

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

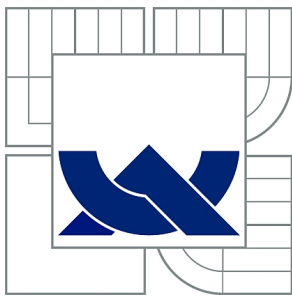
STUDIUM A MODELOVÁNÍ KARBONATACE BETONU

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

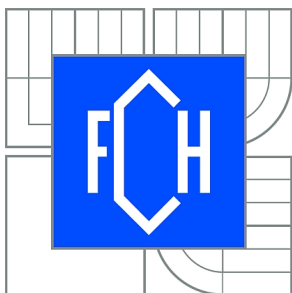
RNDr. MARKÉTA CHROMÁ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

STUDIUM A MODELOVÁNÍ KARBONATACE BETONU

INVESTIGATION AND MODELLING OF CONCRETE CARBONATION

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RNDr. MARKÉTA CHROMÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAROMÍR HAVLICA, DrSc.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání dizertační práce

Číslo dizertační práce:	FCH-DIZ0056/2011	Akademický rok: 2011/2012
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	RNDr. Markéta Chromá	
Studijní program:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (P2820)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808V016)	
Vedoucí práce	prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.	
Konzultanti:		

Název dizertační práce:

Studium a modelování karbonatace betonu

Zadání dizertační práce:

Hlavním cílem dizertační práce je experimentální studium a rovněž modelování procesu karbonatace betonu připraveného z portlandského cementu a betonu s částečnou náhradou cementu alternativními silikátovými pojivy. Jako alternativní pojiva jsou využity: popílek, vysokopecní struska a metakaolin

Termín odevzdání dizertační práce: 20.3.2012

Dizertační práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu dizertační práce. Toto zadání je přílohou dizertační práce.

RNDr. Markéta Chromá
Student(ka)

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 27.2.2012

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Pravděpodobně nejčastějším typem degradace železobetonových konstrukcí je koroze ocelové výztuže. Povrch výztuže je chráněn před korozi tenkou vrstvou oxidů železa, která se vytváří díky silnému zásaditému prostředí okolního betonu. Ke korozi pak dochází porušením této ochranné vrstvy (i) penetrací chloridů (když jejich koncentrace v okolí výztuže překročí kritickou hodnotu), nebo (ii) snížením pH pórového roztoku na hodnotu nižší než 9,5. Takové snížení je způsobeno karbonatací Ca(OH)_2 , který reaguje s atmosférickým CO_2 .

Hlavním cílem této práce je experimentální studium a modelování karbonatačního procesu. Práce je zaměřena především na studium vlivu relativní vlhkosti, doby ošetřování a náhrady portlandského cementu alternativními silikátovými příměsmi (popílek, vysokopecní struska a metakaolin) na průběh karbonatace. Rovněž bylo zjištěno množství zbytkového hydroxidu vápenatého v přítomnosti těchto příměsí a jejich pucolánové aktivity. Dále bylo provedeno velké množství parametrických studií a vzájemné srovnání karbonatačních modelů. V neposlední řadě byly popsány a využity pro další parametrické studie softwarové nástroje, které jsou založené na uvedených modelech a uvažují vstupní data jako statisticky nezávislé náhodné veličiny.

ABSTRACT

The corrosion of steel reinforcement is probably the most frequent type of degradation of reinforced concrete structures. Reinforcing bars are protected from corrosion by a thin iron oxide layer which is formed on their surface due to a high alkalinity of the surrounding concrete. Corrosion may start when this layer is destroyed (i) either by chloride ion penetration (when the concentration of dissolved chloride at the depth of the reinforcing steel exceeds a critical value) or (ii) by a reduction in the pH value of pore solution to values below 9.5. Such a reduction in alkalinity is the result of carbonation of the Ca(OH)_2 in the concrete mass, i.e. of its reaction with the atmospheric CO_2 .

The main aim of this work is an experimental investigation and modelling of carbonation process. The effect of relative humidity, curing period and replacement of Portland cement by supplementary cementing materials (SCM - fly ash, blast furnace slag and metakaolin) on carbonation process has been studied. Calcium hydroxide content in the presence of SCM and their pozzolanic activities have been also determined. Furthermore, lots of parametric studies and comparison of carbonation models have been provided. The software tools based on the introduced models and considering the input data to be statistically independent random variables have been described and used for other parametric studies.

KLÍČOVÁ SLOVA

Karbonatace, beton, příměs, obsah hydroxidu vápenatého, pucolánová aktivita, modelování.

KEYWORDS

Carbonation, concrete, supplementary cementing material, calcium hydroxide content, pozzolanic activity, modelling.

CHROMÁ, M. Studium a modelování karbonatace betonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 143 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Disertační práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího disertační práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Velmi ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří jakýmkoliv způsobem přispěli k vytvoření této disertační práce. Poděkování patří prof. Ing. Jaromíru Havlicovi, DrSc. za odborné vedení a pomoc při dokončování této práce. Dále bych chtěla poděkovat prof. RNDr. Pavle Rovnaníkové, CSc. za nesmírnou ochotu a vstřícnost při všech odborných konzultacích a její cenné rady a podporu poskytnutou při sepisování této práce. Můj velký dík patří rovněž prof. Ing. Břetislavu Teplému, CSc. za velmi trpělivé zasvěcování do problémů trvanlivosti a spolehlivosti konstrukce a velkou pomoc při vypracovávání části týkající se modelování karbonatačního procesu. Také děkuji doc. Ing. Pavlu Schmidovi, Ph.D. za provedení lomově-mechanických zkoušek, Ing. Patriku Bayerovi, Ph.D. za stanovení pórové struktury a Mgr. Petře Trebulákové, Ph.D. za spolupráci při studiu frekvenční inspekce jako jedné z nedestruktivních metod pro zjištění hloubky karbonatace. Tímto velmi děkuji i celému kolektivu ústavu chemie FAST VUT za vytvoření přátelské atmosféry a výborných podmínek potřebných pro realizaci této práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mé rodině, známým a přátelům za jejich velkou psychickou podporu projevenou nejen při dokončování této práce.

OBSAH

ÚVOD	9
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 CEMENTY.....	11
2 PŘÍMĚSI	13
2.1 Pucolánově aktivní látky	14
2.1.1 Popílek.....	15
2.1.1 Metakaolin.....	17
2.2 Hydraulicky nebo latentně hydraulicky aktivní látky	18
2.2.1 Struska	18
3 HYDRATACE CEMENTU	20
3.1 Hydratace portlandského cementu	20
3.1.1 Hydratace C_3S a C_2S	20
3.1.2 Hydratace C_3A a C_4AF	23
3.2 Hydratace směsného cementu	24
4 KARBONATACE BETONU	25
4.1 Proces karbonatace betonu	26
4.2 Základní etapy karbonatace.....	27
4.3 Stálost produktů vzniklých při karbonataci betonu.....	28
4.4 Faktory ovlivňující karbonataci betonu.....	29
5 MODEL Y KARBONATACE BETONU	32
5.1 Modely karbonatace pro betony připravené z portlandského cementu.....	33
5.1.1 Model podle Schiessla.....	33
5.1.2 Modely dle Morinagy.....	33
5.1.3 Spojený Fickův-Fourierův zákon	34
5.1.4 Modely dle Papadakise.....	35
5.2 Modely karbonatace pro betony připravené ze směsných cementů	37
5.2.1 Vyjádření vlivu příměsí koeficientem typu cementu	37
5.2.1.1 Model dle Boba a Affany	37
5.2.1.2 Model dle De Sittera	38
5.2.1.3 Model dle Kishitaniho	38
5.2.1.4 Model dle Jianga	40
5.2.2 Vyjádření vlivu příměsí množstvím a složením použité příměsi.....	40
5.2.2.1 Model dle Jianga pro betony s vysokým obsahem popílku	40

5.2.3 Vyjádření vlivu příměsi pomocí koncepce k -hodnoty	42
5.2.3.1 Model dle Papadakise a Tsimase	42
5.2.4 Vyjádření vlivu příměsi výsledkem zrychlené karbonatační zkoušky	43
5.2.4.1 fib Model Code.....	43
6 ZAŘAZENÍ BETONU DO ETAPY KARBONATACE DLE MATOUŠKA A DROCHYTKY	47
7 TRVANLIVOST BETONU	48
7.1 Stupně vlivu prostředí	48
7.1.1 Stupeň vlivu prostředí XC: karbonatace	49
7.2 Performance-based přístupy	50
7.2.1 Navrhování železobetonových konstrukcí s ohledem na životnost.....	50
7.2.2 Úrovně návrhu železobetonových konstrukcí s ohledem na životnost	52
7.2.3 Specifikace betonu	53
8 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	54
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	55
9 POUŽITÉ SUROVINY.....	55
9.1 Cement.....	55
9.2 Příměsi.....	55
9.2.1 Popílek.....	55
9.2.2 Struska.....	55
9.2.3 Metakaolin.....	56
9.3 Kamenivo	56
10 ZKUŠEBNÍ TĚLESA A SLOŽENÍ ZKUŠEBNÍCH SMĚSÍ.....	57
10.1 Příprava zkušebních těles	57
10.1.1 Cementové pasty	57
10.1.2 Cementové malty.....	57
10.2 Souhrn použitých receptur.....	58
10.2.1 Cementové pasty	58
10.2.1.1 Cementové pasty pro stanovení zbytkového Ca(OH)_2	58
10.2.1.2 Cementové pasty pro určení lomově mechanických vlastností	59
10.2.2 Cementové malty.....	59
10.2.2.1 Cementové malty pro studium vlivu relativní vlhkosti vzduchu na průběh karbonatace.....	59
10.2.2.2 Cementové malty pro studium vlivu doby ošetřování na průběh karbonatace	59

10.2.2.3 Cementové malty pro studium vlivu typu a množství příměsí na průběh karbonatace.....	59
10.2.2.4 Cementové malty pro studium vlivu náhrady portlandského cementu, popř. kameniva popílkem na průběh karbonatace	60
10.2.2.5 Cementové malty pro stanovení hloubky karbonatace pomocí detekce změn parametrů odezvy signálu na akustický impuls.....	61
11 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	61
11.1 Stanovení pevnosti v tahu ohybem a tlaku.....	61
11.2 Stanovení pórovitosti vysokotlakou rtuťovou porozimetrií	62
11.3 Stanovení konzistence	62
11.4 Stanovení objemové hmotnosti	62
11.5 Karbonatační zkouška	62
11.6 Stanovení zbytkového $\text{Ca}(\text{OH})_2$	65
11.6.1 Výpočet zbytkového $\text{Ca}(\text{OH})_2$	65
11.7 Stanovení pucolánové aktivity	65
11.7.1 Výpočet pucolánové aktivity.....	66
11.8 Zkoušky lomově-mechanických vlastností	66
VÝSLEDKY A DISKUSE	68
12 STUDIUM KARBONATAČNÍHO PROCESU	68
12.1 Vliv relativní vlhkosti vzduchu na průběh karbonatace.....	68
12.2 Vliv doby ošetřování na průběh karbonatace	70
12.3 Vliv typu a množství příměsí na průběh karbonatace	73
12.4 Vliv náhrady portlandského cementu, popř. kameniva popílkem na průběh karbonatace.....	79
12.5 Stanovení obsahu zbytkového $\text{Ca}(\text{OH})_2$	83
12.6 Stanovení pucolánové aktivity	88
12.7 Zkoušky lomově-mechanických vlastností	89
12.8 Stanovení hloubky karbonatace pomocí detekce změn parametrů odezvy signálu na akustický impuls.....	90
13 MODELOVÁNÍ KARBONATAČNÍHO PROCESU	92
13.1 Parametrické studie a srovnání modelů.....	93
13.1.1 Carb1	93
13.1.2 Carb2	94
13.1.3 Carb3	95
13.1.4 Carb4	96
13.1.5 Carb5	102
13.1.6 Carb6	103

13.1.7 Carb7	105
13.1.8 Carb8	106
13.1.9 Carb9	106
13.1.10 Vzájemné srovnání modelů	109
13.2 Softwarové nástroje	110
13.2.1 RC-LifeTime	110
13.2.2 FReET-D	110
13.2.3 Využití softwarových nástrojů	111
13.2.3.1 Časový průběh hloubky karbonatace	111
13.2.3.2 Vliv tloušťky krycí vrstvy na délku iniciační periody	113
13.2.3.3 Vliv typu cementu	115
13.2.3.4 Posouzení spolehlivosti pro betonové směsi s obsahem křemičitého popílku	116
13.3 Srovnání hodnot hloubek karbonatace dle modelů s výsledky experimentů	119
13.3.1 Srovnání s měřením hloubky karbonatace na chladicí věži	119
13.3.2 Srovnání s měřením hloubky karbonatace na televizní věži	120
13.3.3 Srovnání s krátkodobými i dlouhodobými experimenty	123
ZÁVĚR	126
14 LITERATURA	129
15 PUBLIKACE SE VZTAHEM K DISERTAČNÍ PRÁCI	134
16 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	138
17 SEZNAM SYMBOLŮ POUŽITÝCH U KARBONATAČNÍCH MODELŮ	139
PŘÍLOHY	143
18 SEZNAM PŘÍLOH	143

ÚVOD

Železobeton je jedním z nejpoužívanějších konstrukčních materiálů. Jedná se o heterogenní kompozit, který se sestává ze dvou druhů materiálu – betonu a ocelové výztuže. Samotný beton má vysokou pevnost v tlaku, ale pevnost v tahu ohybem je velice nízká. Uvádí se, že pevnost betonu v tahu ohybem je asi 8 až 10 % pevnosti v tlaku [1-2]. Pro přenášení tahových napětí se tedy do betonu vkládají prvky ocelové výztuže. Vysoká pevnost železobetonu umožnila stavbu nejrůznějších typů konstrukcí, jejichž realizace by bez použití ocelové výztuže byla jen těžko představitelná. Přítomnost kovu však s sebou přináší určité problémy související s korozí.

Koroze ocelové výztuže je považována za hlavní příčinu ztráty funkčnosti betonových konstrukcí, což s sebou přináší významné ekonomické důsledky. Škodlivý vliv koroze výztuže v betonu spočívá ve vzniku nerozpustných korozních produktů s několikanásobně větším objemem ve srovnání s původní ocelí. Zvětšení objemu pak vyvolá napětí v okolním betonu, které může vést ke vzniku trhlin, případně delaminaci povrchové vrstvy betonu, a tím k možnosti přímého napadení povrchu výztuže dalšími agresivními látkami. Dalším důsledkem koroze oceli je snížení efektivní plochy průřezu výztuže a porušení soudržnosti mezi betonem a výztuží. Uvedené důsledky zhoršují mechanické parametry konstrukce a zkracují její životnost. Koroze ocelové výztuže je tedy považována za pravděpodobně nejzávažnější typ degradace železobetonových konstrukcí.

Za běžných podmínek se v pórovém roztoku čerstvého betonu vytváří zásadité prostředí ($\text{pH} > 12$) s vysokým obsahem hydroxidových iontů (OH^-), které se do pórového roztoku uvolňují jednak disociací hydroxidu vápenatého a rovněž disociací hydroxidu sodného a draselného. Hydroxid vápenatý se tvoří při hydrataci silikátových slínekových minerálů, zatímco hydroxidy sodný a draselný vznikají reakcí minerálů obsahujících Na_2O a K_2O s vodou. V takovém prostředí vzniká na povrchu výztuže tenká (tloušťka asi 10 nm), ale hustá a dobře přilnavá vrstvička oxidů železa, která působí jako ochranná (pasivační) vrstva zabraňující přímému kontaktu kyslíku, vody i jiných agresivních látek s povrchem výztuže [3]. Ke korozi výztuže pak může docházet v přítomnosti kyslíku a vlhkosti až v okamžiku, kdy dojde k narušení této pasivační vrstvy (po depasivaci výztuže). Mezi jevy vedoucí k depasivaci výztuže patří především:

- **karbonatace betonu**

Karbonatace betonu je chemický proces způsobený reakcí oxidu uhličitého přítomného v atmosféře se složkami cementového tmelu v betonu. Během tohoto procesu dochází k postupnému snižování pH pórového roztoku. Je-li beton krycí vrstvy zkarbonatován až k výztuži do té míry, že koncentrace hydroxidových iontů v pórovém roztoku u výztuže odpovídá $\text{pH} < 9,5$ dojde k narušení ochranné (pasivační) vrstvy na povrchu výztuže.

- **působení chloridů**

Přítomnost chloridů, které jsou součástí chemických rozmrazovacích látek pro údržbu silnic, vede po překročení kritické koncentrace v okolí výztuže rovněž k depasivaci výztuže. Dalším významným zdrojem chloridů je vedle chemických rozmrazovacích látek rovněž mořská voda v přímořských státech.

Vzhledem ke stále rostoucí koncentraci oxidu uhličitého v atmosféře roste rovněž význam studia prvního jmenovaného jevu – karbonatace betonu. Následující kapitoly budou tedy zaměřeny nejdříve na hydrataci cementu vedoucí ke vzniku hydroxidu vápenatého a hydratovaných křemičitanů a hlinitanů vápenatých, které pak mohou následně podléhat

karbonataci. Dále bude podrobněji rozebrán vlastní průběh karbonatačního procesu a popsáno několik nejdůležitějších faktorů, které průběh karbonatace ovlivňují.

Pro odhad životnosti konstrukce nebo pro rozhodnutí o postupech a o časovém sledu inspekcí, údržby a případných oprav je velmi výhodné efektivní modelování jevů, vedoucích k depasivaci, a tím i následné korozi výztuže. Velmi důležitá je mj. znalost časového úseku, který uplyne od zhotovení konstrukce do okamžiku, kdy pomyslná karbonatační fronta prostoupí celou tloušťkou krycí vrstvy (tj. dojde k depasivaci výztuže). Tato doba je nazývána iniciačním časem. Pomocí vhodného výpočetního modelu lze postup karbonatace odhadnout a stanovit tak iniciační čas, který je často chápán jako limitní hodnota v mezním stavu použitelnosti betonové konstrukce. V minulých letech bylo z tohoto důvodu pro výpočet hloubky karbonatace vytvořeno několik deterministických matematických modelů. Význam a využití těchto modelů je společně s jejich stručným přehledem a zhodnocením vypovídací schopnosti také součástí této práce.

TEORETICKÁ ČÁST

1 CEMENTY

Cementy jsou práškové hydraulické maltoviny tvořené jemně mletým křemičitanovým nebo hlinitanovým slínkem a případně dalšími přísadami a příměsmi. Jedná se o nejrozšířenější hydraulické maltoviny, které se vyznačují schopností tuhnout a tvrdnout reakcí s vodou bez přístupu vzduchu.

Základním a nejdůležitějším cementem je portlandský cement (PC), který se vyrábí pálením surovin za vzniku portlandského slínku a jeho následným mletím se 3 až 5 % sádrovce – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ jako regulátoru tuhnutí. Portlandský slínek se získá pálením směsi vápence s hlinito–křemičitými minerály (jíly, slíny, břidlice) v oblasti teploty slinutí (nad $1350\text{ }^\circ\text{C}$), kdy vznikají hlavní slínkové minerály. Mineralogické (fázové) složení slínku, tj. přítomnost a vzájemné zastoupení tzv. slínkových minerálů, má zásadní vliv na konečné vlastnosti slínku a cementu. V portlandském slínku bylo doposud popsáno více než 25 minerálních fází, rozhodující význam pro vlastnosti cementu však mají následující hlavní sloučeniny: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) – trikalciumpsilikát, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) – dikalciumpsilikát a $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) – trikalciumaluminát, které provází malé množství mezerní hmoty: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) – tetraalkaliumaluminát ferit [1,4-6].

Kromě těchto čistě minerálních fází se ve slínku rozlišují tzv. technické minerály (fáze) – alit, belit a celit. V technické praxi se většinou klade rovnítko mezi C_3S a alitem, C_2S a belitem a C_4AF a celitem, mineralogicky však tyto technické fáze obsahují ještě další složky.

Kromě těchto hlavních slínkových minerálů obsahuje slínek jako vedlejší složky v omezeném množství volné vápno (CaO) a oxid hořečnatý (MgO). Volný oxid vápenatý je zbytkem volného nezreagovaného CaO ze směsi surovin nebo vzniká rozpadem C_3S . Oxid hořečnatý se může objevovat jako součást tuhých roztoků ferrialuminátové fáze nebo C_3S , může být součástí skelné fáze a může se vyskytovat i jako volné MgO ve formě minerálu periklasu. Skelná fáze je po chemické stránce složena z CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , malého množství MgO a oxidů alkalických kovů [1,4,5]. Přehled hlavních složek portlandského slínku a jejich vlastností uvádí tab. 1 [4].

Tab. 1 – Přehled hlavních složek v portlandském slínku [4].

Název	Označení	Zastoupení (%)	Hydratační teplo ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Rychlost hydratace
trikalciumpsilikát	C_3S	45 - 80	500	rychlá
dikalciumpsilikát	C_2S	5 - 32	250	střední
trikalciumaluminát	C_3A	4 - 16	1340	velmi rychlá
tetraalkaliumaluminát ferit	C_4AF	3 - 12	420	rychlá
oxid vápenatý	CaO	0,1 - 3	1150	pomalá
oxid hořečnatý	MgO	0,5 – 4,5	840	pomalá

Vedle portlandského cementu existuje celá řada dalších druhů cementu. Jednotlivé druhy se od sebe liší vstupními surovinami, obsaženými v surovinové směsi (nebo poměrem těchto surovin), a tím složením slínku (a průběhem procesu tvrdnutí), pomocnými látkami, které se přidávají ke slínku při mletí cementu apod. Odlišnosti v chemickém a mineralogickém složení mají za následek odlišnosti ve vlastnostech různých druhů cementů.

Tab. 2 – Druhy cementů pro obecné použití a jejich složení podle ČSN EN 197-1 [7].

Druh cementu	Název cementu	Označení cementu	Typ příměsi	Množství příměsi (%)
I	Portlandský	I	-	-
II	Portlandský struskový	II/A-S	Vysokopecní struska (S)	6 - 20
		II/B-S		21 - 35
	Portlandský s křemičitým úletem	II/A-D	Křemičitý úlet (D)	6 - 10
	Portlandský pucolánový	II/A-P	Přírodní pucolán (P)	6 - 20
		II/B-P		21 - 35
		II/A-Q	Průmyslový pucolán (Q)	6 - 20
		II/B-Q		21 - 35
	Portlandský popílkový	II/A-V	Křemičitý popílek (V)	6 - 20
		II/B-V		21 - 35
		II/A-W	Vápenatý popílek (W)	6 - 20
		II/B-W		21 - 35
	Portlandský s kalcinovanou břidlicí	II/A-T	Kalcinovaná břidlice (T)	6 - 20
		II/B-T		21 - 35
	Portlandský s vápencem	II/A-L	Vápenec (L)	6 - 20
II/B-L		21 - 35		
Portlandský směsný	II/A-M	(S, D, P, Q, V, W, T, L)	6 - 20	
	II/B-M		21 - 35	
III	Vysokopecní	III/A	Vysokopecní struska (S)	36 – 65
		III/B		66 – 80
		III/C		81 – 95
IV	Pucolánový	IV/A	(D, P, Q, V)	11 - 35
		IV/B		36 - 55
V	Směsný	V/A	(P, Q, V)	18 - 30
		V/B		30 - 50

Cementy pro obecné použití definuje v současnosti technická norma ČSN EN 197-1 [7] Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití, platná od 1. 6. 2001. Pod označením „cement pro obecné použití“ se mají na mysli cementy „tradiční a osvědčené“, které jsou dlouhodobě vyráběny a používány. Tato norma uvádí celkem 27 jmenovitých cementů (viz tab. 2) pro obecné použití (označovaných jako CEM), které jsou rozděleny do pěti hlavních skupin cementu [6,8]:

- **CEM I** Portlandský cement
- **CEM II** Portlandský cement směsný
- **CEM III** Vysokopecní cement
- **CEM IV** Pucolánový cement
- **CEM V** Směsný cement

Směsné cementy (CEM II – V) se z portlandského cementu připravují přidávkem 6 až 95 % jemně mletých příměsí s latentně hydraulickými nebo pucolánovými vlastnostmi, nejčastěji elektrárenského popílku nebo vysokopecní strusky. Za druhovým označením cementu, vyznačeným římskou číslicí I – V se dále uvádí hodnota normalizované pevnostní třídy. V současnosti se u nás vyrábějí cementy tří pevnostních tříd – 32,5, 42,5 a 52,5. Číslo znamená pevnost příslušného cementu v tlaku po 28 dnech hydratace, zkoušenou podle ČSN EN 196-1 [9]. Má-li cement vysoké počáteční pevnosti, připojuje se za označení třídy ještě písmeno R (tzv. rychlovazný cement), cementy s normální rychlostí tuhnutí se označují písmenem N. U vysokopecních cementů CEM III je navíc podle ČSN EN 197-4 možno vyrábět také cementy s nízkou počáteční pevností s označením L [5].

Vedle cementů pro obecné použití se pak lze setkat ještě se speciálními cementy, mezi které můžeme zahrnout cementy se speciálními vlastnostmi, popř. odlišným mechanismem tvrdnutí (např. silniční, síranovzdorný, hlinitanový, rozpínavý a bílý cement) [1,5].

2 PŘÍMĚSI

Příměsi jsou většinou práškové látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých jeho vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností v čerstvém i zatvrdlém stavu [1,10]. U čerstvého betonu se jedná zejména o konzistenci a zpracovatelnost a u zatvrdlého betonu o pevnost, hutnost, trvanlivost, odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí atd. Dalším důvodem je snížení spotřeby portlandského cementu, jehož výroba je zatížena emisemi oxidu uhličitého. Příměsi se přidávají v takovém množství, které nepříznivě neovlivní vlastnosti betonu, zejména jeho trvanlivost nebo nezpůsobí korozi výztužné oceli. Podle ČSN 206-1 [10] se dělí na dva typy:

a) Typ I – inertní příměsi

Tento typ příměsí se přidává většinou pro dosažení hutnější struktury betonu, nebo pro zlepšení reologických vlastností čerstvého betonu. Tyto příměsi vzhledem ke svému chemickému a mineralogickému složení netuhnou a netvrdnou ani za přidávku budičů. Jejich úkolem je zvýšit hutnost struktury zatvrdlé směsi a zvýšit množství podílu jemnozrnné malty v betonu, a tím přispět k jeho lepší zpracovatelnosti, případně změnit barvu betonu. Nejčastěji se jedná o mleté horniny, kamenné moučky, odprašky ze zpracování kamene, nebo speciální příměsi, jako barevné pigmenty a další. V případě těchto příměsí je však

nutné si uvědomovat zvýšenou potřebu záměsové vody potřebné ke smočení povrchu příměsí.

b) Typ II – aktivní příměši

Aktivní příměši jsou látky, které díky svému složení aktivně přispívají k vývinu pevností cementového tmele. Přidávají se jako složky do cementu při mletí slínku nebo do čerstvého betonu při jeho míchání. Lze je rozdělit na dvě základní skupiny: pucolánově aktivní a na látky hydraulicky nebo latentně hydraulicky aktivní [11-12]. **Pucolánově aktivní** látky jsou ty, které neobsahují žádné vápenaté ionty nebo jich obsahují jen nepatrné množství, mají však vysoký obsah SiO_2 v reaktivním stavu a mnohdy také obsahují Al_2O_3 , nebo hlinitokřemičitany. Tyto látky s vodou nereagují, k jejich reakci je třeba vysoce zásadité prostředí, které může být vytvořeno přítomností např. hydroxidu vápenatého (jedná se o tzv. budič hydraulicity). V přítomnosti hydroxidu vápenatého pak vytvářejí již za normální teploty hydratované křemičitany vápenaté. Je-li přítomen Al_2O_3 , nebo některé druhy aluminosilikátů, tvoří se hydratované hlinitany vápenaté. Příkladem těchto látek jsou především vysokoteplotní elektrárenské popílky a křemičité úlety. **Hydraulicky nebo latentně hydraulicky aktivní** látky obsahují vápenaté sloučeniny, které mohou v některých případech reagovat s vodou bez příměsí zásaditých sloučenin. Jejich reaktivita s vodou je závislá na mineralogickém a chemickém složení. Příkladem hydraulicky reagujících látek je vysokopeční granulovaná struska.

Výhody směsných cementů, které obsahují některé z výše uvedených příměsí, spočívají v dosažení některých příznivých vlastností, kterých je dosaženo za specifických podmínek [6]:

- a) především jde o pomalejší uvolňování hydratačního tepla, což je způsobeno nižším podílem slínku ve směsi. Tím jsou omezeny teplotní gradienty, které v betonu vyvolávají teplotní napětí. To je důležité zejména pro masivní konstrukce, např. přehradu nebo masivní základy.
- b) lepší odolnost vůči některým chemickým látkám, síranům a mořské vodě
- c) snížení nebo i potlačení následků alkalicko-křemičité reakce
- d) lepší odolnost proti působení chloridů pro lepší odolnost ocelové výztuže; to je důležité zejména pro železobetonové konstrukce vystavené působení mořské vody, nebo pro vozovky, které jsou v zimě ošetřovány rozmrazovacími solemi, obsahujícími chloridy.

2.1 Pucolánově aktivní látky

Pucolán je definován jako křemičitý nebo hlinitokřemičitý materiál, který sám o sobě má malé nebo žádné pojivé vlastnosti, ale pokud je v jemně mleté formě a v přítomnosti vlhkosti, reaguje s hydroxidem vápenatým při běžných teplotách za tvorby sloučenin s významnými pojivými vlastnostmi [6,13-14].

V případě směsných cementů je $\text{Ca}(\text{OH})_2$ uvolňován při hydrataci portlandského cementu a je schopný reagovat s pucolánem v pastě. Aby k tomu došlo, je třeba zvolit vhodný poměr těchto složek (alespoň 40 – 50 % portlandského cementu), aby při hydrataci cementu vzniklo dostatečné množství hydroxidu vápenatého pro reakci s pucolánem [6].

Schopnost pucolánů reagovat s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za běžných teplot ($20\text{ }^\circ\text{C}$) se nazývá **pucolánová aktivita** a zahrnuje všechny reakce mezi pucolánem, hydroxidem vápenatým a vodou [6]. Schopnost těchto materiálů reagovat s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ souvisí s neuspořádanou strukturou molekulárních řetězců přítomných látek [6,14]. Při pucolánové reakci dochází k napadání řetězců Si-O-Si a Si-O-Al hydroxidovými ionty, které vznikají disociací hydroxidu vápenatého, a tím dochází ke zkracování těchto řetězců. Vzniklé křemičitanové a hlinitokřemičitanové ionty potom vytvářejí s přítomnými Ca^{2+} ionty hydratované křemičitanové a hlinitokřemičitanové vápenaté, tedy látky podobné produktům hydratace PC [14]. Podrobnější popis pucolánové reakce je uveden v kap 3.2.

Pucolány lze rozdělit podle původu vzniku na [14]:

a) přírodní

Přírodní pucolány jsou buď původu vulkanického (tufy) nebo sedimentárního (tufity, křemelina). Původním pucolánovým materiálem, od něhož dostaly materiály podobného charakteru název, byly vyvěřeliny, které se nacházely v blízkosti sopky Vesuv u města Puzzuoli. Dnes se využívá v Německu a ve Francii zejména rýnský tras. Pucolánové vlastnosti se projevují také u materiálů, které se sice nevyskytují v sypké formě, ale obsahují reaktivní látky. Takové materiály je potom potřeba nejdříve převést do jemně mleté formy. Přírodní pucolány obsahují převážně SiO_2 v amorfnní formě. Větší či menší pucolánovou aktivitu vykazují mnoho přírodních materiálů, které obsahují vedle amorfnního SiO_2 také reaktivní formy Al_2O_3 a některé hlinitokřemičitanové. Vhodnými pucolánově aktivními látkami jsou například opály, slídy, čediče, zeolity atd. Jejich reakce s hydroxidem vápenatým závisí také na chemickém a mineralogickém složení, fyzikálním stavu a velikosti zrn.

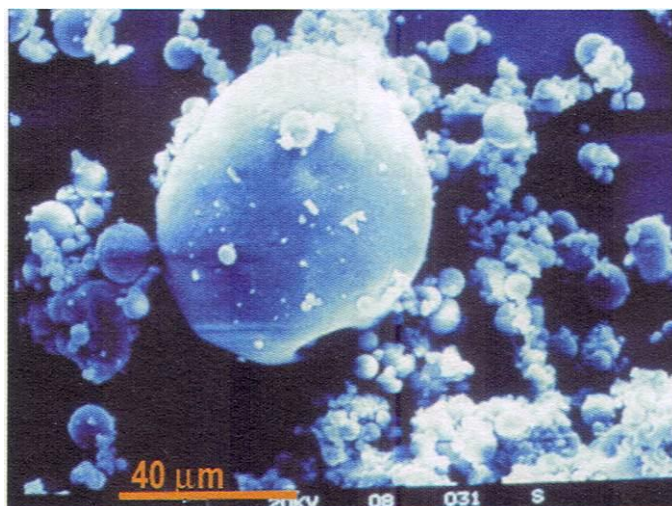
b) technogenní

Dalším zdrojem pucolánově aktivních látek jsou materiály produkované lidskou činností, tzv. technogenní pucolány. Využívají se buď odpadní produkty technologických procesů nebo lidské činnosti nebo se tyto látky připravují záměrně. Do první kategorie spadají popely po spalování různých organických materiálů (dřeva, obilné a rýžové slámy, vinných výhonků apod.), popílky jako produkty spalování uhlí nebo tzv. křemičité úlety, což jsou produkty pecních plynů, vznikajících při výrobě ferosilicia nebo elementárního křemíku, které obsahují velmi reaktivní amorfnní oxid křemičitý o velikosti částic okolo $0,2\text{ }\mu\text{m}$, často agregovaných do větších celků. Druhou kategorií technogenních pucolánů jsou, v poslední době se rozšiřující, cíleně pálené materiály. Jsou připravovány pálením jílových surovin kaolinitického typu, které jsou následně jemně mlety. Nejčastěji se k tomuto účelu používá kaolin (obsahující kaolinit), který se pálením převede na tzv. metakaolin (metakaolinit).

V dalším textu jsou podrobněji popsány pucolánově aktivní látky technogenního původu, které jsou pak použity jako příměsi do malt v experimentální části – popílek a metakaolin.

2.1.1 Popílek

Elektrárenské popílky z vysokoteplotního spalování jsou anorganické podíly po spalování organických látek, které se zachycují z kouřových plynů v odlučovačích, nejčastěji v elektrofiltrech. Jsou složené převážně z malých kulovitých zrn o velikosti $5 - 90\text{ }\mu\text{m}$ (viz obr. 1), která jsou plná nebo dutá a díky sférickému tvaru zlepšují zpracovatelnost betonu [6,14-15]. Barva jednotlivých zrn je šedá nebo béžová. Měrný povrch se pohybuje okolo $300\text{ m}^2/\text{kg}$. Hustota jednotlivých částic popílku se pohybuje kolem 2300 kg/m^3 , což je výrazně nižší než hustota portlandského cementu – 3120 kg/m^3 [15].



Obr. 1 – Elektronová mikroskopie elektrárenského popílku [6].

Zrna vznikla utuhnutím taveniny a obsahují amorfni SiO_2 , krystalickou fázi tvoří mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) a křemen (SiO_2) [14]. Amorfni podobu má asi 90 % popílku, zbytek je pak podoby krystalické [16]. Popílek dále obsahuje nespálený zbytek organické hmoty, který může činit podle spalovacího zařízení, průběhu spalovacího procesu a teploty spalování až 15 %. Jako každý odpad mají popílky proměnlivé chemické, mineralogické i granulometrické složení podle druhu spalovaného uhlí, lokality (technické řešení spalovacího procesu) a způsobu odlučování z exhalátu [1].

Popílek pro stavební účely musí splňovat kriteria, podle toho, pro kterou technologii se má využívat. Např. popílek, který se používá jako příměs do betonu může mít dle ČSN EN 450 [17] ztrátu žíháním max. 5,0 %, celkový obsah oxidu sírového max. 3,0 %, obsah chloridů max. 0,10 % a obsah volného oxidu vápenatého max. 1,0 % hmotnosti vysušeného popílku.

Podle ČSN EN 197-1 [7] se popílek rozděluje na **křemičitý (V)** a **vápenatý (W)**. Křemičitý popílek (V) je jemný prášek převážně sestávající z kulových částic s pucolánovými vlastnostmi. Obsahuje zejména aktivní SiO_2 a Al_2O_3 . Ve zbytku je pak obsažen oxid železitý a jiné sloučeniny. Obsah aktivního oxidu vápenatého musí být nižší než 10,0 % hmotnosti, přičemž obsah volného oxidu vápenatého nesmí být vyšší než 1,0 % hmotnosti. Obsah aktivního oxidu křemičitého musí být vyšší než 25 % hmotnosti. Vápenatý popílek (W) je jemný prášek, který má hydraulické a/nebo pucolánové vlastnosti. Obsahuje především aktivní oxid vápenatý, aktivní oxid křemičitý a oxid hlinitý. Ve zbytku je pak opět obsažen oxid železitý a jiné sloučeniny. Obsah aktivního oxidu vápenatého nesmí být menší než 10,0 % hmotnosti. Vápenatý popílek obsahující aktivní oxid vápenatý mezi 10,0 % a 15,0 % hmotnosti musí obsahovat zároveň nejméně 25,0 % hmotnosti aktivního oxidu křemičitého.

Podle americké klasifikace ASTM C 618 jsou popílky rozděleny dle chemického složení do dvou skupin, **popílky typu C** (vápenaté) a **popílky typu F** (křemičité). Oba typy se liší sumou ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), která má u typu C hodnotu 50 % a u typu F hodnotu 70 % celkové hmotnosti. V konečném důsledku to znamená, že se oba popílky liší obsahem CaO. Popílek typu F pochází ze spalování antracitu a černého uhlí a má nízký obsah CaO (do 5 %), zatímco popílek typu C pochází ze spalování mladého hnědého uhlí a zejména lignitu a jeho obsah CaO dosahuje hodnoty 10 až 40 % [18]. Popílek z černého uhlí (typu F) má menší variabilitu vlastností, vykazuje vysokou pucolánovou aktivitu, protože obsahuje velké množství amorfniho SiO_2 , a je tedy vhodnější příměsí do betonu, než popílek z hnědého uhlí

(typu C). Ačkoliv v ČR je 80 % popílků z hnědého uhlí a popílek z černého uhlí je produkován jen v Dětmovicích, vápenatý popílek (typu C) se v ČR prakticky nevyskytuje [1,6,14,16].

Popílek zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu, ale zvyšuje potřebný vodní součinitel, neboť část vody se spotřebuje k adsorpci na povrchu zrn popílku. V začátcích používání popílků do betonů byla obava, že mechanické vlastnosti betonu při náhradě většího množství cementu nebudou vyhovující v důsledku zmíněné nutnosti zvýšení vodního součinitele. V současné době je pozornost využívání popílků zaměřena na vysokohodnotné a samozhutnitelné betony, ve kterých se využívají vysoce účinné plastifikátory umožňující výrazné snížení vodního součinitele při zachování požadované zpracovatelnosti.

Popílek rovněž zvyšuje dlouhodobé pevnosti betonu [1]. Pucolánová reakce se začíná projevovat přibližně okolo 28. dne při podmínkách normálního zrání, přičemž pevnosti získané na vzorcích betonů s přísadkou popílku byly podstatně vyšší po 90 dnech normálního zrání [16]. Pucolánová reakce popílku je tedy pomalá, což je mimo jiné způsobeno skelným stavem popílkových zrn.

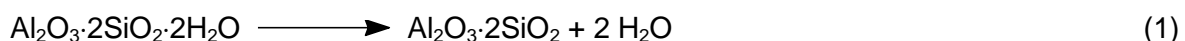
Jednou z nevýhod použití popílků jako náhrady části cementu je snížení pevnosti malty v raném období pro ty druhy aplikací, kde je požadován rychlý nárůst pevností. Vhodnou alternativou, kterou lze odstranit tuto nevýhodu je použití vyššího množství popílku než je množství nahrazovaného cementu. V rámci rozsáhlého výzkumu zaměřeného na využití popílku ve stavebnictví se uvádí, že popílků jsou vhodné jako příměs nahrazující část cementu jen do takových malt a betonů, kde je zabezpečeno dostatečné množství vody potřebné na hydrataci kvalitním ošetřováním. Jen za těchto okolností může dojít k vyrovnání, resp. zvýšení pevnosti malt a betonů s popílků proti pevnosti malt a betonů porovnávacích [16].

Popílků lze ve stavebnictví využívat v řadě aplikací [14]:

- a) pro výrobu maltovin – příměs do směsných cementů (nejlépe se uplatňují popílků, jejichž jemnost je přibližně shodná s jemností cementu)
- b) pro výrobu malt na zdění a pro úpravy omítky
- c) jako částečná náhrada pojiva a jemných podílů plniva v betonu
- d) jako silikátová složka do autoklávovaných pórobetonů
- e) pro spékané popílkové sbalky – lehčené kamenivo
- f) jako ostřivo do keramických výrobků
- g) do vápenopopílkových směsí – podkladní vrstvy vozovek, zpevňování plání.

2.1.1 Metakaolin

Metakaolin je pucolánový materiál, jehož průmyslové využívání začíná již v minulém století. Metakaolin se vyrábí tepelnou aktivací kaolinu, kaolinitických jílů a jiných vhodných surovin s kaolinitem jako převažující složkou [19]. Minerál kaolinit je definován vzorcem $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ze vzorce je patrné, že tento minerál obsahuje ve své struktuře vázanou vodu, která se zahříváním od teploty kolem 450 - 500 °C až do teplot zhruba 800 – 850 °C uvolňuje podle rovnice [15,20-22]:



Vysoká teplota rozkladu ukazuje na chemicky vázanou vodu, při odštěpování vody se jedná o tzv. dehydroxylaci [15,20-21]. Tepelnou aktivací se tedy z původního kaolinitu odstraní tzv. konstituční voda, čímž dojde k destrukci struktury vstupního materiálu a tvorbě rentgenoamorfni látky ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), tj. metakaolinu [15]. K tvorbě metakaolinitu, který představuje hlavní složku surového metakaolinu, dochází postupně, v závislosti na velikosti částic kaolinitu, dokonalosti jeho krystalové struktury (krystalinitě), rychlosti a podmínkách zahřívání [22]. Kalcinovaný produkt je rychle zchlazen a následně pomlet na jemný prášek [15].

Metakaolin je bílá práškovitá látka, která má velikosti částic a měrný povrch závislé na způsobu mletí [15,20-21].

Metakaolin používaný při laboratorním výzkumu jako část náhrady cementu v cementové maltě nebo betonu s sebou přináší zejména následující pozitiva [15,20,22]:

- a) dochází ke „zjemnění“ pórové struktury cementového tmele a následně cementového kamene, a tím k celkovému snížení propustnosti betonu
- b) nižší propustnost cementového kamene se podílí na zvýšení odolnosti proti pronikání a působení agresivních roztoků (chloridů a síranů) a na celkovém zlepšení trvanlivostních vlastností betonu
- c) použitím metakaolinu lze docílit podstatného zvýšení pevnosti malt nebo betonů v tlaku, které je srovnatelné s účinky křemičitých úletů
- d) přítomnost metakaolinu vede k potlačení možné objemové expanze v důsledku alkalicko-křemičité reakce kameniva
- e) použitím metakaolinu lze docílit snížení tvorby primárních i sekundárních výkvětů betonu, ovšem v závislosti na chemickém složení použitého superplastifikátoru
- f) snižuje smršťování betonu, protože díky lepšímu uspořádání částic vytváří kompaktnější beton
- g) zlepšuje zpracovatelnost a povrchovou úpravu betonu.

2.2 Hydraulicky nebo latentně hydraulicky aktivní látky

Jak již bylo zmíněno, jedná se o látky, které obsahují vápenaté sloučeniny a mohou v některých případech reagovat s vodou bez příměsí zásaditých sloučenin. Příkladem hydraulicky reagujících látek je vysokopecní granulovaná struska.

2.2.1 Struska

Strusky jsou pevné nekovové odpady hutní výroby, které vznikají reakcí doprovodných složek kovonosné sloučeniny v rudě se struskotvornou přísadou (CaO). Ve stavebnictví se využívají jako pojivo do směsných cementů nebo jako příměs do betonů, lze ji použít i jako plnivo [14].

Nejvhodnější pro výrobu pojiv je vysokopecní struska vznikající při výrobě surového železa, která obsahuje řadu vápenatých a hořečnatých křemičitanů a hlinitokřemičitanů. V kyselých struskách jsou hlavními minerály anortit - $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ a diopsid - $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$.

Hlavními minerály v zásaditých a neutrálních struskách jsou gehlenit - $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$, akermanit - $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$, melilit - pevný roztok gehlenitu a akermanitu, merwinit - $3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$, belit - β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ a wollastonit - β - $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ [23]. Struska se musí při vypouštění z vysoké pece rychle ochladit (granulovat), aby se zabránilo její krystalizaci a měla tím co největší podíl amorfni fáze [6,14,23]. Strusky používané pro výrobu pojiv obsahují asi 10 % krystalické fáze.

Amorfni struska vykazuje latentně hydraulické vlastnosti, tzn. reaguje ve vodě i sama (bez přídavku $\text{Ca}(\text{OH})_2$), ale reakce je velmi pomalá a nedokonalá, vznikají postupně hydratované křemičitany a hlinitany vápenaté a hořečnaté, které jsou pojivé a vykazují určitou pevnost. Je to způsobeno tím, že na rozdíl od pucolánů obsahuje vápenaté sloučeniny. V přítomnosti i malého množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se pak chová jako plně hydraulická látka, poněvadž zásadité prostředí urychluje tvrdnutí strusky a působí jako katalyzátor hydratačního procesu. To znamená, že i malý přídavek portlandského cementu (a tedy i malé množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ uvolněné jeho hydratací), urychlí tvrdnutí strusky. Díky tomu je možné míchat strusku s portlandským cementem v širokém spektru poměrů (podle EN 197-1 [7] 6 – 95 %). Samozřejmě cementy s rozdílným množstvím strusky budou mít odlišné vlastnosti. Týká se to především krátkodobých pevností (2 až 7 dní), kdy se pomalá hydratace strusky projevuje jen velmi málo a k pevnosti přispívá pouze hydratace portlandského cementu [6].

Vhodnost strusek je dána jak fyzikálním stavem (amorfni stav), tak i chemickým složením. Vhodnost chemického složení je posuzována podle několika vztahů vycházejících z výsledků chemických rozborů. Na základě obsahu jednotlivých sloučenin ve strusce lze její kvalitu hodnotit pomocí modulů, stejně jak je tomu u cementů. Vzhledem k tomu, že pro výrobu cementů se doporučují zásadité strusky, je jedním ze základních hodnotících kritérií modul zásaditosti M_z [14,23]:

$$M_z = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

Zásadité strusky, které mají modul zásaditosti $M_z > 1$ jsou tedy jako pojivo vhodnější, ale hůře se granulují. Při pomalém ochlazení přecházejí do krystalického stavu a hrozí zde i nebezpečí silikátového rozpadu (viz níže). U kyselých strusek při jejich ochlazení rychle narůstá jejich viskozita, takže zde nejsou tak vhodné podmínky pro vznik krystalické struktury.

