,2		38,7		4,6	4,5	4,5	42,9	
B14	14493	9348	36,1	36,25	38,4	38,58	4,6	4,6	4,6	44,0	43,44
B15	14362	9206	36,4		38,6		4,5	4,6	4,6	43,5	
B16	14536	9436	36,9		40,0		4,6	4,6	4,6	44,3	
B17	15050	9796	36,6	36,60	38,5	39,48	4,6	4,6	4,6	44,0	43,63
B18	14547	9523	36,3		39,9		4,5	4,5	4,5	42,6	
B19	15782	10441	38,4		40,9		4,6	4,6	4,5	43,9	
B20	15072	9873	37,9	38,18	40,9	40,66	4,6	4,7	4,7	45,4	44,56
B21	15541	10146	38,2		40,1		4,6	4,6	4,6	44,4	
C01	5636	3036	13,2		15,6		3,4	3,4	3,3	23,8	
C02	5909	3004	14,8	13,89	16,0	15,36	3,4	3,5	3,5	25,5	23,84
C03	5712	2883	13,7		14,5		3,2	3,2	3,3	22,2	
C04	3943	2141	6,5		7,9		2,2	1,9	2,2	9,7	
C05	4642	2458	9,1	8,26	10,7	9,75	3,0	3,0	3,0	19,0	14,64
C06	4642	2458	9,1		10,6		2,7	2,7	2,7	15,2	
C07	9311	4767	36,2		39,5		4,5	4,4	4,4	41,6	
C08	9136	4689	34,8	35,53	38,0	38,66	4,4	4,4	4,4	41,1	41,55
C09	9184	4689	35,5		38,5		4,5	4,4	4,5	42,0	
C10	9398	4786	37,3		40,3		4,5	4,5	4,6	43,6	
C11	9714	4816	39,3	38,36	40,0	40,47	4,5	4,5	4,6	43,3	43,15
C12	9608	4874	38,6		41,1		4,5	4,5	4,5	42,5	
C13	9476	4835	37,5		40,7		4,5	4,5	4,5	42,3	
C14	9631	4864	38,9	38,14	41,3	40,77	4,5	4,6	4,5	43,0	42,44
C15	9631	4903	38,0		40,3		4,5	4,5	4,4	42,1	
C16	9660	4864	38,9		41,0		4,5	4,6	4,5	43,3	
C17	9709	4932	38,7	38,92	40,9	41,20	4,5	4,5	4,5	42,7	42,99
C18	9709	4922	39,2		41,7		4,5	4,5	4,5	43,0	
C19	9767	4922	40,1		42,3		4,5	4,6	4,6	44,3	
C20	9738	4942	39,6	39,36	42,6	41,32	4,6	4,6	4,5	43,9	43,59
C21	9893	5000	38,4		39,1		4,6	4,6	4,6	42,5	