Dalším kritériem pro posuzování kvality vysokopecních granulovaných strusek je index F, který navrhl Keil. Tento zohledňuje i vliv obsahu CaS a MnO ve struskách a vypočítá se ze vztahu [23]:

$$F = \frac{\text{CaO} + \text{CaS} + 0,5 \cdot \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}} \quad (3)$$

Podle tohoto kritéria je struska zařazována do 3 kategorií:

- | | |
|--------------------|--|
| a) $F < 1$ | struska nevhodná pro výrobu struskoportlandských cementů |
| b) $F = 1,5 - 1,9$ | struska dobré kvality |
| c) $F > 1,9$ | struska velmi dobré kvality |

Strusky mohou procházet změnami struktury, nazývanými rozpady, které vedou ke změně objemu [14,23]. Silikátový rozpad probíhá při změně β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ na γ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, během které dochází ke zvětšení objemu o 10 % a snížení objemové hmotnosti. Železnatý rozpad

nastává při oxidaci FeS, kde Fe^{2+} přejde na Fe^{3+} a objem se zvětší o 40 %, manganatý rozpad probíhá podle rovnice:



Všechny uvedené procesy jsou pomalé a probíhají až v zatvrdlém kompozitu. Negativním faktorem při využívání strusek je jejich rekrystalizace. Vzniká gehlenit, akermanit a další fáze. To má za následek zhoršování fyzikálně-mechanických vlastností produktů z nich vyrobených.

Norma ČSN EN 206-1 se nezabývá hodnotou efektivního vodního součinitele $(w/c)_{\text{eff}}$ při použití strusky jako příměsí, považuje ji za plnohodnotnou náhradu cementu. K užívání granulované strusky jako náhrady cementu vede uživatele betonu zejména snížení vývinu hydratačního tepla, zvýšení pevností po delší době, snížení penetrace chloridů, zvýšení odolnosti proti síranům a proti alkáliovému rozpínání kameniva. Důsledně je doporučováno dobré počáteční ošetření betonu, v opačném případě dochází ke zvýšení rychlosti karbonatace, odlupování povrchu betonu a snížení odolnosti proti zmrazovacím cyklům.

3 HYDRATACE CEMENTU

3.1 Hydratace portlandského cementu

Hydratace portlandského cementu představuje složitý komplex reakcí mezi slínkovými minerály, síranem vápenatým a vodou.

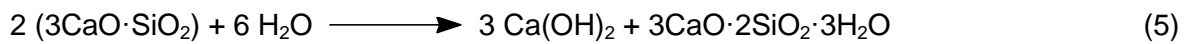
Po smísení s vodou cement tuhne a postupně nabývá na pevnosti, přičemž se vytváří reálná struktura s postupně se snižujícím objemem pórů. Tuhnutí a tvrdnutí probíhá za aktivní účasti vody. Reakce slínkových minerálů s vodou jsou ve své podstatě hydrolyzou s následující hydratací, přičemž reakcí s vodou se původně bezvodé slínkové minerály přeměňují na hydratační produkty, tzn. na nové sloučeniny obsahující chemicky vázanou vodu. Tyto hydratační produkty, ačkoliv jde o hydratované fáze, jsou ve vodě nerozpustné a stálé.

Chemické reakce, které probíhají při hydrataci portlandského cementu, jsou komplexní. Následující kapitoly budou tedy zaměřeny pouze na reakce, při nichž vznikají, popř. se spotřebovávají hydratační produkty, které pak následně mohou podléhat karbonataci. Jedná se o hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandit, zkráceně CH), hydratované křemičitany vápenaté obecného vzorce $m\text{CaO} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot p\text{H}_2\text{O}$ (označované někdy souborně jako tzv. CSH gely) a hydratované hlinitany vápenaté ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

V následujícím textu bude často použito zkrácené označení, obvyklé v cementářské chemii: C jako zkratka pro CaO, S pro SiO_2 , A pro Al_2O_3 , F pro Fe_2O_3 , Š pro SO_3 a H pro H_2O .

3.1.1 Hydratace C_3S a C_2S

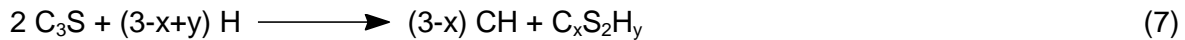
Hlavní složkou portlandského cementu je C_3S (viz tab. 1) a z tohoto důvodu se vyznačuje hlavním vlivem na vlastnosti cementového tmelu a betonu. Jeho podstatná část zreaguje v průběhu 30 dnů, další již menší podíl do jednoho roku. Reakci C_3S s vodou lze vyjádřit následovně [4]:



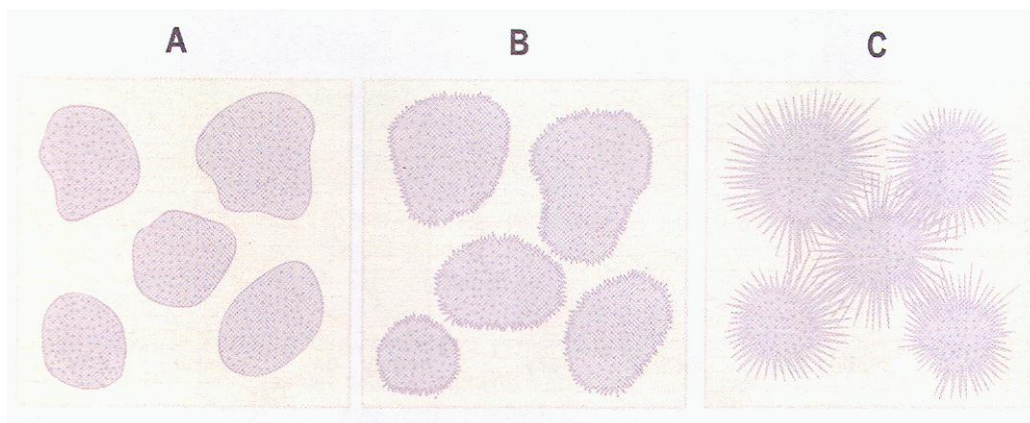
ve zkrácené verzi



přesněji

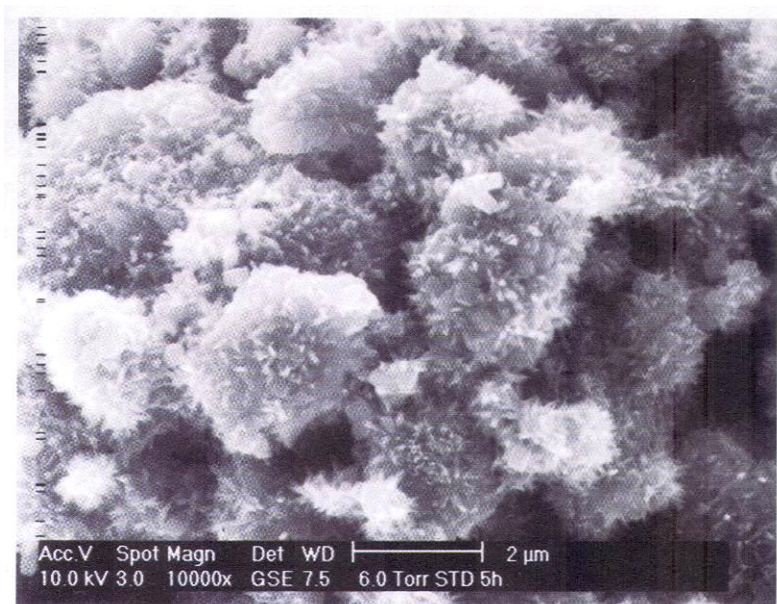


Vznikající CSH produkty mají v případě $x = 0,5 - 1,5$ a $y = 0,5 - 2,5$ lístečkovou strukturu (CSH I) a v případě $x = 1,5 - 2,0$ a $y = 1,0 - 4,0$ vláknitou strukturu (CSH II). Při pokračující hydrataci se tvoří na površích hydratujících zrn C_3S vlákna hydratovaných křemičitanů vápenatých, která se postupně začínají dotýkat a poté přemostňovat mezery mezi hydratujícími zrny. Tři stadia hydratace jsou schematicky znázorněna na obr. 2: je to počátek hydratace, kdy reakce ještě nenastala a soustava cement + voda je plastická (A). Následuje počátek tuhnutí, kdy se vlákna od jednotlivých zrn začínají dotýkat (B), pak vlákna postupně rostou, prodlužují se a díky přemostňování mezer mezi zrny a prorůstání vláken dochází ke tvrdnutí (C) [6]. Obr. 3 ilustruje mikrostrukturu cementové pasty po 5 hodinách: vlákna hydratovaných křemičitanů vápenatých (CSH), vzniklá díky hydrataci C_3S , prorážejí povlak primárního ettringitu (vznik ettringitu je popsán v kap. 3.1.2), který vznikl během prvních minut po smíchání cementu s vodou a který obaluje hydratující zrna (obr. 4).

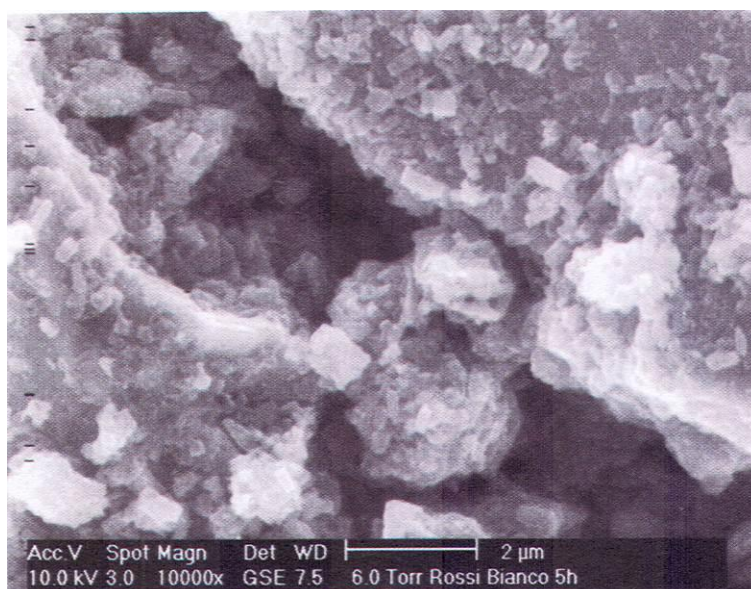


Obr. 2 – Schematické znázornění vývoje struktury v průběhu hydratace portlandského cementu od smísení s vodou (A), přes tuhnutí (B) až k tvrdnutí cementového tmelu (C) [6].

Současně se vznikem CSH sloučenin nastává přesycování roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlanditem, který se později vylučuje v jemných krystalcích, nejčastěji destičkovitého tvaru. Krystalky jsou tedy ploché a nemají vláknitou morfologii, a proto portlandit sám o sobě nepřispívá k vývoji pevností. Disociací tohoto hydroxidu se však do pórového roztoku uvolňují hydroxidové ionty, a tím se v pórovém roztoku vytváří zásadité prostředí (nasycený vodný roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$ má při $25\text{ }^\circ\text{C}$ $\text{pH} = 12,4$). Jak již bylo zmíněno v úvodu, v takovém prostředí vzniká na povrchu výztuže pasivační vrstva oxidů železa, která působí jako bariéra zabraňující přímému kontaktu kyslíku, vody i jiných agresivních látek s povrchem výztuže. Chrání tedy ocelovou výztuž před korozí. Jeho přítomnost je rovněž důležitá u směsných cementů, kdy reakce mezi hydroxidem vápenatým a příměsmi výrazně přispívá k vývoji pevností tvrdnoucí cementové pasty [6].



Obr. 3 – Struktura fáze C_3S po 5 hodinách hydratace zobrazena pomocí skenovacího elektronového mikroskopu; vznikající vlákna CSH vyvolávají rychlé tvrdnutí [6].



Obr. 4 – Struktura hydratujícího portlandského cementu ve 30. minutě po smíchání s vodou, sledovaná skenovacím elektronovým mikroskopem [6].

Reakci nelze přesně stechiometricky vyjádřit, jelikož CSH sloučeniny se vyznačují kolísavým složením. Identifikace přesného složení a struktury CSH produktů je obtížná, jelikož vykazují rentgenoamorfni charakter. Tyto hydratované křemičitany vápenaté s molárním poměrem $CaO/SiO_2 < 3$ se rozdělují na základě strukturního uspořádání do několika hlavních skupin [4]:

- a) skupina wollastonitu (β -CS) – svou vnitřní strukturou s vláknitými nebo prismatickými krystaly mu odpovídají nekoit ($C_3S_6H_8$), okenit (CS_2H_2), xonotlit (C_5S_5H), foshagit (C_4S_3H) a hillebrandit (C_2SH);

- b) skupina tobermoritu – do této skupiny náleží krystalické fáze (1,13 nm tobermorit - $C_5S_6H_5$, 1,4 nm tobermorit - $C_5S_6H_9$), nedokonale krystalické sloučeniny (CSH I a CSH II) a téměř amorfní fáze (gel s molárním poměrem $CaO/SiO_2 > 2.0$);
- c) skupina gyrolitu – do této skupiny řadíme sloučeniny s hexagonálními nebo pseudo-hexagonálními krystaly (gyrolit - $C_2S_3H_2$, truscotit – $C_6S_{10}H_3$, Z-fáze – C_9S_6H , Assarssonova Z-fáze – C_9S_6H);
- d) fáze příbuzné γ - C_2S – calcio-chondroit (C_5S_2H), kilchoanit (C_3S_2) a C_2S γ -hydrát ($C_6S_3H_2$);
- e) ostatní hydrosilikátové fáze – afwillit ($C_3S_2H_3$), C_2S α -hydrát a dellait (C_6S_3H).

Hydratace C_2S probíhá obdobně, reakce je však značně pomalá. Hlavní podíl zreaguje teprve po časovém období delším než 30 dnů, reakce však pokračuje ještě po 1 roce. Reakcí C_2S s vodou vznikají opět CH a CSH sloučeniny [4]:



Pro křemičitanové slínkové minerály je tedy během procesu hydratace charakteristická tvorba $Ca(OH)_2$ a hydratovaných křemičitanů vápenatých s nižším poměrem CaO/SiO_2 než ve výchozím minerálu. Uvedené hydratační produkty mohou následně podléhat karbonataci.

3.1.2 Hydratace C_3A a C_4AF

Na rozdíl od křemičitanových slínkových minerálů má C_3A sklon vytvářet sloučeniny výrazně krystalického charakteru. Konečným stabilním produktem dlouhodobé hydratace C_3A je kubický $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ (C_3AH_6), který vzniká přes některé hexagonální meziproducty, např. $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13-19H_2O$ (C_4AH_{13-19}) a $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$ (C_2AH_8). V přítomnosti $Ca(OH)_2$ (CH) reaguje C_3A následovně:



Dochází tedy ke spotřebě hydroxidu vápenatého. V případě absence sádrovce nebo jeho nedostatečného množství vede reakce k tzv. falešnému tuhnutí [4]. Tento jev je důsledkem morfologie hydratovaných hlinitanů vápenatých. Tyto složky mají lupínkovitý charakter, proto ve srovnání s jehlicovitým charakterem CSH přispívají k pevnosti jen nepatrně. Ploché krystaly hydratovaných hlinitanů vápenatých však působí jako můstky mezi cementovými zrny, a tím způsobují ztrátu plasticity cementové pasty [6].

Podstatně důležitější je průběh hydratace C_3A v přítomnosti sádrovce $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ($C\hat{S}H_2$). Sádrovec, který se přidává k portlandskému slínku jako zpomalovač tuhnutí, přechází do roztoku, který je následkem hydratačních reakcí přesycen $Ca(OH)_2$. Za těchto okolností se tvoří při větším množství síranu vápenatého primární ettringit (označovaný také jako AF_t fáze) - $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ($C_3A \cdot 3C\hat{S} \cdot H_{32}$) [4,5]. Ettringit zpomaluje rychlost hydratace tím, že ve formě malých jehliček pokrývá povrch C_3A , čímž zabraňuje dalšímu kontaktu s vodou [6]. Ve druhé fázi pak reaguje ettringit s C_3A za vzniku monosulfátu (AF_m fáze) - $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ($C_3A \cdot C\hat{S} \cdot H_{12}$), který vzniká rovněž v přítomnosti menšího množství $CaSO_4$ [5,8]. Přeměna ettringitu na monosulfát může probíhat rovněž reakcí s C_4AH_{13} . Při této reakci vedle monosulfátu rovněž vzniká $Ca(OH)_2$ (CH):



Množství sádrovce, který je přidáván, se pohybuje v rozmezí 7 – 8 % vzhledem k hmotnosti cementu. Toto množství je daleko nižší, než by odpovídalo stechiometrickému množství C_3A , potřebnému pro reakci, tedy pro transformaci všeho C_3A na ettringit. Ovšem vyšší množství sádrovce by mohlo vést k tvorbě ettringitu ještě dlouho po tuhnutí cementu, což by se projevilo vznikem trhlin v zatvrdlém betonu [6].

Feritová fáze ve své podstatě představuje tuhý roztok v systému $C_2A - C_2F$ a ve slínku portlandského cementu ji lze označit jako C_4AF nebo C_2AF , příp. $C_2A_{0,5}F_{0,5}$ [4,8]. Hydratace feritové fáze je obdobná C_3A , avšak značně pomalejší [8]. Při nízkých teplotách vznikají hexagonální sloučeniny $C_4(A,F)H_{19}$ nebo $C_4(A,F)H_{13}$, které jsou stálé do teploty 20 °C, při vyšší teplotě se mění v kubický $C_3(A,F)H_6$. Reaktivita feritové fáze se zvyšuje se stoupajícím poměrem A/F. Tvorba C_3FH_6 spolu s fází C_4FH_{13} byla zjištěna pouze u hydratace C_2F . Reakci feritové fáze s vodou za přítomnosti portlanditu lze znázornit takto:



V přítomnosti sádrovce vzniká stejně jako u C_3A nejdříve ettringit, obsahující substituované Fe^{3+} ionty a jakmile všechen sádrovec zreaguje, přechází ettringit na monosulfát:



Reakce za účasti $CaSO_4$, aluminátové a feritové fáze mají významnou úlohu v počátečním stádiu tuhnutí a tvrdnutí. Za konečné fyzikální a mechanické vlastnosti ztvrdlého cementu však „odpovídají“ C-S-H sloučeniny a $Ca(OH)_2$, jež vznikají hydrolyzou křemičitanových slínekových minerálů (C_3S a C_2S) – viz kap. 3.1.1.

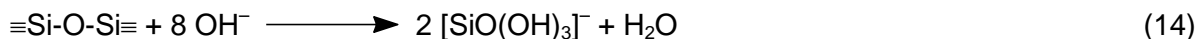
V některých speciálních cementech se C_3A nebo C_4AF nevyskytují. Pokud se v cementu nevyskytuje C_3A , nazývá se takový cement jako ferrocement a je charakteristický svou tmavou barvou. Absence C_3A vede ke snížení dávky sádrovce jako regulátoru tuhnutí. Takový cement je pak velmi citlivý na superplastifikátory. Pokud v cementu chybí C_4AF , je portlandský cement bílý a je používán pro speciální architektonické účely. Ve srovnání s ferrocementem vyžaduje bílý cement pro regulaci tuhnutí více sádrovce. Tím je méně citlivý na působení superplastifikátorů a vyvíjí také větší hydratační teplo [6].

3.2 Hydratace směsného cementu

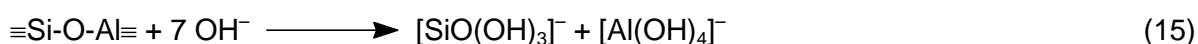
U směsných cementů se při mletí portlandského slínku přidávají latentně hydraulické (struska) a pucolánové příměsi (křemičité úlety, popílky, apod.) – viz tab. 2, popř. kap 2. Jak již bylo zmíněno v kap. 2, jedná se o křemičité nebo hlinitokřemičité materiály, které nemají žádné, nebo mají jen malé pojivé schopnosti. Za přítomnosti vlhkosti reagují nejčastěji s hydroxidem vápenatým na produkty, které již pojivé schopnosti mají (pucolánová reakce) [1].

Produkty reakce těchto materiálů s hydroxidem vápenatým jsou podobné produktům hydratace portlandského cementu – viz kap. 3.1. Obdobně jako při hydrataci portlandského cementu tedy vznikají hydratované křemičitanové vápenaté a hydratované hlinité vápenaté. Rozdíl je ve výskytu hydroxidu vápenatého, který při hydrataci portlandského cementu vzniká, zatímco při pucolánové reakci se hydroxid vápenatý, vzniklý při hydrataci portlandského cementu, spotřebovává [13,24]. Další rozdíl je v rychlosti reakce, kdy při pucolánové reakci vznikají CSH sloučeniny mnohem pomaleji než reakcí křemičitanových slínekových minerálů (C_3S a C_2S) s vodou [6].

Pucolánová aktivita souvisí s neuspořádanou strukturou molekulárních řetězců přítomných látek [6,14]. Pucolány, které jsou složeny převážně z amorfního SiO_2 , reagují s hydroxidem vápenatým v přítomnosti vody za vzniku hydratovaných křemičitanů vápenatých, převážně amorfního charakteru, tzv. CSH gelů. Pucolánovou reakci tohoto typu lze schématicky popsat rovnicí [14]:



Pucolány s obsahem jak křemičité, tak hlinité složky, vytvářejí s hydroxidem vápenatým řadu sloučenin, vedle CSH sloučenin jsou to především hexagonální hlinitany C_4AH_{13} . Podobné výsledky byly obdrženy reakcí zeolitických sloučenin s hydroxidem vápenatým. Další produkty pucolánové reakce mohou být rovněž C_3AH_6 , $\text{C}_3\text{AS}_2\text{H}_2$, $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaCO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ a C_2ASH_8 [11]. Složení reakčních produktů je závislé na typu pucolánového materiálu a na podmínkách průběhu reakce s hydroxidem vápenatým, tj. na okolní teplotě a přítomnosti vlhkosti. Pucolánovou reakci tohoto typu lze schématicky popsat rovnicí [14]:



Pucolány neobsahují žádné nebo jen velmi malé množství oxidu vápenatého. Tím se liší od latentně hydraulických příměsí, které vápenaté sloučeniny obsahují, např. vysokopeční struska (viz kap. 2), která hydratuje v přítomnosti hydroxidu vápenatého za vzniku CSH I, hydrogranátu $\text{C}_3\text{A}_{1-x}\text{F}_x\text{S}_y\text{H}_{6-2y}$ a gehlenithydrátu C_2ASH_8 [11].

Pucolánová reakce je podmíněna reaktivitou pucolánu, obsahem aktivních složek, poměrem hydroxid vápenatý/pucolán, množstvím vody, teplotou a dobou ošetření. Obecně lze říci, že stoupající teplota zvyšuje reakční rychlost na počátku reakce, ale bylo zjištěno, že po 6 dnech již není výrazný rozdíl mezi spotřebovaným hydroxidem vápenatým u vzorku, kde reakce probíhala při teplotě 30°C a při teplotě 70°C [11]. Reaktivita u stejného druhu pucolánu se pak může lišit v závislosti na velikosti částic, tedy na měrném povrchu, ale také na chemickém a mineralogickém složení a na primární úpravě, např. teplotě a době výpalu apod.

Pucolány obsahují reaktivní formy hlinitanů, křemičitanů, železitanů a především amorfni SiO_2 . Tyto materiály tedy obsahují stejné oxidy jako portlandský cement, ale v jiném poměru a o jiném mineralogickém složení. Hlavní rozdíl je v molárním poměru SiO_2/CaO , kdy pucolány mají větší obsah SiO_2 , zatímco portlandský cement především CaO [24].

V případě karbonatace betonů připravených ze směsných cementů bude tedy vedle reakce CH s oxidem uhličitým probíhat i pucolánová reakce. Reakce budou probíhat konkurenčně v závislosti na podmínkách. Během pucolánové reakce však zároveň vznikají CSH sloučeniny, které rovněž mohou s CO_2 reagovat [24]. Navíc vyšší obsah CSH sloučenin se odráží v nižší pórovitosti ztvrdlé pasty, a ta je proto méně propustná pro CO_2 . K pasivaci výztuže v případě betonů ze směsných cementů rovněž přispívá skutečnost, že ačkoli $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reaguje s pucolánem nebo struskou, stále jej určité množství zbývá. I toto malé množství totiž dokáže zajistit vysoké pH pórového roztoku [6].

4 KARBONATACE BETONU

Karbonatace betonu je chemický proces způsobený reakcí oxidu uhličitého se složkami cementového tmelu v betonu, čímž dochází k postupnému snižování pH pórového roztoku až na hodnotu 8,3. Postoupí-li linie (čelo) takto zkarbonatované povrchové vrstvy betonu až

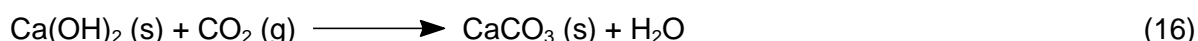
k výztuži (tj. zasáhne celou krycí vrstvu), dojde k narušení ochranné (pasivační) vrstvy na povrchu výztuže, která pak může začít v přítomnosti kyslíku a vlhkosti korodovat. Pasivační vrstva se na povrchu výztuže vytváří vzhledem ke skutečnosti, že pórový roztok v nezkarbonatovaném betonu má vysokou koncentraci hydroxidových iontů odpovídající hodnotě $\text{pH} > 12$.

Je-li tedy beton kompaktní (tj. bez trhlin), pronikají molekuly CO_2 rovnoměrně od povrchu betonu do jeho vnitřních vrstev difúzí a čelo zkarbonatované vrstvy tak kopíruje povrch betonu. Je-li však beton porušen trhlinkami, stávají se trhlinky místem, kudy mohou do struktury betonu intenzivně pronikat plyny z vnějšího prostředí. V takto zasažených místech jsou vytvářeny podmínky pro rozvoj karbonatace. Pomocí srovnání míry karbonatace povrchu betonu, který byl atmosférickým vlivům vystaven po celou dobu užívání konstrukce, s mírou karbonatace betonu, který se nachází v bezprostřední blízkosti trhliny, můžeme pak posoudit dobu vzniku trhliny [25].

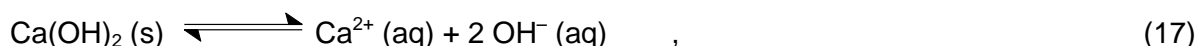
4.1 Proces karbonatace betonu

Hydroxidové ionty (OH^-) v pórovém roztoku vznikají jednak disociací hydroxidu vápenatého, který se tvoří při hydrataci silikátových slínekových minerálů, a rovněž disociací hydroxidu sodného a draselného, které se tvoří hydrolyzou minerálů obsahujících Na_2O a K_2O . Zatímco hydroxidy sodný a draselný jsou zcela rozpuštěny v pórovém roztoku, obsah hydroxidu vápenatého je nízký vzhledem k jeho rozpustnosti (0,16 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve 100 g vody při 20 °C) a v cementovém tmelu je přítomen rovněž v krystalické formě (portlanditu). Pórový roztok v nezkarbonatovaném betonu má vysokou koncentraci hydroxidových iontů odpovídající hodnotě $\text{pH} > 12$ [26].

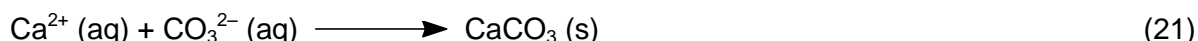
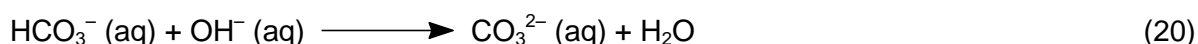
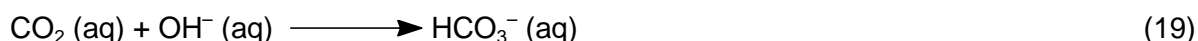
Karbonataci způsobuje oxid uhličitý, který reaguje se zásaditými křemičitany a hlinitany vápenatými, ale především s hydroxidem vápenatým, sodným a draselným. Hydroxidy sodný NaOH a draselný KOH jsou přítomny v cementovém tmelu v nízké koncentraci, dominantní roli hraje především hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Reakce mezi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (s) a CO_2 (g) lze popsat reakcí [26]:



Tato reakce se skládá z několika elementárních kroků, které probíhají v pórovém roztoku, vytvářejícím tenký film na stěnách pórů [27-29]. Jedním z elementárních kroků je rozpuštění portlanditu:



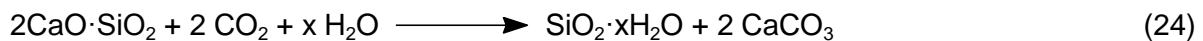
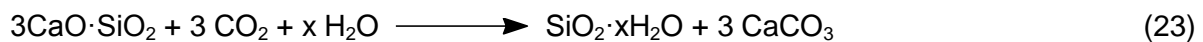
dalším krokem je pak rozpuštění CO_2 v pórovém roztoku a vzájemná reakce těchto sloučenin:



Rozpustnost CaCO_3 je mnohem nižší než rozpustnost $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Snížení koncentrace hydroxidových iontů neutralizací oxidem uhličitým v pórovém roztoku tedy vede k rozpuštění dalších podílů krystalického hydroxidu vápenatého až do jeho úplného vyčerpání. Při absenci

hydroxidu vápenatého se sníží pH pórového roztoku na hodnotu 8,3, která odpovídá koncentraci hydroxidových iontů v nasyceném roztoku uhličitanu vápenatého (1,4 mg CaCO₃ ve 100 g vody při 20 °C). Postoupí-li hloubka takto zkarbonatované povrchové vrstvy betonu až k výztuži, dojde k narušení ochranné (pasivační) vrstvy na povrchu výztuže, která pak za jistých podmínek může začít korodovat.

Ke snižování pH pórového roztoku betonu dochází pouze v případě uvedené reakce. Vyčerpáním zásoby hydroxidu vápenatého vzniklého hydratací slínekových minerálů však karbonatace nekončí. Ostatní produkty hydratace slínekových minerálů reagují rovněž s oxidem uhličitým velmi složitými reakčními mechanismy. Stálost těchto hydratačních produktů vůči oxidu uhličitému a jiným kyselým plynům je různá a řídí se termodynamickými zákony. Uplatňuje se i hodnota pH pórového roztoku a koncentrace karbonatačních produktů jako uhličitanu sodného a draselného, které ovlivňují rozpustnost hydratačních produktů cementu. Karbonataci v další fázi podléhají především CSH sloučeniny a dosud nezhydratovaný C₃S a C₂S dle následujících reakcí [27]:



Karbonatace hydratovaných hlinitanů vápenatých vede ke vzniku Al₂O₃·nH₂O a C₃A·CaCO₃·H₁₁₋₁₃, který může karbonatovat dále za vzniku CaCO₃ a opět Al₂O₃·nH₂O (25-26). U hydratovaných hlinitanů vápenatých a ostatních dosud nezhydratovaných složek cementového tmelu probíhá karbonatace pouze v povrchové vrstvě a podstatná část pak zůstává nedotčena [27].

Souhrnně lze konstatovat, že proces karbonatace tedy zahrnuje difúzi oxidu uhličitého v plynné fázi pórovou strukturou betonu, jeho rozpuštění v pórovém roztoku přítomném na povrchu jednotlivých pórů, rozpuštění pevného hydroxidu vápenatého v pórovém roztoku, jeho následnou difúzi roztokem a konečně reakci s rozpuštěným CO₂, popř. reakci CO₂ s CSH sloučeninami a dosud nezhydratovanými C₃S a C₂S [30].

4.2 Základní etapy karbonatace

Vlastní proces karbonatace rozděluje Matoušek [31-33] do čtyř stádií:

V prvním období karbonatace reaguje oxid uhličitý s hydroxidem vápenatým rozpuštěným v pórovém roztoku. Vzniklý uhličitan vápenatý krystaluje v pórech ve formě kalcitu. Snížení koncentrace hydroxidu vápenatého umožňuje jeho další rozpouštění. To vede k další karbonataci. Vzhledem k velikosti molárního objemu uhličitanu vápenatého a hydroxidu vápenatého dochází k vyplňování kapilárních pórů cementového tmelu a zhoršování jejich průchodnosti. Dochází tedy ke snížení pórovitosti cementového tmelu a ke zvýšení odolnosti proti působení agresivních látek. Mechanické vlastnosti betonu se v tomto stadiu stávají výhodnějšími.

Ve druhém období karbonatují ostatní hydratační produkty cementu, tj. hydratované křemičitany, ale především hlinitany vápenaté. Vznikající modifikace uhličitanu vápenatého, spolu s amorfním oxidem křemičitým, zůstávají v pseudomorfózách po hydratačních

produktech cementu. Uhličitan vápenatý se vyskytuje ve formě jemnozrnných krystalů. Vlastnosti betonu se příliš nemění a pohybují se kolem původních hodnot.

Třetí období karbonatace se vyznačuje rekrytalizací jemnozrnných útvarů uhličitanu vápenatého. Vznikají rozměrné krystaly kalcitu a aragonitu. Vlivem zvýšené vlhkosti může dojít k přeměně metastabilních modifikací uhličitanu vápenatého, aragonitu a vateritu, na stabilní kalcit. V této fázi karbonatace se již zhoršují mechanické vlastnosti betonu vlivem krystalizačního tlaku na stěny pórů.

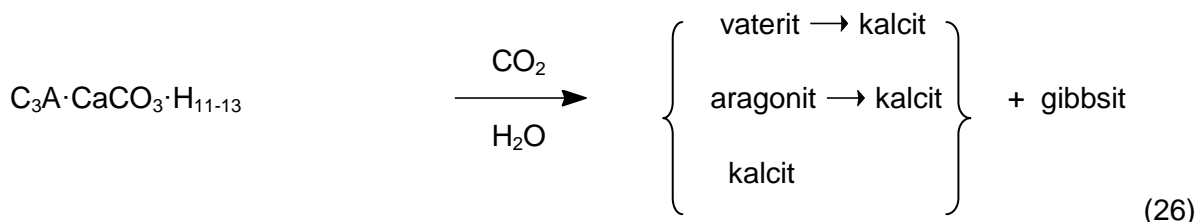
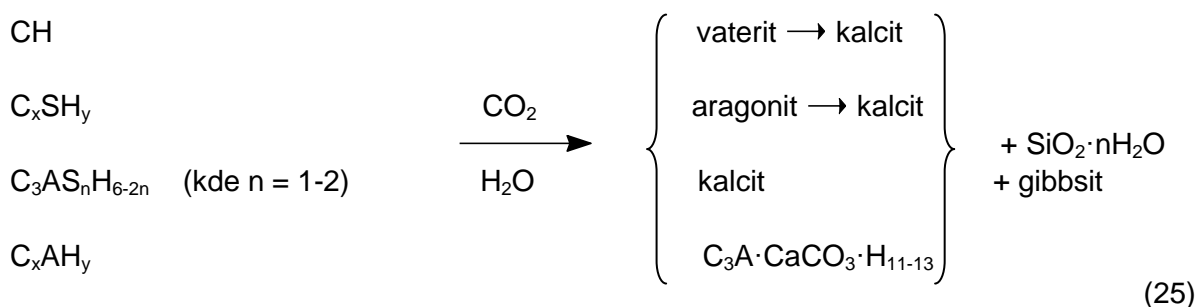
Ve čtvrtém období nastává úplná karbonatace, velké krystaly kalcitu a aragonitu prostupují celou strukturou cementového tmelu, dochází ke ztrátě pevnosti a rozpadu cementového tmelu.

U většiny konstrukcí dosahuje karbonatace maximálně 2. stupně, spíše výjimečně se vyskytují konstrukce ve 3. a 4. stupni karbonatace (v případě intenzivních zdrojů CO_2).

4.3 Stálost produktů vzniklých při karbonataci betonu

V literatuře je možno nalézt schéma karbonatačních reakcí hydratačních produktů cementu [31-33], které uvádí schéma kinetiky karbonatace křemičitanových a hlinitanových cementů (25-26).

Schéma znázorňuje postup fázových přeměn, přičemž je zachycen vznik konečných i přechodných fází. Množství vzniklého uhličitanu vápenatého totiž necharakterizuje zcela fázi karbonatace. Při posuzování karbonatace je nutné rozlišovat modifikace CaCO_3 , tj. přítomnost kalcitu, aragonitu a vateritu, a dále velikost zrn vzniklých produktů karbonatace – viz kap. 4.2.



Pomocí zjištění, v jaké formě je přítomen vzniklý CaCO_3 , můžeme charakterizovat průběh karbonatace, resp. posoudit stav zkarbonatovaného betonu [32]. Vzniklý CaCO_3 může být přítomen společně s amorfním silikagelem v pseudomorfózách po hydratačních produktech

nebo ve formě jemnozrnných krystalických modifikací uhličitanu vápenatého (rozměry převážně v nm), popř. ve formě poměrně velmi rozměrných krystalů kalcitu a aragonitu (rozměry činí i několik μm), vzniklých rekrystalizací předchozích modifikací CaCO_3 . Méně stálé modifikace CaCO_3 mohou vlivem vlhkosti a déle trvající karbonatace, nebo i vyšší teploty, přecházet na modifikace stálejší. Mimoto se mohou zde ještě vytvářet jen přechodně stálé, resp. velmi nestálé sloučeniny (např. během karbonatace hydratovaných hlinitanů vápenatých) [32-33].

V počátečním období hydratace vznikají velké krystaly Ca(OH)_2 ve tvaru hexagonálních desek o průměru přes 3 μm , dále malé jehličkovité krystaly ettringitu a základní CSH sloučeniny. Kalcit vzniklý karbonací mává dosti různý tvar krystalů, nejčastěji jsou to nízké klence (romboedry) – první stadium. Vaterit se nachází ve tvaru destiček, které jsou obvykle velmi jemné a připomínají hexagonální symetrii (druhé stadium). Prizmatické krystaly aragonitu i přes 10 μm dlouhé jsou typické pro třetí stadium a v cementovém tmelu mohou vyvíjet značné krystalizační tlaky. Konečná stadia karbonatace betonů na bázi portlandského cementu se projevují tak, že v celé struktuře cementového tmelu se začnou objevovat početné krystaly aragonitu a kalcitu vzniklé rekrystalizací předchozích modifikací. Tyto krystaly vytvářejí v pórech a kapilárách betonu a nakonec v celé jeho struktuře velké krystalizační tlaky. Mikrostrukturní přeměny a pravděpodobně i krystalizační tlaky způsobují ve čtvrtém stadiu karbonatace destrukci cementového tmelu. Již ve třetím stadiu se to projevuje zvýšeným otěrem betonu. V konečném stavu může potom docházet k úplné ztrátě soudržnosti betonu. Takové případy jsou v praxi dosti vzácné, dochází k nim, např. u špatně zhutněných betonů s vysokou propustností, kdy současně s oxidem uhličitým působí i zvýšená vlhkost [32].

4.4 Faktory ovlivňující karbonataci betonu

Jak vyplývá z předcházejících kapitol, karbonatace betonu je komplexní proces, ke kterému dochází v cementovém tmelu betonu, zatímco kamenivo, které tvoří převážnou část hmotnosti a objemu betonu, slouží z hlediska karbonatace betonu pouze jako inertní plnivo. Jeho množství je ovšem rovněž důležité, jelikož ovlivňuje některé důležité parametry např. difúzi CO_2 betonem [34-35].

Propustnost betonu pro CO_2 je závislá především na počtu, velikosti, tvaru a uspořádání přítomných pórů. Celková pórovitost betonu je tvořena póry cementového tmelu, kameniva i většími dutinkami, danými zvětšenou mezerovitostí kameniva nebo nevhodným zpracováním betonu (např. odmíšením) [33]. Otevřenou pórovou strukturu charakterizují dva důležité parametry – otevřená pórovitost a rozdělení velikosti pórů. Otevřenou pórovitostí se rozumí vzájemně propojené póry, kde je možný pohyb kapalin i plynů. Rozdělení a velikost pórů ovlivňuje rychlost pohybu částic. Velikost pórů se pohybuje v rozmezí několika řádů. Podle způsobu jejich vzniku a jejich charakteristik rozlišujeme póry zhutňovací, vzduchové póry, kapilární a gelové póry. Často se používá rozdělení na makropóry ($> 10^{-5}$ m), kapilární póry (10^{-7} - 10^{-5} m) a mikropóry ($< 10^{-7}$ m) [36]. Z hlediska karbonatace jsou podstatné kapilární póry (viz obr. 5) a makropóry, mikropóry jsou za normálních podmínek zaplněny pórovým roztokem, jsou tedy pro oxid uhličitý nepropustné. Odolnost proti karbonataci je podstatně snižována zvyšováním objemu kapilárních pórů [36]. Pórový systém závisí na typu a množství cementu, vodním součiniteli a stupni hydratace, tj. na složení betonu, jeho zpracování a dalším ošetřování [30,33].



Obr.5 – Kapilární pórovitost cementové pasty [6].

Karbonatace je dále ovlivněna též rychlostí reakce CO_2 s hydratačními produkty, která je dána především typem a množstvím cementu a stupněm hydratace [30].

V případě použití průmyslových odpadů (popílek, struska, křemičité úlety) jako příměsí do betonu, je nutno brát v úvahu mj. i jejich vliv na průběh karbonatace. Jedná se o pucolánově aktivní látky, které v přítomnosti vody reagují s hydroxidem vápenatým za vzniku produktů s pojivými vlastnostmi. Sníží se tak sice koncentrace hydroxidu vápenatého, ale vzhledem ke vzniku vazebných sloučenin může docházet současně ke snížení pórovitosti cementového tmelu v betonu, a tím ke snížení rychlosti difúze oxidu uhličitého, tedy ke zpomalení průběhu karbonatace [13,15,24].

Rovněž voda, která je vždy v menším, či větším množství přítomná v pórovém systému betonu hraje důležitou roli v procesu karbonatace. Kapalná voda na jednu stranu zabraňuje difúzi CO_2 pórovým systémem betonu, na druhou stranu však poskytuje prostředí pro reakci CO_2 s hydratačními produkty, především $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Rychlost karbonatace se z tohoto důvodu s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu (RH) zvyšuje, ovšem při vysokých hodnotách RH blízkých 100 % se rychlost opět snižuje. Při velmi nízké relativní vlhkosti vzduchu může probíhat difúze CO_2 velmi rychle, ale většina pórů je v takovém případě suchá a vlastní karbonatační reakce nemůže probíhat. Při vysoké relativní vlhkosti vzduchu jsou naopak téměř všechny póry naplněny vodou a difúze CO_2 je pak velmi pomalá [28,31-32,36-38]. Vlastní průběh závislosti rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu je však už interpretován rozdílně. Zatímco Papadakis [37] uvádí maximální rychlost při RH = 50 %, Matoušek [31-32] experimentálně naměřil nejvyšší rychlost karbonatace při RH = 93 %, Roy a kol. [38] při RH = 75 % a Lagerblad [28] uvádí nejvyšší rychlost karbonatace mezi RH = 60 – 80 %. Vliv toho faktoru je tedy ještě nutné ověřit.

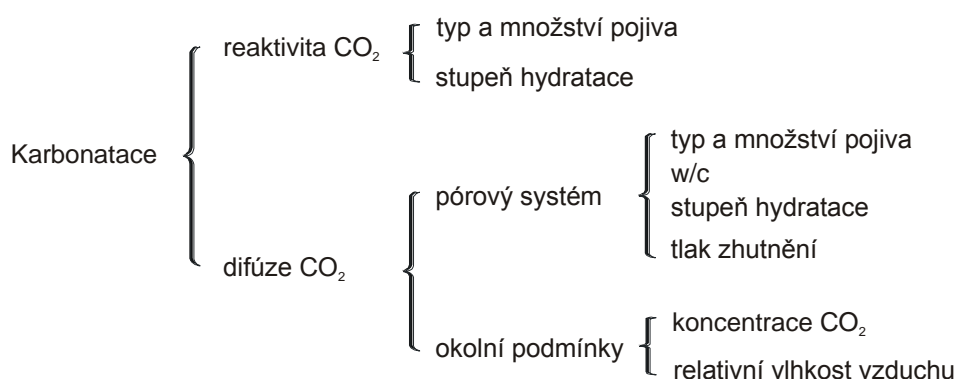
V literárních údajích o složení vzduchu se uvádí koncentrace oxidu uhličitého 0,038 objemových % (700 mg/m^3). Celosvětově však tato hodnota vzrůstá a liší se v různých oblastech (např. ve městech je koncentrace CO_2 vyšší než v jejich okolí – např. v Brně a okolí bylo v roce 2003 naměřeno množství CO_2 v rozsahu $560 - 1560 \text{ mg/m}^3$ v závislosti na typu lokality) [39]. Místně se může koncentrace oxidu uhličitého zvýšit produkcí ze znečišťujících zdrojů, např. tepelných elektráren, tepláren, spaloven, dále kvasnými procesy, výrazný vliv má rovněž dopravní zatížení ve městech. Ve spalinách se sleduje obsah jedovatého oxidu uhelnatého. Při spalovacích procesech se zajišťuje dokonalé spalování

přívodem vzduchu, aby vznikl nejedovatý oxid uhličitý. Ten však má negativní dopad nejen na živou přírodu (skleníkový efekt), ale také na zvýšení karbonatace betonu. Vyšší koncentrace CO_2 je rovněž v prostorách soustředění lidí, zpravidla špatně větraných (např. stará kina). Oxid uhličitý je z uvedených důvodů monitorován po celém světě, ale jeho kontinuální měření v městském prostředí není obvyklé. V naší republice se měření CO_2 v městském prostředí zřejmě neprovádí, ani Český hydrometeorologický ústav CO_2 v atmosféře nemonitoruje. Relativně dlouhodobé měření CO_2 v městském prostředí České republiky je prováděno na meteorologické stanici na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně [39]. Analýza dat z šestiletého měření prokázala cyklický průběh koncentrace CO_2 . Roční cyklus vykazuje nejvyšší koncentrace v zimním a nejnižší v letním období. Týdenní cyklus je charakterizován vyššími hodnotami v pracovní dny ve srovnání s víkendy. Měření rovněž potvrzuje globální trend růstu koncentrace CO_2 – roční přírůstek dosahuje $18,88 \text{ mg/m}^3$ pro danou lokalitu v Brně [39]. V roce 2000 - 2004 bylo množství CO_2 mezi $727 - 1080 \text{ mg/m}^3$ (v Brně přibližně 800 mg/m^3) [39]. Současné množství CO_2 je přibližně 820 mg/m^3 .

Dnes se sleduje produkce CO_2 a množství emisí se řeší vydáváním povolenek. Legislativní vztahy v této oblasti řeší zákon č. 695/2004 Sb. z roku 2004, který stanovuje práva a povinnosti provozovatelů zařízení a dalších osob při obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů, postup při vydávání povolení k vypouštění emisí skleníkových plynů a rozhodování o jeho změnách, postup při vydávání a přidělování povolenek na emise skleníkových plynů a podmínky obchodování s nimi, působnost orgánů veřejné správy a sankce za porušení uložených povinností.

Jelikož teplota ovlivňuje rychlost chemických reakcí, je tato veličina považována za jeden z důležitých parametrů ovlivňujících průběh karbonatace [36]. Transport CO_2 v betonu a jeho reakční rychlost se složkami betonu, Ca(OH)_2 a hydratovanými křemičitany a hlinítky vápenatými, jsou totiž na teplotě závislé. Rostoucí teplota vede ke zvýšení pohyblivosti molekul CO_2 a k vyšší reakční rychlosti [28].

Karbonatace betonu je tedy jev, který závisí na velkém množství parametrů, např. propustnosti a tloušťce krycí vrstvy, relativní vlhkosti vzduchu, teplotě a obsahu oxidu uhličitého v okolním prostředí, přičemž propustnost betonu v krycí vrstvě je mj. dána typem a granulometrií jednotlivých složek, složením, zpracováním a ošetřováním betonu. Hlavní parametry, na kterých rychlost karbonatace závisí, jsou shrnuty v následujícím schématu (obr. 6) [29]:



Obr. 6 – Schéma průběhu karbonatace [29].

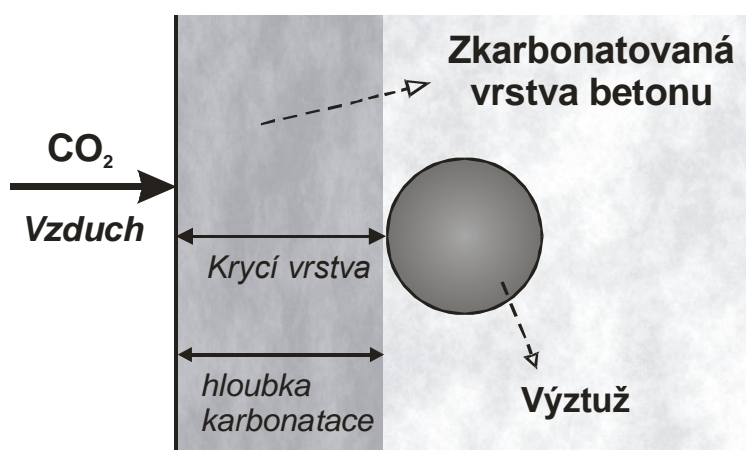
5 MODEL Y KARBONATACE BETONU

Za dobu životnosti objektu je považována doba, po kterou konstrukce vyhovuje požadavkům uživatele. Plánování životnosti konstrukce je tedy proces, který má vést k tomu, aby stavba s dostatečnou spolehlivostí plnila všechny požadované funkce minimálně po dobu návrhové životnosti při současné optimalizaci nákladů.

V jednodušších případech, kdy je životnost konstrukce ovlivněna převážně jedním degradačním procesem, lze využít dostatečně výstižný matematický model. U železobetonových konstrukcí je velmi často dominujícím degradačním procesem koroze výztuže. Při odhadu životnosti se pak postupuje tak, že se nejdříve určí pomocí příslušných modelů iniciační čas, během kterého dojde k depasivaci výztuže vlivem karbonatace, popř. působením chloridů. Poté se stanoví propagační čas, během kterého ještě bude splněna podmínka, že zmenšená průřezová plocha výztuže je větší, nebo alespoň rovna ploše potřebné pro splnění příslušného mezního stavu s přijatelnou spolehlivostí. Životnost konstrukce je pak dána součtem těchto časových úseků.

Kromě volby výpočetních modelů, které by v co největší míře měly odpovídat skutečnosti, je potřeba věnovat pozornost i vstupním údajům, spojeným s technologií betonu a jeho uložením, s vlivy vnějšího prostředí atd. Důsledky těchto parametrů se mohou překrývat a často bývá obtížné získat dostatečně spolehlivé informace. Nedostatečně realistické hodnoty vstupních parametrů pak mohou samozřejmě způsobit závažné odchylky prognózovaných veličin od skutečnosti.

V případě nadzemních konstrukcí se v modelech uvažuje pouze působení oxidu uhličitého, v důsledku čehož dochází k depasivaci výztuže pouze vlivem karbonatace - viz obr. 7 (i když v ovzduší mohou být přítomny i jiné kyselé plyny). Iniciační čas, který ohraničuje tzv. pasivní stadium ochrany výztuže, je pak stanoven pomocí vhodného modelu popisujícího průběh karbonatace.



Obr. 7 – Dosažení iniciačního času.

Nejlépe propracované modely karbonatace popisují na mikro-úrovni transportní jevy s využitím základních fyzikálních a chemických zákonů [40]. Tento přístup však vede k diferenciálním vztahům a následně pak k nutnosti řešení soustav diferenciálních rovnic. Jejich numerická řešení obvykle vyžadují např. speciální aplikace metody sítí, resp. metody konečných prvků a jsou nevhodná pro každodenní praxi. Takové modely proto nejsou v dalším textu uvedeny.

Matematické modely karbonatace dále uvedené jsou založené na difúzi CO_2 v pórovém systému betonu [28,36]. Difúzi lze popsat II. Fickovým zákonem:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (27)$$

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 jednoduchou funkcí

$$x_c = A\sqrt{t}, \quad (28)$$

kde parametr A je třeba určit buď experimentálně, nebo pomocí modelu. Používané modely se liší právě vyjádřením tohoto parametru a jejich použití tedy závisí na znalosti příslušných vstupních veličin, jejich statistických parametrů i na dalších okolnostech.

5.1 Modely karbonatace pro betony připravené z portlandského cementu

Všechny modely uvedené v této kapitole jsou použitelné pouze pro výpočet hloubky karbonatace u betonů připravených z portlandského cementu. Modelům popisujícím průběh karbonatace u betonů zhotovených nejen z portlandského, ale i směsných cementů bude věnována samostatná kapitola.

5.1.1 Model podle Schiessla

Model podle Schiessla [36, 41] je poloempirický a užívá následující tvar parametru A :

$$A = \sqrt{\frac{2 D_B c_{CO_2}}{c c_{CO_2,tot}/100}} \quad (29)$$

kde D_B je difúzní koeficient betonu pro účinek CO_2 (m^2/s), c_{CO_2} je množství CO_2 v okolní atmosféře (mg/m^3), $c_{CO_2,tot}$ je množství CO_2 potřebné k přeměně všech karbonatace schopných produktů hydratace v betonu (%) a c je množství cementu (kg/m^3).

K výstižnosti modelu je nutno uvést, že pro betony starší 7 let chyba modelu oproti skutečnosti postupně narůstá [36]. Difúzní koeficient D_B může být proměnný v čase a klesá se vzdáleností od povrchu. Je však zřejmé, že s využitím uvedeného vztahu jsme při určování hloubky karbonatace na straně bezpečné.

5.1.2 Modely dle Morinagy

V relativně jednoduchém empirickém modelu [37] se tvar parametru A liší v závislosti na vodním součiniteli w/c betonu v krycí vrstvě:

- pro $w/c \leq 0,6$:

$$A \approx 1650 \left(\frac{w}{c} - 0,38 \right) f(RH) \left(c_{CO_2} \cdot \frac{24}{44} \cdot 10^{-6} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

- pro $w/c > 0,6$:

$$A \approx 1650 \left(\frac{(w/c) - 0,25}{[1 + 2,6(w/c)]^{\frac{1}{2}}} \right) f(RH) \left(c_{CO_2} \cdot \frac{24}{44} \cdot 10^{-6} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (31)$$

kde w a c je množství vody a cementu (kg/m^3), c_{CO_2} je obsah CO_2 v okolní atmosféře (mg/m^3) a $f(RH)$ je funkce vyjadřující vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu. Tento model obsahuje pouze 4 vstupní parametry, z nichž pouze vodní součinitel vyjadřuje složení použité směsi pro výrobu betonu. Může sloužit tedy spíše pro orientační zjištění hloubky karbonatace, popř. pro uživatele, který má k dispozici pouze omezené množství vstupních dat.

Jelikož teplota ovlivňuje rychlost chemických reakcí, je tato veličina považována za jeden z důležitých parametrů ovlivňujících průběh karbonatace. Empirický model publikovaný Morinagou v roce 1988 [42] vliv teploty okolí bere v úvahu a parametr A je v tomto případě vyjádřen následujícími tvary:

- pro $w/c \leq 0,6$:

$$A = \sqrt{\frac{c_{CO_2} \cdot 8,205 \cdot 10^{-6} (T + 273,15)}{5 \cdot 44}} \cdot 2,44 \cdot R (1,391 - 0,174 RH + 0,0217 T) \left(4,6 \frac{w}{c} - 1,76 \right) \sqrt{365} \quad (32)$$

-pro $w/c \geq 0,6$:

$$A = \sqrt{\frac{c_{CO_2} \cdot 8,205 \cdot 10^{-6} (T + 273,15)}{5 \cdot 44}} \cdot 2,44 \cdot R (1,391 - 0,174 RH + 0,0217 T) \left(4,9 \frac{\left(\frac{w}{c} - 0,25 \right)}{\sqrt{1,15 + 3 \frac{w}{c}}} \right) \sqrt{365} \quad (33)$$

kde w a c je množství vody a cementu (kg/m^3), c_{CO_2} je obsah CO_2 v okolní atmosféře (mg/m^3), RH je relativní vlhkost okolního vzduchu (%), T teplota okolí ($^{\circ}\text{C}$) a R je poměr rychlosti karbonatace vzorku betonu s ochrannou vrstvou (např. omítkou) a bez ní (pro beton bez ochranné vrstvy tedy platí $R = 1$).

Výhodou tohoto modelu je zahrnutí vlivu teploty okolí. Transport CO_2 v betonu a jeho reakční rychlost se složkami betonu (Ca(OH)_2 a CSH sloučeninami) jsou totiž na teplotě závislé. Rostoucí teplota vede ke zvýšení pohyblivosti molekul CO_2 a k vyšší reakční rychlosti.

5.1.3 Spojený Fickův-Fourierův zákon

Hodnocení trvanlivosti je posuzováno buď podle doby, za kterou prodifunduje škodlivý plyn (CO_2) do předem stanovené hloubky, nebo přímo hloubkou průniku CO_2 v daném materiálu za přesně definovanou časovou jednotku. Vyhodnocení se provádí podle následujícího vztahu, výpočtem neznámé veličiny, podle níž má být míra odolnosti betonu posuzována. Základní vztah mezi určovanou veličinou a veličinami dosazovanými je pro CO_2 [32]:

$$\frac{d_B^2 \mu \rho CaO \text{ } ^{\circ}\text{K}_{\max}}{p t} = 2,987 \cdot 10^{-6} \quad (34)$$

kde d_B je tloušťka vrstvy betonu, resp. krycí vrstva (m), μ je součinitel difúzního odporu (-), ρ objemová hmotnost betonu (kg/m^3), CaO obsah oxidu vápenatého schopného reakce s kyselinotvornými plyny (CO_2) (%), $^{\circ}K_{max}$ maximální stupeň karbonatace (u běžných betonových konstrukcí $^{\circ}K_{max} = 80$ %) (%), p je parciální tlak CO_2 v atmosféře (v běžné atmosféře $p = 30$ Pa) a t je doba působení CO_2 na beton.

5.1.4 Modely dle Papadakise

Model podle Papadakise a kol. [37] byl odvozen na základě zákona o zachování hmotnosti CO_2 , Ca(OH)_2 a CSH (hydratované křemičitanu vápenaté). Karbonatace hydratovaných hlinitanů vápenatých není brána v úvahu, jelikož probíhá pouze v povrchové vrstvě těchto sloučenin a jejich podstatná část pak zůstává nedotčena [27]. Parametr A je tu navržen v obecnější podobě:

$$A = \sqrt{\frac{2 [\text{CO}_2] D_{e,\text{CO}_2}}{[\text{CH}] + 3[\text{CSH}]}} \quad , \quad (35)$$

kde D_{e,CO_2} je efektivní difúzní koeficient CO_2 v betonu (m^2/s), $[\text{CO}_2]$ je koncentrace CO_2 v okolí (mol/m^3), $[\text{CH}]$ je koncentrace Ca(OH)_2 v betonu (mol/m^3), $[\text{CSH}]$ je koncentrace hydratovaných křemičitanů vápenatých (mol/m^3).

Zjednodušená varianta modelu uvádí pak parametr A ve tvaru:

$$A = 350 \frac{\rho_c}{\rho_v} \frac{\left(\frac{w}{c} - 0,3\right)}{\left(1 + \frac{\rho_c w}{\rho_v c}\right)} f(RH) \sqrt{\left(1 + \frac{\rho_c w}{\rho_v c} + \frac{\rho_c a}{\rho_a c}\right) c_{\text{CO}_2} \frac{24}{44} 10^{-6}} \quad , \quad (36)$$

kde ρ_c , ρ_v a ρ_a jsou objemové hmotnosti cementu, vody a kameniva (kg/m^3), w/c , a/c jsou vodní součinitel a hmotnostní poměr kamenivo/cement, $f(RH)$ je funkce vyjadřující vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu a c_{CO_2} je množství CO_2 v okolní atmosféře (mg/m^3).

Množství kameniva je vyjádřeno vztahem:

$$a = a_1 + a_2 + a_3 \quad (37)$$

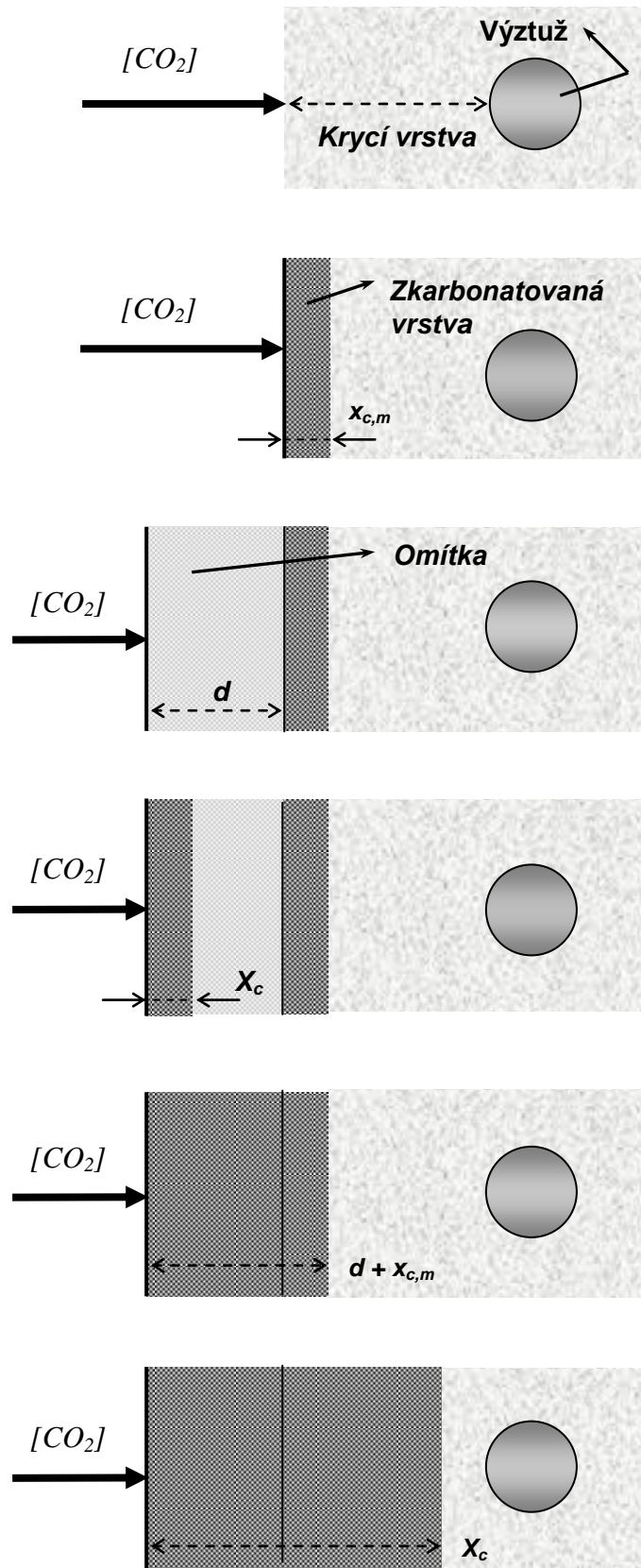
kde a_1 , a_2 a a_3 jsou množství písku a kameniva s granulometrií 4/8 mm a 8/16 mm (kg/m^3).

Objemová hmotnost kameniva je pak určena následujícím vztahem:

$$\rho_a = \frac{a}{\frac{a_1}{\rho_{a_1}} + \frac{a_2}{\rho_{a_2}} + \frac{a_3}{\rho_{a_3}}} \quad , \quad (38)$$

kde ρ_{a_1} , ρ_{a_2} , ρ_{a_3} jsou příslušné objemové hmotnosti (kg/m^3).

Uvedený model popisuje složení použité směsi pro výrobu betonu větším počtem parametrů a je oproti předchozím modelům mnohem výstižnější. Obsahuje 12 proměnných a může být použit ke zjištění závislosti průběhu karbonatace na podmínkách okolního prostředí, ale i na podmínkách technologických a materiálových. Tento model vychází z fyzikálně-chemické podstaty probíhajících dějů.



0.
 $t = 0$
 $x_c = 0$

I. a)

$t = t_m$

$$A_{con} = \frac{2 D_{e,CO_2}^{con} c_{CO_2} \cdot 10^{-3}}{44 ([CH]^{con} + 3[CSH]^{con})}$$

$$x_{c,m} = \sqrt{A_{con} t_m}$$

I. b)

Nanesení vápenocementové omítky
 $t = t_m$
 $X_c = 0$

II. a)

$$A_{mor} = \frac{2 D_{e,CO_2}^{mor} c_{CO_2} \cdot 10^{-3}}{44 ([CH]^{mor} + 3[CSH]^{mor})}$$

$$t_d = d^2 / A_{mor}$$

$$t_m < t < t_m + t_d$$

$$X_c = \sqrt{A_{mor} (t - t_m)}$$

II. b)

$t = t_m + t_d$
 $X_c = d + x_{c,m}$

III.

$t > t_m + t_d$

$$r_D = D_{e,CO_2}^{con} / D_{e,CO_2}^{mor}$$

$$X_c = d - d r_D + \sqrt{A_{con} (t - t_m - t_d) + (d r_D + x_{c,m})^2}$$

Obr. 8 – Jednotlivé fáze procesu karbonatace před a po nanesení vápenocementové omítky [37].

Papadakis a kol. [37] dále publikovali deterministický model popisující průběh karbonatace i v případě, kdy je povrch betonu ošetřen po určitém čase vápenocementovou omítkou. Tento model je opět založen na zákonu zachování hmotnosti CO_2 , Ca(OH)_2 a CSH sloučenin. Na obr. 8 jsou ukázány jednotlivé modelované fáze procesu karbonatace před a po nanesení vápenocementové omítky s uvedením příslušných symbolických vztahů. Zkratky *con* a *mor* jsou užity pro beton a vápenocementovou omítku. Tloušťka omítky je označena d , původní krycí vrstva pak c . Hloubka karbonatace v čase t od povrchu betonu, resp. od povrchu omítky je označena x_c , resp. X_c . Čas, kdy je aplikována omítky je t_m a odpovídající hloubka karbonatace je $x_{c,m}$. D_{e,CO_2} je efektivní difúzní koeficient CO_2 v zkarbonatovaném betonu nebo maltě omítky (m^2/s), $[\text{CO}_2]$ je koncentrace CO_2 v okolním prostředí (mol/m^3) a $[\text{CH}]$, $[\text{CSH}]$ jsou molární koncentrace Ca(OH)_2 a CSH (mol/m^3).

Tento model obsahuje celkem 35 vstupních veličin a lze využít zejména při rozhodování o strategii údržby nebo oprav. Aplikace vápenocementové omítky na povrch betonu po uplynutí určitého časového úseku je totiž považována za efektivní a ekonomický způsob ochrany před karbonatací. Účinnost této bariéry závisí na kvalitě betonu i omítky, tloušťce nanesené omítky a rovněž na čase, kdy je aplikována.

5.2 Modely karbonatace pro betony připravené ze směsných cementů

Jednou z cest, vedoucích k omezení emisí oxidu uhličitého při výrobě cementu, je využívání průmyslových odpadů (popílek, křemičité úlety a struska) jako příměsí do cementů. Použití těchto tzv. směsných cementů vede k omezení množství použitého portlandského slínku, při jehož výrobě se do ovzduší uvolňuje velké množství CO_2 (při výrobě 1 tuny cementu přibližně 660 kg CO_2 , dříve 1 tuna CO_2 [43,44]) a proces výroby je navíc energeticky velmi náročný (při výrobě betonu se spotřebuje asi 1700 J/g slínku). Přítomnost příměsí však může ovlivňovat vlastnosti betonů – viz kap. 3.2. V případě hodnocení průběhu karbonatace mohou pomoci analytické modely, které vliv příměsí zohledňují.

Vliv příměsí na průběh karbonatace může být v analytickém modelu mj. vyjádřen:

- koeficientem typu cementu
- množstvím a složením použité příměsi
- pomocí koncepce k -hodnoty
- výsledkem zrychlené karbonatační zkoušky.

5.2.1 Vyjádření vlivu příměsí koeficientem typu cementu

Tento způsob je využit zejména u následujících jednodušších modelů s menším počtem vstupních parametrů [30,36,45-46].

5.2.1.1 Model dle Boba a Affany

Parametr A je v tomto případě dán následujícím vztahem [36,45]:

$$A = 150 \frac{r_{c,a} r_{RH} r_{CO_2}}{f_c} \quad , \quad (39)$$

kde f_c je pevnost v tlaku použitého betonu (MPa), $r_{c,a}$ je koeficient typu cementu (-), r_{RH} vyjadřuje vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu (-) a r_{CO_2} je koeficient vyjadřující vliv koncentrace CO_2 v okolí (-).

Pro koeficient typu cementu jsou v závislosti na množství příměsi doporučené hodnoty od 0,8 do 2. Pro koeficient vlivu relativní vlhkosti r_{RH} je doporučeno uvažovat hodnoty od 1 (pro beton uvnitř objektu) do 0,3 (pro trvale vlhké prostředí). V případě koeficientu r_{CO_2} jsou pak uvedeny hodnoty 1,0 pro okolní atmosféru s obsahem 0,03 % CO_2 (550 mg/m³ CO_2 v okolí – venkovská oblast) a 2,0 pro atmosféru s obsahem 0,10 % CO_2 (1833 mg/m³ CO_2 v okolí – průmyslová oblast). Pevnost betonu v tlaku f_c zahrnuje vliv obsahu cementu, vodního součinitele, druhu a množství kameniva a vliv zpracování betonu. Nevýhodou modelu je empirická povaha všech koeficientů.

5.2.1.2 Model dle De Sittera

Tento model [36] uvádí konstantu A ve tvaru:

$$A = \sqrt{\frac{46 w/c - 17,6}{2,7}} r_{c,b} r_{RH} \quad , \quad (40)$$

kde w/c je vodní součinitel (-), $r_{c,b}$ je koeficient typu cementu (-) a r_{RH} vyjadřuje vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu (-).

Vodní součinitel w/c se zde uvažuje $< 0,6$. Pro vliv cementu $r_{c,b}$ se doporučují hodnoty od 0,6 do 2,2. Pro koeficient vlivu vlhkosti r_{RH} jsou pak doporučeny hodnoty od 0,3 (pro beton ve vlhkém prostředí) do 1 (pro beton uvnitř objektu). V práci je rovněž připojen přehled stochastických vlastností proměnných souvisejících s karbonatací betonu a procentuální vliv některých veličin, tj. jejich citlivost.

5.2.1.3 Model dle Kishitaniho

V roce 1928 Uchida a Hamada [46] vyvinuli následující vztah pro výpočet parametru A :

$$A = \frac{10(w_0 - 0,3)}{\sqrt{0,3(1 + 3 w_0)}} \quad , \quad (41)$$

kde w_0 je efektivní vodní součinitel.

Kishitani a kol. [46] následně publikovali pro tento výpočet dva vztahy, jelikož zjistili, že rychlost karbonatace se liší v závislosti na použitém vodním součiniteli w/c :

pro $w/c < 0,6$ pak platí:

$$A = \frac{10 \cdot R_n [4,6 (w/c) - 1,76]}{\sqrt{7,2}} \quad (42)$$

a pro $w/c > 0,6$:

$$A = \frac{10 \cdot [R_n(w/c) - 0,25]}{\sqrt{0,3[1,15 + 3(w/c)]}} \quad , \quad (43)$$

kde w, c je hmotnost vody a cementu na 1 m^3 betonu (kg), R_n neutralizační faktor (-).

První rozdíl mezi Kishitaniho (42-43) a Hamadovým vztahem (41) spočívá v rozdílné hodnotě efektivního vodního součinitele, což bylo způsobeno použitím různého písku – Hamada použil vysušený písek, zatímco Kishitani pouze povrchově vysušený. Kishitaniho vztah v tomto případě odpovídá Hamadovu po zavedení následující substituce:

$$w_0 = (w/c) + 0,05 \quad (44)$$

Druhý rozdíl je v zahrnutí neutralizačního faktoru R_n (-), který zohledňuje vliv typu cementu, kameniva a přísad.

$$R_n = r_{c,c} \cdot r_a \cdot r_s \quad , \quad (45)$$

kde $r_{c,c}$ je koeficient typu cementu (-), r_a koeficient typu kameniva (-) a r_s koeficient typu přísady (-). Doporučené hodnoty pro tyto koeficienty jsou shrnuty v tab. 3-5.

Tab. 3 – Doporučené hodnoty pro koeficient typu cementu.

Typ cementu		$r_{c,c}$
Portlandský cement	běžný	1
	s vysokými počátečními pevnostmi	0,6
Směsný cement (příměs: struska)	30 – 40 % strusky (portlandský struskový cement)	1,4
	60 % strusky (vysokopecní)	2,2
Pucolánový		1,7
Směsný cement (příměs: poléťavý popílek)		1,9

Tab. 4 – Doporučené hodnoty pro koeficient typu kameniva.

Typ kameniva	r_a
říční písek, říční štěrk	1
říční písek, pemzový štěrk	1,2
pemzový písek, pemzový štěrk	2,9
škvára	3,3

Tab. 5 – Doporučené hodnoty pro koeficient typu přísady.

Typ přísady	r_s
Plastifikátor	1
Provzdušňovací činidlo	0,6
Disperzní činidlo	0,4

5.2.1.4 Model dle Jianga

Jiný matematický model pro karbonatační proces, zohledňující rovněž vliv příměsí pomocí koeficientu typu cementu byl publikován Jiangem a kol. [30]:

$$A = 839 \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{1,1} \cdot \sqrt{\frac{\frac{w}{r_{c,d} c} - 0,34}{r_{HD} r_{c,c} c} \cdot c_{CO_2} \frac{24}{44} 10^{-6} \cdot 365}, \quad (46)$$

kde RH je relativní vlhkost okolního vzduchu (%), c a w je hmotnost vody a cementu na 1 m^3 betonu (kg), c_{CO_2} je obsah CO_2 v okolním prostředí (mg/m^3), $r_{c,d}$ koeficient typu cementu (-) a r_{HD} koeficient stupně hydratace (-).

U tohoto modelu se však nepodařilo získat dostačující informace ohledně doporučených hodnot pro oba koeficienty ve vztahu (základní data týkající se uvedeného modelu byla publikována pouze v čínštině). Použití tohoto modelu tedy závisí na uživateli a jeho zkušenostech.

5.2.2 Vyjádření vlivu příměsí množstvím a složením použité příměši

Tohoto způsobu je využito v případě modelu popisujícího průběh karbonatace betonu připraveného z cementu s vysokým obsahem popílku [30], který již obsahuje 20 vstupních parametrů.

5.2.2.1 Model dle Jianga pro betony s vysokým obsahem popílku

Výsledky testu ukázaly, že výše zmiňovaný model Jiang a kol. není vhodný pro betony připravené z cementu s vysokým obsahem popílku (HVFA – High-Volume Fly Ash) [30]. Takový beton se od betonů připravených z portlandského nebo směsného cementu liší především skutečností, že v případě přípravy HVFA betonu nemůže být použitý popílek zcela zreagován. Pokud se všechny molekuly SiO_2 , Fe_2O_3 a Al_2O_3 sloučí po hydrataci s jednou molekulou CaO , potom maximální množství popílku M (-), který může zreagovat vyjadřuje vztah:

$$M = \frac{(C_1 - 0.93 S_1 - 0.55 A_1 - 0.35 F_1 - 0.70 S_1')}{[0.93(S_2 - S_1) + 0.55(A_2 - A_1) + 0.35(F_2 - F_1) + 0.70(S_2' - S_1') - (C_2 - C_1)]}, \quad (47)$$

kde C_1 , S_1 , A_1 , F_1 a S_1' jsou hmotnostní procenta CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a SO_3 v cementu (%) a C_2 , S_2 , A_2 , F_2 a S_2' hmotnostní procenta CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a SO_3 v popílku (%).

U HVFA betonu je množství použitého popílku větší než M a část popílku nemůže tedy zreagovat. V tomto případě je vodní součinitel (w/c) nahrazen efektivním vodním součinitelem (w/b^*):

$$w/b^* = \frac{w}{c+F'} = \frac{1-M}{1-\left(\frac{F}{c+F}\right)} \cdot \frac{w}{(c+F)} \quad (48)$$

kde F' je množství popílku, které může reagovat a w , c , F jsou hmotnosti vody, cementu a popílku v 1 m^3 betonu (kg).

Model pro výpočet hloubky karbonatace v případě HVFA betonu je vyjádřen tímto vztahem [30]:

$$x_c = 839 \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{1.1} \cdot \sqrt{\frac{w/b^* - 0,34}{\alpha k' c} c_{CO_2} \frac{24}{44} 10^{-6} \cdot \sqrt[n]{t \cdot 365}} \quad (49)$$

kde x_c hloubka karbonatace (mm) v čase t (roky), RH relativní vlhkost okolního vzduchu (%), c_{CO_2} je obsah CO_2 v okolním prostředí (mg/m^3), α stupeň hydratace cementu (-), k' koeficient odpovídající rychlosti karbonatace (-), který může být vypočítán pomocí vztahu (50) a n je parametr zohledňující vliv pórového systému (-) (doporučená hodnota parametru n je mezi 2,0 a 2,1).

$$k' = 1 - \beta \left(\frac{M}{1-M} \cdot \frac{A_2}{100} \cdot \frac{1}{102 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{8,03} \right) \quad (50)$$

kde β je stupeň hydratace popílku (-) a $102 \cdot 10^{-3}$ je molární hmotnost Al_2O_3 (kg/mol).

Tab. 6 – Stupeň hydratace cementu (α) a popílku (β) [47].

Obsah popílku (%)	28 dní		90 dní		365 dní	
	α	β	α	β	α	β
0	0,59	-	0,66	-	0,76	-
10	0,60	0,26	0,70	0,33	0,77	0,37
20	0,62	0,17	0,73	0,26	0,79	0,28
30	0,66	0,17	0,80	0,24	0,83	0,27
40	0,69	0,16	0,85	0,24	0,88	0,26
50	0,78	0,16	0,93	0,23	0,96	0,25
60	0,88	0,15	0,98	0,21	0,98	0,23

Pro použití tohoto modelu je tedy nutné znát výsledky chemického rozboru cementu a popílku. Pravděpodobně je však mnohem složitější získat hodnoty stupně hydratace cementu a popílku. Metoda pro jejich určení byla studována teprve nedávno Wangem a kol. [47]. Tato metoda však vyžaduje nejen znalost výsledků chemického rozboru cementu a popílku, ale i provedení X-ray difrakční analýzy okolí částic cementu i popílku v zatvrdlém

cementovém tmelu, a dále termickou analýzu (pro určení množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$) a porozimetrii zatvrdlého cementového tmelu. Ze svých experimentálních výsledků Wang a kol. usoudili, že rostoucí množství popílku vede ke zvyšování stupně hydratace cementu za současného zpomalení pucolánové reakce popílku. Stupně hydratace cementu a popílku zjištěné v různých časových intervalech pro vzorek s efektivním vodním součinitelem $w/(c + F) = 0,30$ jsou uvedeny v tab. 6.

5.2.3 Vyjádření vlivu příměsi pomocí koncepce *k*-hodnoty

Je známo, že vodní součinitel w/c (dle běžné definice hmotnostní poměr voda/cement) v případech směsných cementů není vhodný pro predikci pevnostní třídy betonu, ani jeho dalších vlastností. Proto byl již v r. 1967 [48] navržen alternativní koncept tzv. *efektivního vodního součinitele*

$$(w/c)_{\text{eff}} = \text{voda} / (\text{cement} + k \cdot \text{SCM}) \quad (51)$$

aplikovaný nejprve jenom na pevnost betonu. V tomto vztahu je *k* hodnota, zohledňující účinnost příměsi (SCM – Supplementary Cementing Materials). Tato *k*-hodnota závisí na druhu a množství příměsi v betonu a liší se též podle vlastnosti, ke které se vztahuje (pevnost betonu, odolnost proti karbonataci, či působení chloridů). Pro vlastnosti betonu popisující jeho *trvanlivost* byla studována teprve v posledních létech a je již také začleněna do normy [10] jako tzv. koncepce *k*-hodnoty. V normě jsou však uvedeny jiné *k*-hodnoty, než byly experimentálně zjištěny Papadakisem [49] – viz tab. 7.

Tato koncepce byla využita u následujícího modelu [49], který zahrnuje již větší počet vstupních parametrů ve srovnání s předchozími modely.

Tab. 7 - *k*-hodnoty pro modelování procesu karbonatace.

Typ příměsi	Papadakis a kol. [49]	EN 206 – 1 [10]
Křemičitý úlet	$k = 0,3$ (obsahující 90,90 % SiO_2 , 0,69 % CaO)	$k = 2,0$ pro $w/(c + kP) \leq 0,45$
		$k = 1,0$ pro $w/(c + kP) > 0,45$
Popílek	$k = 0,5$ <i>křemičitý popílek</i> (obsahující 53,50 % SiO_2 , 3,38 % CaO)	$k = 0,2$ pro CEM I 32,5
	$k = 0,7$ <i>vápenatý popílek</i> (obsahující 39,21 % SiO_2 , 22,78 % CaO)	$k = 0,4$ pro CEM I 42,5 a vyšší

5.2.3.1 Model dle Papadakise a Tsimase

V tomto modelu je parametr *A* dán následujícím analytickým vztahem [49]:

$$A = 4147 \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2} c_{CO_2}}{0,218 (c + kP)}} \quad (52)$$

kde c_{CO_2} je obsah CO_2 v okolním prostředí (mg/m^3), k je hodnota účinnosti příměsi pro modelování procesu karbonatace (-) a D_{e,CO_2} je efektivní difúzní koeficient CO_2 ve zkarbonatovaném betonu (m^2/s). Tento koeficient je pak vyjádřen následujícím empirickým vztahem:

$$D_{e,CO_2} = 6,1 \times 10^{-6} \left(\frac{(w - 0,267(c + kP))/1000}{\frac{c + kP}{\rho_c} + \frac{w}{1000}} \right)^3 \times f(RH)^{2,2} \quad , \quad (53)$$

kde c , w , P je hmotnost cementu, vody a příměsi v $1 m^3$ betonu (kg), ρ_c je objemová hmotnost cementu (kg/m^3) a $f(RH)$ je funkce vyjadřující vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu.

5.2.4 Vyjádření vlivu příměsi výsledkem zrychlené karbonatační zkoušky

Jako příklad takového modelu může sloužit velmi komplexní model s 12 vstupními parametry, obsažený v mezinárodním dokumentu [50,51].

5.2.4.1 fib Model Code

Tento velmi komplexní model karbonatačního procesu v betonu byl vyvinut v rámci výzkumného projektu Duracrete [50] a bude včleněn do nového *fib Model Code* [51]. Výpočet parametru A je vyjádřen následujícím vztahem:

$$A = \sqrt{631 \cdot 10^{11} k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,o}^{-1} + \varepsilon_t) c_{CO_2} \cdot 10^{-6} \cdot W} \quad , \quad (54)$$

kde k_e je funkce vlivu okolního prostředí zahrnující především vliv relativní vlhkosti u povrchu betonu na inverzní efektivní odolnost proti karbonataci (-), k_c je funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu (především doby ošetřování betonu t_c) na inverzní efektivní odolnost proti karbonataci (-), $R_{ACC,o}^{-1}$ je inverzní efektivní odolnost proti karbonataci pro suchý beton včetně vazebné kapacity betonu pro CO_2 , určená v čase t_0 za zrychlených karbonatačních podmínek (ACC – Accelerated Carbonation Conditions) [$(m^2/s)/(kg CO_2/m^3)$], k_t je regresní parametr vyjadřující vliv ACC testovací metody (-), ε_t je korekční člen zahrnující nepřesnosti vzniklé použitím ACC testovací metody [$(m^2/s)/(kg CO_2/m^3)$], c_{CO_2} je obsah CO_2 v okolním prostředí (mg/m^3) a W je funkce vlivu počasí zahrnující vliv mezo-klimatických podmínek (např. orientace a odpovídající pravděpodobnost směru deště, pravděpodobnost srážek apod.). V následujícím textu budou vstupní parametry podrobněji popsány [50,51]:

Inverzní efektivní odolnost proti karbonataci $R_{ACC,o}^{-1}$

Uvedený model je založen na skutečnosti, že inverzní efektivní odolnost proti karbonataci je určena pomocí zrychleného karbonatačního testu (ACC testu), ve kterém jsou suché betonové vzorky testovány za definovaných podmínek po referenční dobu t_0 . Inverzní odolnost proti karbonataci $R_{NAC,o}^{-1}$ určená za přírodních karbonatačních podmínek (NAC – Natural Carbonation Conditions) bude větší o průměrný faktor $A = 1,25$. To lze vysvětlit tím,

že ve zrychleném testu dosahuje vysušení do větší hloubky než za přírodních podmínek (ačkoliv se testování provádí za stejných klimatických podmínek, tj. 20 °C a RH = 65 %). Tento jev vede k mírnému zbrždění karbonatačního procesu v případě ACC testu. Pro velmi suchý beton tedy teoreticky platí hodnota $R_{ACC,0}^{-1} = 0$.

Pro měření odolnosti proti karbonataci lze využít přímé (měření hloubky karbonatace např. ACC testem) a nepřímé testovací metody (měření plynové permeability). Výhody ACC testu jsou následující:

- vazebná kapacita betonu nemusí být dodatečně uvažována
- dobrá reprodukovatelnost výsledků testu
- krátká délka trvání

Z těchto důvodů byl ACC test s následujícím provedením vybrán ve fib Model Code 2010 [51] jako referenční testovací metoda:

1. Výroba betonových vzorků s rozměry: výška/šířka/délka = 100/100/500 mm.
2. Po odformování jsou vzorky uloženy na 7 dní (referenční doba ošetřování) ve vodní lázni.
3. Po vyjmutí z vody jsou vzorky uskladněny dalších 21 dní za standardizovaných laboratorních podmínek ($T_{ref} = 20$ °C, $RH_{ref} = 65$ %).
4. Po uplynutí 28 dní (t_{ref}) jsou vzorky umístěny do karbonatační komory se standardizovanými laboratorními podmínkami ($T_{ref} = 20$ °C, $RH_{ref} = 65$ %). V komoře jsou vzorky vystaveny CO_2 o koncentraci 2,0 obj. % po dobu 28 dní, která je označena jako referenční doba t_0 .
5. Poté jsou vzorky rozříznuty a na zlomcích je stanovena hloubka karbonatace x_c (m) pomocí roztoku fenolftaleinu o koncentraci 1g/l.
6. Inverzní efektivní odolnost proti karbonataci $R_{ACC,0}^{-1}$ [(m²/s)/(kg CO_2 /m³)] má pak normální rozložení se střední hodnotou, kterou lze vypočítat z naměřené hodnoty x_c dle následujícího vztahu:

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_c}{420} \right)^2 \quad (55)$$

a standardní odchylkou s danou následujícím vztahem:

$$s = 0,69 \cdot \left(\frac{R_{ACC,0}^{-1}}{10^{-11}} \right)^{0,78} 10^{-11} \quad (56)$$

Pokud nejsou pro $R_{ACC,0}^{-1}$ dostupná naměřená data z testu, může být pro orientační účely využito literárních údajů uvedených v tabulce 8.

Tab. 8 – Literární hodnoty $R_{ACC,0}^{-1}$ [10^{-11} (m²/s)/(kg CO₂/m³)].

cement type	ω_{eff}^1					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
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 + SF ($k = 2,0$)	3,5	5,5	n.d. ²	n.d. ²	16,5	n.d. ²
CEM III/B 42,5	n.d. ²	8,3	16,9	26,6	44,3	80,0

¹efektivní vodní součinitel ω_{eff} (vztah (51)) zohledňující FA (popílek) a SF (křemičité úlety) s využitím uvedené k -hodnoty

²n.d. – pro tyto betony nebyla hodnota $R_{ACC,0}^{-1}$ stanovena

Faktory vztahující se k ACC testu k_t, ε_t

Tyto faktory byly zavedeny za účelem převést výsledky získané ACC testem $R_{ACC,0}^{-1}$ [(m²/s)/(kg CO₂/m³)] na inverzní odolnost proti karbonataci $R_{NAC,0}^{-1}$ získanou za přírodních podmínek (NAC) [(m²/s)/(kg CO₂/m³)]:

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t \quad , \quad (57)$$

kde k_t je regresní parametr, který uvažuje vliv ACC testovací metody (-) a ε_t je korekční člen zahrnující nepřesnosti vzniklé použitím ACC testovací metody [(m²/s)/(kg CO₂/m³)].

Tyto faktory jsou pro ACC test kvantifikovány následovně: k_t (-): normální rozložení se střední hodnotou 1,25 a směrodatnou odchylkou 0,35 a ε_t [(m²/s)/(kg CO₂/m³)]: normální rozložení se střední hodnotou $1 \cdot 10^{-11}$ a směrodatnou odchylkou $0,15 \cdot 10^{-11}$.

Funkce vlivu okolního prostředí k_e

Tato funkce uvažuje vliv vlhkosti na difúzní koeficient, a tím i na odolnost betonu proti karbonataci. Funkce vlivu prostředí k_e (-) může být popsána následujícím vztahem:

$$k_e = \frac{\left(1 - \left(\frac{RH_{real}}{100}\right)^5\right)^{2,5}}{\left(1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^5\right)} \quad , \quad (58)$$

kde RH_{ref} (%) je referenční relativní vlhkost okolního vzduchu ($RH_{ref} = 65$ % v souladu s ACC testem) a RH_{real} je relativní vlhkost zkarbonatované vrstvy (%).

Jako vstupní data pro RH_{real} mohou být využita data z nejbližší meteorologické stanice, a to konkrétně střední denní hodnoty RH. Vzhledem k tomu, že relativní vlhkost se mění od 0 do 100, mělo by být pro popis této veličiny vybráno ohraničené pravděpodobnostní rozložení s horním limitem. Dolní limit se v závislosti na oblasti může výrazně lišit od 0. Pro popis

RH_{real} jsou tedy vhodná následující rozdělení pravděpodobnosti: beta rozdělení a Weibull(max) rozložení.

Funkce vlivu počasí W

Funkce vlivu počasí W zahrnuje mezo-klimatické podmínky ovlivňující povrch betonu:

$$W = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t} \right)^w, \quad (59)$$

kde t_0 je referenční čas (rok) ($t_0 = 0,0767$ let v souladu s ACC testem), w je exponent zahrnující vliv počasí (-), p_{SR} je pravděpodobnost deště (-), jedná se o konstantní parametr vyjadřující průměrné rozložení směru větru během deště, založené na datech z nejbližší meteorologické stanice, b_w je regresní exponent (-) s doporučeným normálním rozložením se střední hodnotou 0,446 a směrodatnou odchylkou 0,163 a ToW (-) je dán následujícím vztahem:

$$ToW = \frac{t_w}{365}, \quad (60)$$

kde t_w je průměrný počet deštivých dnů za rok, přičemž za deštivý den je považován den s minimálním množstvím srážek $h_{ND} = 2,5$ mm/den. Data pro určení ToW mohou být obdržena z nejbližší meteorologické stanice.

Funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu k_c

Funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu k_c (-) bere v úvahu vliv ošetřování betonu na efektivní odolnost proti karbonataci a je určena následujícím vztahem:

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c}, \quad (61)$$

kde b_c je regresní exponent s doporučeným normálním rozložením se střední hodnotou $-0,567$ a střední odchylkou 0,024 a t_c je doba ošetřování (dny).

Obsah CO_2 v okolním prostředí C_{CO_2}

Současnou koncentraci CO_2 je ovlivňují dva hlavní faktory:

- a) spalování fosilních paliv
- b) kácení lesních porostů

V roce 2003 bylo množství CO_2 mezi $(687 - 746) \pm 20$ mg/m³ (v Brně přibližně 800 mg/m³). Současné množství CO_2 (mg/m³) může být kvantifikováno následovně: normální rozložení se střední hodnotou 820 a směrodatnou odchylkou 100.

Tento model patří z uvedených modelů k těm komplexnějším. Pro použití modelu je však nutné provést speciální karbonatační test za zrychlených karbonatačních podmínek (ACC test) a získat statistická data z nejbližší meteorologické stanice. Získání vstupních parametrů je tedy náročnější, jeho výhodou však je skutečnost, že tento model bude zahrnut do mezinárodního dokumentu *fib Model Code 2010* [51].

6 ZAŘAZENÍ BETONU DO ETAPY KARBONATACE DLE MATOUŠKA A DROCHYTKY

Karbonatace betonu je charakterizována následujícími veličinami: hodnotou pH vodního výluhu betonu, stupněm karbonatace a stupněm modifikačních přeměn [32].

Stupeň karbonatace °K (%) je poměr zkarbonatovaného Ca(OH)_2 k obsahu celkového CaO, schopného podlehnout karbonataci. Stupeň karbonatace °K se určí výpočtem z obsahu CaO a SO_3 , zjištěných chemickým rozbořem a z obsahu CO_2 , vázaného na jemnozrnný a hrubozrnný CaCO_3 , určeného termickou analýzou. Nejprve se určí obsah zkarbonatovaného oxidu vápenatého CaO_{karb} (%):

$$\text{CaO}_{\text{karb}} = 1,273 (\text{CO}_{2j} + \text{CO}_{2h}) \quad (62)$$

kde CO_{2j} je obsah CO_2 vázaného na jemnozrnný CaCO_3 (%) a CO_{2h} je obsah CO_2 vázaného na hrubozrnný CaCO_3 (%). Stupeň karbonatace °K (%) se pak vypočítá dle vztahu:

$$^{\circ}K = \frac{\text{CaO}_{\text{karb}}}{\text{CaO} - 0,700 \text{SO}_3} \cdot 100 \quad (63)$$

kde CaO a SO_3 jsou procentuální obsahy daných oxidů v dílčím vzorku.

Stupeň modifikačních přeměn °MP (-) je poměr hrubozrnných a jemnozrnných krystalů CaCO_3 , vzniklých během karbonatace. Krystaly CaCO_3 se mohou též vyskytovat v pseudomorfozách ve tvarech po hydratačních produktech. Stupeň modifikačních přeměn °MP (-) se určí z obsahu CO_2 , vázaného na jemnozrnný a hrubozrnný CaCO_3 , zjištěného termickou analýzou, a to podle následujícího vztahu:

$$^{\circ}MP = \frac{\text{CO}_{2h}}{\text{CO}_{2j}} \quad (64)$$

Pro posouzení míry karbonatace betonu a jeho zařazení do jednotlivých etap je podstatné znát významný vztah mezi stupněm karbonatace a hodnotou pH výluhu. Tato závislost byla získána statistickým vyhodnocením 76 vzorků starých betonů, různě silně zkarbonatovaných. Hlavní mezní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9 – Mezní hodnoty stupně karbonatace, stupně modifikačních přeměn a hodnoty pH výluhu ve vztahu k etapám karbonatace [32]

Etapa	Stupeň karbonatace	Stupeň modifikačních přeměn	Hodnota pH výluhu
I	méně než 55	více než 0,5	více než 10,8
II	55 – 73	0,5 – 0,4	10,8 – 9,6
III	73 – 85	0,4 – 0,8	9,6 – 8,0
IV	více než 85	více než 0,8	méně než 8,0

Vzhledem k určitému rozptylu, danému překrýváním jednotlivých etap karbonatace, jsou tyto hodnoty považovány za orientační. To platí zejména pro vzorky betonu, jejichž jakost není rovnoměrná.