Tab.A. 16 Dynamické moduly pružnosti po 75 cyklech

	f _L	f _F	EcrL		Ecrf		vL			Ecu,UZ	
	[Hz]	[Hz]	[GPa]		[GPa]		[km/s]			[GPa]	
A01	-	-	-	0,31	-	0,34	-	-	-	-	-
A02	1036	615	0,3		0,3		-	-	-	-	
A03	-	-	-		-		-	-	-	-	
A04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A05	-	-	-		-		-	-	-		
A06	-	-	-		-		-	-	-		
A07	1054	536	0,3	0,23	0,3	0,22	-	-	-	-	-
A08	909	536	0,2		0,3		-	-	-	-	
A09	673	391	0,1		0,1		-	-	-	-	
A10	3971	2188	4,5	4,99	4,3	4,06	2,0	2,2	1,7	8,6	8,96
A11	4952	2729	7,0		6,8		2,7	2,4	2,7	15,0	
A12	3539	1111	3,5		1,1		1,2	1,2	1,2	3,3	
A13	5411	3043	8,2	10,77	8,3	10,11	2,8	2,9	2,9	18,7	22,09
A14	5870	3261	9,6		9,4		3,1	3,2	3,1	21,6	
A15	7138	3744	14,5		12,6		3,4	3,5	3,4	26,0	
A16	9778	5353	27,0	26,80	25,7	25,39	4,1	4,3	4,2	39,7	39,79
A17	10155	5478	29,1		27,0		4,3	4,4	4,3	42,2	
A18	9295	5130	24,3		23,5		4,0	4,1	4,2	37,5	
A19	8135	4261	18,4	18,14	16,0	19,08	3,8	3,6	3,6	29,6	30,59
A20	7681	4087	16,6		14,9		3,7	3,5	3,6	29,1	
A21	8377	5470	19,4		26,4		4,0	3,8	3,9	33,0	
B01	14250	9304	35,1	35,90	38,4	39,13	4,4	4,3	4,4	40,6	40,96
B02	14598	9522	36,6		39,7		4,4	4,5	4,5	42,2	
B03	14994	9959	36,0		39,3		4,4	4,4	4,3	40,1	
B04	14077	9348	32,5	25,50	36,0	29,43	4,3	4,2	4,2	37,9	32,61
B05	12031	8099	25,0		29,2		4,1	4,0	3,9	33,6	
B06	10597	7355	18,9		23,1		3,4	3,7	3,5	26,3	
B07	14370	9295	35,6	34,83	38,1	37,39	4,5	4,5	4,5	41,9	41,32
B08	14263	9348	33,9		36,6		4,4	4,4	4,4	40,4	
B09	14263	9202	35,0		37,5		4,5	4,4	4,5	41,7	
B10	14489	9255	37,5	36,97	39,8	39,24	4,5	4,6	4,6	43,8	43,18
B11	14715	9560	35,8		38,1		4,5	4,5	4,5	42,7	
B12	14330	9082	37,6		39,8		4,5	4,5	4,6	43,0	
B13	14835	9627	36,7	36,89	39,0	38,89	4,5	4,5	4,6	42,6	43,19
B14	14569	9374	36,5		38,7		4,6	4,6	4,5	43,9	
B15	14569	9242	37,5		39,0		4,5	4,5	4,5	43,1	
B16	14649	9414	37,5	36,79	39,9	39,49	4,5	4,5	4,5	43,2	42,95
B17	14914	9760	35,9		38,3		4,5	4,6	4,6	43,5	
B18	14662	9574	36,9		40,3		4,5	4,5	4,5	42,1	
B19	15778	10477	38,4	38,47	41,2	40,95	4,6	4,6	4,6	44,3	44,50
B20	15207	9866	38,6		40,9		4,6	4,5	4,7	44,7	
B21	15579	10225	38,4		40,7		4,6	4,6	4,6	44,5	
C01	2406	1442	2,4	6,16	3,5	7,74	1,2	1,8	1,2	4,1	12,08

C02	4645	2457	9,2		10,7		2,9	3,0	2,6	16,9	
C03	4043	2261	6,9		8,9		2,6	2,7	2,7	15,2	
C04	1783	934	1,3	2,34	1,5	2,80	1,2	1,2	1,0	2,8	6,15
C05	2449	1449	2,6		3,7		2,0	2,0	1,9	8,4	
C06	2717	1333	3,1		3,1		1,8	1,9	1,8	7,2	
C07	8321	4227	29,0	28,76	31,2	31,26	4,0	4,0	4,1	34,2	34,67
C08	8551	4384	30,6		33,3		4,1	4,2	4,1	36,4	
C09	7935	4082	26,6		29,3		4,0	4,0	3,9	33,5	
C10	9408	4771	37,4	36,94	40,0	40,48	4,5	4,5	4,5	43,0	41,46
C11	9263	4831	35,8		40,3		4,3	4,5	4,4	40,7	
C12	9493	4867	37,7		41,1		4,4	4,3	4,5	40,6	
C13	9589	4867	38,4	38,68	41,2	41,31	4,4	4,4	4,5	41,6	42,29
C14	9698	4915	39,4		42,2		4,5	4,5	4,5	43,0	
C15	9650	4915	38,2		40,5		4,5	4,5	4,5	42,2	
C16	9722	4867	39,4	39,26	41,0	41,36	4,5	4,5	4,5	43,2	42,77
C17	9795	4976	39,4		41,7		4,5	4,4	4,5	42,2	
C18	9686	4903	39,0		41,4		4,5	4,5	4,5	42,9	
C19	9737	4928	39,8	39,36	42,4	41,40	4,6	4,6	4,6	44,0	43,13
C20	9758	4928	39,8		42,4		4,6	4,6	4,5	43,5	
C21	9903	5024	38,5		39,5		4,6	4,6	4,6	41,9	