Dalším důležitým parametrem pro posouzení stavu zkorodovaného betonu je stupeň modifikačních přeměn a jeho vztah ke stupni karbonatace. Tento vztah byl stanoven na základě experimentálního vyšetření přibližně 80 vzorků starých zkorodovaných betonů. Uvedené mezní hodnoty v tab. 9, charakteristické pro zařazení vzorku betonu do etapy karbonatace, platí pro hutné i mezerovité betony s použitím cementu na bázi portlandského, hlinitanového a jim podobných.

7 TRVANLIVOST BETONU

Trvanlivost stavebních hmot lze charakterizovat dobou jejich použitelnosti ve stavebním díle, tj. dobou, po kterou odolávají působení různých vlivů (změny teploty, působení slunečního záření, zmrazování, zvlhčování, či působení agresivních atmosférických vlivů), aniž by došlo ke změnám jejich vlastností přesahujícím hraniční (přípustné) požadavky. Konstrukce pak vyhovuje z hlediska trvanlivosti tehdy, pokud v průběhu požadované doby užívání plní svou funkci, a to jak z hlediska bezpečnosti, tak i funkčnosti, bez nároku na enormní požadavky na neplánovanou údržbu a opravy.

V předchozích kapitolách byl uveden průběh karbonatace betonu a modely, které tento proces popisují, resp. je umožní prognózovat. Tato kapitola pojednává o tom, jak karbonataci a následné korozi zabránit. Základní opatření uvádí evropská norma EN 206-1 [10], která platí pro Evropu a některé další země jako například Turecko, některé země severní Afriky a Středomoří [6]. Tato norma obsahuje obvykle také tzv. národní doplňky.

Tab. 10 – Stupně vlivu prostředí [6].

Stupeň	Charakteristika prostředí	Počet podstupňů
XO	bez nebezpečí koroze nebo narušení (interiéry budov s velmi nízkou vlhkostí)	-
XC	koroze vlivem karbonatace	4
XD	koroze způsobená chloridy jinými než z mořské vody	3
XS	koroze způsobená chloridy z mořské vody	3
XF	střídavé působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich	4
XA	chemicky agresivní prostředí	3

7.1 Stupně vlivu prostředí

ČSN EN 206-1 [10] klasifikuje prostředí, ve kterých má betonová konstrukce sloužit. Tyto kategorie prostředí se nazývají stupně vlivu prostředí a jsou značeny písmenem X, za kterým následuje ještě další písmeno: O, C, D, S, F a A. Stupně vlivu prostředí spolu s charakteristikou prostředí jsou uvedeny v tabulce 10. Všechny stupně, s výjimkou třídy XO, jsou ještě dále děleny. Stupeň XO představuje vnitřní prostředí (interiér suchých budov), kde

nehrozí nebezpečí koroze železobetonu. Nicméně podle Eurokódu 2 [52] i zde musí být krytí výztuže nejméně 15 mm pro železobeton a alespoň 25 mm pro přepjatý beton, aby se vyloučilo nebezpečí koroze výztuže [6].

7.1.1 Stupeň vlivu prostředí XC: karbonatace

V následujících odstavcích bude rozdělen stupeň XC a budou rozebrána technologická opatření pro tento stupeň, důležitá pro trvanlivost betonu, která se týkají maximálního vodního součinitele, minimální třídy pevnosti betonu a minimálního obsahu cementu. Tato opatření jsou doporučena ČSN EN 206-1 [10] a vedle nich jsou pak v tabulce 11 uvedeny i minimální tloušťky krytí podle Eurokódu 2 pro konstrukce z železobetonu (r) a předpjatého betonu (p).

Doporučení ČSN EN 206-1 [10] z hlediska trvanlivosti, společně s předepsanými tloušťkami krytí v souladu s Eurokódem 2, by měla být dodržena pro železobetonové konstrukce s životností nad 50 let. Pokud má být životnost delší než 100 let, je třeba dodržet ještě přísnější opatření. Minimální hodnota pevnosti betonu (vyjádřená prostřednictvím $f_{cy/cck}$ a $f_{cu/cck}$) odpovídá maximální hodnotě w/c za předpokladu, že je použit cement třídy 32,5. Hodnota minimálního množství cementu může být uvažována pouze u betonu s přírodním kamenivem s maximální velikostí zrna 32 mm, třídou konzistence S4 a s použitím superplastifikátorů, které potřebnou dávku vody redukují až o 20 % [6].

Tab. 11 – Stupeň XC: koroze výztuže vlivem karbonatace [6].

Stupeň	Popis prostředí	Kde je možno se s prostředím setkat	Max. w/c	Min. třída pevnosti	Min. obsah cementu (kg/m ³)	Tloušťka krytí	
						r	p
XC1	suché nebo stále mokré	<ul style="list-style-type: none"> interiéry budov s nízkou vlhkostí vzduchu 	0,65	20/25	260	15	25
XC2	mokré, občas suché	<ul style="list-style-type: none"> konstrukce zadržující vodu základy 	0,60	25/30	280	25	35
XC3	středně mokré, vlhké	<ul style="list-style-type: none"> interiéry budov s průměrnou nebo vyšší vlhkostí vzduchu vnější konstrukce chráněné před deštěm 	0,55	30/37	280	25	35
XC4	střídavě mokré a suché	<ul style="list-style-type: none"> vnější konstrukce vystavené dešti 	0,50	30/37	300	30	40

Třída agresivity XC se tedy týká železobetonových a předpjatých konstrukcí, u nichž existuje riziko koroze výztuže, vyvolané karbonací. Tato třída agresivity se dále dělí na podtřídy XC1, XC2, XC3 a XC4.

Nejagresivnější prostředí spadá do stupně XC4. Zde je riziko koroze výztuže největší, protože konstrukce je v tomto případě vystavena střídavě suchému prostředí (kdy dochází k difúzi O_2 a CO_2) a vlhkému prostředí (nasakování vody). Ve všech případech se jedná o procesy, umožňující neutralizaci hydroxidu vápenatého a podporující korozi výztuže díky snížení koncentrace OH^- iontů.

Málo agresivní prostředí (XC1) se týká konstrukcí v suchém prostředí, například interiérů budov. Absence vody zpomalí, ne-li zastaví, proces karbonace, a proto může být vodní součinitel, požadovaný pro zajištění ochrany výztuže proti karbonaci (mluvíme o pasivaci výztuže), relativně vysoký (0,65) – viz tab. 11.

Hodnoty tloušťky krytí výztuže pro betonové konstrukce, nacházející se v prostředí spadajícím do XC2 a XC3, leží mezi hodnotami požadovanými pro nejagresivnější prostředí XC4 a nejméně agresivní XC1. Takovéto průměrné agresivní prostředí se vyznačuje tím, že konstrukce je stále pod vodou (XC2), takže O_2 a CO_2 nemohou přes vodou zaplněné póry difundovat do betonu. Podobně v prostředí XC3, tedy při hodnotách průměrné vlhkosti, je beton sice vystaven vlhkému vzduchu, ale ne přímému kontaktu s vodou (například ve vodotěsných betonových tunelech).

7.2 Performance-based přístupy

7.2.1 Navrhování železobetonových konstrukcí s ohledem na životnost

Navrhování konstrukcí dle současných norem má jisté nevýhody. Obecným nedostatkem při navrhování konstrukcí je skutečnost, že podle současných předpisů [52] se navrhují obvykle občanské stavby na 50 let a mosty na 100 let. Investor by však měl mít možnost rozhodnout se na základě účelu stavby a ekonomické rozvahy pro vlastní požadovanou životnost konstrukce.

Investor rovněž nemá k dispozici prostředky pro objektivnější hodnocení a srovnání alternativních řešení, příp. omezení rizika neekonomických důsledků. Z návrhu pro konkrétní konstrukci rovněž nevyplývá úroveň (míra) spolehlivosti a trvanlivost (či životnost) konstrukce. O těchto vlastnostech konstrukcí navržených dle ČSN/Eurokódů, lze pouze oprávněně předpokládat, že budou přiměřené. V řadě případů by však bylo výhodnější navrhnout konstrukci na cílenou, předem danou hladinu spolehlivosti, resp. dobu životnosti, či dobu do první opravy/rekonstrukce apod. Existují i další případy, kdy je konstrukci nutné nebo vhodné navrhnout tak, aby měla individuálně požadované vlastnosti, např. zvýšenou odolnost proti degradaci materiálu, proti požáru, proti zemětřesení a další [53].

V poslední době se proto začíná prosazovat nový trend – tzv. Performance-Based Design - navrhování konstrukcí s ohledem na užité vlastnosti (tj. na specifické hodnoty např. požadované uživatelem). K užitným vlastnostem patří, kromě základních funkčních vlastností, např. spolehlivost, trvanlivost, ale také ekonomická a ekologická šetrnost. Je zřejmé, že některé z těchto vlastností jsou ve svém důsledku protikladné a při návrhu konstrukce k nim nemůže projektant přistupovat odděleně, nýbrž musí postupovat tak, aby

celý soubor vlastností optimalizoval s přihlédnutím k požadavkům legislativním, požadavkům zákazníka a s přihlédnutím ke specifickým případu [54].

Jde tedy často o nelehký úkol, kdy je nutno zohlednit potřeby či představy tzv. cílového klienta a svoji roli přitom musí sehrát projektant, investor i prováděcí firma. Přitom projektant musí být vybaven potřebnými znalostmi (mj. základy pravděpodobnostního modelování a simulačních technik) a vhodnými softwarovými nástroji (zahrnujícími zejména modelování degradace stavebních materiálů a konstrukcí), které mu umožní efektivně prognózovat životnost, spolehlivost a rozhodovat o optimálním řešení [55].

Trvanlivost a spolehlivost patří k rozhodujícím vlastnostem konstrukce, a proto navrhování na životnost a analýza životnosti jsou činnosti, jejichž cílem je stanovení či odhad budoucích užitečných vlastností konstrukce i objektu, a které dávají podklady nutné pro plánování a provádění údržby, oprav a pro optimální alokaci finančních a materiálových prostředků. Navrhování konstrukce na cílenou životnost může být vedeno buďto přímo cestou ověření splnění požadovaného časového limitu v daných podmínkách, nebo prognózou odolnosti konstrukce po uplynutí životnosti.

Navrhování konstrukce s ohledem na životnost vyžaduje (i) hodnotit časově závislé mezní stavy (MS), (ii) pracovat s odpovídajícími modely popisujícími degradaci materiálů a (iii) využívat pravděpodobnostní přístupy. V následujícím textu jsou tyto body rozvedeny podrobněji.

Mezní stavy únosnosti (ULS – Ultimate Limit States) a použitelnosti (SLS - Serviceability Limit States) konstrukcí uvádí EN 1990 [56], přitom ale čas do mezních podmínek obvykle nevstupuje a jen se předpokládá jistá nominální životnost. Kromě těchto dvou základních druhů mezních stavů se v souvislosti s trvanlivostí konstrukce nově zavádí mezní stavy trvanlivosti (DLS – Durability Limit States), které vymezují podmínky jistých stadií degradace, kdy sice ještě není dosažen žádný ze stavů SLS či ULS, ale je zde vazba na údržbu a životnost. Jako mez životnosti můžeme totiž zvolit okamžik vzniku takových poškození, které by již vyžadovaly nákladnější opravy, ale přitom by ještě nebyl dosažen žádný z „klasických“ mezních stavů. Tyto DLS jsou již zahrnuty ve výše zmíněných normách [51] a [57]. Formálně jsou zatím mezní stavy trvanlivosti řazeny do kategorie SLS [55].

Při posuzování, a tedy i navrhování konstrukcí lze postupovat pomocí plně pravděpodobnostního pojetí, kdy se pracuje s tzv. pravděpodobností poruchy [53]. Obecně má pravděpodobnostní podmínka pro hodnocení mezního stavu tvar [55,58]:

$$P_f = P(A \geq B) < P_d \quad , \quad (65)$$

kde A je akce zatížení či působení prostředí, B je bariéra (únosnost, odpor konstrukce, zadaná mezní hodnota). Pravděpodobnost poruchy P_f tak porovnáváme s návrhovou pravděpodobností P_d . Všechny tyto veličiny mohou být funkcí času. V případě karbonatce má podmínka (65) následující tvar:

$$P_f(t_D) = P\{a - x_c(t_D) \leq 0\} \leq P_d \quad (66)$$

Obecně je možno výše uvedenou a další, obdobné podmínky nahradit vztahem:

$$P_f = P(t_S \leq t_D) \leq P_d \quad , \quad (67)$$

kde t_s je čas dosažení mezní hodnoty degradace.

Pro posouzení spolehlivosti, s jakou jsou předmětné mezní stavy splněny, je vhodné transformovat pravděpodobnost P_f na index spolehlivosti β pomocí vztahu

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (68)$$

kde Φ označuje distribuční funkci normovaného normálního rozdělení. Hodnota β se pak porovnává s návrhovou hodnotou β_d . Oba ukazatele spolehlivosti P_f i β jsou tedy ekvivalentní a jsou vztahovány vždy k jisté referenční době.

Je zřejmé, že pro určení/odhad příslušné hodnoty x_c musí být použity vhodné výpočetní modely karbonatace zahrnující veličiny, které ovlivňují postup karbonatace v čase. Jsou to data týkající se betonu (složení i způsob ošetřování), charakteristiky konstrukci obklopujícího prostředí, příp. další parametry. Obvykle jsou to veličiny, o kterých přesné údaje nejsou známé, resp. které ze své povahy podléhají jistému rozptylu, a proto je vhodné pracovat s nimi jako s náhodnými veličinami (resp. náhodnými funkcemi - to je ale zatím v praxi neschůdné). Musí být tedy postupováno pravděpodobnostně.

7.2.2 Úrovně návrhu železobetonových konstrukcí s ohledem na životnost

Je tedy zřejmé, že navrhování betonových konstrukcí s ohledem na jejich životnost je komplikovaný problém a lze říci, že v současné praxi se běžně akceptují velmi zjednodušené postupy – což ovšem není adekvátní významu a možným ekonomickým (i ekologickým) důsledkům. V posledním období jsou proto vypracovávány modely degradačních procesů na pravděpodobnostním základě, které umožňují spolehlivostní posuzování životnosti konstrukce [53].

Lze rozlišit tři úrovně modelování působení prostředí a mechanismů degradujících betonové konstrukce, a tedy také úrovně navrhování (a posuzování) na životnost [53]:

a) Makro-úroveň

Jedná se o postupy běžně používané v současnosti. Postupuje se dle současných norem a doporučení, které vesměs „předepisují“ postupy a příslušné veličiny navrhování, což má vést k jistým typickým, nominálním či obvykle očekávaným vlastnostem. Pro projektovanou konstrukci není stanovena specifická návrhová životnost, předpokládá se jen, že konstrukce bude odpovídat doporučené hodnotě, u pozemních staveb obvykle 50 let. K tomuto cíli je nutno dodržet předepsané, limitní hodnoty, např. pevnostní třídu betonu, krytí výztuže, typ a množství cementu, dobu ošetřování a vodní součinitel, obvykle vztahované k tzv. expoziční třídě konstrukce (vliv prostředí) – viz kap. 6.1.

b) Mezo-úroveň

Jedná se o navrhování s využitím jednodušších, inženýrských modelů degradačních procesů, s přihlédnutím k lokálním vlivům prostředí. Návrh je tedy založen na modelování postupné degradace materiálů s uvažováním vlivů prostředí v dané lokalitě, přihlíží se k cílové (požadované) životnosti sledované konstrukce. Výpočty mohou být deterministické i pravděpodobnostní.

c) Mikro-úroveň

Jedná se o plně pravděpodobnostní návrh na cílovou životnost či posouzení zbytkové životnosti s podrobným modelováním degradačních procesů a vlivů prostředí. Tyto postupy a modely jsou dnes již známy, ale jde o poměrně pracné postupy, vyžadující znalost řady pravděpodobnostních metod a statistických údajů o vlastnostech konstrukce, materiálů a prostředí, což v běžné praxi lze stěží uplatnit.

7.2.3 Specifikace betonu

Navrhování betonových konstrukcí je ovšem úzce spojeno se specifikací betonu. Dle definice uvedené v ČSN EN 206-1 [10] se specifikací rozumí konečná sestava dokumentovaných technických požadavků předávaných výrobcí ve formě požadovaných vlastností, tj. **přímých charakteristik** (performance-based - dále jen PB; je to např. rychlost karbonatace – vztaheno k expozičním třídám XC) nebo předepsáním **nepřímých charakteristik** udávajících složení betonu (preskriptivní forma – např. hodnota vodního součinitele) [54].

V úvodu normy [10] je uvedeno, že evropská technická komise CEN/TC 104 došla k závěru, že PB metody nejsou dosud dostatečně vyvinuty tak, aby mohly být součástí této normy. Komise však uznala, že některé státy mají vyvinuto důvěryhodné zkoušení i kritéria. Proto tato norma umožňuje pokračování a rozvíjení této praxe.

Uvedená norma pak udává ve vztahu k trvanlivosti v příloze F, v tabulkách NA F.1, 2 a 3, normativní hodnoty mezí složení betonu (vodní součinitel, obsah cementu, obsah vzduchu a doporučení ohledně pevnosti betonu) dle expozičních tříd, tj. hlavně nepřímé charakteristiky. Odstavec 5.3.3 jen stručně pojednává o PB formě ve vztahu ke stupňům vlivu prostředí a odkazuje na informativní přílohu J - Návrh složení betonu z hlediska trvanlivosti, kde jsou uvedeny obecné pokyny pro takový návrh ve smyslu PB. Ve výčtu metod, které mohou být přitom použity, jsou zde také zahrnuty metody založené na analytických modelech, které byly porovnány s údaji ze zkoušek, reprezentujících skutečné podmínky v praxi.

8 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je experimentální studium a rovněž modelování procesu karbonatace betonu připraveného z portlandského cementu a betonu s částečnou náhradou cementu alternativními silikátovými pojivy. Jako alternativní pojiva jsou využity: popílek, vysokopeční struska a metakaolin.

V rámci disertační práce je řešen:

- vliv relativní vlhkosti na průběh karbonatace, který je v literatuře rozdílně popsán a hodnocen;
- vliv doby ošetřování na průběh karbonatace;
- vliv náhrady portlandského cementu alternativními silikátovými příměsmi na snížení obsahu hydroxidu vápenatého v cementovém tmelu;
- průběh karbonatace v souvislosti s náhradou cementu alternativními silikátovými pojivy;
- výběr a úprava vhodných modelů popisujících průběh karbonatace pro vývoj softwarového nástroje, který by posloužil projektantovi a investorovi při navrhování konstrukcí - vzájemné srovnání modelů a rovněž provedení a vyhodnocení různých parametrických studií.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

9 POUŽITÉ SUROVINY

9.1 Cement

Pro výrobu cementových past a cementových malt byl použit cement CEM I 42,5 R podle ČSN EN 197-1 [7] z Českomoravský cement, a. s. Mokrý. Chemické složení cementu je shrnuto v tabulce 12.

Tab. 12 – Chemické složení cementu.

Složka	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S _{celk.}	Ztráta žháním
%	18,89	4,24	3,83	62,37	0,99	2,31	1,17

9.2 Příměsi

Do směsi pro výrobu cementových past a cementových malt byl jako alternativní silikátové pojivo přidáván popílek, struska, nebo metakaolin.

9.2.1 Popílek

Jednou z použitých příměsí byl popílek z Třineckých železáren, a.s. Chemické složení je uvedeno v tabulce 13.

Tab. 13 – Chemické složení popílku.

Složka	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S _{celk.}	Ztráta žháním
%	44,98	22,72	8,81	4,31	2,96	2,84	0,49	0,64	11,37

9.2.2 Struska

Další použitou příměsí byla velmi jemně mletá granulovaná vysokopecní struska o měrném povrchu 420 m²/kg. Strusku dodává firma Kotouč Štramberk, spol. s r.o., kde je upravována pro další potřeby mletím. Původ má struska v ArcelorMittal Ostrava, a.s. Její chemické složení je shrnuto v tabulce 14.

Tab. 14 – Chemické složení strusky.

Složka	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	S _{celk.}	Cl	B
%	34,14	5,99	0,45	39,8	9,38	0,339	0,42	0,28	0,33	0,056	1,44

9.2.3 Metakaolin

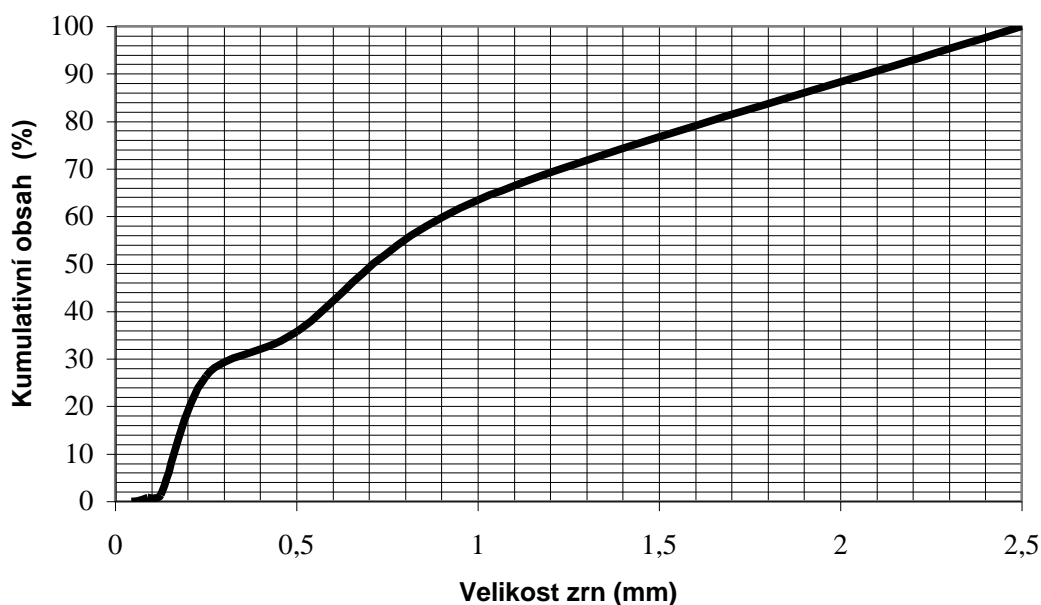
Jako poslední druh příměsí byl použit metakaolin s označením MEFISTO K05 dodávaný společností ČLUZ, a.s. Nové Strašecí s velikostí zrna $D_{50} = 5 \mu\text{m}$. Jeho chemické složení udávané výrobcem udává tabulka 15.

Tab. 15 – Chemické složení metakaolinu.

Složka	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂
%	58,70	38,50	0,72	0,20	0,38	0,85	0,49

9.3 Kamenivo

Jako kamenivo byly do cementových malt přidávány 3 frakce křemenného zkušebního písku podle ČSN 721200 [59] v poměru 1:1:1. Jedná se o filtrační písky, které jsou dováženy z Chlumu u Doks. Jejich frakce je přibližně následující: PG1 – frakce s velikostí zrn do 0,5 mm a s největším podílem zrn o velikosti 0,125 – 0,25 mm; PG2 – frakce s velikostí zrn do 2,5 mm a s největším podílem zrn o velikosti 0,5 – 1 mm; PG3 – frakce s velikostí zrn do 2,5 mm a s největším podílem zrn o velikosti 1 – 2,5 mm. Ke stanovení přesné zrnitosti byl proveden síťový rozbor směsi zkušebních písků smíchaných v poměru 1:1:1, jehož výsledky jsou zpracovány do grafu na obrázku 9. Z chemického hlediska písek obsahuje nejméně 98 % SiO₂, ztráta žiháním je 0,5 %.



Obr. 9 – Křivka zrnitosti zkušebního písku.

10 ZKUŠEBNÍ TĚLESA A SLOŽENÍ ZKUŠEBNÍCH SMĚSÍ

10.1 Příprava zkušebních těles

10.1.1 Cementové pasty

Pro zkoušení vlastností na cementových pastách byla zvolena zkušební tělesa o rozměrech 20×20×100 mm. Pouze pro studium lomově-mechanických vlastností byla vyrobena zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm, která neobsahovala žádnou z příměsí.

Nejprve byly na laboratorních vahách naváženy všechny složky podle připravované receptury – viz kap. 10:2:1. V mísící nádobě byl poté smíchán cement s příslušnou příměsí (pokud byla použita) a následně přidána voda. Po dokonalém zhomogenizování byla připravená cementová pasta plněna do ocelových forem opatřených separačním přípravkem. (parafínový olej). Formy byly plněny ve dvou vrstvách a každá vrstva byla zhutněna pěti rázy o podložku. Přebytek hmoty byl odstraněn špachtlí.

Všechna vyrobená tělesa byla odformována po 24 hodinách zrání v laboratorních podmínkách ($t = 22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 55 \pm 5 \%$) a následně uložena do vody na dalších 27 dní. Poté byla zkušební tělesa vyjmuta z vodní lázně a ponechána 24 hodin v laboratorních podmínkách, aby došlo k vysušení těles. Na takto vysušených vzorcích se prováděly předepsané zkoušky.

10.1.2 Cementové malty

Pro zkoušení vlastností na cementových maltách byla zvolena zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm.

Nejprve byly na laboratorních vahách naváženy všechny složky podle připravované receptury – viz kap. 10.2.2. V mísící nádobě byla nejdříve připravena cementová pasta stejným postupem, jak bylo popsáno v předchozí kapitole, a do takto připravené pasty bylo postupně přidáváno kamenivo od nejjemnější frakce po nejhrubší. Důkladně zhomogenizovaná malta byla plněna do připravených ocelových forem opatřených separačním nátěrem stejným jako u přípravy past. Hutnění malt bylo prováděno na vibračním stolku po dobu 5 sekund. Přebytek malty byl odstraněn špachtlí.

Odformování, zrání ve vodní lázni a následné sušení bylo prováděno stejným způsobem jako u cementových past. Pouze při přípravě zkušebních těles pro studium vlivu doby ošetřování na průběh karbonatace byla doba zrání kromě uvedených 28 dní rovněž 7 a 14 dní a 1 rok.

V případě vzorků pro stanovení hloubky karbonatace pomocí detekce změn parametrů odezvy signálu na akustický impuls byly vzorky po odformování opatřeny z pěti stran trojitou vrstvou epoxidového laku, aby se zabránilo přístupu CO_2 z těchto stran. Označení jednotlivých stran vzorku je následující:

- S1 – větší boční stěna trámečku ve formě (*jediná bez nanesení epoxidového laku*)
- S2 – spodní stěna trámečku ve formě (dno)
- S3 - větší boční stěna trámečku ve formě
- S4 – vrchní stěna trámečku ve formě
- S5 – menší boční stěna trámečku ve formě
- S6 - menší boční stěna trámečku ve formě

10.2 Souhrn použitých receptur

V následujících kapitolách bude uvedeno složení směsí pro výrobu zkušebních těles použitých následně na zkoumání vlivu různých faktorů na průběh karbonatace, popř. na jiná stanovení.

10.2.1 Cementové pasty

10.2.1.1 Cementové pasty pro stanovení zbytkového Ca(OH)_2

Ke stanovení zbytkového Ca(OH)_2 byla použita zkušební tělesa z cementové pasty o rozměrech 20×20×100 mm. Použité směsi obsahovaly kromě cementu a vody, vždy rovněž jednu z příměsí – popílek (POP), struska (STR) nebo metakaolin (MK). Uvedené suroviny jsou charakterizovány v kap. 9. Složení jednotlivých směsí pro případ popílku je shrnuto v tabulce 16. Stejná receptura směsí byla pak použita i v případě ostatních příměsí, pouze v označení je pak použita vždy příslušná zkratka pro danou příměs.

Tab. 16 – Receptura směsi pro cementové pasty s popílkem.

Označení	Cement (g)	Popílek (g)	Voda (ml)
ref	400	–	200
POP10	400	44,4	222
POP15	400	70,4	235
POP25	400	133,2	267
POP30	400	171,6	286

Tab. 17 – Typ cementu dle ČSN EN 197-1 odpovídající použitému množství cementu a příměsí.

Příměs	Množství příměsí	Název cementu	Označení cementu
Popílek	10 a 15 %	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V
	25 a 30 %		CEM II/B-V
Struska	10 a 15 %	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S
	25 a 30 %		CEM II/B-S
Metakaolin	10 a 15 %	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-Q
	25 a 30 %		CEM II/B-Q

Jak vyplývá z tabulky 16, směsi byly připraveny se stoupajícím množstvím příměsí - 10, 15, 25 a 30 % ze součtu hmotností cementu a příměsí. Obsah vody pak odpovídal poměru $\text{voda}/(\text{cement} + \text{příměs}) = 0,50$ (nebyla respektována k -hodnota z ČSN EN 206 [10]).

V tabulce 17 je shrnuto, jakému typu cementu dle ČSN EN 197-1 [7] odpovídá použité množství cementu a příměsí u zvolených směsí.

10.2.1.2 Cementové pasty pro určení lomové mechanických vlastností

K určení lomově-mechanických vlastností byla zhotovena zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm, která neobsahovala žádnou z příměsí. Použitá směs tedy obsahovala pouze cement (viz kap 9.1) a vodu. Vodní součinitel uvedené směsi byl 0,40.

10.2.2 Cementové malty

Pro zkoušení vlastností na cementových maltách byla zvolena vždy zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm.

10.2.2.1 Cementové malty pro studium vlivu relativní vlhkosti vzduchu na průběh karbonatace

Pro studium vlivu relativní vlhkosti vzduchu (RH) na průběh karbonatace byla zvolena cementová malta s vodním součinitelem 0,54. Hmotnostní poměr kamenivo/cement (a/c) byl 4. Použité suroviny jsou charakterizovány v kap. 9. Složení směsi je shrnuto v tabulce 18.

Tab. 18 – Receptura směsi pro cementové malty pro studium vlivu relativní vlhkosti vzduchu na průběh karbonatace.

Cement (g)	Kamenivo (g)	Voda (ml)
420	1680	225

10.2.2.2 Cementové malty pro studium vlivu doby ošetřování na průběh karbonatace

Pro studium vlivu doby ošetřování cementové malty na průběh karbonatace byla zvolena stejná receptura jako pro studium vlivu relativní vlhkosti vzduchu (kap. 10.2.2.1). Jednotlivé vzorky se od sebe liší pouze dobou ošetřování, která je 7 dní (označení O7), 14 dní (O14), 28 dní (O28) a 1 rok (O365).

10.2.2.3 Cementové malty pro studium vlivu typu a množství příměsí na průběh karbonatace

Směsi pro studium vlivu typu příměsí na průběh karbonatace obsahovaly kromě cementu, kameniva a vody, vždy rovněž jednu z příměsí – popílek (POP), struska (STR) nebo metakaolin (MK). Všechny suroviny jsou charakterizovány v kap. 9. Složení jednotlivých směsí pro případ popílků je shrnuto v tabulce 19. Stejná receptura směsí byla pak použita i v případě ostatních příměsí, pouze v označení je pak použita vždy příslušná zkratka pro danou příměs.

Jak vyplývá z tabulky 19, směsi byly připraveny se stoupajícím množstvím příměsí - 10, 15, 25 a 30 % ze součtu hmotností cementu a příměsí. Obsah vody pak odpovídal poměru voda/(cement + příměs) = 0,50 (nebyla respektována *k*-hodnota z ČSN EN 206 [10] – více

viz kap. 13.1.4). Poměr a/c byl u všech použitých směsí 4. V tabulce 17 je shrnuto, jakému typu cementu dle ČSN EN 197-1 [7] odpovídá použité množství cementu a příměsi u zvolených směsí.

Tab. 19 – Receptura směsi pro cementové malty s popílkem.

Označení	Cement (g)	Popílek (g)	Kamenivo (g)	Voda (ml)
ref	420	–	1260	210
POP10 - M	420	46,6	1260	234
POP15 - M	420	73,9	1260	247
POP25 - M	420	139,9	1260	280
POP30 - M	420	180,2	1260	300

10.2.2.4 Cementové malty pro studium vlivu náhrady portlandského cementu, popř. kameniva popílkem na průběh karbonatace

Ve směsích pro výrobu cementové malty bylo popílkem nahrazeno postupně 10, 15, 25 a 30 % hmotnosti cementu při zachování hmotnosti kameniva (malty označené C) a stejným množstvím pak rovněž kamenivo při zachování hmotnosti cementu (malty označené K). V maltách s nižším obsahem popílku (C10, C15, K10, K15) odpovídá dle ČSN EN 197-1 [7] množství cementu a popílku složení portlandského popílkového cementu CEM II/A-V, v maltách s vyšším obsahem popílku (C25, C30, K25, K30) portlandskému popílkovému cementu CEM II/B-V. Všechny suroviny jsou charakterizovány v kap. 9. Složení jednotlivých směsí je shrnuto v tabulce 20.

Tab. 20 – Receptura směsi pro cementové malty pro studium vlivu náhrady portlandského cementu, popř. kameniva popílkem.

Cementová malta	Cement (g)	Popílek (g)	Kamenivo (g)	Voda (ml)	Voda/ (cement + popílek)	a/c
referenční C0	450	–	1350	215	0,48	3,0
C10	405	45	1350	215	0,48	3,3
C15	383	68	1350	215	0,48	3,5
C25	338	113	1350	215	0,48	4,0
C30	315	135	1350	215	0,48	4,3
K10	450	45	1305	215	0,43	2,9
K15	450	68	1282	215	0,42	2,8
K25	450	113	1237	215	0,38	2,7
K30	450	135	1215	215	0,37	2,7

10.2.2.5 Cementové malty pro stanovení hloubky karbonatace pomocí detekce změn parametrů odezvy signálu na akustický impuls

Pro stanovení hloubky karbonatace pomocí detekce změn parametrů odezvy signálu na akustický impuls byla zvolena cementová malta s vodním součinitelem 0,50. Zvolený poměr a/c byl 3. Použité suroviny jsou charakterizovány v kap. 9. Složení směsi je shrnuto v tabulce 21. Jak již bylo zmíněno, vzorky byly po odformování opatřeny z pěti stran trojitou vrstvou epoxidového laku, aby se zabránilo přístupu CO₂ z těchto stran (viz kap. 10.1.2).

Tab. 21 – Receptura směsi pro cementové malty pro stanovení hloubky karbonatace pomocí detekce změn parametrů odezvy signálu na akustický impuls.

Cement (g)	Kamenivo (g)	Voda (ml)
450	1350	225

11 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

11.1 Stanovení pevnosti v tahu ohybem a tlaku

Stanovení pevností bylo prováděno podle ČSN EN 196-1 [9]. **Pevnost v tahu ohybem** se stanovuje tříbodovým zatěžováním do porušení zkušebních těles. Maximální zatěžovací síla F (N) se zaznamenává, přičemž zkouška se provádí vždy minimálně na 3 zkušebních tělesech. Na zlomcích z tohoto experimentu pak jsou zjišťovány pevnosti tlakové. Pevnost v tahu ohybem (MPa) se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$R_f = \frac{3}{2} \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad , \quad (69)$$

kde l je vzdálenost mezi osami podpěrných válců ($70,0 \pm 0,5$ mm pro zkušební tělesa o rozměrech $20 \times 20 \times 100$ mm a $100,0 \pm 0,5$ mm pro zkušební tělesa o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm), b je šířka zkušebního tělesa (mm) a d je výška zkušebního tělesa (mm). Ve výsledcích je pak uvedena průměrná hodnota ze tří měření.

Pro stanovení **pevností v tlaku** byl použit hydraulický lis s rozsahem tlačné síly do 20, 40, nebo 200 kN dle charakteru zkoumaného vzorku. Maximální tlačná síla F (N) se zaznamenává a pevnost v tlaku R_c (MPa) se pak vypočítá z poměru maximální tlačné síly a průřezové plochy zkušebního tělesa A (mm²). Pro zkušební tělesa o rozměrech $20 \times 20 \times 100$ mm pak platí:

$$R_c = \frac{F}{A} = \frac{F}{20 \cdot b} \quad (70)$$

Pro zkušební tělesa o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm platí:

$$R_c = \frac{F}{A} = \frac{F}{40 \cdot b} \quad (71)$$

Ve výsledcích je opět uvedena průměrná hodnota v tomto případě z šesti měření.

11.2 Stanovení pórovitosti vysokotlakou rtuťovou porozimetrií

Pro stanovení pórovitosti byl použit rtuťový porozimetr firmy Micromeritics Pore Sizer 9310.

Parametry přístroje:

- nízkotlaký test 0 – 0,21 MPa
- vysokotlaký test 0 – 207 MPa
- měřitelné póry 300 – 0,006 μm

11.3 Stanovení konzistence

Konzistence cementové malty byla stanovena s pomocí kovového kužele z korozivzdorné oceli s hladkým povrchem stěn, který měl následující rozměry: výška ($39,5 \pm 0,5$ mm), vnitřní průměr spodní části ($40 \pm 0,5$ mm) a vnitřní průměr horní části ($21 \pm 0,5$ mm). Tento kužel byl umístěn do středu desky střešovacího stolku a naplněn cementovou pastou, jejíž přebytek byl odstraněn špachtlí. Poté byl kovový kužel lehce nadzvednut kolmo vzhůru a cementová pasta se na desce rozlila. Hodnota rozlité byla stanovena změřením průměru rozlitého zkušební vzorku cementové pasty po 3 svislých pádech, při nichž se deska střešovacího stolku zvedala a pak volně padala z předepsané výšky. Průměr cementové pasty po rozlité byl změřen ve dvou na sebe kolmých směrech.

11.4 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost zatvrdlé cementové paty nebo malty byla stanovena výpočtem z hmotnosti zatvrdlé cementové pasty nebo malty vztažené na daný objem. U zkušebních těles byly před provedením zkoušky pevnosti v tahu ohybem změřeny rozměry pomocí posuvného měřítka Mitutoyo s přesností 0,01 mm a stanovena jejich hmotnost s přesností na 0,01 g. Každý rozměr byl změřen třikrát a následně vypočten průměr z těchto hodnot. Z výsledných hodnot byla vypočtena objemová hmotnost zatvrdlé cementové pasty, nebo malty dle následujícího vztahu:

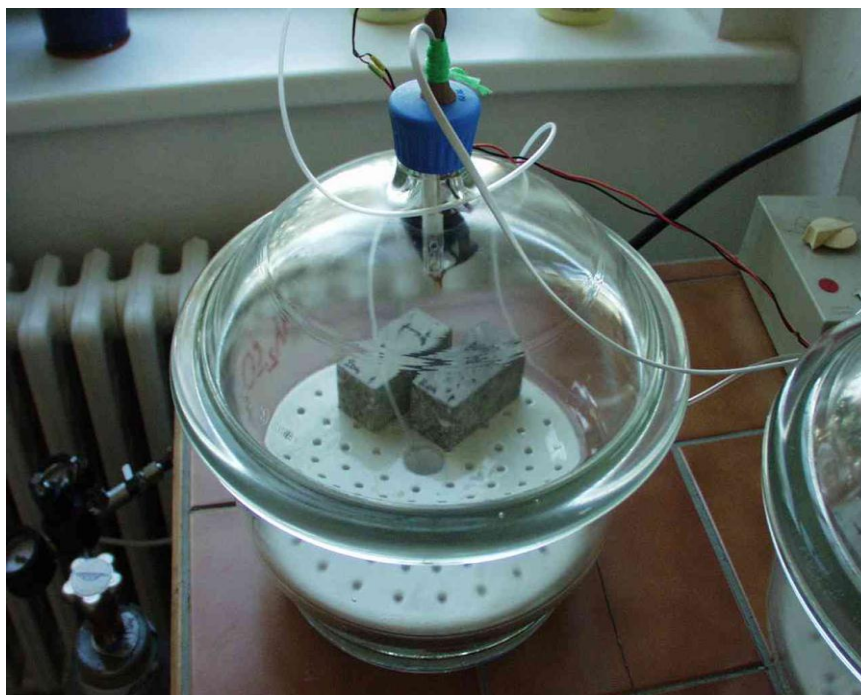
$$\rho = \frac{m}{V} \quad , \quad (72)$$

kde ρ je objemová hmotnost (kg/m^3), m je hmotnost zkušební tělesa (kg) a V je objem zkušební tělesa (m^3). Celé stanovení je provedeno na 3 vzorcích a ve výsledcích je pak uvedena průměrná hodnota z těchto tří stanovení.

11.5 Karbonatační zkouška

Pro urychlení průběhu karbonatace byly vzorky vloženy do exsikátoru se zvýšeným obsahem oxidu uhličitého (55 ± 5 obj. % CO_2) – viz obr. 10. V exsikátorech byla upravována relativní vlhkost přítomností nasycených roztoků různých solí viz tabulka 22. V jednom z exsikátorů

byl pak místo nasyceného roztoku soli umístěn silikagel, který zajišťoval hodnotu RH = 0 - 4 %. Teplota se během průběhu karbonatace pohybovala v rozmezí 22 ± 2 °C.



Obr. 10 – Uložení vzorků během karbonatace.

Tab. 22 – Relativní vlhkosti nad nasycenými roztoky solí.

Nasycený roztok	K ₂ SO ₄	KNO ₃	KCl	NaCl	K ₂ CO ₃
Relativní vlhkost (25 °C) (%)	97,3	93,6	84,3	75,3	43,2

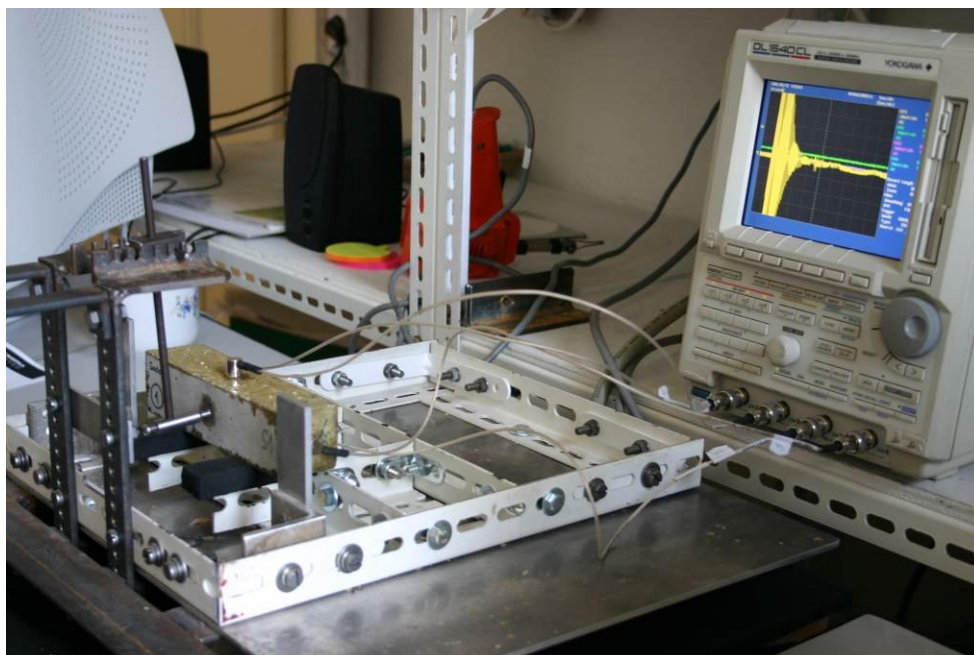
Po uplynutí stanovené doby uložení byly vzorky vyjmuty z exsikátoru, rozříznuty a byla na nich stanovena hloubka karbonatace pomocí fenolftaleinové zkoušky. Ta spočívá v tom, že po aplikaci ethanolického roztoku fenolftaleinu se acidobazický indikátor fenolftalein zbarví růžovofialově, popř. zůstane bezbarvý. Růžovofialová barva ukazuje, kde malta ještě není zkarbonatována (pH > 9,5), zatímco tam, kde malta zůstane šedá (fenolftalein je bezbarvý), již malta zkarbonatovala (pH < 9,5). Tloušťka šedé vrstvy tedy odpovídá hloubce karbonatace (viz obr. 11). Hloubka karbonatace byla vždy naměřena z každé strany dvakrát a z těchto 8 měření byla stanovena průměrná hodnota, která je uvedena ve výsledcích.

Jedná se o nejčastěji používanou metodu určení hloubky karbonatace [30,38,60-64]. Její nevýhodou je však skutečnost, že může rozlišit pouze zcela zkarbonatovanou část betonu (malty) od ostatních částí, které mohou být nezkarbonatované, nebo již částečně zkarbonatované [65-66]. Tvorbou uhličitanu vápenatého za hloubkou karbonatace, určenou fenolftaleinovou zkouškou, byla zjištěna pomocí termické, infračervené a rentgenové difrakční analýzy [67-68]. Chang a kol. [68] zjistili, že hloubka karbonatace určená pomocí těchto metod je dokonce dvojnásobná oproti hloubce určené pomocí fenolftaleinového indikátoru. V našem případě však naměřená hloubka slouží především ke srovnání vlivu

některého z faktorů na průběh karbonatce a pro tento účel je fenolftaleinová zkouška dostačující. Navíc je tato metoda rovněž zahrnuta v normě ČSN EN 14630 [69].



Obr. 11 – Určení hloubky karbonatce pomocí fenolftaleinové zkoušky.



Obr. 12 – Provedení experimentu FI metodou Impact-echo (Impuls-echo).

Jako nedestruktivní metoda určení hloubky karbonatce byla zkoumána rovněž detekce změn parametrů odezvy signálu na akustický impuls realizovaný úderem kovového kladívka do předem stanovených bodů na povrchu betonových zkušebních těles. Získaná spektra odezvy signálů byla podrobena frekvenční inspekci (FI), kdy k efektivní realizaci experimentu FI byla využita metodika Impact-echo (Impuls-echo) – viz obr. 12. Budící impuls byl realizovaný úderem kladívka o hmotnosti 90 gramů do předem stanovených bodů na plochách zkoumaného trámečku. Odezva na budící akustický impuls byla snímána

v definovaných bodech na ploše trámečku čtyřmi snímači Sedlák fixovanými včelím voskem a vedena na vstupy čtyřkanálového osciloskopu Yokogawa DL1540CL [70].

11.6 Stanovení zbytkového Ca(OH)_2

Zbytkový hydroxid vápenatý byl stanoven ve výluhu z cementové pasty sacharátovou metodou. Do odměrné baňky o objemu 1000 ml byl navážen 1,0000 g namleté cementové pasty a odměrná baňka byla naplněna do $\frac{3}{4}$ studenou převařenou destilovanou vodou. Poté byla odměrná baňka uzavřena a umístěna na třepačku a její obsah byl třepán 2 hodiny. Následně byla odměrná baňka doplněna studenou převařenou destilovanou vodou po rysku. Do 3 titračních baněk bylo napipetováno 100 ml zfiltrovaného roztoku, přidáno 20 g sacharosy (p.a.) a titrováno odměrným roztokem 0,1 M HCl na fenolftalein do odbarvení.

11.6.1 Výpočet zbytkového Ca(OH)_2

Hydroxid vápenatý reaguje s kyselinou chlorovodíkovou dle následující reakce:



Látkové množství Ca(OH)_2 v odměrné baňce $n[\text{Ca(OH)}_2]$ (mol) se pak vypočítá dle následujícího vzorce:

$$n[\text{Ca(OH)}_2] = \frac{c(\text{HCl}) \cdot V(\text{HCl})}{2} \cdot \frac{V(\text{odm.b.})}{V(\text{pipet.})}, \quad (74)$$

kde $c(\text{HCl})$ je látková koncentrace HCl (mol/l), $V(\text{HCl})$ je objem spotřebované HCl na titraci (l), $V(\text{odm.b.})$ je objem odměrné baňky (1 l) a $V(\text{pipet.})$ je objem pipetovaného roztoku (0,1 l).

Hmotnost Ca(OH)_2 v odměrné baňce $m[\text{Ca(OH)}_2]$ (g) je dáno:

$$m[\text{Ca(OH)}_2] = n[\text{Ca(OH)}_2] \cdot M[\text{Ca(OH)}_2], \quad (75)$$

kde $M[\text{Ca(OH)}_2]$ je molární hmotnost Ca(OH)_2 (74,09 g/mol).

Obsah Ca(OH)_2 ve vzorku $w[\text{Ca(OH)}_2]$ (%) se pak vypočítá:

$$w[\text{Ca(OH)}_2] = \frac{m[\text{Ca(OH)}_2]}{m(\text{vzorku})} \cdot 100, \quad (76)$$

$m(\text{vzorku})$ je hmotnost vzorku (g).

11.7 Stanovení pucolánové aktivity

Pucolánová aktivita byla stanovena pomocí tzv. Chapellova testu [71], kde výsledek zkoušky vyjadřuje schopnost pucolánu vázat Ca(OH)_2 .

Známa množství pucolánu a oxidu vápenatého jsou ve vodném prostředí 24 hodin společně míchána za teploty 93 °C. Oxid vápenatý reaguje ve vodě na Ca(OH)_2 , který je částečně vázán pucolánem a částečně zůstává v roztoku. Po filtraci je obsah hydroxidu vápenatého ve filtrátu navázán na sacharosu a následně stanoven titrací kyselinou chlorovodíkovou. Rozdíl

mezi hmotností Ca(OH)_2 odpovídající navážce CaO a hmotností Ca(OH)_2 obsaženého ve filtrátu je hmotnost Ca(OH)_2 vázaného pucolánem. Výsledek zkoušky je vyjádřen v jednotkách mg Ca(OH)_2 vázaného na 1 g pucolánu. Pro zvýšení přesnosti se provádí slepý pokus se suspenzí bez pucolánu.

Před zahájením zkoušky byl přichystán roztok sacharosy připravený doplněním 240 g sacharosy (p.a.) do 1 litru vody neobsahující CO_2 (odstraněn varem) a dále byl připraven CaO , a to kalcinací CaCO_3 (p.a.) ve vrstvě max. 5 mm v elektrické peci při $1000\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 1,5 hodiny. Oxid vápenatý chladl v exsikatoru obsahujícím nasycený roztok NaOH (sorberent CO_2).

S přesností na čtyři desetinná místa bylo naváženo 0,344 – 0,352 g CaO a 0,264 – 0,272 g pucolánu. Navážky byly z váženek spláchnuty 64 ml vody neobsahující CO_2 odměřené pipetou do autoklávu a ten byl po vložení míchadla uzavřen. Autokláv byl míchán na magnetické míchačce umístěné v sušárně o teplotě $93\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 24 hodin. Po vyjmutí, ochlazení a otevření autoklávu byl obsah reakční nádoby přelit do 250 ml Erlenmayerovy baňky. Reakční nádoba pak byla do téže baňky vypláchnuta 64 ml výše popsaného roztoku sacharosy odměřené pipetou. Po vložení míchadla a uzavření baňky je reakční směs spolu se sacharosou míchána po dobu 15 minut na magnetické míchačce a následně zfiltrována do suché nádoby. Do 2 titračních baněk bylo následně pipetou odměřeno po 40 ml filtrátu. Po přidání tří kapek fenolftaleinového indikátoru byl vzorek titrován kyselinou chlorovodíkovou do úplného odbarvení.

Jak již bylo zmíněno, výše popsaný postup je aplikován i na slepý pokus, při němž není do reakční nádoby přidán pucolán. Slepý pokus musí být proveden při každé sérii stanovení. Pucolánová aktivita u každého typu pucolánu byla stanovena třikrát a ve výsledcích je pak uvedena průměrná hodnota.

11.7.1 Výpočet pucolánové aktivity

Množství Ca(OH)_2 v mg vázaného jedním gramem pucolánu je vypočítáno dle vzorce:

$$X = 37,047 \cdot c(\text{HCl}) \cdot \frac{V(\text{roztok})}{V(\text{pipet.})} \cdot \frac{V(\text{HCl})^{SI} \cdot \frac{m(\text{CaO})}{m(\text{CaO})^{SI}} - V(\text{HCl})}{m}, \quad (77)$$

kde 37,047 je ekvivalent Ca(OH)_2 , $V(\text{roztok})$ (ml) je celkový objem v Erlenmayerově baňce po vypláchnutí roztokem sacharosy (128 ml), $V(\text{pipet.})$ (ml) odpipetovaný objem zfiltrovaného roztoku k titraci (40 ml), $c(\text{HCl})$ (mol/l) látková koncentrace HCl , $V(\text{HCl})^{SI}$ (ml) objem HCl spotřebovaný při titraci slepého vzorku, $V(\text{HCl})$ (ml) objem HCl spotřebovaný při titraci testovaného vzorku, $m(\text{CaO})^{SI}$ (g) hmotnost CaO naváženého při přípravě slepého vzorku, $m(\text{CaO})$ (g) hmotnost CaO přidaného k testovanému pucolánu a m (g) hmotnost navážky pucolánu.

11.8 Zkoušky lomově-mechanických vlastností

Tělesa o velikosti $40 \times 40 \times 160$ mm byla před zkouškou tříbodovým ohybem ve středu opatřena zářezem do třetiny jejich výšky diamantovou okružní pilou. Pro zatěžování se používal mechanický lis Heckert FPZ 100/1 při rozsahu 1-10 kN. Rozpětí podpor činilo

120 mm. Zatěžování zkušebních těles probíhalo spojitě za konstantního přírůstku deformace 0,05 mm/min. Diagramy zatížení-průhyb byly zaznamenány pomocí ústředny HBM SPIDER 8. Zatěžovací síla byla snímána přes standardní výstup řídicí jednotky lisu a průhyb indukčním snímačem. Zvolená frekvence ukládání měřených dat – 10 Hz.

Po této lomové zkoušce byla dále na jedné polovině každého vzorku zkoušena pevnost v tlaku na zlomcích při rozměrech tlačných čelistí 40×62,5 mm.

Výsledné hodnoty jsou uváděny jako aritmetické průměry ze tří měření.

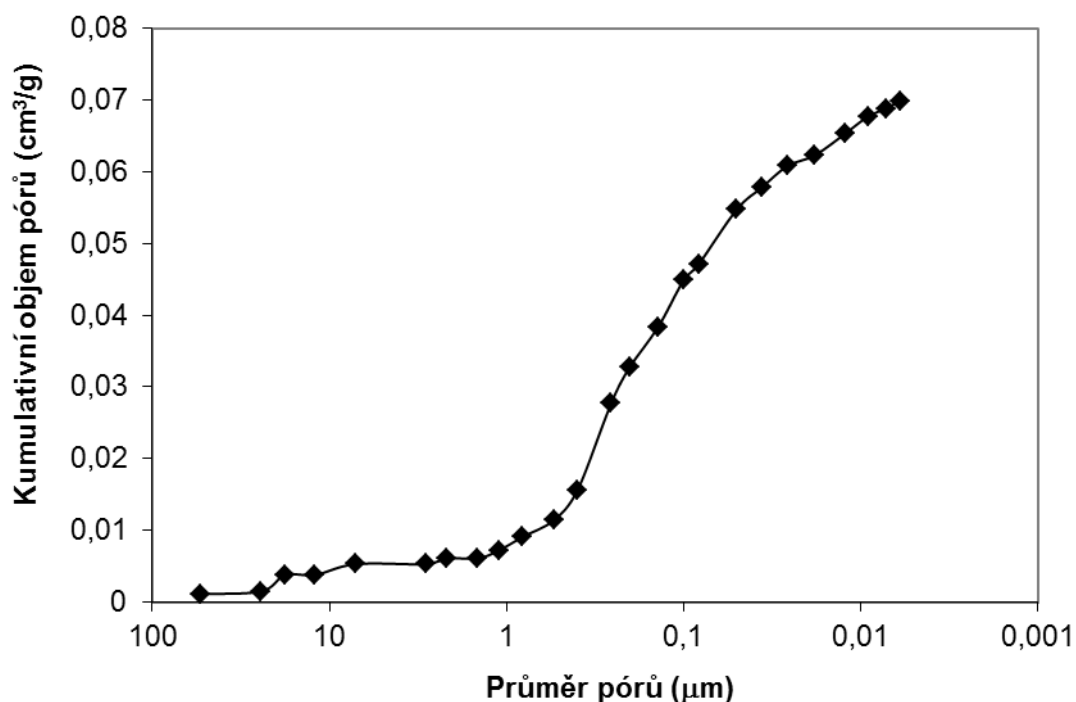
VÝSLEDKY A DISKUSE

12 STUDIUM KARBONATAČNÍHO PROCESU

12.1 Vliv relativní vlhkosti vzduchu na průběh karbonatace

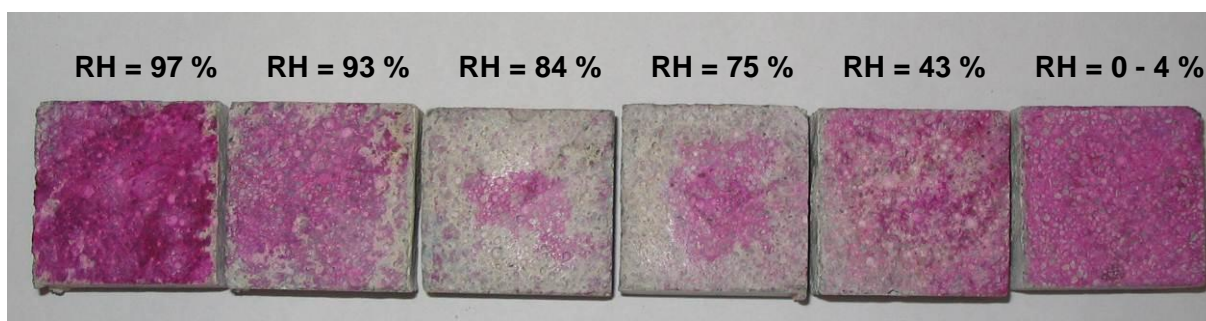
Jak již bylo zmíněno v teoretické části, vliv relativní vlhkosti (RH) na průběh karbonatace je v literatuře rozdílně interpretován. Zatímco Papadakis [37] uvádí maximální rychlost při RH = 50 %, Matoušek [31-32] experimentálně naměřil nejvyšší rychlost karbonatace při RH = 93 %, Roy a kol. [38] při RH = 75 % a Lagerblad [28] uvádí nejvyšší rychlost karbonatace mezi RH = 60 – 80 %. Vliv toho faktoru bylo tedy ještě nutné ověřit.

Příprava zkušebních těles je popsána v kap. 10.1.2, složení použité směsi pak v kap. 10.2.2.1. U zkušebních těles byla před karbonatační zkouškou stanovena objemová hmotnost – 2124 kg/m³, pevnost v tahu ohybem 8,55 MPa a pevnost v tlaku 53,94 MPa. Dále byla studována pórová struktura vysokotlakou rtuťovou porozimetrií – viz obrázek 13. Z obrázku 13 vyplývá, že použitá cementová malta má nejvíce pórů s průměrem menším než 0,40 μm.

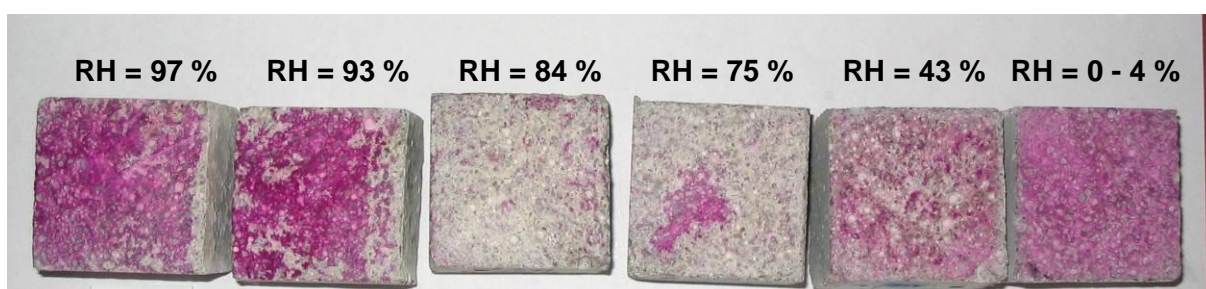


Obr. 13 – Kumulativní objem pórů u vzorku pro studium vlivu RH na průběh karbonatace.

Následná karbonatační zkouška byla provedena v exsikátorech se zvýšeným obsahem CO₂ (viz kap. 11.5). Dosažená hloubka karbonatace byla stanovována po 6 a 9 týdnech uložení v exsikátoru. Stanovení hloubky karbonatace je znázorněno na obrázku 14 a 15. Dosažené hloubky karbonatace jsou shrnuty v tabulce 23, graf závislosti hloubky karbonatace na relativní vlhkosti pak na obrázku 16.



Obr. 14 – Stanovení hloubky karbonatace po 6 týdnech uložení v exsikátoru – vliv RH.

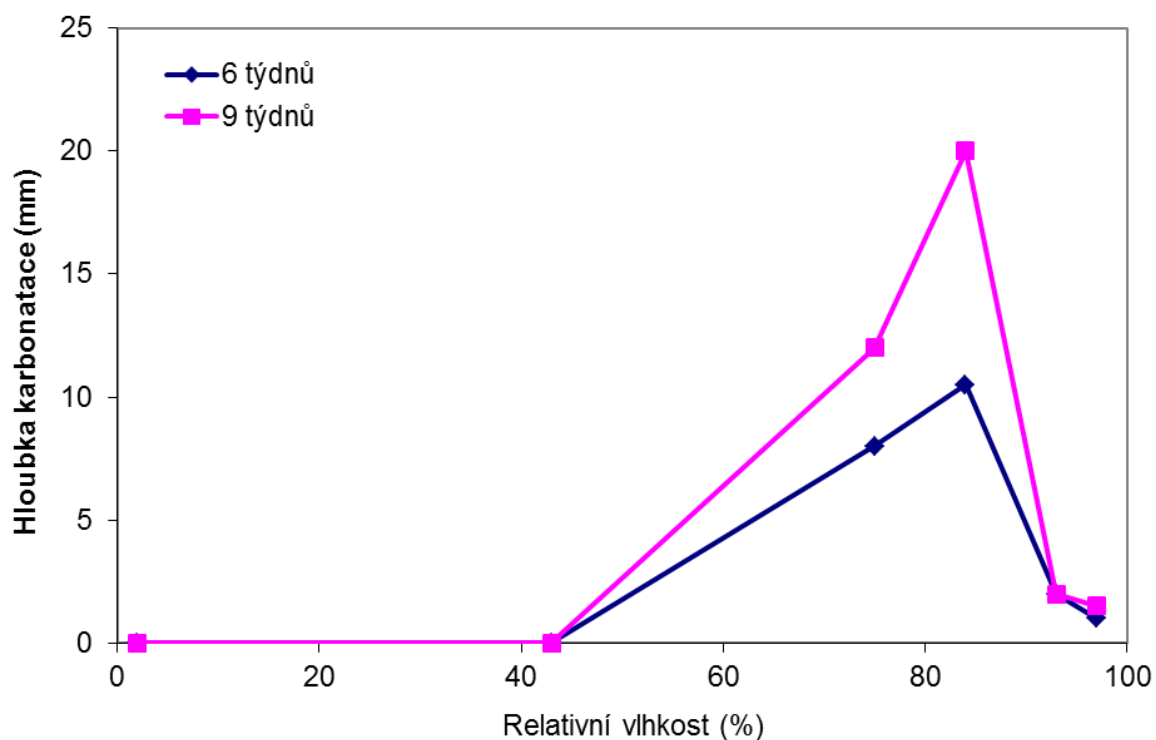


Obr. 15 – Stanovení hloubky karbonatace po 9 týdnech uložení v exsikátoru – vliv RH.

Z uvedených výsledků vyplývá, že karbonatace při nízké relativní vlhkosti ($RH < 43$) a při vlhkosti blízké $RH = 100\%$ vůbec neprobíhá ani po 9 týdnech zrychlené karbonatační zkoušky. Karbonatace naopak probíhá při $RH = 50 - 90\%$. Nejvyšší rychlost byla dosažena při RH kolem 84 %, a proto byla většina karbonatačních zkoušek prováděna při této relativní vlhkosti. Získaná data se blíží spíše výsledkům, které získal Roy a kol. [38] a Lagerblad [28]. Naopak výsledky Papadakise [37] a Matouška [31-32] nebyly potvrzeny.

Tab. 23 – Dosažená hloubka karbonatace pro různé RH.

Relativní vlhkost (%)	Hloubka karbonatace (mm)	
	6 týdnů	9 týdnů
97	1	1 – 2
93	2	2
84	10 – 11	> 20
75	8	12
43	0	0
0 - 4	0	0



Obr. 16 – Závislost hloubky karbonatce na relativní vlhkosti.

12.2 Vliv doby ošetřování na průběh karbonatce

Při modelování průběhu karbonatce bylo zjištěno, že v mnoha modelech není zahrnuta doba ošetřování cementové malty, popř. betonu. Z tohoto důvodu byl vliv tohoto faktoru rovněž prozkoumán.

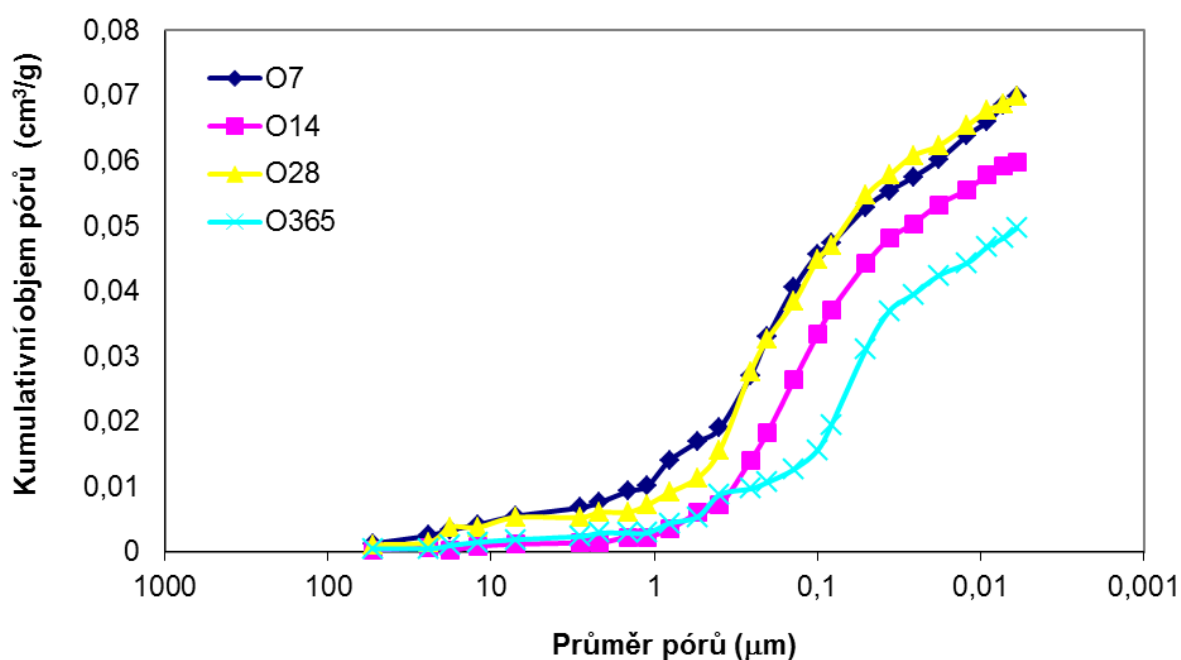
Cílem ošetřování je dosažení co největší pevnosti betonu využitím hydratace cementu a nerušené tvorby struktury. Je nutno omezit nežádoucí tahová a tlaková napětí ve struktuře betonu, která mohou vznikat při špatném ošetřování betonu.

Tab. 24 – Objemová hmotnost, R_f a R_c pro vzorky s různou dobou ošetřování.

Označení	Doba ošetřování (dny)	Objemová hmotnost (kg/m^3)	R_f (MPa)	R_c (MPa)
O365	365	2207	8.11	63.65
O28	28	2124	8.55	53.94
O14	14	2105	8.68	52.98
O7	7	2124	9.56	50.65

Příprava zkušebních těles je popsána v kap. 10.1.2, složení použité směsi a označení vzorků pak v kap. 10.2.2.2. U zkušebních těles byla před karbonatační zkouškou stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu ohybem (R_f) a pevnost v tlaku (R_c). Výsledky jsou shrnuty v tabulce 24 a vyplývá z nich, že objemová hmotnost je dle předpokladu nejvyšší pro vzorky ošetřované 1 rok, v ostatních případech se hodnota objemové hmotnosti již výrazně neliší. Pevnost v tahu ohybem pak s rostoucí dobou ošetřování klesá, pevnost v tlaku pak naopak dle předpokladu roste, jelikož s rostoucí dobou ošetřování dochází k lepší hydrataci cementu a nerušené tvorbě struktury cementového tmelu. Kratší ošetřování pak vede k nedostatečné hydrataci cementu na povrchu betonu, který se vysušuje, což vede ke snížení pevnosti betonu.

U uvedených vzorků byla rovněž zkoumána pórová struktura – viz obr. 17. Nejmenší celkový objem pórů má vzorek, který byl uložen 1 rok ve vodě. Výrazně nižší objem pórů má v oblasti průměru pórů $< 0.5 \mu\text{m}$. Největší celkový objem pórů mají vzorky, které byly uloženy 7 a 28 dní ve vodě. Tyto vzorky mají rovněž vyšší objem pórů v celém rozsahu jejich průměrů. Předpokladem bylo, že celkový objem pórů bude klesat s rostoucí dobou ošetřování. Od tohoto předpokladu vybočuje pouze průběh závislosti kumulativního objemu pórů na průměru pórů u vzorku O28, který je téměř shodný s průběhem u vzorku O7.

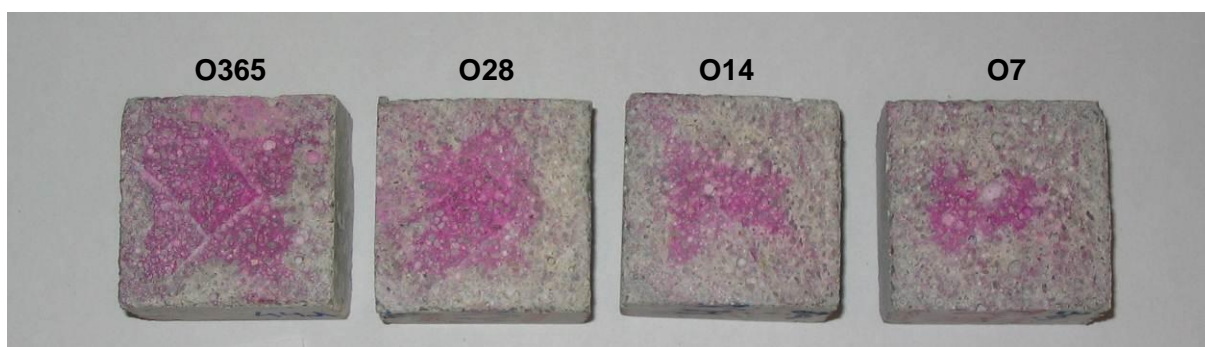


Obr. 17 – Kumulativní objem pórů u vzorků pro studium vlivu doby ošetřování na průběh karbonatace.

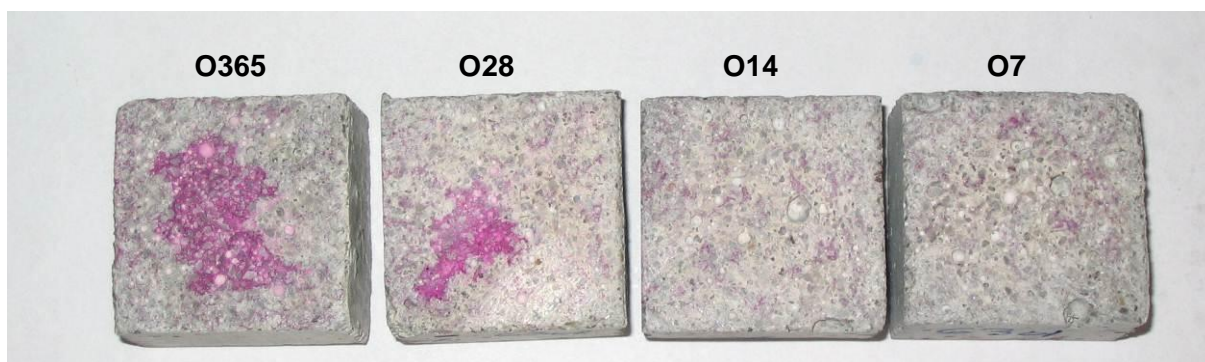
Následná karbonatační zkouška byla provedena v exsikátorech se zvýšeným obsahem CO_2 za přítomnosti nasyceného roztoku NaCl (viz kap. 11.5). Dosažená hloubka karbonatace byla stanovována po 6 a 9 týdnech uložení v exsikátoru. Stanovení hloubky karbonatace je znázorněno na obrázku 18 a 19. Dosažené hloubky karbonatace jsou shrnuty v tabulce 25.

Tab. 25 – Hloubka karbonatace pro vzorky s různou dobou ošetřování.

Označení	Doba ošetřování (dny)	Hloubka karbonatace (mm)	
		6 týdnů	9 týdnů
O365	365	7	9
O28	28	8	12
O14	14	11	> 20
O7	7	12	> 20



Obr. 18 – Stanovení hloubky karbonatace po 6 týdnech uložení v exsikátoru – vliv doby ošetřování.



Obr. 19 – Stanovení hloubky karbonatace po 9 týdnech uložení v exsikátoru – vliv doby ošetřování.

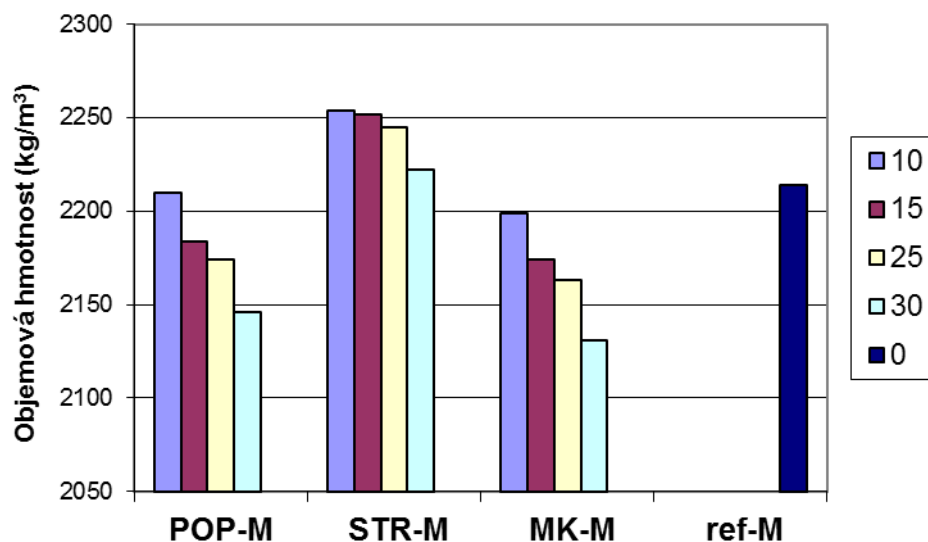
Ze získaných výsledků je patrné, že s rostoucí dobou ošetřování klesá hloubka karbonatace, což je v souladu s předpokladem. Postup karbonatace je totiž velmi ovlivněn pórovou strukturou použité cementové malty. Nejmenší objem pórů byl stanoven u vzorku O365, z čehož vyplývá, že propustnost cementové malty pro CO₂ je u tohoto vzorku nejnižší, a tudíž i stanovená hloubka karbonatace je u tohoto vzorku nejnižší (karbonatace probíhá nejpomaleji). U ostatních vzorků zjištěná hloubka karbonatace pak odpovídá výše zmíněnému předpokladu, že celkový objem pórů klesá s rostoucí dobou ošetřování. Rozdíl mezi zjištěnou hloubkou karbonatace u vzorku O365 a O28 není výrazný, proto můžeme usoudit, že obvyklá doba ošetřování (28 dní) je pro odolnost proti karbonataci dostačující. Kratší doby ošetřování pak sice vedou k vyšším hodnotám hloubky karbonatace, ovšem rozdíly nejsou tak významné, že by tento faktor musel být v každém případě zahrnut do

modelu popisujícího průběh karbonatace. Kratší doba ošetřování vede ke vzniku smršťovacích trhlinek a vznikají deformace, které snižují trvanlivost betonu.

12.3 Vliv typu a množství příměsi na průběh karbonatace

Dalším faktorem, který ovlivňuje průběh karbonatace je typ a množství zvolené příměsi. Pro studium byly použity následující příměsi - popílek, vysokopecní struska a metakaolin (viz kap. 9.2). Směsi byly připraveny se stoupajícím množstvím příměsi - 10, 15, 25 a 30 % ze součtu hmotností cementu a příměsi. Příprava zkušebních těles je popsána v kap. 10.1.2, složení použitých směsí a označení vzorků pak v kap. 10.2.2.3.

U zkušebních těles byla před karbonatační zkouškou stanovena objemová hmotnost, R_f a R_c . Výsledky jsou shrnuty na obrázcích 20 – 22.

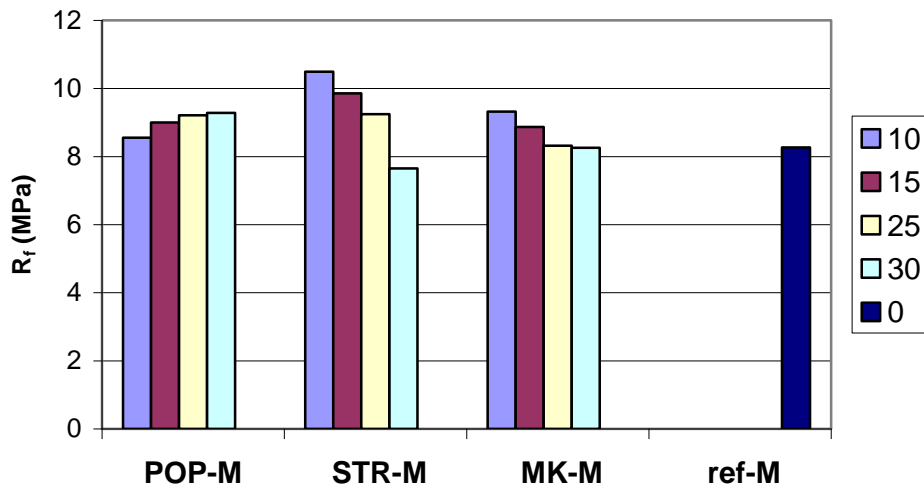


Obr. 20 – Stanovení objemové hmotnosti.

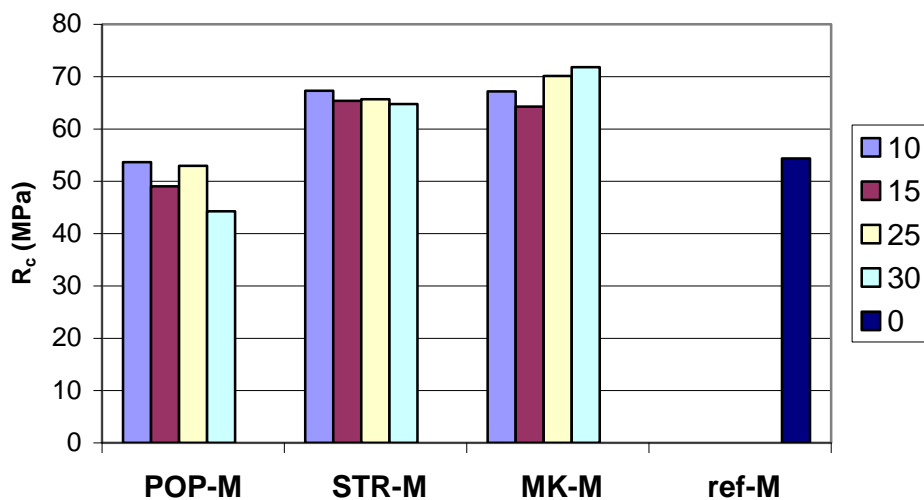
Z obrázku 20 vyplývá, že se zvyšujícím se obsahem příměsi dochází k postupnému snižování objemové hmotnosti, přičemž cementové malty s přídavkem metakaolinu (MK-M) dosahují nejnižších hodnot a cementové malty s přídavkem strusky (STR-M) nejvyšších hodnot objemové hmotnosti. Vzorky obsahující jako příměs popílek (POP-M) a metakaolin dosahují nižších hodnot objemové hmotnosti než referenční vzorky bez přídavku příměsi (ref-M), naopak vzorky s obsahem strusky mají hodnoty objemové hmotnosti vyšší pro všechna množství příměsi.

V případě stanovení pevnosti v tahu ohybem (obr. 21) dochází u strusky a metakaolinu k postupnému snižování pevnosti s rostoucím množstvím příměsi, zatímco u popílku k postupnému zvyšování pevnosti s rostoucím množstvím příměsi. Hodnoty pevnosti v tahu ohybem jsou u všech vzorků podobné, nejvyšší hodnoty je dosaženo u vzorku s obsahem 10 % strusky (STR10-M), nejnižší hodnoty pak u vzorku s obsahem 30 % strusky

(STR30-M). Vzorky STR30-M a MK30-M mají nižší hodnoty pevnosti ve srovnání s referenční cementovou maltou (ref-M), ostatní malty dosahují vyšších hodnot.

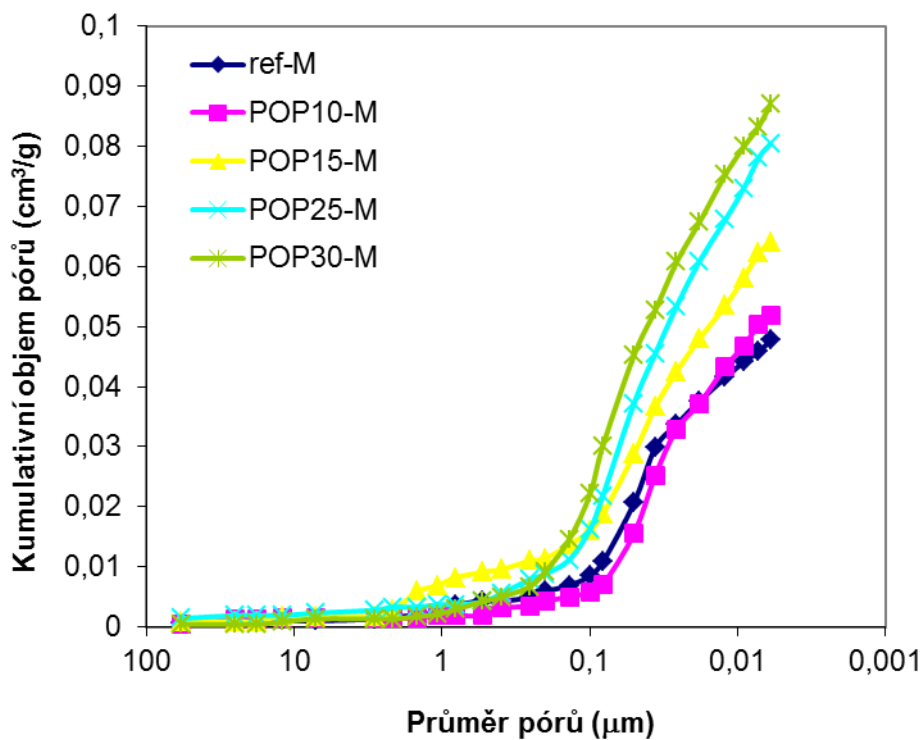


Obr. 21 – Stanovení pevnosti v tahu ohybem.

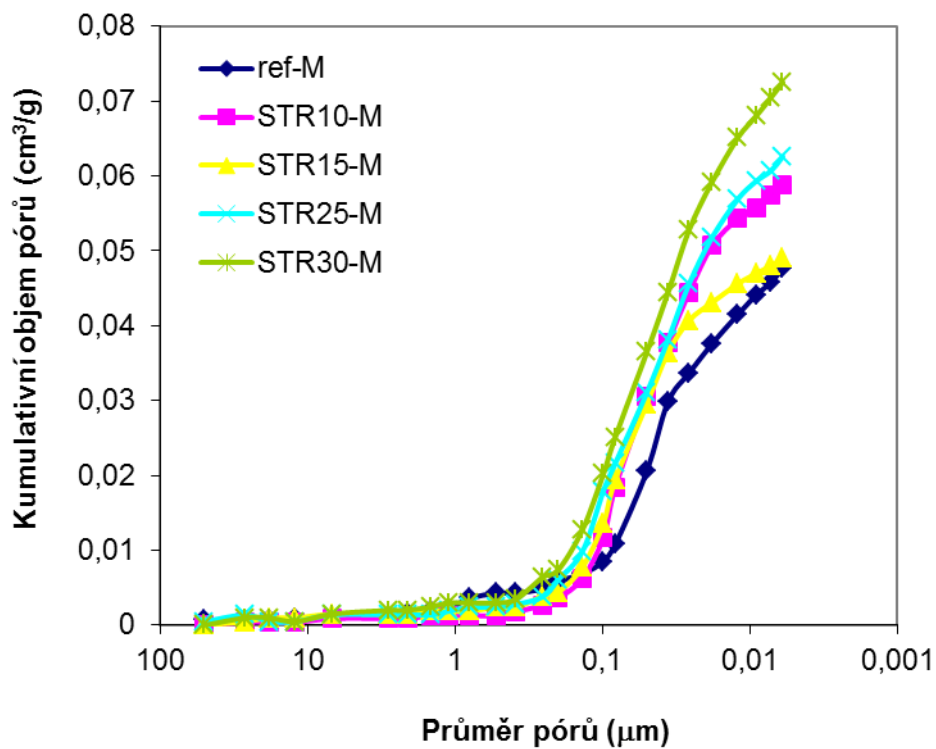


Obr. 22 – Stanovení pevnosti v tlaku.

V případě stanovení pevnosti v tlaku dochází u popílku a strusky k postupnému snižování pevnosti s rostoucím množstvím příměsi, zatímco u metakaolinu k postupnému zvyšování pevnosti s rostoucím množstvím příměsi. Nejvyšších hodnot je dosaženo v případě použití metakaolinu jako příměsi, nejnižších pak v případě popílku. Při srovnání s referenční cementovou maltou dosahují vyšších hodnot vzorky obsahující metakaolin a strusku, cementové malty obsahující popílek pak mají hodnotu pevnosti v tlaku nižší.



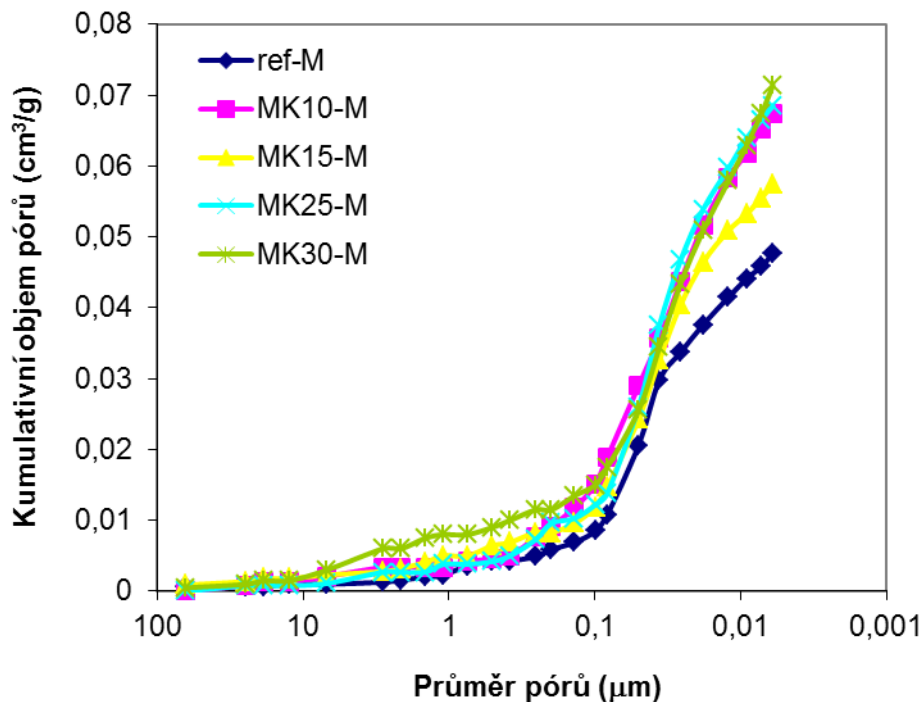
Obr. 23 – Kumulativní objem pórů u vzorků s obsahem popílku.



Obr. 24 – Kumulativní objem pórů u vzorků s obsahem strusky.

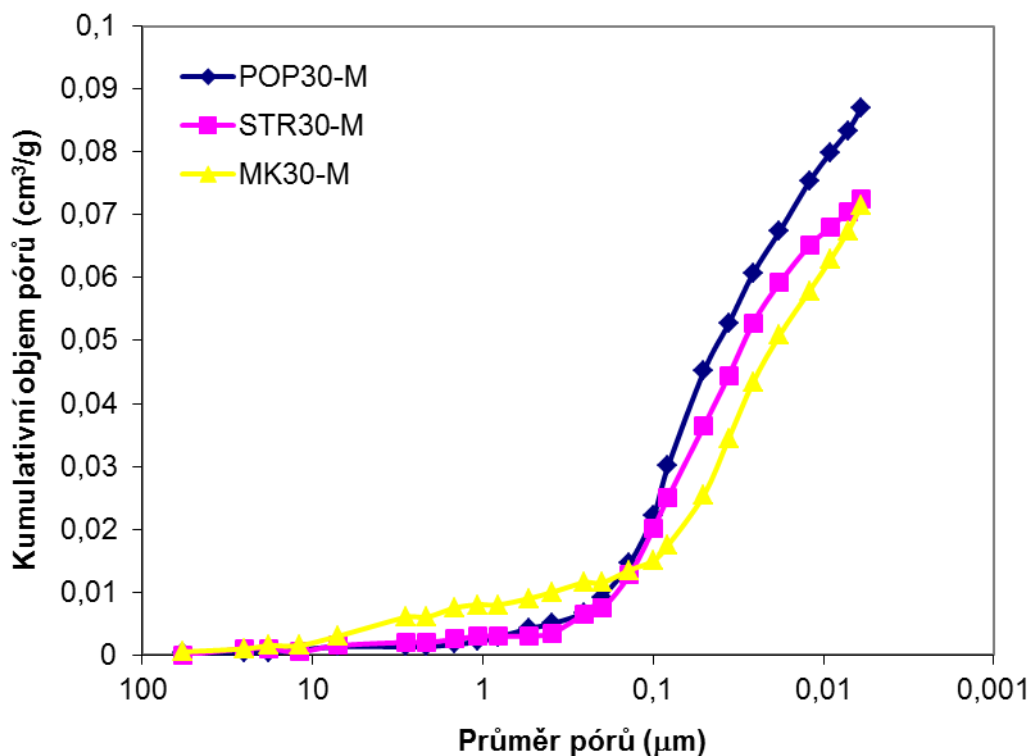
Dále byla u jednotlivých cementových malt studována pórová struktura vysokotlakou rtuťovou porozimetrií – viz obr. 23 – 26. Na obrázku 23 je znázorněna závislost kumulativního objemu pórů na průměru pórů pro cementové malty s obsahem popílku. Z obrázku je patrné, že celkový objem pórů se zvyšuje s rostoucím množstvím popílku ve vzorku. Nejmenší celkový objem pórů má tedy vzorek referenční malty bez přídavku popílku a největší celkový objem pórů pak vzorek s obsahem 30 % popílku. Výrazně odlišný objem pórů mají vzorky v oblasti průměru pórů $< 0,1 \mu\text{m}$. V oblasti průměru pórů mezi $1,5$ a $0,2 \mu\text{m}$ má pak mírně vyšší kumulativní objem pórů vzorek s obsahem 15 % popílku.

Na obrázku 24 je znázorněna závislost kumulativního objemu pórů na průměru pórů pro cementové malty s obsahem strusky a na obrázku 25 pak pro cementové malty s obsahem metakaolinu. V obou případech je celkový objem pórů nejnižší u referenční malty bez přídavku příměsi stejně jako u popílku. U vzorků s obsahem metakaolinu je pak celkový objem pórů u referenční malty výrazně nižší než u ostatních vzorků s metakaolinem. Nejnižší celkový objem pórů ze vzorků s obsahem strusky, popř. metakaolinu mají pak vzorky s 15 % dané příměsi, následují vzorky s obsahem 10, 25 a 30 % příměsi.



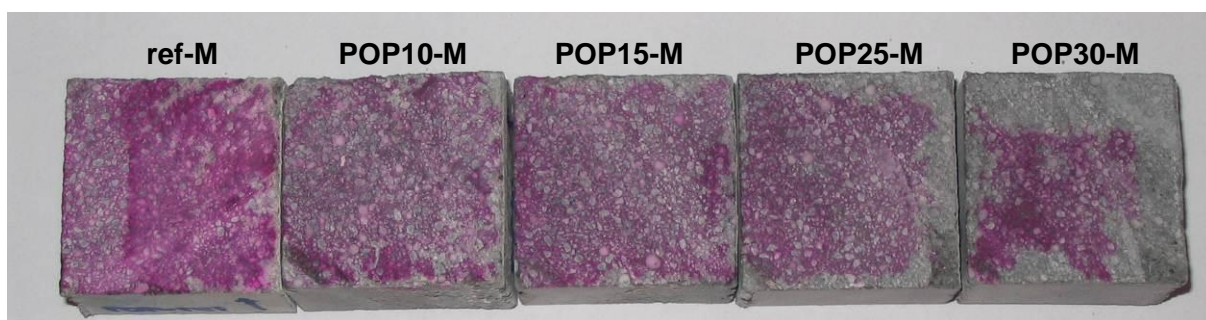
Obr. 25 – Kumulativní objem pórů u vzorků s obsahem metakaolinu.

Na obrázku 26 je pak znázorněno srovnání závislostí kumulativního objemu pórů na průměru pórů pro vzorky s obsahem 30 % všech tří příměsí. Nejvyšší celkový objem pórů má vzorek s obsahem popílku, nejnižší pak vzorek s obsahem metakaolinu. Celkový objem pórů u metakaolinu je však velmi podobný celkovému objemu pórů u strusky. V oblasti průměru pórů mezi 7 a $0,15 \mu\text{m}$ má pak mírně vyšší kumulativní objem pórů vzorek s obsahem 30 % metakaolinu.