Tab.A. 17 Dynamické moduly pružnosti po 100 cyklech

	f _L	f _R	EcrL		Ecrf		vL			Ecu,UZ	
	[Hz]	[Hz]	[GPa]		[GPa]		[km/s]			[GPa]	
A01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A13	2808	1489	2,2	4,20	2,0	3,45	1,4	1,4	1,5	4,7	10,20
A14	3841	1988	4,1		3,5		2,2	2,5	2,2	11,8	
A15	4682	2316	6,2		4,9		2,5	2,4	2,6	14,0	
A16	6955	3791	13,7	14,06	12,9	12,99	3,7	3,4	3,6	28,5	28,94
A17	7311	3791	15,1		12,9		3,6	3,7	3,6	30,1	
A18	6898	3834	13,4		13,2		3,4	3,6	3,7	28,3	
A19	6306	3514	11,1	11,87	10,9	10,72	3,2	3,4	3,3	24,4	25,62
A20	6306	3378	11,2		10,2		3,4	3,4	3,2	25,0	
A21	6941	3549	13,4		11,1		3,4	3,7	3,5	27,5	

B01	13017	8523	29,3		32,3		4,1	4,0	4,1	34,7	
B02	14242	9273	34,9	32,44	37,7	35,41	4,3	4,4	4,4	39,7	37,62
B03	14366	9558	33,1		36,2		4,3	4,3	4,2	38,4	
B04	13995	9273	32,2		35,5		4,3	4,2	4,2	38,1	
B05	9834	6914	16,7	19,32	21,3	23,50	3,7	3,7	3,5	27,6	28,22
B06	7306	5667	9,0		13,8		3,0	3,1	3,0	19,0	
B07	12836	8496	28,4		31,9		4,1	4,2	4,0	35,4	
B08	12890	8742	27,7	30,13	32,0	33,70	4,2	4,2	4,0	35,9	37,42
B09	14097	9159	34,3		37,2		4,4	4,4	4,4	40,9	
B10	14461	9255	37,4		39,9		4,6	4,6	4,6	44,5	
B11	14675	9640	35,6	36,89	38,7	39,74	4,6	4,6	4,5	43,5	43,76
B12	14333	9170	37,7		40,6		4,4	4,6	4,6	43,3	
B13	14878	9651	36,9		39,3		4,5	4,6	4,6	43,3	
B14	14632	9437	36,8	37,03	39,2	39,26	4,7	4,6	4,6	45,0	44,33
B15	14536	9277	37,3		39,3		4,6	4,6	4,6	44,7	
B16	14607	9405	37,3		39,8		4,6	4,6	4,6	44,7	
B17	15093	9863	36,8	37,09	39,1	39,91	4,6	4,6	4,6	45,0	44,27
B18	14692	9625	37,1		40,8		4,6	4,5	4,5	43,1	
B19	15847	10550	38,8		41,8		4,6	4,6	4,6	44,7	
B20	15131	9873	38,2	38,47	41,0	41,43	4,5	4,6	4,7	44,9	44,95
B21	15580	10321	38,4		41,5		4,6	4,7	4,6	45,2	
C01	-	-	-		0,0		-	-	-	-	
C02	1875	1171	1,5	0,89	2,4	1,35	1,0	1,6	0,8	2,8	3,10
C03	1663	958	1,2		1,6		1,0	1,3	1,4	3,4	
C04	462	254	0,1		0,1		0,3	0,3	0,3	0,2	
C05	869	496	0,3	0,21	0,4	0,25	0,3	0,3	0,3	0,2	0,15
C06	699	339	0,2		0,2		0,3	0,3	0,3	0,2	
C07	5531	2611	12,9		11,9		3,6	3,5	3,6	26,6	
C08	6727	3260	19,0	16,22	18,5	15,33	3,6	3,7	3,7	28,7	27,84
C09	6295	2973	16,8		15,6		3,7	3,6	3,7	28,2	
C10	7695	3196	25,1		18,0		4,2	4,2	4,2	37,6	
C11	6842	3393	19,6	20,27	20,0	16,56	3,8	3,9	3,8	31,0	34,13
C12	6214	2598	16,2		11,7		4,1	4,0	3,9	33,8	
C13	9456	4825	37,4		40,6		4,4	4,4	4,4	40,9	
C14	9661	4910	39,1	38,28	42,1	41,28	4,5	4,6	4,5	43,7	42,23
C15	9661	4952	38,3		41,2		4,4	4,5	4,5	42,1	
C16	9650	4889	38,8		41,4		4,5	4,6	4,5	43,4	
C17	9756	4973	39,1	39,02	41,6	41,64	4,5	4,5	4,5	42,8	43,06
C18	9703	4931	39,1		41,8		4,5	4,5	4,5	43,1	
C19	9703	4931	39,6		42,5		4,5	4,6	4,5	43,4	
C20	9735	4942	39,6	39,13	42,6	41,43	4,5	4,6	4,5	43,2	42,63
C21	9871	5010	38,2		39,3		4,5	4,5	4,5	41,3	