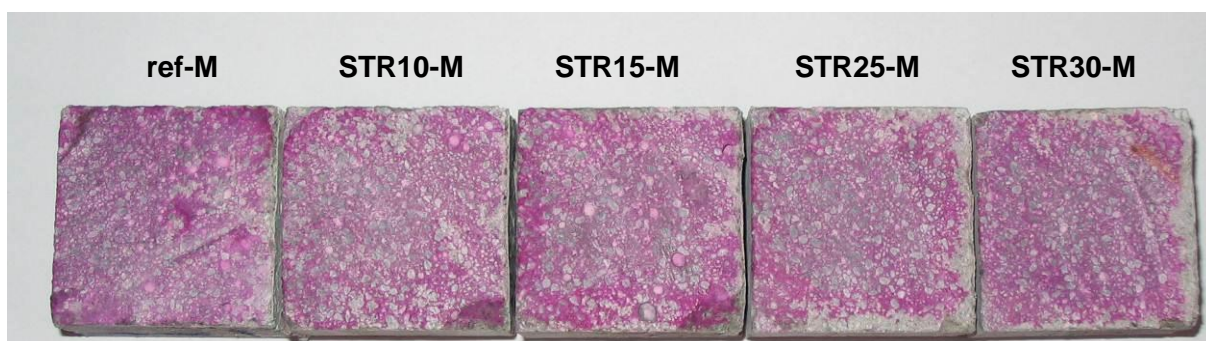


Obr. 26 – Kumulativní objem pórů u vzorků s obsahem 30 % popílku (POP30-M), strusky (STR30-M) a metakaolinu (MK30-M).

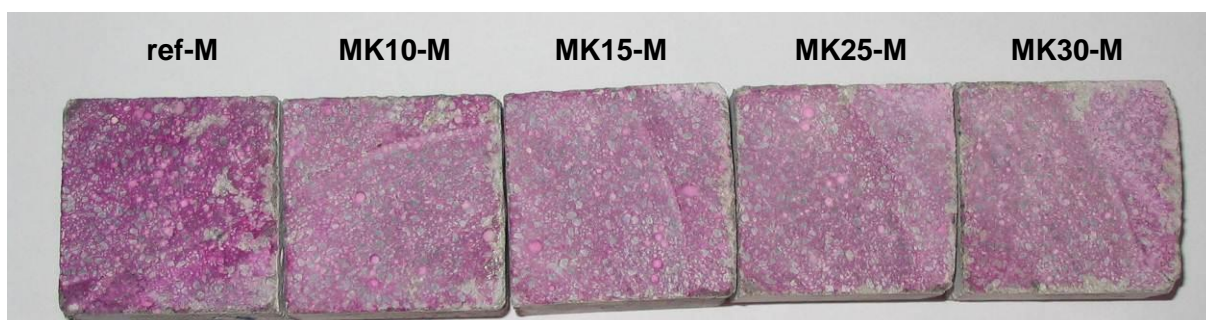
Následná karbonatační zkouška byla provedena v exsikátorech se zvýšeným obsahem CO_2 za přítomnosti nasyceného roztoku KCl (viz kap. 11.5). Dosažená hloubka karbonatce byla stanovována po 2, 4, 8 a 12 týdnech uložení v exsikátoru. Stanovení hloubky karbonatce po 12 týdnech uložení v exsikátoru je znázorněno na obrázcích 27 - 29. Dosažené hloubky karbonatce jsou shrnuty v tabulce 26.



Obr. 27 – Stanovení hloubky karbonatce po 12 týdnech uložení v exsikátoru – vzorky s obsahem popílku.



Obr. 28 – Stanovení hloubky karbonatace po 12 týdnech uložení v exsikátoru – vzorky s obsahem strusky.



Obr. 29 – Stanovení hloubky karbonatace po 12 týdnech uložení v exsikátoru – vzorky s obsahem metakaolinu.

Tab. 26 – Hloubka karbonatace pro vzorky s různým typem a množstvím příměsi.

Typ příměsi	Označení	Hloubka karbonatace (mm)			
		2 týdny	4 týdny	8 týdnů	12 týdnů
-	ref-M	0	0 – 1	0 – 1	0 – 1
Popílek	POP10-M	0	0	1 – 2	1 – 2
	POP15-M	0	0 – 1	2	2
	POP25-M	1 – 2	2	3	3 – 4
	POP30-M	3 – 4	4 – 5	6 – 7	7 – 8
Struska	STR10-M	0	0	0	0 – 1
	STR15-M	0	0 – 1	1	1 – 2
	STR25-M	0 – 1	1	1 – 2	1 – 2
	STR30-M	1	1 – 2	2	2
Metakaolin	MK10-M	0	0	0	0
	MK15-M	0	0	0	0
	MK25-M	0	0 – 1	0 – 1	0 – 1
	MK30-M	0	1	1	1

Ze získaných výsledků je patrné, že u všech příměsí dochází s jejím rostoucím množstvím k rychlejšímu postupu karbonatace, tj. k vyšším hodnotám hloubky karbonatace. To je u popílku v souladu s výsledky studia pórové struktury (viz obr. 23) a opět to potvrzuje skutečnost, že postup karbonatace je velmi ovlivněn pórovou strukturou použité cementové malty. Nejnižší celkový objem pórů byl stanoven u vzorku s obsahem 10 % popílku (POP10), z čehož vyplývá, že propustnost cementové malty pro CO_2 je u tohoto vzorku nejnižší, a tudíž i stanovená hloubka karbonatace je u tohoto vzorku nejnižší (karbonatace probíhá nejpomaleji). Naopak u vzorku s obsahem 30 % popílku (POP30) byl stanoven nejvyšší celkový objem pórů a karbonatace zde probíhá nejrychleji. Vyšší porozita malt s vyšším obsahem příměsí je dána vyšším množstvím záměsové vody, kdy nebyl brán ohled na reaktivní příměsí, a tedy na korekci vodního součinitele.

U cementových malt s rostoucím obsahem příměsí dochází k rychlejšímu postupu karbonatace rovněž z důvodu nižšího obsahu OH^- iontů. Použité příměsí jsou pucolánově aktivní látky, které v přítomnosti vody reagují s hydroxidem vápenatým za vzniku produktů s pojivými vlastnostmi. Zvýšení množství příměsí tedy vede k vyšší spotřebě hydroxidu vápenatého, vzniklého při hydrataci cementu. To se projeví rychlejším snížením koncentrace hydroxidových iontů, což bylo identifikováno fenolftaleinovou zkouškou a dokumentováno na obrázcích 27 -29.

Rovněž vzájemné srovnání průběhu karbonatace v přítomnosti různých příměsí je v souladu s výsledky studia pórové struktury daných vzorků. Nejvyšší celkový objem pórů má vzorek s obsahem popílku. Celkový objem pórů u malt s metakaolinem je nejnižší, ale velmi podobný celkovému objemu pórů u malt se struskou (viz obr. 26). Podobné výsledky byly dosaženy u naměřených hloubek karbonatace (viz tab. 26). Získané výsledky jsou však překvapivé z toho důvodu, že z použitých příměsí má metakaolin nejvyšší pucolánovou aktivitu, tzn. má nejvyšší spotřebu hydroxidu vápenatého na 1 g příměsí (viz kap. 12.6). Rovněž množství zbytkového hydroxidu vápenatého je v přítomnosti metakaolinu nejnižší (viz kap. 12.5), což by se tedy mělo projevit rychlejším snížením koncentrace hydroxidových iontů. Důvod, proč malty s příměsí metakaolinu karbonatují nejpomaleji, je ve velikosti jeho zrn ($5 \mu\text{m}$), která zcela zreagují a vzniklé produkty zaplní možné kapilární póry ve struktuře cementového tmelu. Propustnost cementové malty pro CO_2 je pak u tohoto vzorku nízká a karbonatace neprobíhá.

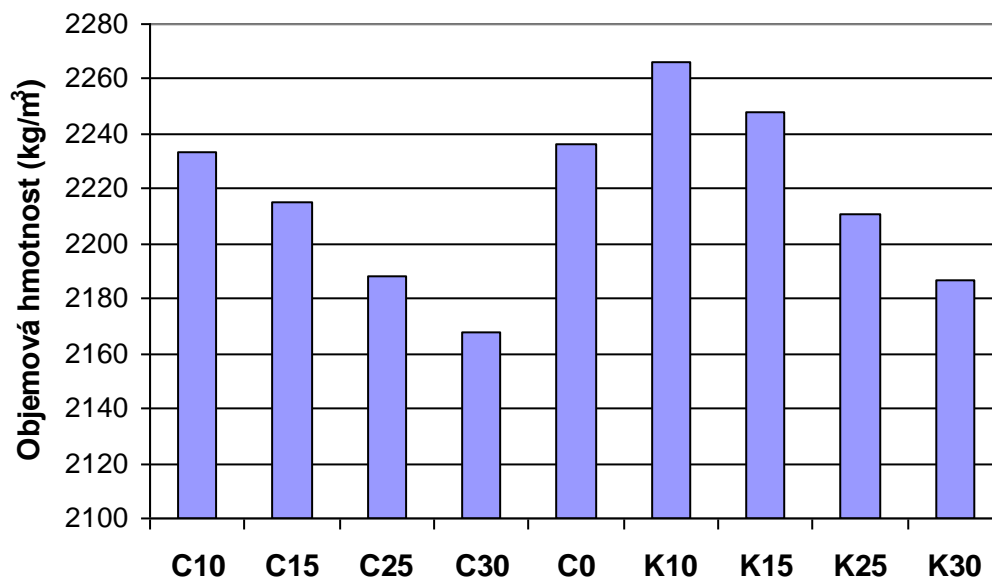
12.4 Vliv náhrady portlandského cementu, popř. kameniva popílkem na průběh karbonatace

V této kapitole je posuzován vliv částečné náhrady portlandského cementu, popř. jemných podílů kameniva popílkem na odolnost cementové malty proti karbonataci. Popílek byl zvolen z uvedených příměsí, protože karbonatace v jeho přítomnosti probíhala nejrychleji.

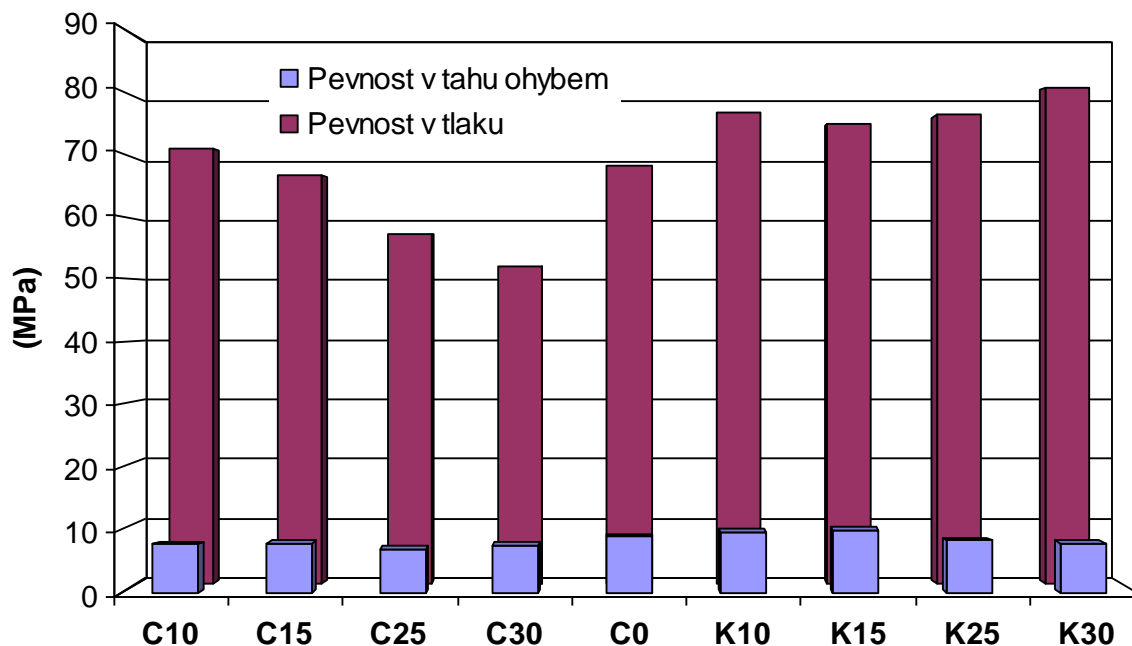
Ve směsích pro výrobu cementové malty bylo popílkem nahrazeno postupně 10, 15, 25 a 30 % hmotnosti cementu při zachování hmotnosti kameniva (malty označené C) a stejným množstvím pak rovněž kamenivo při zachování hmotnosti cementu (malty označené K). Příprava zkušebních těles je popsána v kap. 10.1.2, složení použitých směsí a označení vzorků pak v kap. 10.2.2.4.

U zkušebních těles byla před karbonatační zkouškou stanovena objemová hmotnost, R_f a R_c . Výsledky jsou shrnuty na obrázcích 30 – 31.

Z obrázku 30 vyplývá, že se zvyšujícím se obsahem popílku dochází k postupnému snižování objemové hmotnosti u obou sad vzorků. V případě nahrazení cementu popílkem (sada C) jsou stanovené objemové hmotnosti nižší ve srovnání se vzorky, kde bylo popílkem nahrazeno kamenivo (sada K). Ve srovnání s referenční cementovou maltou (C0) bylo dosaženo vyšších hodnot objemové hmotnosti pouze v případě vzorků K10 a K15, ostatní vzorky měly hodnotu objemové hmotnosti nižší.

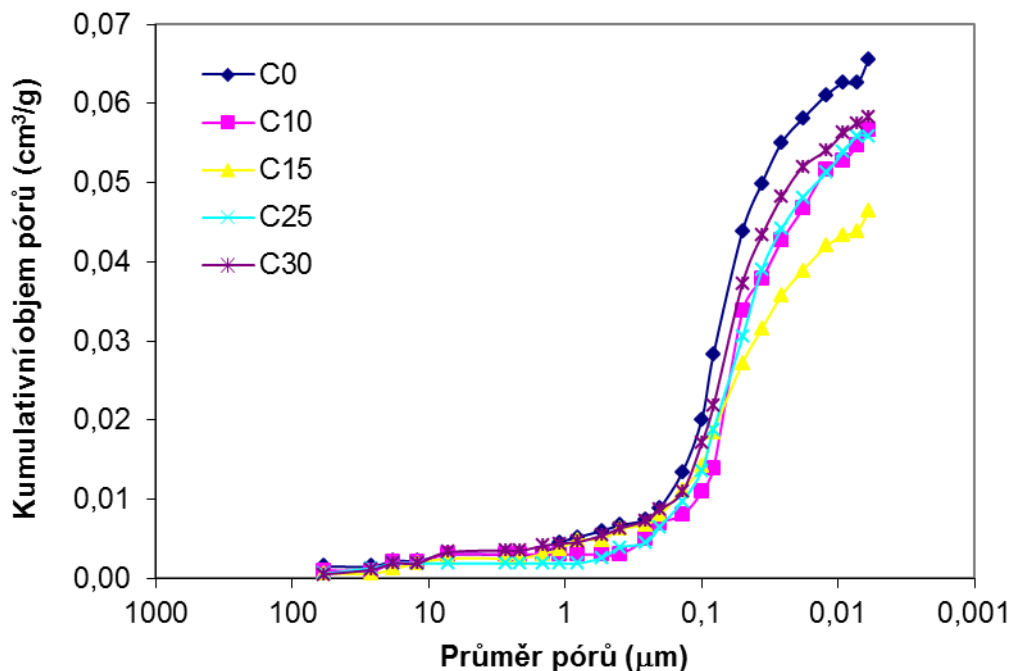


Obr. 30 – Stanovení objemové hmotnosti.

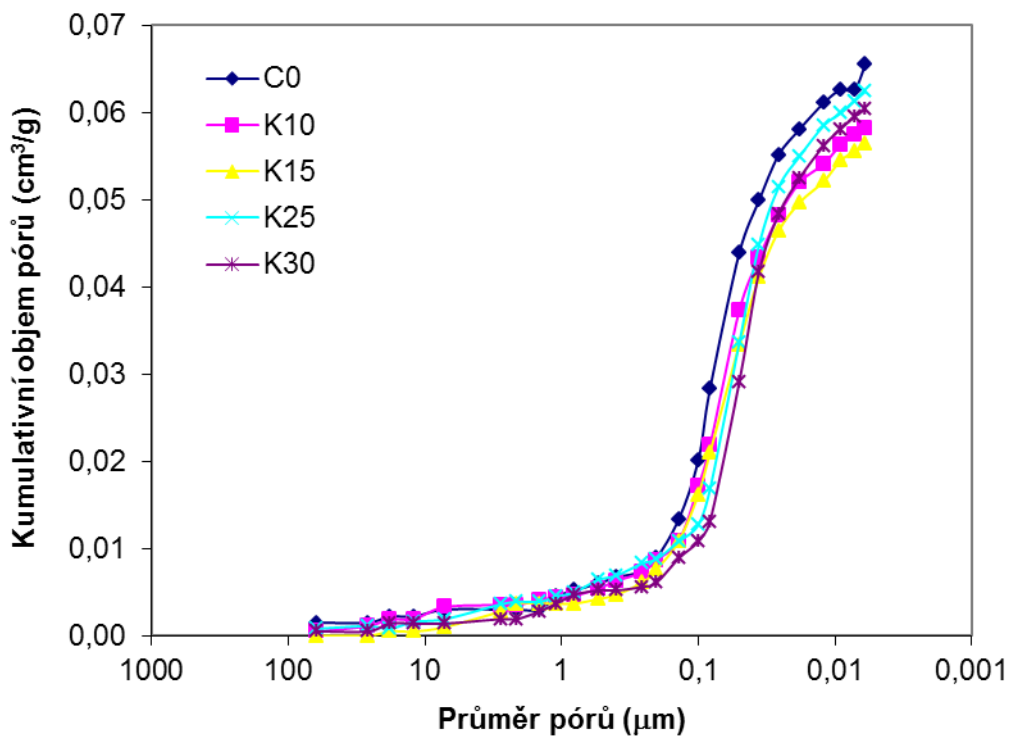


Obr. 31 – Stanovení pevnosti v tahu ohybem a tlaku.

Výsledky stanovení pevností v tahu ohybem a tlaku zkušebních těles po 28 dnech zrání jsou znázorněny na obrázku 31 a porovnány s pevnostmi referenčních vzorků bez přídavku popílku. V případě nahrazení cementu popílkem (sada C) dochází ke snížení pevností, zatímco v případě nahrazení kameniva popílkem (sada K) k mírnému zvýšení pevností ve srovnání s pevnostmi referenční malty (C0).



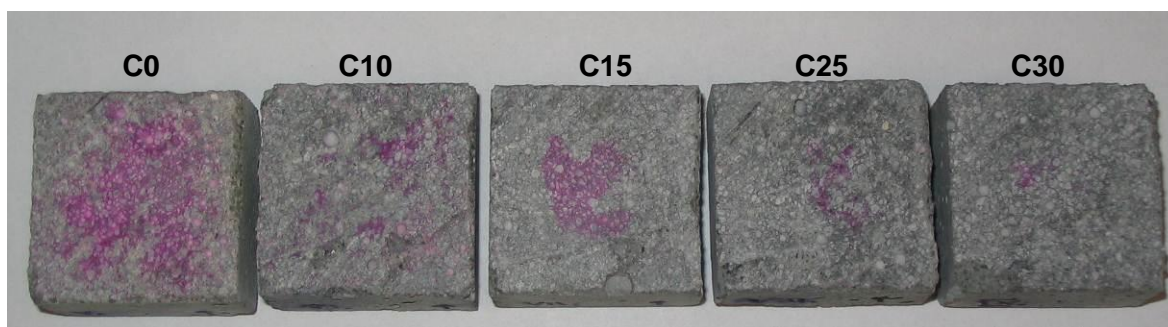
Obr. 32 – Kumulativní objem pórů (náhrada cementu popílkem).



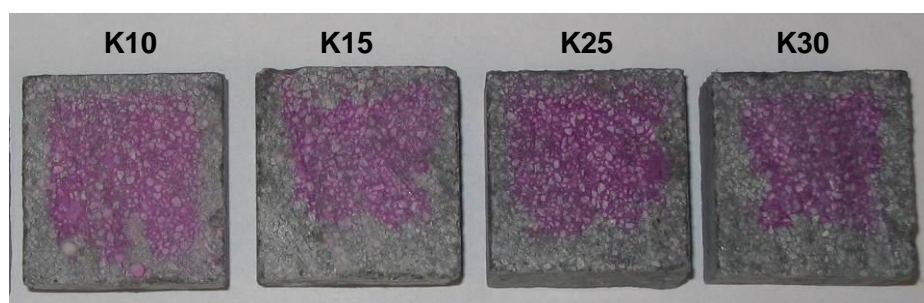
Obr. 33 – Kumulativní objem pórů (náhrada kameniva popílkem).

Jak vyplývá z obrázku 32 a 33, všechny malty mají pórovou strukturu s podobným rozložením velikostí i množství průměru pórů a liší se především v případě sady C celkovým objemem pórů. Největší celkový objem pórů má v obou případech referenční cementová malta, která má i vyšší objem pórů s průměrem $> 0,1 \mu\text{m}$. Nejmenší celkový objem je pak u malt C15, resp. K15, přičemž referenční malta (C0) má asi 1,4násobný objem pórů ve srovnání s maltou C15 a 1,2násobný ve srovnání s maltou K15. Z uvedeného vyplývá, že popílek slouží v těchto případech jako mikroplnivo a v obou případech má přibližně stejný vliv na snížení porozity oproti referenčnímu vzorku.

Následná karbonatační zkouška byla provedena v exsikátorech se zvýšeným obsahem CO_2 za přítomnosti nasyceného roztoku KCl (viz kap. 11.5). Dosažená hloubka karbonatace byla stanovována po 2, 3, 7, 10 a 15 týdnech uložení v exsikátoru. Stanovení hloubky karbonatace po 15 týdnech uložení v exsikátoru je znázorněno na obrázcích 34 a 35. Dosažené hloubky karbonatace jsou shrnuty v tabulce 27.



Obr. 34 – Stanovení hloubky karbonatace po 15 týdnech uložení v exsikátoru – náhrada cementu popílkem.



Obr. 35 – Stanovení hloubky karbonatace po 15 týdnech uložení v exsikátoru – náhrada kameniva popílkem.

Z výsledků zrychlené karbonatace je zřejmé, že v případě sady C dochází k rychlejšímu průběhu karbonatace u malt s popílkem ve srovnání s referenční maltou. K rychlejšímu průběhu karbonatace dochází zejména zpočátku, kdy je hloubka karbonatace u malt C25 a C30 až 4-5násobná ve srovnání s C0, zatímco po 15 týdnech 2-3 násobná. Snížení množství cementu vede ke vzniku menšího množství hydroxidu vápenatého během hydratace cementu a současné zvýšení množství popílku pak k jeho vyšší spotřebě [47]. To se projeví rychlejším snížením koncentrace hydroxidových iontů, což je identifikováno roztokem fenolftaleinu a dokumentováno na obrázku 34.

Ve vzorcích malt sady K je relativně vyšší procento cementu ve vztahu k množství popílku, což se projeví vyšší koncentrací hydroxidových iontů v pórovém roztoku, které jsou

k dispozici k reakci s CO_2 . Ve stejnou dobu bylo identifikováno $\text{pH} > 9$ na větší ploše řezu, tedy čelo karbonatice bylo v menší hloubce, než u vzorků sady C. Snížení množství hydroxidu vápenatého v důsledku pucolánové aktivity popílku není pravděpodobně tak výrazné a převládá pozitivní vliv snížení porozity těchto cementových malt a zvýšení pevností.

Z výsledků měření hloubky karbonatice tedy vyplývá, že obsah hydroxidu vápenatého, odpovídající množství použitého cementu v maltě, má rozhodující vliv na postup čela karbonatice.

Tab. 27 – Hloubka karbonatice pro vzorky s náhradou cementu, popř. kameniva popílkem.

Malta	Hloubka karbonatice [mm]				
	2 týdny	3 týdny	7 týdnů	10 týdnů	15 týdnů
referenční C0	1-2	3	4	5	7-8
C10	5	5-6	5	6	9
C15	6	5-6	6	6-7	11
C25	8	7-8	7-8	9-10	15
C30	9-10	11-12	10-11	12-13	17-18
K10	0	0	1	2	5-6
K15	0	1-2	2	3	7
K25	0	2	2-3	4	6
K30	2-3	3-4	3-4	5-6	8

12.5 Stanovení obsahu zbytkového $\text{Ca}(\text{OH})_2$

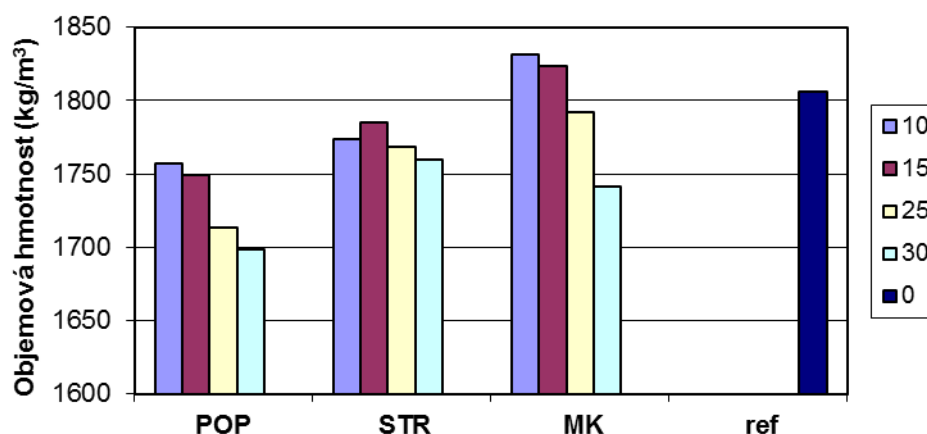
Obsah hydroxidu vápenatého v cementovém tmelu v betonu je důležitý pro stabilitu ochranné oxidické vrstvy na ocelové výztuži. Každá z použitých pucolánově nebo hydraulicky reagujících látek má jinou reakční aktivitu a spotřebuje pro dané množství příměsi jiné množství hydroxidu. Stanovení volného hydroxidu vápenatého umožňuje určit reaktivitu alternativní silikátové příměsi. Tato kapitola je věnována stanovení zbytkového obsahu hydroxidu vápenatého v cementových pastách s příměsmi. Množství hydroxidu vápenatého je ovlivněno druhem a množstvím použitých příměsí (popílek, vysokopeční struska a metakaolin - viz kap. 9.2) a bylo stanoveno ve výluhu cementové pasty sacharátovou metodou (viz kap. 10.7) po vyjmutí vzorků z vody a následně po 14, 28 a 56 dnech uložení na vzduchu bez přístupu CO_2 .

Směsi byly připraveny se stoupajícím množstvím příměsi - 10, 15, 25 a 30 % ze součtu hmotností cementu a příměsi. Příprava zkušebních těles je popsána v kap. 10.1.1, složení použitých směsí a označení vzorků pak v kap. 10.2.1.1. U cementových past byla před naplněním do forem stanovena konzistence plastické směsi (viz kap. 11.3). Výsledky stanovení jsou shrnuty v tabulce 28. U zatvrdlých zkušebních těles byla po vyjmutí z vody určena objemová hmotnost, R_f a R_c . Výsledky jsou shrnuty na obrázcích 36 – 38.

Tab. 28 – Stanovení konzistence cementových past

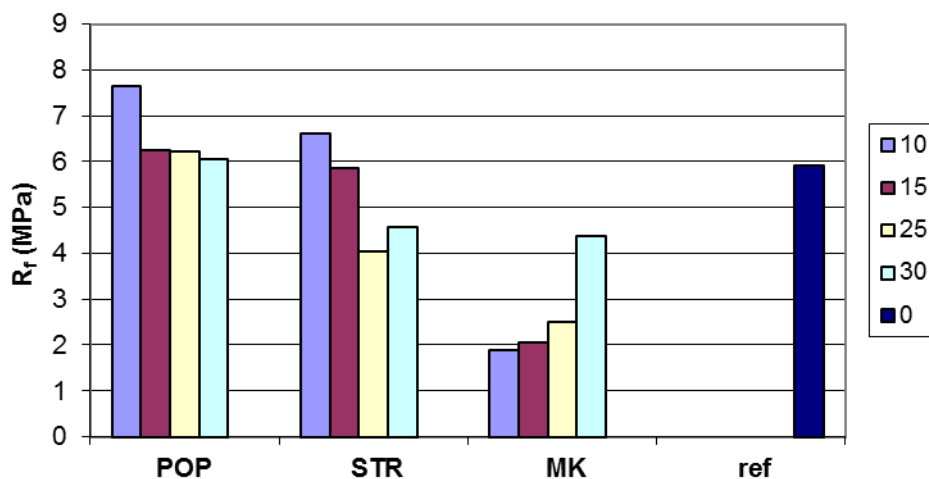
Cementová pasta	Rozliv (mm)
Referenční	55
POP	60 - 75
STR	75 - 85
MK	43 -50

Výsledky stanovení objemové hmotnosti jsou shrnuty na obrázku 36. Z obrázku vyplývá, že se zvyšujícím se obsahem příměsi dochází k postupnému snižování objemové hmotnosti, přičemž cementové pasty s přidavkem popílku dosahují nejnižších hodnot a cementové pasty s přidavkem metakaolinu nejvyšších hodnot objemové hmotnosti. Vzorky s obsahem příměsi (kromě MK10 a MK15) dosahují nižších hodnot objemové hmotnosti než referenční vzorky bez přidavku příměsi (REF).



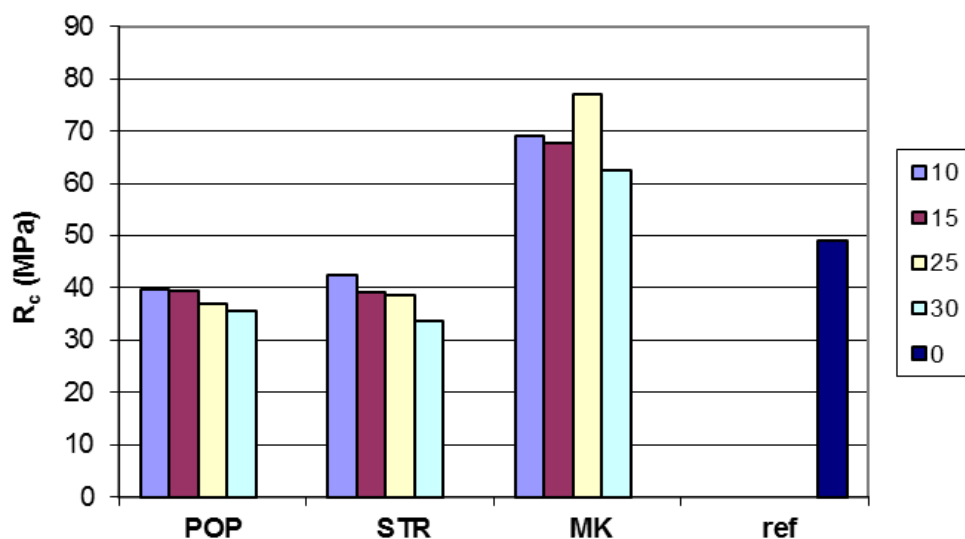
Obr. 36 – Stanovení objemové hmotnosti.

Výsledky stanovení pevností v tahu ohybem (R_f) a tlaku (R_c) zkušebních těles po 28 dnech zrání jsou znázorněny na obr. 37 a 38 a porovnány s pevnostmi referenčních vzorků bez přidavku příměsi (REF). Stoupající množství silikátových příměsí ovlivnilo pevnostní charakteristiky cementových past. V případě stanovení pevnosti v tlaku za ohybu (obr. 37) dochází u popílku a strusky k postupnému snižování pevnosti s rostoucím množstvím příměsi, zatímco u metakaolinu k postupnému zvyšování pevnosti s rostoucím množstvím příměsi. Nejnižších hodnot pevnosti v tahu ohybem dosahují vzorky s obsahem metakaolinu a nejvyšších hodnot pak vzorky s obsahem popílku. Všechny cementové pasty s obsahem popílku a cementová pasta s obsahem 10 % strusky (STR10) mají vyšší hodnoty pevnosti ve srovnání s referenční cementovou pastou (REF), ostatní pasty dosahují nižších hodnot.



Obr. 37 – Stanovení pevnosti v tahu ohybem.

V případě stanovení pevnosti v tlaku již u všech příměsí dochází k postupnému snižování pevnosti s rostoucím množstvím příměsí. Nejvyšších hodnot je dosaženo v případě použití metakaolinu jako příměsí, nejnižších pak v případě popílku. Při srovnání s referenční cementovou pastou dosahují vyšších hodnot pouze vzorky obsahující metakaolin, ostatní cementové pasty mají hodnotu pevnosti v tlaku nižší.



Obr. 38 – Stanovení pevnosti v tlaku.

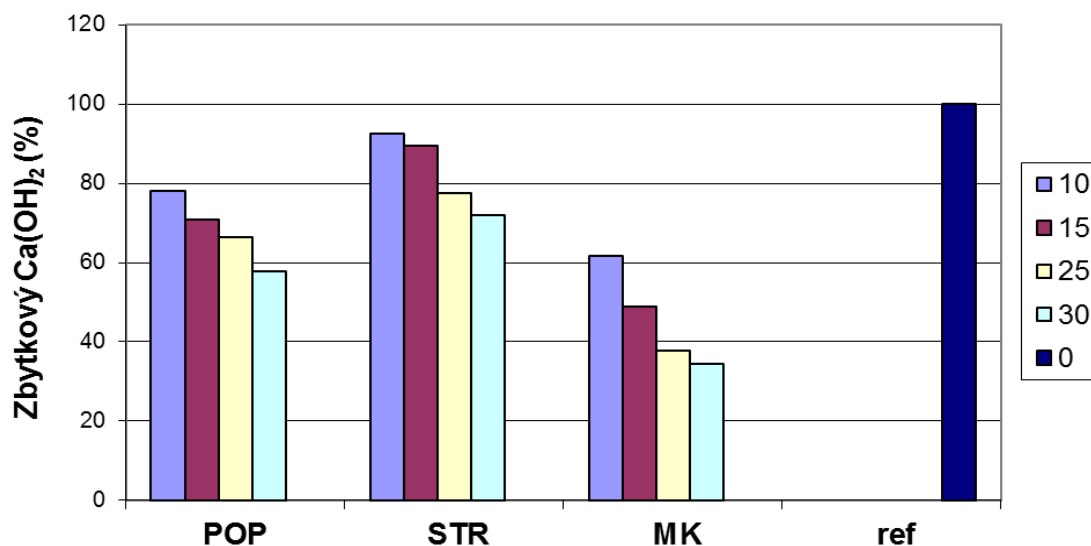
Výsledky stanovení množství zbytkového Ca(OH)_2 jsou shrnuty na obr. 39 a 40. Vzhledem k tomu, že u referenčních vzorků dochází k postupnému zvyšování množství Ca(OH)_2 v čase z důvodu postupné hydratace cementu, byly získané hodnoty pro jednotlivé vzorky pro větší názornost převedeny na % Ca(OH)_2 z množství přítomného v referenční pastě v daný čas.

Pro představu je množství přítomného Ca(OH)_2 v % z hmotnosti vzorku pro referenční pasty v jednotlivých časových úsecích uvedeno v tabulce 29.

Tab. 29 – Množství přítomného Ca(OH)_2 v referenčních vzorcích.

Doba uložení na vzduchu (den)	Množství Ca(OH)_2 ve vzorku (%)
0	20,02
14	20,99
28	21,97
56	22,62

Z obrázku 39 je patrné, že se stoupajícím množstvím silikátové příměsi dochází ve všech případech ke snižování koncentrace Ca(OH)_2 , protože hydroxid vstupuje do reakce s příměsí. Z použitých pucolánových příměsí se zdá být nejúčinnější metakaolin, protože spotřebuje ze všech sledovaných příměsí nejvíce Ca(OH)_2 . U vzorku obsahujícího 30 % metakaolinu zůstane ve směsi pouze 34,5 % Ca(OH)_2 z množství přítomného v referenční pastě. Vysokopecní granulovaná struska je latentně hydraulické pojivo, které obsahuje vápenaté sloučeniny. K reakci, která vede k vytvoření pevné struktury, tak spotřebuje nejméně Ca(OH)_2 . U vzorku obsahujícího 30 % strusky tak zůstane ve směsi 71,9 % z původně přítomného Ca(OH)_2 .

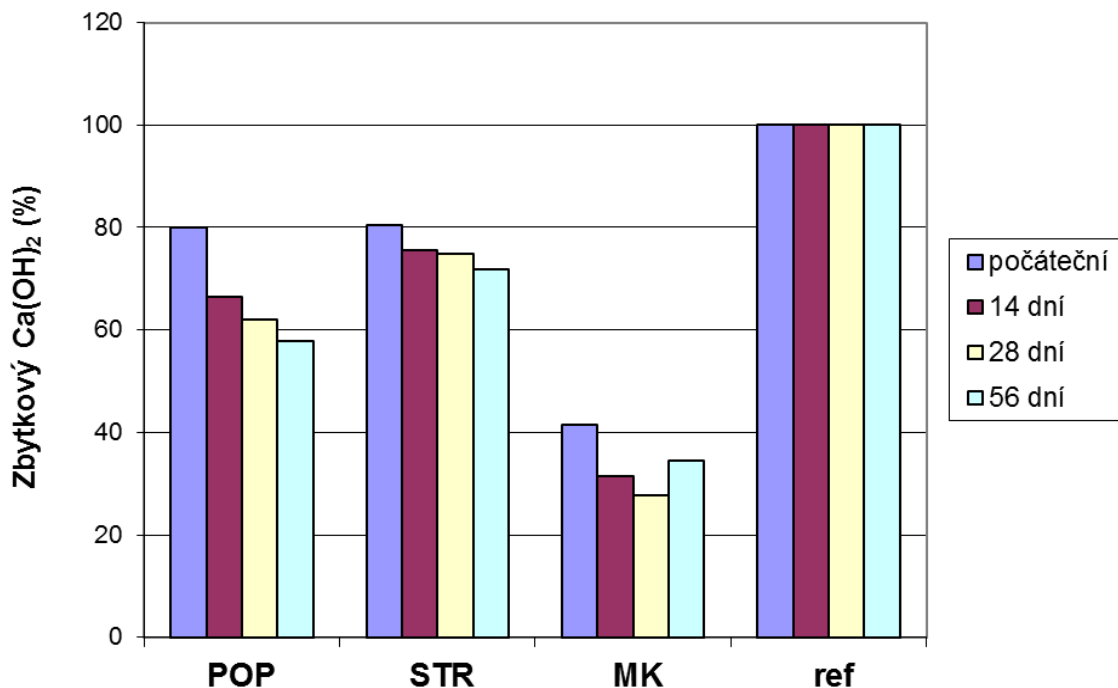


Obr. 39 – Stanovení zbytkového Ca(OH)_2 po 56 dnech uložení na vzduchu.

Z obrázku 40 je patrné, že u vzorků s příměsí dochází na rozdíl od referenčních cementových past (viz tab. 29) k postupnému snižování obsahu Ca(OH)_2 v čase, jelikož postupně dochází k pucolánové reakci dalších podílů příměsí. Rychlost pucolánové reakce, při které dochází ke spotřebě hydroxidu vápenatého, je v těchto případech větší než rychlost hydratace dalších podílů cementu, kdy hydroxid vápenatý vzniká. U metakaolinu však po

56 dnech dochází k překvapivému zvýšení obsahu zbytkového Ca(OH)_2 , což je způsobeno pravděpodobně tím, že povrch zrn příměsi již zreagoval a nyní pucolánová reakce již probíhá pomaleji.

Zajímavé je rovněž srovnání časového průběhu množství zbytkového Ca(OH)_2 u popílku a strusky. Zatímco po vyjmutí vzorků z vody je obsah Ca(OH)_2 v obou vzorcích podobný, po 56 dnech uložení na vzduchu se liší až o 14 %. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že struska je latentně hydraulické pojivo a díky obsahu vápenatých sloučenin spotřebuje postupně menší množství přítomného Ca(OH)_2 , vzniklého při hydrataci cementu.



Obr. 40 – Stanovení zbytkového Ca(OH)_2 v čase pro vzorky s obsahem 30 % příměsi.

U železobetonových konstrukcí se ocelová výztuž v zásaditém prostředí (v přítomnosti Ca(OH)_2) pasivuje a vzniklá ochranná (pasivační) vrstva tak brání případné korozi. Snížením obsahu Ca(OH)_2 v pojivu dochází k depasivaci výztuže, což může vést za vhodných podmínek ke korozi a zkrácení životnosti železobetonové konstrukce. Spotřeba hydroxidu vápenatého při reakci s příměsí má za následek nižší kapacitu pro jeho možnou karbonataci, nebo obecně neutralizaci. Přítomností příměsi je tedy dříve dosaženo iniciačního času, tj. doby, kdy se sníží pH pórového roztoku v cementovém tmelu pod hodnotu 9,5, a jsou tak vytvořeny podmínky pro korozi výztuže. Naopak na odolnost proti chemické korozi pojiva má snížení obsahu Ca(OH)_2 pozitivní vliv, protože většina korozivních látek přednostně reaguje s Ca(OH)_2 za tvorby nepojivých, více či méně, rozpustných sloučenin. V tomto ohledu se jako nejpříznivější jeví využití metakaolinu jako alternativní příměsi a naopak pro železobetonové konstrukce je vhodnější použití strusky. Toto zjištění však nelze zcela zobecnit, neboť při korozi hrají roli i další faktory, především velikost a konektivita pórů, relativní vlhkost, difúze korozi způsobujících látek a v neposlední řadě také kyslík, který je nezbytný pro katodovou reakci na výztuži.

Uvedené výsledky nejsou bohužel v souladu se vzájemným srovnáním průběhu karbonatace v přítomnosti těchto příměsí (viz kap. 12.3), kdy bylo nejvyšších hloubek karbonatace

dosaženo u vzorků s obsahem popílku a nejnižších karbonatačních hloubek pak u vzorků s metakaolinem. Nejnižší množství zbytkového hydroxidu vápenatého v přítomnosti metakaolinu by se naopak mělo projevit rychlejším snížením koncentrace hydroxidových iontů a dosažená hloubka karbonatace by tedy měla být nejvyšší. Důvodem, proč malty s příměsí metakaolinu karbonatují nejpomaleji, je skutečnost, že velikost jeho zrn je malá (5 μm), a proto zcela zreagují a vzniklé produkty zaplní možné kapilární póry ve struktuře cementového tmelu. Propustnost cementové malty pro CO_2 je pak u tohoto vzorku nízká a karbonatace neprobíhá.

12.6 Stanovení pucolánové aktivity

U použitých příměsí (popílek, vysokopecní struska a metakaolin - viz kap. 9.2) byla stanovena rovněž jejich pucolánová aktivita, tj. schopnost vázat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – viz kap. 11.7. Výsledky stanovení jsou shrnuty v tabulce 30 a v případě popílku a metakaolinu jsou v souladu s hodnotami uvedenými v literatuře pro podobné materiály [20,72].

Tab. 30 – Pucolánová aktivita jednotlivých příměsí.

Příměs	Pucolánová aktivita (mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /1g příměsí)
Popílek	542
Struska	123
Metakaolin	1062

Zjištěné pucolánové aktivity jsou v souladu s výsledky stanovení množství zbytkového hydroxidu vápenatého v cementových pastách s obsahem těchto příměsí (viz kap. 12.5), kdy nejnižší množství zbytkového hydroxidu vápenatého po 56 dnech uložení na vzduchu bylo zjištěno ve vzorcích s obsahem metakaolinu a nejvyšší pak ve vzorcích s obsahem strusky.

Překvapivé jsou však výsledky vzájemného srovnání průběhu karbonatace v přítomnosti těchto příměsí (viz kap. 12.3), kdy bylo nejvyšších hloubek karbonatace dosaženo u vzorků s obsahem popílku a nejnižších karbonatačních hloubek pak u vzorků s metakaolinem. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že vzorky s obsahem metakaolinu vykazovaly již před karbonatační zkouškou nejnižší celkový objem pórů. Během karbonatace pak dochází k dalšímu snížení pórovitosti cementového tmelu v důsledku krystalizace uhličitanu vápenatého. Rovněž při pucolánové reakci se zvyšuje hutnost cementového tmelu vznikem vazebných sloučenin. Propustnost cementové malty pro CO_2 je tedy nízká a karbonatace tak neprobíhá.

12.7 Zkoušky lomově-mechanických vlastností

Vlivu karbonatace cementových kompozitů na jejich lomově-mechanické vlastnosti není v tuzemských podmínkách věnována pozornost, ačkoliv jinak degradace těchto stavebních materiálů patří k významným aspektům při odhadu životnosti či zbytkové životnosti např. železobetonových konstrukcí. V této kapitole jsou shrnuty výsledky vlivu karbonatace vzorků ze zatvrdlé cementové pasty (viz kap. 10.2.1.2) na její lomově-mechanické vlastnosti. Experimentální detaily lomové zkoušky jsou uvedeny v kap. 11.8.

Vzorky po odformování byly uloženy 6 týdnů ve dvou různých prostředích lišících se množstvím oxidu uhličitého v obklopujícím vzduchu. Jednu sadu tvořila zkušební tělesa, jejichž uložení odpovídalo běžnému zastoupení CO₂ ve vzduchu (0,038 % obj.). Hloubka karbonatace (měřená pomocí fenolftaleinové zkoušky) dosáhla u této sady hodnoty 1 mm. Druhá sada vzorků byla umístěna po stejnou dobu v exsikátoru v prostředí se zvýšeným obsahem oxidu uhličitého (55 ± 5 obj. %), ve kterém byla přítomností nasyceného roztoku KNO₃ udržována zvýšená relativní vlhkost (93,6 % při teplotě 20 °C). U této sady karbonatace pokročila do hloubky 13 mm, zasáhla tedy podstatnou část průřezu vzorků.

Výsledné hodnoty vyšetřovaných vlastností obou výše definovaných sad jsou shrnuty v tabulce 31. Prakticky nezkarbonatované vzorky první sady jsou v této tabulce označeny jako srovnávací.

Tab. 31 – Výsledky lomové zkoušky

Veličina	Jednotka	Srovnávací vzorky	Zkarbonatované vzorky
Objemová hmotnost	kg/m ³	1545	1857
Pevnost v tlaku	MPa	25,4	48,7
Modul pružnosti	GPa	10,4	8,3
Lomová houževnatost	MPa · m ^{1/2}	0,345	0,244
Houževnatost	N · m	11,7	7,2

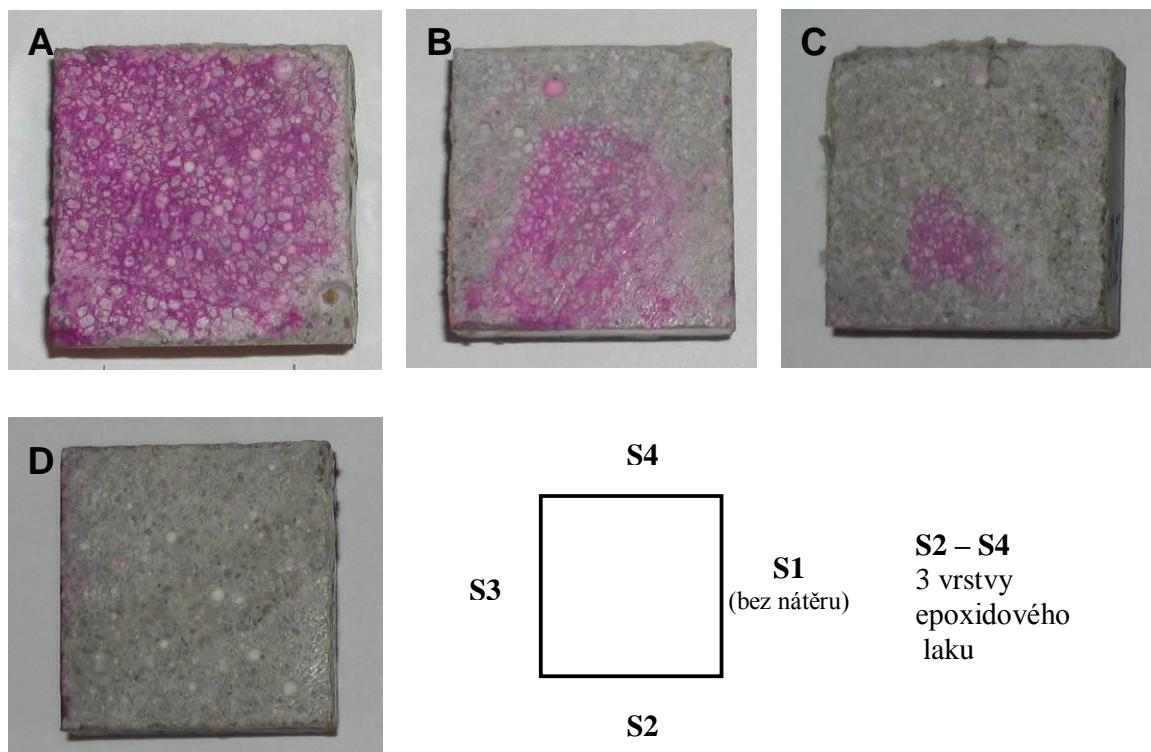
Z výše uvedených výsledků zkoušek lze vyvodit, že karbonatace zatvrdlé cementové pasty měla podstatný vliv na všechny sledované vlastnosti. Objemová hmotnost se u vzorků druhé sady zvýšila asi o 20 % oproti vzorkům srovnávacím. Pevnost v tlaku na zlomcích vzrostla dokonce o přibližně 90 %. Přitom modul pružnosti poklesl o 20 %. Také hodnoty obou lomových charakteristik poklesly u zkarbonatovaných vzorků – efektivní lomová houževnatost o přibližně 30 % a efektivní houževnatost o bezmála 40 %.

To potvrzuje skutečnost, že během karbonatace nejdříve dochází ke krystalizaci uhličitanu vápenatého v pórech ve formě kalcitu. Vzhledem k velikosti molárního objemu uhličitanu vápenatého a hydroxidu vápenatého se vyplňují kapilární póry cementového tmelu a zhoršuje se jejich průchodnost. Na druhé straně s přeměnou Ca(OH)₂, který je zabudován v reakčních produktech, se vytvoří nevazebný, nebo jen částečně vazebný CaCO₃. To vede ke změně lomově-mechanických parametrů.

12.8 Stanovení hloubky karbonatáce pomocí detekce změn parametrů odezvy signálu na akustický impuls

Fenolftaleinová zkouška je jednou z nejčastěji používaných metod určení hloubky karbonatáce. Zkouška spočívá v tom, že po uplynutí stanovené doby je část vzorku odříznuta a po aplikaci ethanolického roztoku fenolftaleinu pak stanovena hloubka karbonatáce. Jedná se tedy o destruktivní metodu. V této kapitole jsou shrnuty poznatky o využití frekvenční inspekce (FI) jako jedné z nedestruktivních metod pro zjištění hloubky karbonatáce a hledání parametrických rozdílů odezvy signálu v průběhu karbonatáce cementové malty.

Příprava zkušebních těles je popsána v kap. 10.1.2, složení použité směsi pak v kap. 10.2.2.5. U zkušebních těles byla nejdříve stanovena objemová hmotnost – 2233 kg/m³, pevnost v tahu ohybem 7,96 MPa a pevnost v tlaku 69,56 MPa. Poté byla zkušební tělesa opatřena z pěti stran trojitou vrstvou epoxidového laku, aby se zabránilo přístupu CO₂ z těchto stran (viz kap. 10.1.2).



Obr. 41 – Stanovení hloubky karbonatáce pomocí ethanolického roztoku fenolftaleinu: A) po 2 týdnech, B) po 5 týdnech, C) po 6 týdnech D) po 8 týdnech.

Následná karbonatační zkouška byla provedena v exsikátorech se zvýšeným obsahem CO₂ (55 ± 5 obj. %) za přítomnosti nasyceného roztoku KNO₃ (viz kap. 11.5). Jednotlivá měření byla prováděna před karbonatační zkouškou a po 2, 5, 6 a 8 týdnech uložení v exsikátoru. Experiment FI byl proveden na jedné sadě těles dle metodiky Impact-echo (Puls-echo) – viz kap. 11.5. Budící impuls realizovaný úderem kladívka byl během měření metodou FI veden do nejvíce zkarbonatované strany vzorku (viz obr. 41 - strana S4). Na druhé sadě vzorků byla souběžně stanovována dosažená hloubka karbonatáce pomocí fenolftaleinové zkoušky. Uvedené hodnoty hloubky karbonatáce byly rovněž naměřeny ze strany S4. Stanovení hloubky karbonatáce v jednotlivých časových úsecích pomocí fenolftaleinové zkoušky je

znázorněno na obrázku 41. Hodnoty dominantních frekvencí pro jednotlivá stádia zrychlené karbonatice jsou společně s naměřenými hodnotami hloubky karbonatice uvedeny v tabulce 32.

Předpokladem bylo, že karbonatice cementové malty bude probíhat přednostně ze strany, která nebyla opatřena ochranným epoxidovým lakem (S1). Z naměřených hloubek karbonatice bylo však zjištěno, že nejvíce byla degradována ta strana vzorku, která byla původně vrchní stranou ve formě (S4), a to i přesto, že byla opatřena ochranným epoxidovým lakem. Důvodem je pravděpodobně zvolený vysoký vodní součinitel (w/c), který mohl zapříčinit částečné usazení směsi ve formě ještě před utuhnutím. Tento jev pak mohl způsobit, že množství a velikost pórů v horní části vzorku byla větší a karbonatice zde mohla probíhat snadněji.

Pomocí FI (viz kap. 11.5) bylo zjištěno, že již nanesení ochranného epoxidového laku na povrch vzorků před karbonatační zkouškou má vliv na velikost hodnoty dominantní frekvence odezvy na budicí impuls, přičemž hodnoty dominantních frekvencí u většiny měřených vzorků byly průměrně o 182 Hz vyšší před nanesením epoxidového laku než u totožných vzorků po jeho nanesení.

Tab. 32 – Hodnoty dominantních frekvencí a hloubky karbonatice v průběhu karbonatice.

Délka karbonatice (týdny)	Frekvence (Hz)	Hloubka karbonatice (mm)
0	5821	0
2	5701	2
5	5641	12
6	5542	24
8	5382	zkarbonatováno

V průběhu karbonatice pak docházelo k dalšímu postupnému posunu dominantních frekvencí odezvy signálu k nižším hodnotám. Výsledky v oblasti posunových tendencí dominantních frekvencí mohly být však ovlivněny následujícími skutečnostmi:

- Z důvodu částečného porušení ochranné vrstvy byly vzorky lokálně opatřeny další vrstvou epoxidového laku, což má vliv na hodnotu dominantní frekvence – viz výše.
- Při výrobě testovaných trámečků bylo sice použito kamenivo nízké granulometrie, není však přesto možno bezpečně předejít stavu, kdy úder kladívka směřuje právě do zrna kameniva, což je rovněž ovlivňujícím faktorem výsledných hodnot dominantních frekvencí.
- Nezpochybnitelný vliv na reprodukci získaných výsledků měření má struktura cementové malty, která není zcela homogenní.

Výsledky provedených experimentů využívajících FI jako možnost detekce míry karbonatice cementové malty ošetřené epoxidovým lakem lze shrnout následovně:

- Nanesení ochranného epoxidového laku na povrch vzorků způsobuje posun hodnoty dominantní frekvence průměrně o 182 Hz k nižším hodnotám. Toto ošetření povrchu vzorků však jen mírně zamezilo průniku CO_2 a karbonatice postupovala přednostně

ze strany vzorku, která byla původně vrchní stranou ve formě, a to i přestože byla opatřena ochranným epoxidovým lakem.

- b) Rozdíl ve výsledném frekvenčním spektru pro úder realizovaný do nejvíce zkarbonatované strany činí 439 Hz ve fázi před a po ukončení testu. Výsledky v oblasti posunových tendencí dominantních frekvencí mohou být však ovlivněny hned několika faktory uvedenými výše. Využití této metody pro stanovení hloubky karbonatace tedy není v současné době zcela vhodné.

13 MODELOVÁNÍ KARBONATAČNÍHO PROCESU

V této kapitole jsou uvedeny parametrické studie a srovnání vybraných karbonatačních modelů, dále pak jsou popsány softwarové nástroje, které využívají některé z modelů, a příklady využití uvedených nástrojů.

Z modelů popsaných v kapitole 5 byly vybrány pro parametrické studie a vzájemné srovnání pouze ty, které mají dostupnější vstupní parametry a jsou tedy uživatelsky přístupnější. Pro větší přehlednost byly tyto modely označeny zkratkou Carb1-9 – viz tab. 33.

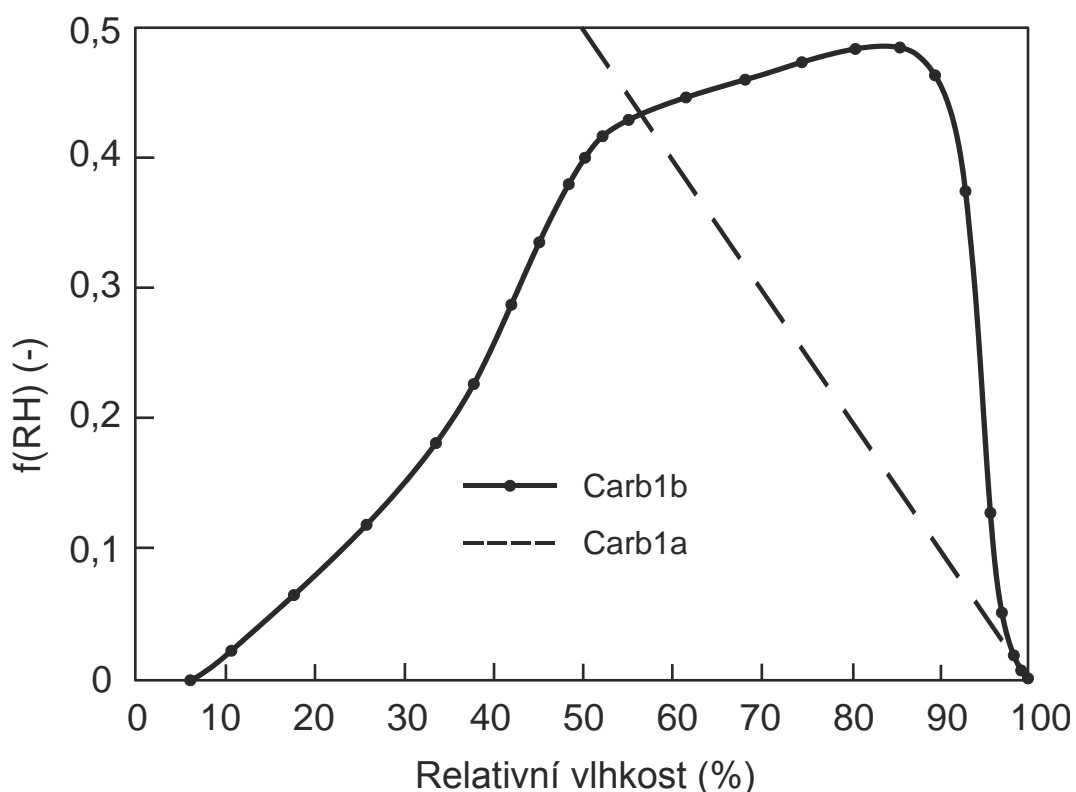
Tab. 33 – Označení karbonatačních modelů.

Označení	Počet vstupů	Popis	Vztah	Literatura
Carb1a Carb1b	12	Pro betony z portlandského cementu, model b se liší $f(RH)$	(36)-(38)	[37]
Carb2a Carb2b	5	Pro betony z portlandského cementu, zjednodušený model, model b se liší $f(RH)$	(30)-(31)	[37]
Carb3	7	Pro betony z portlandského cementu, vliv teploty	(32)-(33)	[42]
Carb4a Carb4b	8	Pro betony ze směsného cementu, model b se liší $f(RH)$	(52)-(53)	[49,73]
Carb5a Carb5b	7 19	Pro betony ze směsného cementu, model b je pro betony s vysokým obsahem popílku	(46) (47)-(50)	[30]
Carb6	5	Pro betony ze směsného cementu, jednoduchý model, typ cementu je uvažován	(39)	[36,45]
Carb7	6	Pro betony ze směsného cementu, jednoduchý model, typ cementu je uvažován	(42)-(43) (45)	[46]
Carb8	11	Pro betony ze směsného cementu, model z <i>fib Model Codu</i> 2010	(54)-(61)	[50,51]
Carb9	34	Pro betony z portlandského cementu s vápenocementovou omítkou	obr. 8	[37]

13.1 Parametrické studie a srovnání modelů

13.1.1 Carb1

Modely Carb1a a Carb1b popisují složení použité směsi pro výrobu betonu větším počtem parametrů a jsou oproti jednodušším modelům mnohem výstižnější. Obsahují 12 proměnných, vycházejí z fyzikálně-chemické podstaty probíhajících dějů a mohou být použity ke zjištění závislosti průběhu karbonatace na podmínkách okolního prostředí, ale i na podmínkách technologických a materiálových. Modely popisují průběh karbonatace betonů připravených z portlandského cementu, pro popis karbonatace betonů připravených ze směsných cementů lze pak použít modely Carb4 – Carb8. Nevýhodou obou modelů je, že nezahrnují vliv dvou důležitých faktorů ovlivňujících karbonatační proces – teploty a podmínek ošetřování betonu. Vliv teploty je zahrnut v modelu Carb3 a vliv podmínek ošetřování v modelech Carb5 a Carb8. Jak však vyplynulo ze srovnání modelu Carb1b s modelem Carb3, ačkoliv model Carb1b vliv teploty neobsahuje, predikuje při průměrné roční teplotě podobné hloubky karbonatace jako model Carb3 (viz kap. 13.1.3). Z výsledků uvedených v kapitole 12.2 pak vyplývá, že vliv doby ošetřování na průběh karbonatace není významný. V případě, že nejsou všechny vstupní parametry modelů Carb1 k dispozici, lze použít jednodušší modely jako Carb2, Carb6, nebo Carb 7.

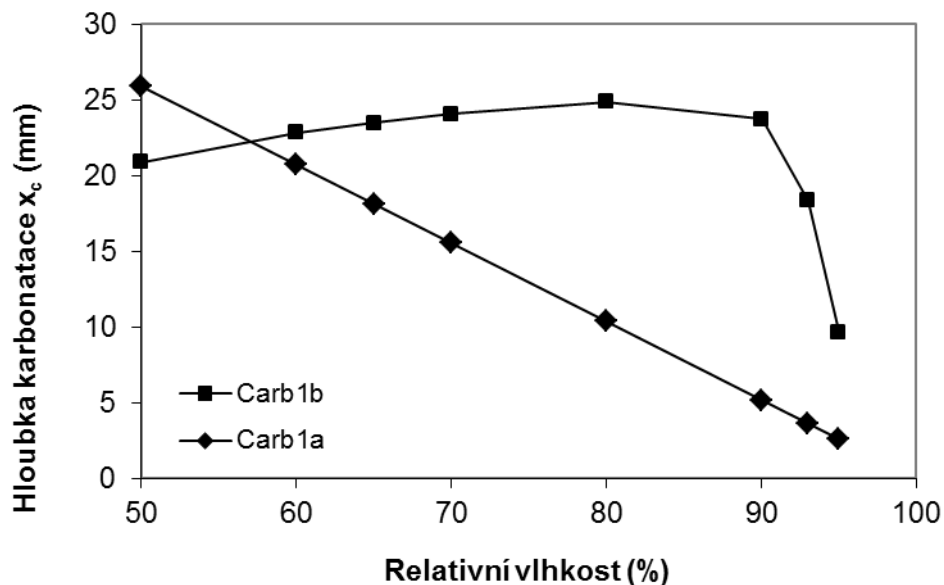


Obr. 42 – Typy $f(RH)$ pro Carb1a a Carb1b.

Oba modely se vzájemně liší vyjádřením funkce $f(RH)$ popisujícím vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu RH. V modelu Carb1a je tato funkce ponechána v původním tvaru, tj. je popsána lineární funkcí $f(RH)$ s maximem při RH = 50 % a minimem při RH = 100 % [37] -

viz obr. 42. Jak bylo zjištěno ze srovnání s experimentálními výsledky, model Carb1a však neposkytuje vyhovující výsledky pro vyšší hodnoty RH (viz kap. 13.3.1), což bylo vyřešeno v modelu Carb1b zavedením alternativní funkce $f(RH)$ založené na kombinaci výsledků uvedených v kap. 12.1 a v dalších experimentálních pracích [38,74].

Pro vzájemné srovnání modelů Carb1a a Carb1b byly použity následující vstupní parametry: $c_{CO_2} = 800 \text{ mg/m}^3$, $RH = 50 - 95 \%$, $c = 313 \text{ kg/m}^3$, $w = 185 \text{ kg/m}^3$, $a_1 = 847 \text{ kg/m}^3$, $a_2 = 386 \text{ kg/m}^3$, $a_3 = 625 \text{ kg/m}^3$, $\rho_c = 3100 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_1} = 2590 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_2} = 2540 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_3} = 2660 \text{ kg/m}^3$. Závislost hloubky karbonatce na relativní vlhkosti v 50 letech je pro oba modely znázorněna na obr. 43. Srovnání s dalšími modely je uvedeno v kap. 13.1.2, 13.1.3, 13.1.6 a 13.1.7.



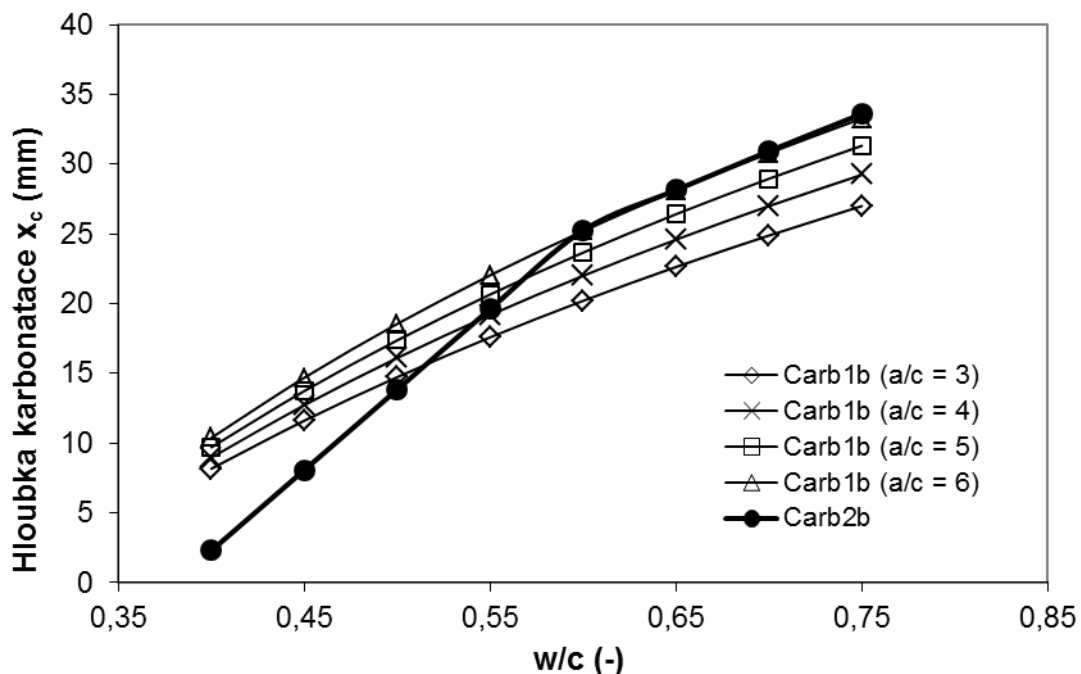
Obr. 43 – Srovnání modelů Carb1a a Carb1b po 50 letech karbonatce.

13.1.2 Carb2

Zjednodušené empirické modely Carb2a a Carb2b zahrnují pouze 6 vstupních parametrů a mohou tak dobře posloužit pro orientační zjištění hloubky karbonatce v případě, kdy není mnoho dostupných dat. Složení použité směsi pro výrobu betonu je zde totiž charakterizováno pouze vodním součinitelem. Nepřítomnost vlivu teploty, podmínek ošetřování betonu a dalších vstupních parametrů charakterizujících složení směsi pro výrobu betonu je pak nevýhodou těchto modelů a způsobuje tak nepřesnosti v určení hloubky karbonatce. Vliv teploty je zahrnut v modelu Carb3, vliv podmínek ošetřování v modelech Carb5 a Carb8 a pro přesnější určení hloubky karbonatce mohou posloužit modely s více vstupními parametry jako např. Carb1 nebo Carb4. Další nevýhodou modelů Carb2 je také jejich omezení na popis karbonatce betonů připravených pouze z portlandského cementu. Pro popis karbonatce betonů připravených ze směsných cementů lze pak použít modely Carb4 – Carb8.

Modely Carb2a a Carb2b se stejně jako modely Carb1 liší ve vyjádření funkce $f(RH)$ popisující vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu RH . V modelu Carb2a je tato funkce ponechána v původním tvaru (viz obr. 42 – Carb1a), v Carb2b je nahrazena alternativní funkcí založené na kombinaci experimentálních dat (viz kap. 13.1.1., obr. 42 – Carb1b), která vede k větší shodě s výsledky experimentů – viz kap 13.3.1.

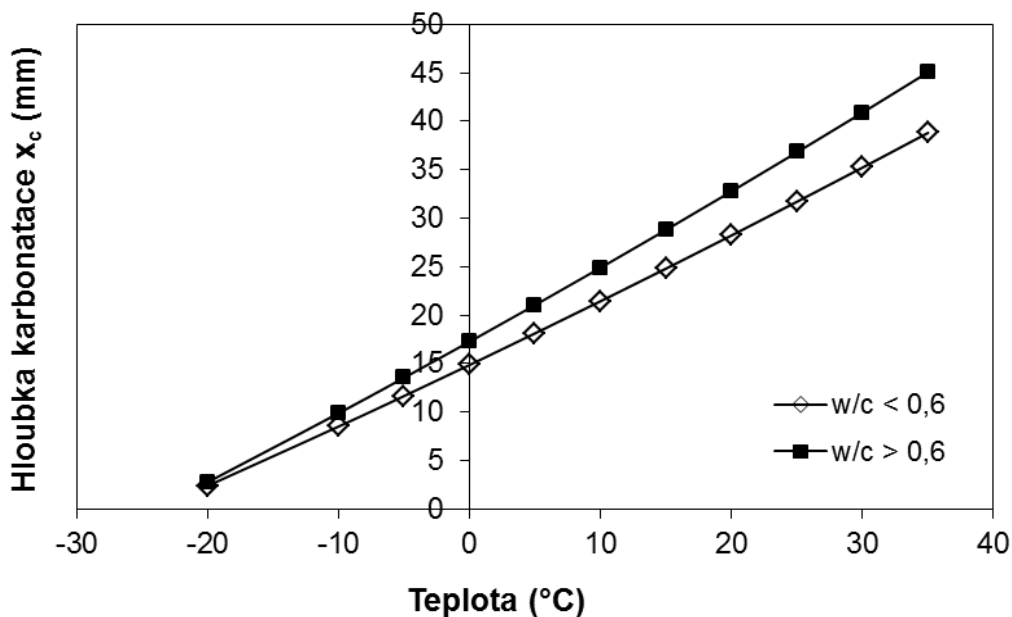
Srovnání hloubek karbonatce vypočítaných na základě modelu Carb1b a Carb2b je uvedeno na obrázku 44. Ze závislosti hloubek karbonatce na vodním součiniteli (w/c) po 50 let je patrné, že pro hodnoty w/c mezi 0,5 a 0,6 jsou vypočítané hloubky karbonatce v dobré shodě, pro hodnoty $w/c < 0,5$ však model Carb1b predikuje vyšší a pro $w/c > 0,6$ nižší hloubky karbonatce. Ke větší shodě výsledků dochází v případě, kdy je a/c v modelu Carb1b rovno 5 a 6. Pro srovnání byla použita stejná vstupní data jako pro srovnání modelů Carb1 (viz kap. 13.1.1) pouze množství vody se při výpočtech mění v souladu s w/c , množství kameniva a v souladu se zvoleným a/c ($a_1 : a_2 : a_3 = 1 : 1 : 1$) a $RH = 75 \%$.



Obr. 44 – Srovnání modelů Carb1b a Carb2b po 50 letech karbonatce.

13.1.3 Carb3

Výhodou modelu Carb3 je přítomnost důležitého parametru teploty okolí jako vstupního parametru. Na obrázku 45 je znázorněna závislost hloubky karbonatce na teplotě po 50 letech karbonatce. Z obrázku je patrné, že se hloubka karbonatce s rostoucí teplotou zvyšuje. Rozdíl v hodnotách hloubek karbonatce pro teploty $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $35 \text{ }^\circ\text{C}$ je významný – v případě $w/c < 0,6$ je to 36,4 mm a pro $w/c > 0,6$ dokonce 42,3 mm. Pro zjištění této závislosti byla použita následující vstupní data: $c_{CO_2} = 800 \text{ mg/m}^3$, $RH = 50 \%$, $R = 1$, $T = -20 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $c = 313 \text{ kg/m}^3$, $w = 185 \text{ kg/m}^3$ pro $w/c \leq 0,6$ a $w = 203,45 \text{ kg/m}^3$ pro $w/c > 0,6$.



Obr. 45 – Závislost hloubky karbonatice na teplotě dle modelu Carb3 po 50 letech.

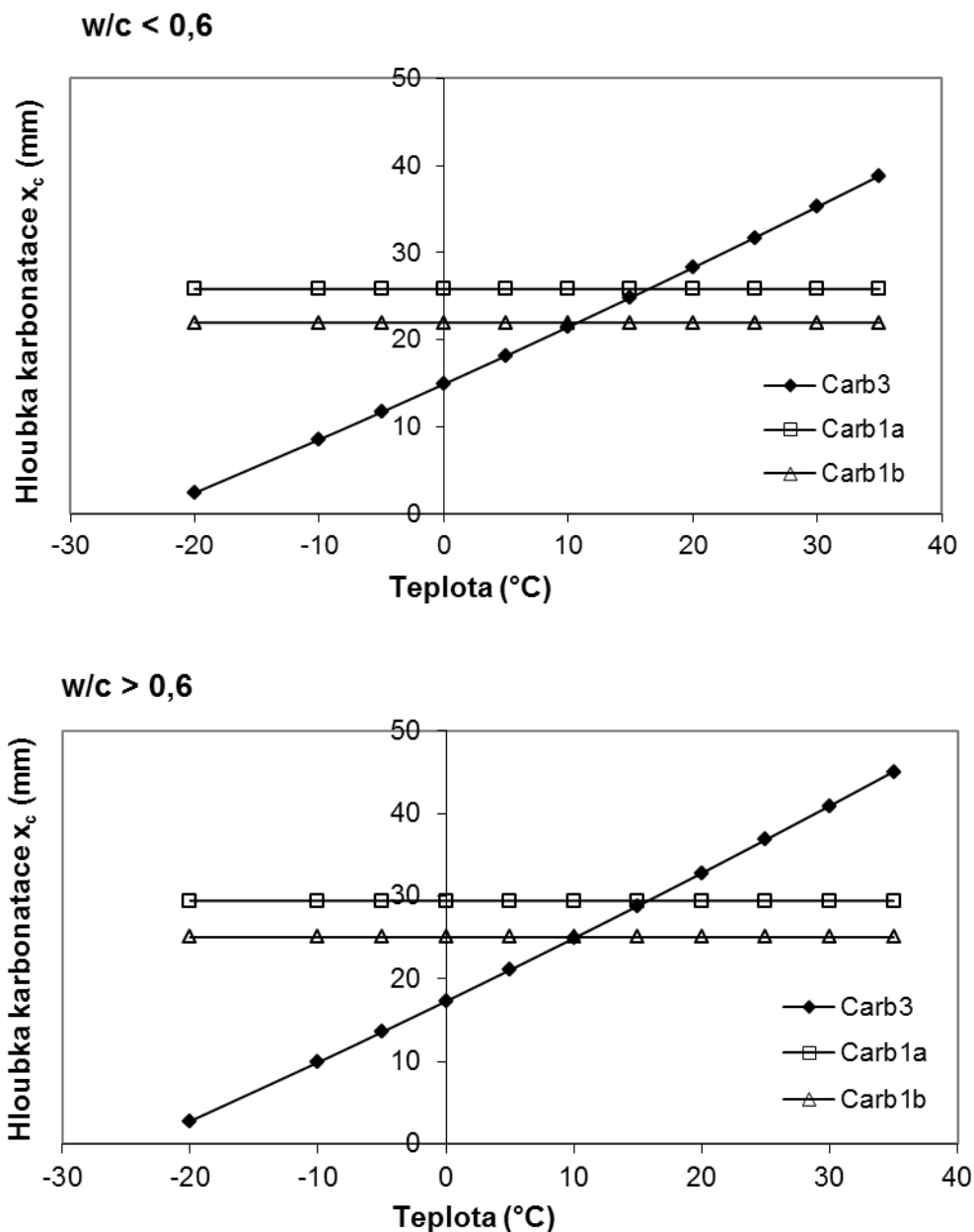
Složení použité směsi pro výrobu betonu je u tohoto modelu opět charakterizováno pouze vodním součinitelem, je tedy vhodný především v případě, kdy známe podmínky okolního prostředí, avšak o složení betonové směsi není mnoho známo. Pro přesnější určení hloubky karbonatice mohou posloužit modely s více vstupními parametry jako např. Carb1 nebo Carb4. Další nevýhodou modelu Carb3 je také jeho omezení na popis karbonatice betonů připravených pouze z portlandského cementu. Pro popis karbonatice betonů připravených ze směsných cementů lze pak použít modely Carb4 – Carb8.

Na obrázku 46 je uvedeno srovnání modelu Carb3 s modely Carb1a,b po 50 letech karbonatice. Jako vstupní parametry byly v případě RH , T , R a w použity hodnoty jako v předchozím případě, pro zbývající proměnné byly použity hodnoty jako v případě srovnání modelů Carb1a,b (viz kap. 13.1.1). Pokud srovnáme karbonatační hloubky vypočítané pro různé teploty modelem Carb3 s výsledky modelů Carb1a,b, zjistíme, že podobných hloubek karbonatice bylo dosaženo v případě Carb1a pro teplotu 15 °C a v případě Carb1b pro 10 °C. Vzhledem k tomu, že průměrná roční teplota v Brně je 9,4 °C [39], je možné pro výpočet hloubky karbonatice v našich podmínkách model Carb1b použít, i když vliv teploty nezahrnuje, protože při průměrné roční teplotě predikuje přibližně stejné hodnoty jako Carb3.

13.1.4 Carb4

Výhodou modelů Carb4a,b je skutečnost, že jsou určeny pro popis karbonatice betonů připravených ze směsných cementů. V posledních letech je totiž energeticky náročný a emisemi CO₂ zatížený portlandský cement nahrazován alternativními, zejména silikátovými a aluminosilikátovými pojivy (SCM), která sice sama o sobě s vodou nereagují, nebo reagují jen velmi zvolna, ale v přítomnosti i malého množství cementu, který hydratací poskytne hydroxid vápenatý, začnou reagovat. Příměs, aby mohla nahrazovat část cementu, musí tedy mít hydraulické nebo pucolánové vlastnosti. Rozdíl mezi oběma druhy je v obsahu CaO,

zatímco pucolán CaO neobsahuje nebo jeho obsah je nízký, u hydraulických příměsí je obsah CaO nezanedbatelný – viz kap. 2.



Obr. 46 – Teplotní vliv na hloubku karbonatace dle modelů Carb3 a Carb1a,b po 50 letech.

Přítomnost příměsí však má vliv na pevnost betonu a rovněž na jeho odolnost proti karbonataci betonu nebo působení chloridů [73]. V případě hodnocení průběhu karbonatace mohou pomoci analytické modely, které vliv příměsí zohledňují. V modelech Carb4a,b je vliv příměsí vyjádřen pomocí koncepce k -hodnoty [49,73] - viz kap. 5.2.3, kde k je hodnota zohledňující účinnost příměsí. Tato k -hodnota vymezuje, jaká část příměsí (SCM) může být považována za ekvivalentní portlandskému cementu ($k = 1$ tedy odpovídá portlandskému cementu). Tato koncepce je již také začleněna do normy EN 206-1 [10]. V normě jsou však uvedeny jiné k -hodnoty, než byly experimentálně zjištěny Papadakisem [49] – viz tab. 7.

V kapitole 5.2 normy EN 206-1 [10] jsou mezi základní požadavky pro složení betonu zahrnuty rovněž pokyny pro používání příměsí a koncepce k -hodnoty včetně hodnot součinitele k pro popílek a křemičitý úlet – viz tab. 7. Při aplikaci tohoto dokumentu a jeho doporučení se ale mj. objevují následující otázky:

- Ze znění normy není zřejmé, jestli se tato koncepce má používat ve vztahu k odolnosti vůči karbonataci, resp. k působení chloridů či pevnosti betonu a zda a jak se hodnoty součinitele k v těchto různých případech liší.
- Vhodnost koncepce k -hodnoty je prokázána pro použití popílku a křemičitého úletu. Při použití jiných příměsí nebo jejich kombinací, popř. při modifikaci uvedených případů, či celé koncepce, se musí vhodnost prokázat. Pro praktické použití jsou to tedy dosti vágní a nepřijemná pravidla; průkazem je zde totiž míněna i *průkazní zkouška* dle normativní přílohy A, což je značně pracná a náročná činnost.
- Jak vyplývá z tabulky 7, předepsané hodnoty součinitele k jsou uvedeny pouze v dosti hrubém členění. Jak je ukázáno dále, nemusí být tyto hodnoty dostatečně výstižné.

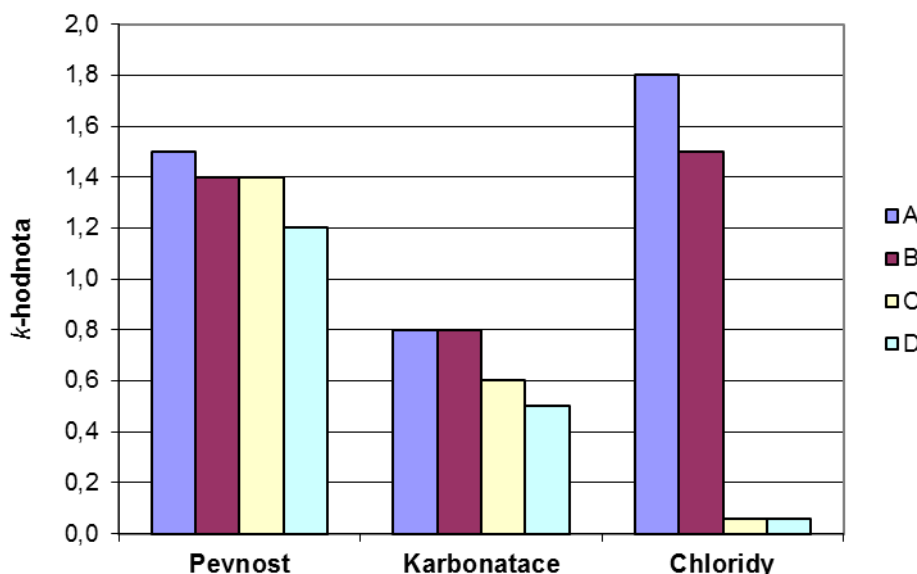
Papadakis však pomocí experimentů zjistil, že k -hodnota závisí na druhu, množství a složení příměsí v betonu a liší se též podle vlastnosti, ke které se vztahuje (pevnost betonu, odolnost proti karbonataci, či působení chloridů) [73] – viz tab. 34. Z výsledků experimentů dále vyplynulo, že k -hodnota pro pevnost betonu se v čase mění.

Tab. 34 – Experimentálně zjištěné k -hodnoty pro různé vlastnosti betonu [73].

Typ příměsí	k -hodnota					
	Pevnost v betonu				Odolnost proti chloridům 90 dní	Odolnost proti karbonataci 100 dní
	2 dny	7 dní	28 dní	90 dní		
Křemičitý úlet			3	2,4	6	0,3
Křemičitý popílek			0,5	0,7	3	0,5
Vápenatý popílek	0,8	0,9	0,9	0,9	2	0,7

Bentur [75,76] shrnuje výsledky mnoha publikací a srovnává jejich experimentálně zjištěné k -hodnoty. Z výsledků vyplývá, že k -hodnota se pro různé vlastnosti téhož betonu zcela liší, což je způsobeno vzájemnými interakcemi portlandského cementu s příměsí a rozdílnou závislostí každé vlastnosti betonu na chemických vlastnostech a mikrostruktuře použitých složek betonu. Tato hodnota závisí dále na původu příměsí a k -hodnota pro pevnost betonu klesá s rostoucím množstvím příměsí a mění se i v čase [75]. Ze srovnání k -hodnot pro 90denní betony s obsahem popílku z různých zdrojů totiž zjistil, že k -hodnota pro pevnost se liší v rozsahu od 1 do 1,5, což je mnohem větší hodnota než je doporučována v EN 206-1 – 0,2 popř. 0,4 (viz tab. 7), pro karbonataci je menší než 0,6 a pro působení chloridů naopak

kolem 2. Hodnoty k uvedené v normě EN 206 [10] se dle jeho názoru vztahují pouze k pevnostem a posuzování míry účinnosti pro trvanlivost (karbonatace a působení chloridů) na základě pevnosti pak považuje za nevhodné. Rovněž upozorňuje na skutečnost, že k -hodnota závisí na způsobu a délce ošetřování betonu. Data ukazují na malou citlivost k -hodnoty pro pevnost a extrémní citlivost k -hodnoty pro působení chloridů (viz obr. 47).



Obr. 47 – Vliv doby a způsobu ošetřování k -hodnotu pro 90denní betony s obsahem křemičitého popílku; A – 28denní ponoření ve vodě, B – 7denní ponoření ve vodě, C – 7denní občasné ošetření vodou, D – 3denní občasné ošetření vodou.

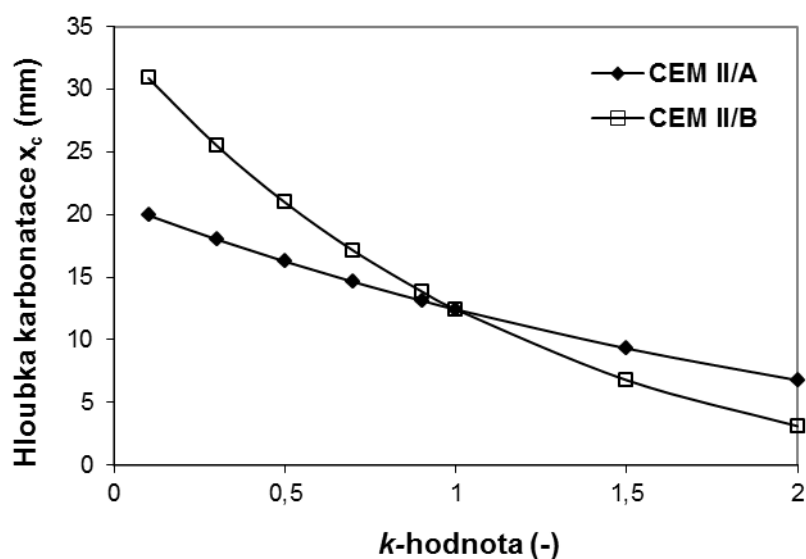
Z uvedeného vyplývá, že jako vstupní hodnoty do modelů Carb4a,b bude vhodnější používat experimentálně zjištěné k -hodnoty než hodnoty uvedené v normě EN206-1 [10]. Srovnávací studie experimentálně zjištěných a vypočtených hodnot hloubky karbonatace s využitím různých k -hodnot jsou uvedeny v kap. 13.3.3.

Modely Carb4a a Carb4b se stejně jako modely Carb1 a Carb2 liší ve vyjádření funkce $f(RH)$ popisující vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu RH . V modelu Carb4a je tato funkce ponechána v původním tvaru (viz obr. 42 – Carb1a), v Carb4b je nahrazena alternativní funkcí založené na kombinaci experimentálních dat (viz kap. 13.1.1., obr 42 – Carb1b), která vede k větší shodě s výsledky experimentů – viz kap. 13.3.3.

Pro parametrické studie vypočítané pomocí modelu Carb4b byly použity následující vstupní parametry: $c_{CO_2} = 800 \text{ mg/m}^3$, $RH = 65 \%$, $w = 175 \text{ kg/m}^3$, $\rho_c = 3100 \text{ kg/m}^3$ a $k = 0,5$, což odpovídá dle Papadakise křemičitému popílku. Další vstupní parametry se mění dle typu cementu - $c = 350 \text{ kg/m}^3$ a $P = 62 \text{ kg/m}^3$ pro CEM II/A s 15 % příměsí a $c = 288 \text{ kg/m}^3$, $P = 124 \text{ kg/m}^3$ pro CEM II/B s 30 % příměsí.

Závislost hloubky karbonatace na k -hodnotě po 50 letech je pro oba typy cementu uvedena na obrázku 48. Ze závislosti je patrná klesající tendence s rostoucí k -hodnotou, při čemž větších rozdílů v karbonatačních hloubkách je dosaženo u cementu CEM II/B. Uvedená závislost je získána pro případ, že měníme při výpočtu pouze k -hodnotu a množství cementu, příměsí a vody zůstává konstantní. V takovém případě sice pro každý typ cementu w/c , popř. $w/(C + P)$ zůstává stejné, ale efektivní vodní součinitel (viz vztah (51)) s rostoucím

k -hodnotou klesá. Klesající závislost hloubky karbonatace na hodnotě k však zůstává i v případě, že množství vody upravíme tak, aby efektivní vodní součinitel byl stále roven 0,5 – viz tabulka 35. Rozdíly v hloubkách karbonatace pak ale nejsou již tak velké.



Obr. 48 – Závislost hloubky karbonatace na k -hodnotě po 50 letech dle modelu Carb4b.

Tab. 35 – Hloubky karbonatace po 50 letech pro různé k -hodnoty v případě stejného efektivního vodního součinitele.

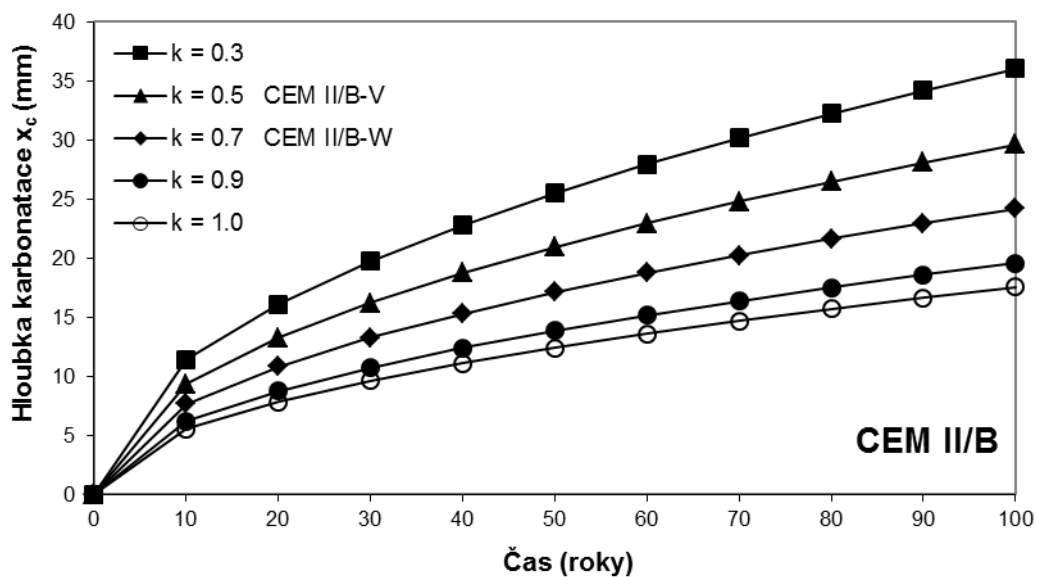
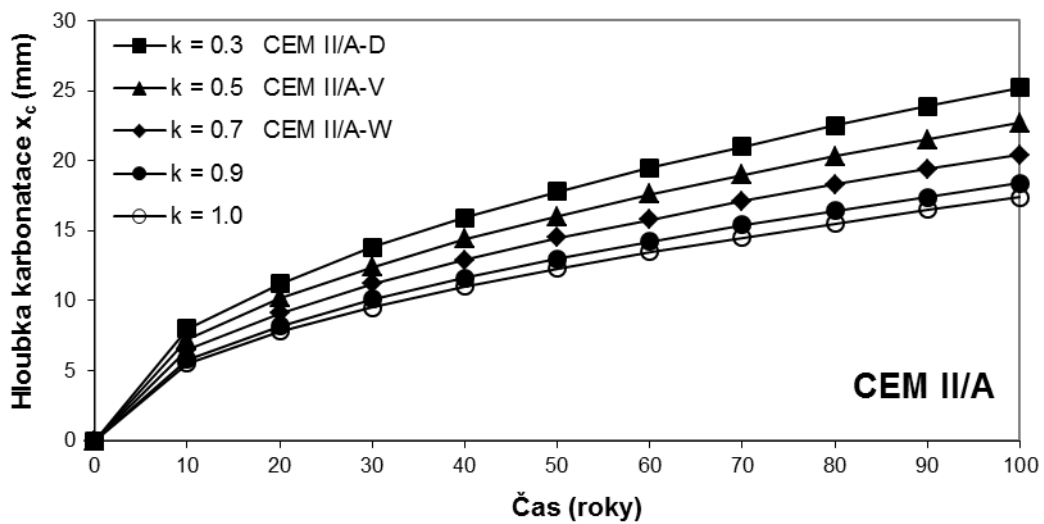
Typ cementu	c (kg/m ³)	P (kg/m ³)	w (kg/m ³)	k (-)	w/(c + k · P)	x_c (mm)
CEM II/A	350	62	178	0,1	0,50	20,8
	350	62	237	2	0,50	18,0
CEM II/B	288	124	150	0,1	0,50	22,6
	288	124	268	2	0,50	16,9

Pokud srovnáme vliv množství křemičitého popílku (dle Papadakise $k = 0,5$) na hloubku karbonatace, tak zjistíme, že pro cement CEM II/B-V s 30 % křemičitého popílku jsou hloubky karbonatace větší než pro cement CEM II/A-V s 15 % křemičitého popílku (viz tab. 36), což je pro směsi s $k < 1$ v souladu s obr. 48. Pokud upravíme množství vody tak, aby efektivní vodní součinitel byl stejný, větší hloubky karbonatace jsou opět dosaženy v případě většího množství křemičitého popílku (cement CEM II/B-V). Rozdíly v dosažených hloubkách karbonatace už opět nejsou tak velké – viz tab. 36.

Pro studium vlivu typu a množství příměsi na průběh karbonatace je tedy vhodnější zvolit množství vody tak, aby připravené maltové směsi měly stejný poměr $w/(C + P)$, protože pak jsou vzájemné rozdíly výraznější. Nalezení vhodné k -hodnoty je navíc obtížné, jak bylo vysvětleno výše.

Tab. 36 – Hloubky karbonatace po 50 letech pro různé množství příměsi se stejným efektivním vodním součinitelem $(w/c)_{eff}$, popř. $w/(C + P)$.

Veličina	Jednotka	CEM II/A-V		CEM II/B-V	
P	kg/m ³	62	62	124	124
c	kg/m ³	350	350	288	288
w	kg/m ³	183	198	168	198
$(w/c)_{eff}$	-	0,48	0,52	0,48	0,56
$w/(C + P)$	-	0,44	0,48	0,41	0,48
x_c	mm	18,2	21,9	19,0	27,01



Obr. 49 – Časový průběh hloubky karbonatace pro různé k -hodnoty dle modelu Carb4b.

Časový průběh hloubek karbonatace pro CEM II/A s 15 % příměsí a CEM II/B s 30 % příměsí byl studován pro pět různých k -hodnot (0,3; 0,5; 0,7; 0,9 a 1,0). Citlivost hloubky karbonatace na k -hodnotu je významnější u cementu typu CEM II/B – viz obr. 49.

13.1.5 Carb5

Model Carb5a je určen pro stanovení hloubky karbonatace pro betony připravené ze směsného cementu, kdy vliv příměsí je vyjádřen koeficientem typu cementu. Tento model rovněž uvažuje vliv stupně hydratace na průběh karbonatace. Bohužel právě o těchto dvou vstupních parametrech se nepodařilo získat dostačující informace. Ze vztahu (46) pro výpočet hloubky karbonatace dle tohoto modelu vyplývá, že oba tyto parametry r_{HD} a $r_{c,d}$ musí být větší než 0 a pro koeficient typu cementu $r_{c,d}$ pak dále platí:

$$r_{c,d} \leq \frac{w}{0,34c} \quad , \quad (78)$$

Pro zjištění vlivu r_{HD} a $r_{c,d}$ na hloubku karbonatace byly použity následující vstupní parametry:

$c_{CO_2} = 800 \text{ mg/m}^3$, $RH = 65 \%$, $c = 313 \text{ kg/m}^3$, $w = 185 \text{ kg/m}^3$, $r_{HD} = 0,2 - 1$ a $r_{c,d} = 0,6 - 1,7$ (u ostatních modelů vyjadřujících vliv příměsí koeficientem typu cementu (viz kap. 5.2.1) se tento koeficient pohybuje mezi 0,6 a 2,2; na základě vztahu (78) však při těchto vstupních parametrech musí být $r_{c,d} \leq 1,74$).

Tab. 37 – Hloubky karbonatace po 50 letech pro různé r_{HD} a $r_{c,d}$.

Koeficient stupně hydratace r_{HD}	Koeficient typu cementu $r_{c,d}$					
	0,6	0,8	1	1,25	1,5	1,7
0,2	97,8	66,6	47,2	30,7	17,9	6,3
0,4	69,1	47,1	33,4	21,7	12,7	4,5
0,6	56,5	38,4	27,3	17,7	10,3	3,7
0,8	48,9	33,3	23,6	15,4	8,9	3,2
1	43,7	29,8	21,1	13,7	8,0	2,8

Z výsledků v tabulce 37 vyplývá, že hloubka karbonatace exponenciálně stoupá s klesajícími koeficienty r_{HD} a $r_{c,d}$. Vezmeme-li v úvahu data z tab. 6, kde stupeň hydratace cementu po 28 dnech je pro portlandský cement 0,59 a po roce dokonce 0,76, pak hodnoty pro $r_{c,d} = 1$ (pravděpodobně portlandský cement) jsou pro $r_{HD} \geq 0,6$ v souladu s hodnotami obdrženyými pro portlandský cement modely Carb1-3.

Model Carb5b se liší od modelu Carb5a vyjádřením vlivu příměsí na průběh karbonatace. V modelu Carb5b je tento vliv vyjádřen množstvím a složením použité příměsí a model je navíc určen pro stanovení hloubky karbonatace pouze pro betony s vysokým obsahem popílku (HVFA). U modelu je uvedeno, že takový beton se od betonů připravených z portlandského nebo směsného cementu liší především skutečností, že v případě přípravy HVFA betonu nemůže být použitý popílek zcela zreagován. Jaké množství popílku je

v takovém případě uvažováno, však model neuvádí. Pro použití tohoto modelu je nutné znát výsledky chemického rozboru cementu a popílku. Pravděpodobně je však mnohem složitější získat hodnoty stupně hydratace cementu a popílku, jejichž hodnoty se budou pohybovat mezi 0 a 1. Pro odhad hodnot může posloužit tab. 6.

Pro stanovení závislosti hloubky karbonatace na stupni hydratace cementu a popílku byla použita následující vstupní data: $c_{CO_2} = 800 \text{ mg/m}^3$, $RH = 65 \%$, $c = 140 \text{ kg/m}^3$, $w = 120 \text{ kg/m}^3$, $F = 173 \text{ kg/m}^3$, $c = 140 \text{ kg/m}^3$, $C_1 = 62,37 \%$, $S_1 = 18,89 \%$, $A_1 = 4,24 \%$, $F_1 = 3,83 \%$ a $S'_1 = 2,31 \%$, $C_2 = 4,31 \%$, $S_2 = 44,98 \%$, $A_2 = 22,72 \%$, $F_2 = 8,81 \%$ a $S'_2 = 0,64 \%$, $n = 2,1$, $\alpha = 0,2 - 1$ a $\beta = 0,2 - 1$.

Tab. 38 – Hloubky karbonatace po 50 letech pro různé α a β .

Stupeň hydratace popílku β	Stupeň hydratace cementu α				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0,2	44,6	31,5	25,8	22,3	20,0
0,4	45,6	32,2	26,3	22,8	20,4
0,6	46,7	33,0	26,9	23,3	20,9
0,8	47,8	33,8	27,6	23,9	21,4
1	49,0	34,6	28,3	24,5	21,9

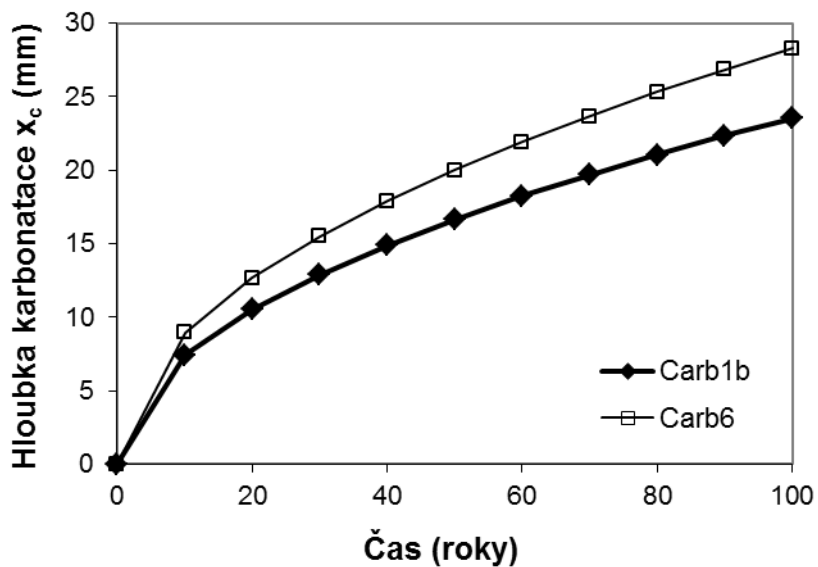
Z výsledků tabulky 38 vyplývá, že hloubka karbonatace roste s rostoucím stupněm hydratace popílku a klesajícím stupněm hydratace cementu, při čemž stupeň hydratace cementu má na hloubku karbonatace mnohem větší vliv. Pro zjištění závislosti byl pro oba parametry zvolen celý rozsah od 0 do 1, jak ale vyplývá z tab. 6, reálné hodnoty pro stupeň hydratace cementu se pohybují mezi 0,8 a 1 a pro stupeň hydratace popílku mezi 0,2 - 0,4. Takovému rozsahu stupňů hydratace pak odpovídají hloubky karbonatace, které už se vzájemně tolik neliší.

13.1.6 Carb6

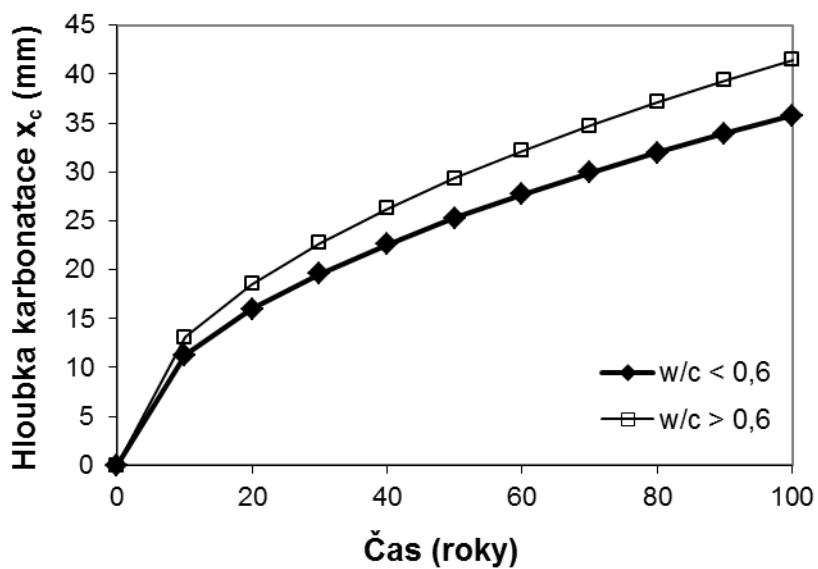
Model Carb6 patří k jednodušším modelům s menším počtem vstupních parametrů určeným pro popis karbonatace betonů připravených ze směsného cementu. Vliv příměsí na průběh karbonatace je u tohoto modelu vyjádřen koeficientem typu cementu, přičemž hodnota koeficientu je doporučena v rozsahu od 0,8 do 2. Nevýhodou modelu je především empirická povaha všech koeficientů.

Srovnání empirického modelu Carb6 s modelem Carb1b, který vychází z fyzikálně-chemické podstaty probíhajících dějů, není jednoduchý úkol. Modely jsou totiž založené na rozdílných základech a využívají odlišné vstupní parametry. Pro ilustrativní účely posloužily následující vstupní parametry: $c_{CO_2} = 800 \text{ mg/m}^3$, $RH = 65 \%$, $c = 370 \text{ kg/m}^3$, $w = 185 \text{ kg/m}^3$, $a_1 = 644 \text{ kg/m}^3$, $a_2 = 262 \text{ kg/m}^3$, $a_3 = 965 \text{ kg/m}^3$, $\rho_c = 3100 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_1} = 2590 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_2} = 2540 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_3} = 2660 \text{ kg/m}^3$ pro Carb1b a $f_c = 35 \text{ MPa}$, $r_{c,a} = 1$, $r_{RH} = 0,55$ a $r_{CO_2} = 1,2$ pro Carb6.

Jak je patrné z obrázku 50, výsledky obou modelů jsou velmi podobné. Koeficient typu cementu $r_{c,a}$ z modelu Carb6 byl při srovnání roven 1, jelikož model Carb1b je určen pro popis karbonatace betonu připraveného z portlandského cementu.



Obr. 50 – Srovnání modelů Carb1b a Carb6.



Obr. 51 – Časový průběh hloubky karbonatace dle modelu Carb7.

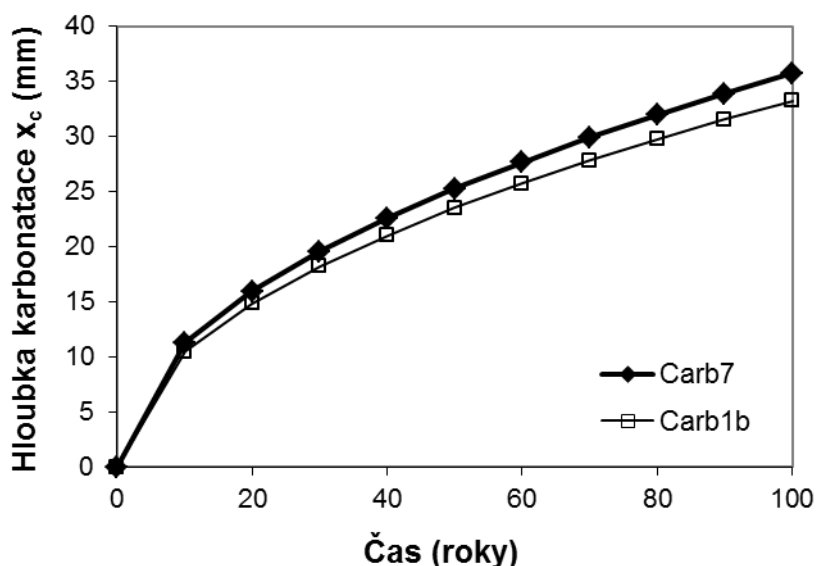
13.1.7 Carb7

Model Carb7 je dalším jednodušším modelem, který je určen pro popis karbonace u betonů připravených ze směsných cementů. Vliv příměsi na průběh karbonatace je vyjádřen koeficientem typu cementu, jehož hodnota se pohybuje od 0,6 po 2,2. Ačkoliv model Carb7 uvažuje velké množství faktorů, které mají vliv na průběh karbonatace, nezahrnuje bohužel vliv okolního prostředí, což je jeho nevýhodou. Další nevýhodou je pak rozdělení typu cementu, kdy např. směsný cement (příměs: popílek - Fly ash blend cement) s koeficientem cementu 1,9 může být v závislosti na složení cementu a popílku popsán v souladu s ČSN EN 197-1 [7] jako portlandský popílkový cement (II/A-V, II/B-V, II/A-W, II/B-W), portlandský směsný cement (II/A-M, II/B-M), pucolánový cement (IV/A, IV/B) nebo směsný cement (V/A, V/B).

Časový průběh hloubky karbonatace vypočítaný modelem Carb7 je pro případ $w/c < 0,6$ i $w/c > 0,6$ znázorněn na obrázku 51. Pro výpočet byla použita následující vstupní data: $c = 313 \text{ kg/m}^3$, $w = 185 \text{ kg/m}^3$ pro $w/c < 0,6$ a $w = 203,45 \text{ kg/m}^3$ pro $w/c > 0,6$, $r_{c,c} = 1$, $r_a = 1$, $r_s = 1$.

Pro srovnání modelu Carb7 s modelem Carb1b byly použity stejné vstupní parametry jako v předchozím případě pro $w/c < 0,6$. Zbývající vstupní hodnoty pro model Carb1b jsou následující: $c_{CO_2} = 800 \text{ mg/m}^3$, $RH = 65 \%$, $a_1 = 644 \text{ kg/m}^3$, $a_2 = 262 \text{ kg/m}^3$, $a_3 = 965 \text{ kg/m}^3$, $\rho_c = 3100 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_1} = 2590 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_2} = 2540 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{a_3} = 2660 \text{ kg/m}^3$.

Ze srovnání hloubek karbonatace vypočítaných oběma modely (viz obr. 52) je patrné, že získané hodnoty jsou velmi podobné.

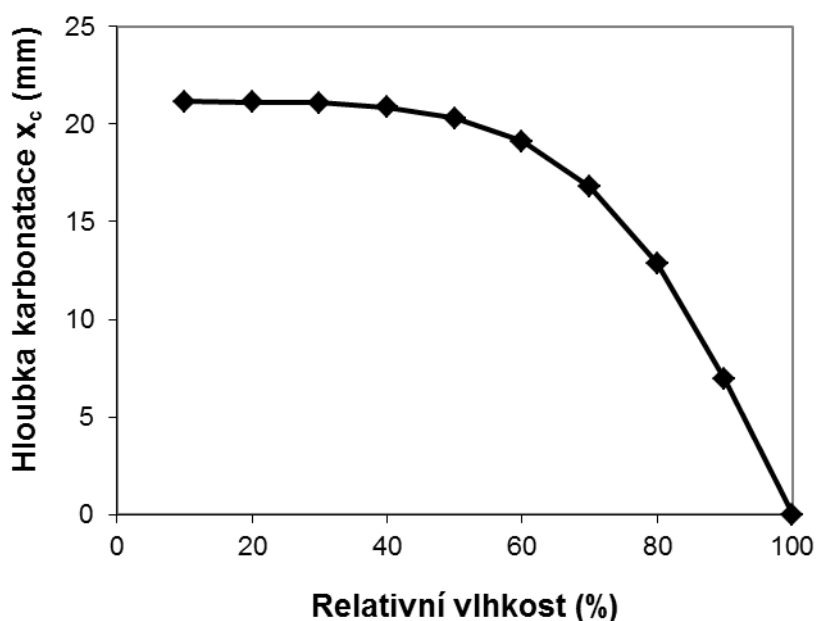


Obr. 52 – Srovnání modelů Carb1b a Carb7.

13.1.8 Carb8

Tento model patří z uvedených modelů k těm komplexnějším a jednotlivé vstupní parametry jsou zde nejpřesněji uvedeny, často včetně odchylky a pravděpodobnostní distribuční funkce – viz kap. 5.2.4.1. Pro použití modelu je však nutné provést speciální karbonatační test za zrychlených karbonatačních podmínek (ACC test) a získat statistická data z nejbližší meteorologické stanice. Získání vstupních parametrů je tedy náročnější, jeho výhodou však je skutečnost, že tento model je zahrnut do mezinárodního dokumentu *fib Model Code 2010* [51].

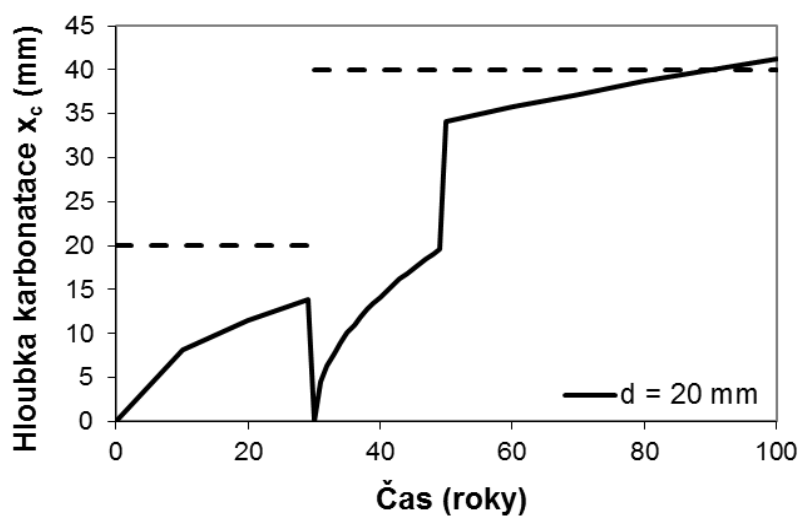
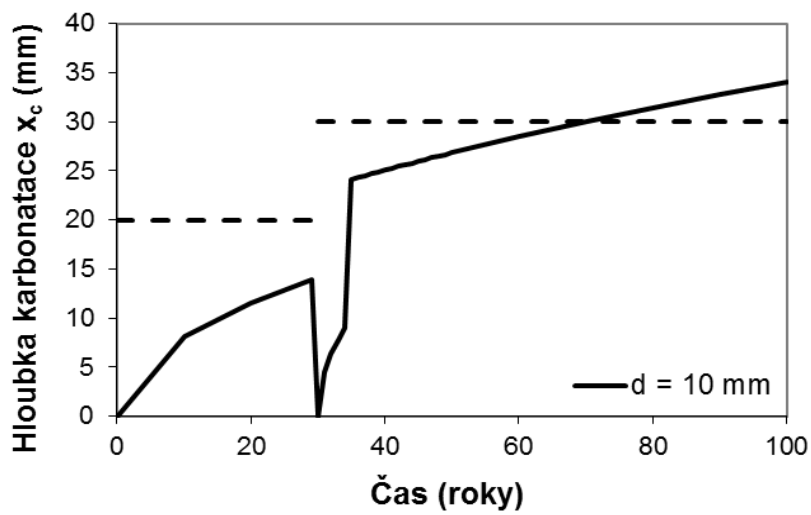
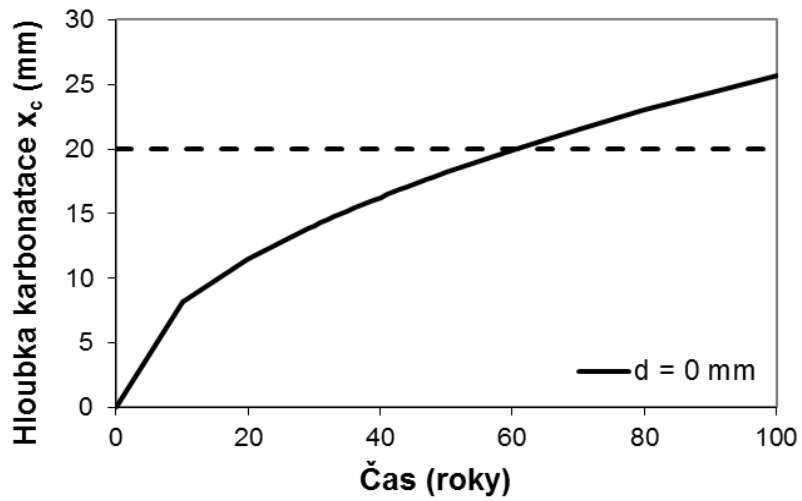
Pro stanovení vlivu relativní vlhkosti okolního vzduchu na hloubku karbonatace po 50 letech dle modelu Carb8 (viz obr. 53) byla použita následující vstupní data: $c_{CO_2} = 800 \text{ mg/m}^3$, $RH = 10 - 100 \%$, $b_c = -0,567$, $t_c = 7$ dní, $R_{ACC,O}^{-1} = 1,34 \cdot 10^{-10} \text{ (m}^2/\text{s)/(kg CO}_2/\text{m}^3)$, $k_t = 1,25$, $\varepsilon_t = 1 \cdot 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)/(kg CO}_2/\text{m}^3)$, $t_w = 40$ dní, $b_w = 0,446$ a $p_{SR} = 0,01$. Závislost hloubky karbonatace na relativní vlhkosti okolí (viz obr. 53) má pro $RH > 50 \%$ podobný průběh jako závislost uváděná Papadakisem (viz obr. 42 – model Carb1a). Jak však bylo zjištěno (viz kap. 12.1), tato závislost neodpovídá získaným experimentálním výsledkům. Model Carb8 pak tudíž neposkytuje pro vyšší hodnoty relativní vlhkosti okolního vzduchu hloubky karbonatace srovnatelné s experimentálně zjištěnými.



Obr. 53 – Vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu na hloubku karbonatace dle modelu Carb8.

13.1.9 Carb9

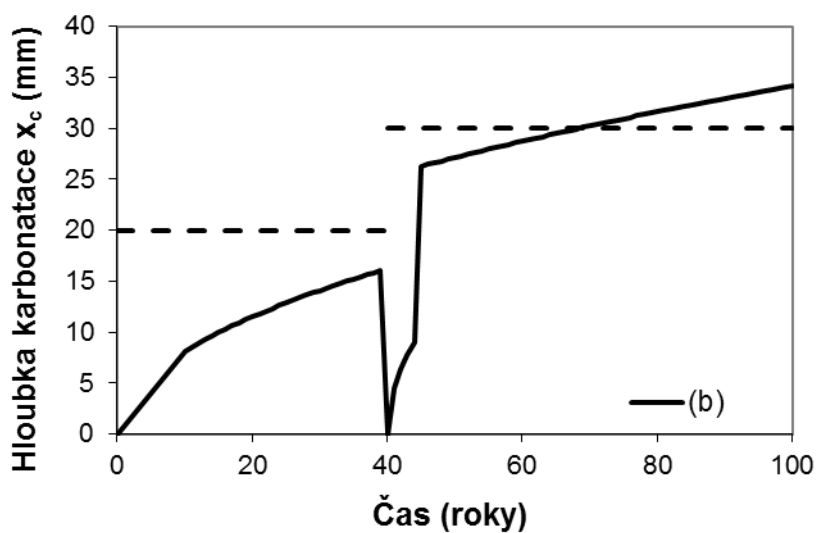
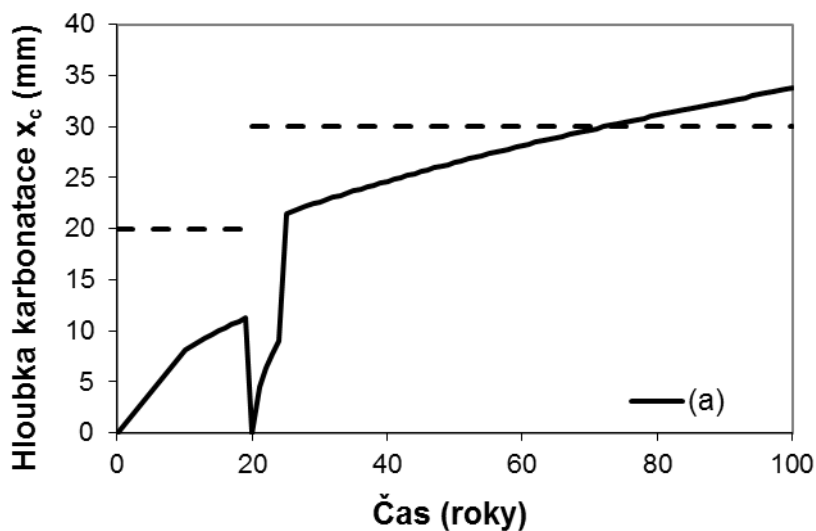
Model Carb9 popisuje průběh karbonatace betonu připraveného z portlandského cementu i v případě, kdy je povrch betonu ošetřen po určitém čase vápenocementovou omítkou. Tento model je stejně jako modely Carb1a,b založen na zákonu zachování hmotnosti CO_2 , $Ca(OH)_2$ a CSH gelů a lze využít zejména při rozhodování o strategii údržby nebo oprav.



Obr. 54 – Časový průběh hloubky karbonatácie dle modelu Carb9 pro beton bez omítky ($d = 0$) a beton opatřený omítkou tloušťky $d = 10$ mm a $d = 20$ mm.

Aplikace vápenocementové omítky na povrch betonu po uplynutí určitého časového úseku je totiž považována za efektivní a ekonomický způsob ochrany před karbonatací. Účinnost této ochrany závisí na kvalitě betonu i omítky, jejich tloušťce a času aplikace omítky. Z tohoto důvodu obsahuje model 34 vstupních parametrů a získání jejich hodnot nemusí být vždy snadné.

Obrázek 54 ukazuje časový průběh hloubky karbonatace dle modelu Carb9 pro beton bez omítky ($d = 0$) a beton opatřený po 30 letech omítkou tloušťky $d = 10$ mm a $d = 20$ mm. Z vyhodnocení průřezů přímek $x_c = c$ (c je krycí vrstva o tloušťce 20 mm) nebo $X_c = c + d$ (kresleno čárkovaně) vyplývá, že po 60 letech dojde k depasivaci výztuže pro $d = 0$, po 70 letech pro $d = 10$ mm a po 90 letech pro $d = 20$ mm. Tloušťka omítky má tedy významný vliv na oddálení depasivace výztuže.



Obr. 55 – Časový průběh hloubky karbonatace dle modelu Carb9 pro beton s časem aplikace omítky $t_m = 20$ let (a) a $t_m = 40$ let (b).

Obrázek 55 pak ukazuje časový průběh hloubky karbonatace v případě, že byla v čase t_m nanesena omítka o tloušťce $d = 10$ mm, při čemž $t_m = 20$ a 40 let. Z vyhodnocení průsečíků přímek $x_c = c$ (c je krycí vrstva o tloušťce 20 mm) nebo $X_c = c + d$ (kresleno čárkovaně) vyplývá, že k depasivaci výztuže dochází v případě $t_m = 20$ let po 72 letech karbonatace a v případě $t_m = 40$ let po 69 letech. Dřívější nanesení omítky tedy oddaluje depasivaci výztuže, vliv doby nanesení omítky však není tak významný jako tloušťka omítky. Vstupní parametry a jejich hodnoty, které byly použity pro výše uvedené parametrické studie, jsou uvedeny v příloze 1.

13.1.10 Vzájemné srovnání modelů

Vzájemné srovnání jednotlivých modelů není snadné, jelikož jednotlivé modely jsou založeny na rozdílných základech a využívají jiné množství a typ vstupních parametrů. Pro ilustrativní účely byl zvolen beton střední kvality připravený z portlandského cementu a uložený za průměrných okolních podmínek. Ze srovnání modelů byl vynechán pouze model Carb5b, který je určen pouze pro betony s vysokým obsahem popílku. Hloubky karbonatace po 50 letech vypočítané pomocí jednotlivých modelů jsou shrnuty v tabulce 39. Hodnoty jednotlivých vstupních parametrů jsou uvedeny v příloze 2.

Tab. 39 – Srovnání karbonatačních modelů.

Model	Hloubka karbonatace (mm)
Carb1a	23,3
Carb1b	22,2
Carb2a	23,1
Carb2b	22,0
Carb3	18,5
Carb4a	30,8
Carb4b	29,1
Carb5a	29,4
Carb6	22,5
Carb7	25,3
Carb8	19,8
Carb9	32,3

13.2 Softwarové nástroje

13.2.1 RC-LifeTime

Pro potřeby navrhování železobetonových konstrukcí na životnost s ohledem na karbonataci byla vyvinuta uživatelsky nenáročná webová aplikace RC-LifeTime. Tento nástroj zahrnuje 3 karbonatační modely – Carb1b, Carb2b a Carb4b – a umožňuje pracovat ve dvou módech: „Concrete Cover Assessment“ – poskytuje závislost hloubky karbonatace x_c na čase t a „Service Life Assessment“ – poskytuje závislost životnosti L na krycí vrstvě a . V obou případech má uživatel možnost zadat všechny vstupní veličiny, jejich rozptyl a vybrat si ze 3 pravděpodobnostních distribučních funkcí (PDF). Vedle jednotlivých vstupních veličin si u všech modelů uživatel může též zvolit faktor neurčitosti modelu ψ , kterým je celý model vynásoben. Tento faktor by měl posloužit ke kompenzaci možných nepřesností a nedokonalostí modelů. V běžných případech lze jako vstupní hodnotu pro tento faktor použít doporučení JCSS (Joint Committee for Structural Safety) – lognormální dvouparametrické PDF se střední hodnotou 1,0 a standardní odchylkou 0,15. V modu „Concrete Cover Assessment“ je možné také zadat tloušťku krytí pro výpočet indexu spolehlivosti β (viz příloha 3), naopak u „Service Life Assessment“ lze vypočítat životnost L pro zadanou tloušťku krytí a spolehlivost β (viz příloha 4). Výsledky výpočtů jsou prezentovány numericky formou přehledné tabulky a v případě modelu Carb1b také graficky (viz příloha 3 a 4).

Tak např. pro vstupní data uvedená v příloze 3 lze z tabulky výsledků (spodní obrázek) vyčíst, že pro stáří 50 let se dá očekávat průměrná hloubka karbonatace 31,6 mm s rozptylem popsaným variačním koeficientem (COV = směrodatná odchylka/střední hodnota) o hodnotě 17 %. Při krytí výztuže 30 mm vychází pak index spolehlivosti $\beta = 0,19$.

U všech modelů lze také vypočítat přibližný odhad emisí CO_2 odpovídající navržené směsi a orientační cena cementu odpovídající 1 m³ betonové směsi. Např. vstupním datům uvedeným v příloze 3 bude odpovídat 304 ± 5 kg CO_2/m^3 směsi pro výrobu betonu a cena cementu bude přibližně 783 Kč/m³ směsi.

13.2.2 FReET-D

FReET-D je akronym pro „Feasible Reliability Engineering Tool for Degradation effects assessment“. Byl vytvořen jako přidružený modul pravděpodobnostního softwaru FReET [77,78] pro statistickou, citlivostní a spolehlivostní analýzu inženýrských problémů. Nástroje nynější verze FReETu jsou rozděleny do tří částí: (i) stochastický model zahrnující statistickou korelaci, (ii) generování náhodných veličin a (iii) výsledky.

Degradační modul FReET-D je zakomponován do programu FReET pomocí předpřipravených souborů file.*fre* odpovídajících vždy jedné z kategorií degradačních modelů a sady podprogramů ve formě *dll* funkcí odpovídajících jednotlivým degradačním modelům. Implementovány jsou 4 různé kategorie degradačních modelů: (1) karbonatace, (2) průnik chloridů, (3) koroze výztuže a (4) zmrazování. FReET-D tedy umožňuje určit vliv těchto degradačních jevů na životnost železobetonových konstrukcí. U karbonatace zahrnuje FReET-D všechny karbonatační modely Carb1 – Carb9.

Jednotlivé modely byly upraveny tak, že všechny vstupní veličiny včetně tloušťky betonové krycí vrstvy i faktoru neurčitosti modelu mohou být zadány jako náhodné veličiny pomocí středních hodnot, směrodatných odchylek, zároveň je možné zvolit, jakému ze 28 rozložení pravděpodobnosti aplikovaných v programu každá veličina podléhá, resp. zda bude uvažována pouze jako deterministická (viz příloha 5 – horní obrázek). V důsledku toho je také náhodně proměnná výsledná veličina, která je zde funkcí vektoru jednotlivých náhodně proměnných vstupů a času. Dále je rovněž možná parametrizace jedné ze vstupních veličin. Pro generování realizací náhodných veličin lze následně použít buď metodu Monte Carlo nebo Latin Hypercube Sampling [79]. Jako výsledek lze získat následující parametry: statistické charakteristiky výstupních veličin, citlivostní analýzu, pomocí které může být stanovena míra statistické citlivosti výstupní veličiny vzhledem k jednotlivým náhodně proměnným vstupům, a odhad indexu spolehlivosti β a teoretické pravděpodobnosti poruchy P_f . Pro výstupní veličinu je též automaticky určena nejbližší pravděpodobnostní distribuční funkce pomocí Kolmogorova-Smirnova testu (viz příloha 5 - spodní obrázek). U karbonatačních modelů si uživatel jako výstupní veličinu může vybrat buď hloubku karbonatace v určitém čase, nebo iniciační čas odpovídající určitému krytí výztuže.

Degradační modely jsou časově závislé matematické funkce, které modelují průměrný nárůst degradace v čase. Tyto modely jsou funkcí mnoha materiálových, geometrických a environmentálních parametrů. Hlavní kritéria pro správný výběr degradačního modelu pro daný specifický případ jsou např. volba relevantního mezního stavu, typ expozičních podmínek, dostupnost statistických dat nebo testovacích metod, či požadovaná přesnost výpočtu.

Implementované degradační modely mohou sloužit mj. pro ověření životnosti a relevantní míry spolehlivosti nově navrhované nebo stávající konstrukce, příp. pro plánování údržby či oprav. Uživatel může vytvářet různé mezní podmínky, např. “*hloubka karbonatace = tloušťka krycí vrstvy*”, což ohraničuje iniciační čas – depasivaci výztuže.

K tomuto softwarovému nástroji byl vytvořen teoretický a uživatelský manuál, u nichž jsem spoluautorkou [80,81].

13.2.3 Využití softwarových nástrojů

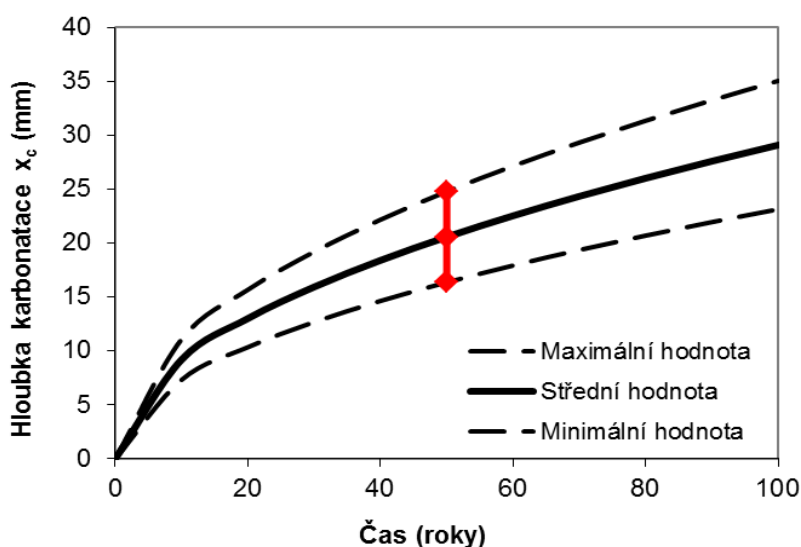
Výhodou uvedených softwarových nástrojů je možnost zadávání jednotlivých vstupů jako náhodných veličin pomocí středních hodnot, směrodatných odchylek a pravděpodobnostní distribuční funkce, což mnohem lépe odpovídá realitě. Náhodně proměnná je pak i výsledná veličina. Kromě statistických údajů poskytují programy též hodnoty indexu spolehlivosti β , který vyjadřuje u RC-Life Time pravděpodobnost, se kterou by pro požadovanou životnost hloubka karbonatace mohla přesáhnout tloušťku krycí betonové vrstvy (u FReETu-D pak záleží na zvolené mezní podmínce). Na následujících příkladech budou ukázány některé parametrické studie s využitím předností těchto programů.

13.2.3.1 Časový průběh hloubky karbonatace

Pro časový průběh hloubky karbonatace v případě cementu CEM II/B-V s 30 % křemičitého popílku byl využit model Carb4b. Pro výpočet byly použity vstupní parametry, jejichž charakteristiky jsou shrnuty v tabulce 40. V tabulce 40 je uvedena rovněž tloušťka krycí vrstvy, která je potřebná k výpočtu indexu spolehlivosti β .

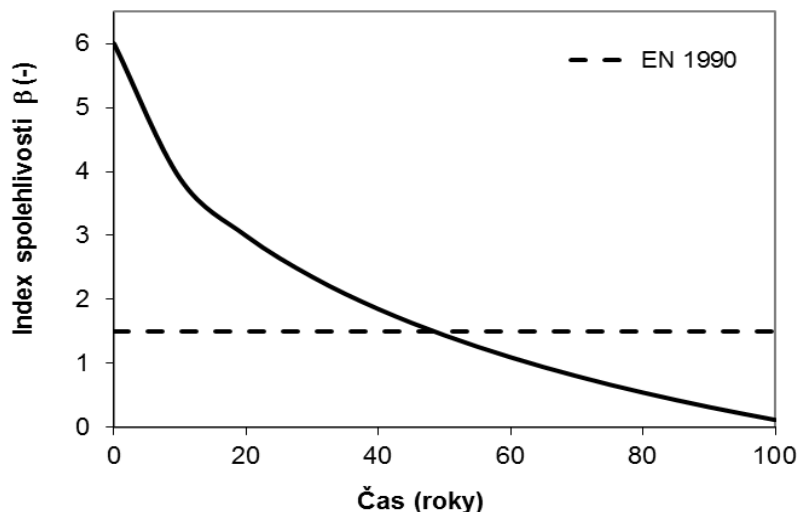
Tab. 40 – Vstupní parametry pro časový průběh hloubky karbonatace dle modelu Carb4b.

Vstupní parametr	Jednotka	Střední hodnota	COV	PDF
Faktor neurčitosti modelu	-	1	0,15	Lognormální (2par)
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	mg/m ³	800	0,06	Normální
Relativní vlhkost okolního vzduchu	%	65	0,15	Normální
Množství cementu CEM I	kg/m ³	288	0,03	Normální
Množství vody	kg/m ³	175	0,03	Normální
Množství příměsi	kg/m ³	124	0,03	Normální
Objemová hmotnost cementu	kg/m ³	3100	0,01	Normální
Hodnota vyjadřující účinnost příměsi	-	0,5		Deterministické
Krycí vrstva	mm	30	0,17	Lognormální (2par)



Obr. 56 – Časový průběh hloubky karbonatace dle modelu Carb4b.

Závislost hloubky karbonatace v čase zjištěná statistickým modelováním pomocí náhodných veličin je znázorněna na obrázku 56. Tento tzv. plně pravděpodobnostní přístup může postihnout reálné chování mnohem lépe. Zjištěné hodnoty hloubky karbonatace mají rozptýl popsaný variačním koeficientem o hodnotě 20,5 %, tj. např. pro stáří betonu 50 let spadá přibližně 70 % možných realizací hloubky karbonatace do intervalu mezi 16,4 a 24,8 mm – viz obr. 56. U výsledné hloubky karbonatace je typ rozdělení pravděpodobnosti nejbližší rozdělení Gamma (2par).



Obr. 57 – Časový průběh indexu spolehlivosti β .

Dále byl stanoven index spolehlivosti β , přičemž mezní podmínka byla zvolena tak, že tento index vyjadřuje pravděpodobnost, se kterou hloubka karbonatace přesáhne tloušťku krycí vrstvy. Ačkoliv střední hodnota hloubky karbonatace nedosáhne tloušťky krycí vrstvy ani pro životnost 100 let, index spolehlivosti např. pro často uváděnou referenční dobu 50 let byl stanoven $\beta = 1,44$. Hodnotě $\beta = 1,5$ požadované dle EN 1990 [56] pro mezní stav použitelnosti odpovídá iniciační čas 48 let – viz obr. 57. Z uvedeného výpočtu je tedy zřetelné, jak zavádějící by mohlo být opírat se jenom o deterministické výpočty. V případě potřeby splnění spolehlivosti by mohl projektant navrhnout větší krytí či jinou kvalitu betonu. V projekční praxi se takto ale postupuje zatím jen zřídka.

Emise CO_2 v tomto případě odpovídá $279 \pm 8 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ navržené směsi pro výrobu betonu.

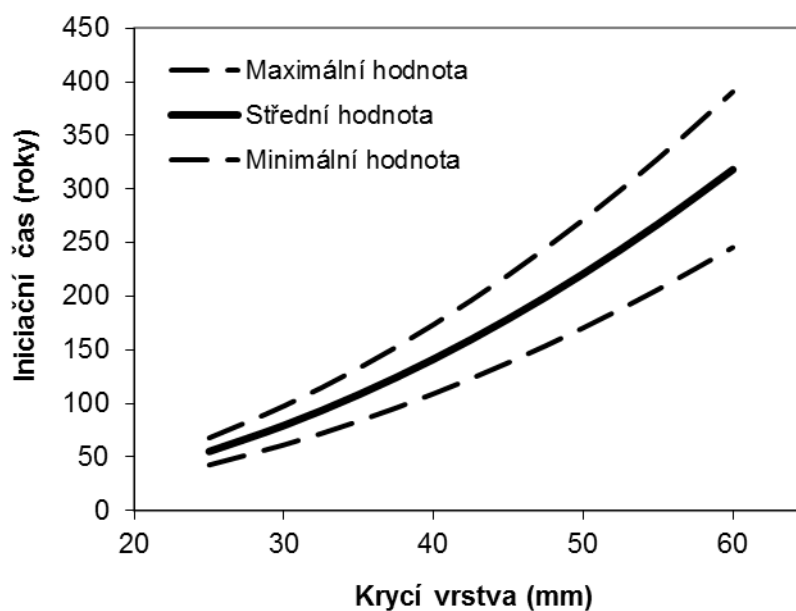
13.2.3.2 Vliv tloušťky krycí vrstvy na délku iniciační periody

V této kapitole je uvedeno studium vlivu tloušťky krycí vrstvy a na délku iniciačního času t_i , kdy je dosaženo mezního stavu životnosti depasivací výztuže. Hodnoty vstupních parametrů včetně rozdělení pravděpodobnosti jsou shrnuty v tabulce 41. K hodnocení vlivu a na t_i byl jako nejvhodnější vybrán model Carb1b.

Stanovená závislost iniciačního času na tloušťce krycí vrstvy je znázorněna na obr. 58. Např. pro krycí vrstvu $a = 30 \text{ mm}$ byla stanovena střední hodnota iniciačního času $t_i = 79 \text{ let}$ s variačním koeficientem $\text{COV} = 22,5 \%$. U získaného iniciačního času je typ rozdělení pravděpodobnosti nejbližší rozdělení Lognormálnímu (2par). Z obrázku 58 vyplývá, že vzrůstající tloušťka krycí vrstvy výrazně prodlužuje délku iniciačního času – krycí vrstvě 25 mm odpovídá iniciační čas 55 let, krycí vrstvě 60 mm pak 318 let.

Tab. 41 – Vstupní parametry pro časový průběh hloubky karbonatace dle modelu Carb4b.

Vstupní parametr	Jednotka	Střední hodnota	COV	PDF
Faktor neurčitosti modelu	-	1	0,15	Lognormální (2par)
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	mg/m ³	800	0,06	Normální
Relativní vlhkost okolního vzduchu	%	70	0,07	Beta (a = 0, b = 100)
Množství cementu CEM I	kg/m ³	313	0,03	Normální
Množství vody	kg/m ³	185	0,03	Normální
Množství kameniva I	kg/m ³	847	0,03	Normální
Množství kameniva II	kg/m ³	386	0,03	Normální
Množství kameniva III	kg/m ³	625	0,03	Normální
Obj. hmotnost cementu	kg/m ³	3100	0,02	Normální
Obj. hmotnost kameniva I	kg/m ³	2590	0,02	Normální
Obj. hmotnost kameniva II	kg/m ³	2540	0,02	Normální
Obj. hmotnost kameniva III	kg/m ³	2660	0,02	Normální



Obr. 58 – Vliv krycí vrstvy na délku iničiační periody dle modelu Carb1b.

13.2.3.3 Vliv typu cementu

Podle nedávných odhadů je cementářský průmysl původcem asi 7 % celosvětových emisí CO₂, které jsou spojovány zejména s výrobou portlandského cementu. Vzniká tedy snaha omezit tyto emise. Jednou z cest je využívání průmyslových odpadů (popílek, křemičité úlety a struska) jako příměsí do cementů, což vede k omezení množství použitého portlandského cementu. Při použití těchto příměsí však nutno brát v úvahu jejich vliv na mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu.

Tato studie tedy ilustruje vliv částečného nahrazení portlandského cementu křemičitým popílkem z vysokoteplotního spalování na proces karbonatace. Sada vstupních parametrů je dána v tabulce 42. Hodnota k byla pro křemičitý popílek zvolena v souladu s Papadakisem experimentálně zjištěnou hodnotou pro tuto příměs ($k = 0,5$). Střední hodnoty v závorkách slouží pro srovnání mezi portlandským cementem bez příměsí (CEM I) a cementem s přídatkem 30 % křemičitého popílku (CEM II/B-V). Množství vody u cementu CEM II/B-V bylo upraveno tak, aby se efektivní vodní součinitel (viz vztah (51)) rovnal vodnímu součiniteli u CEM I ($w/c = 0,4$). K stanovení hloubky karbonatace pro různé expoziční doby byl vybrán pro cement CEM I model Carb1b a pro cement CEM IIB-V model Carb4b.

Tab. 42 - Vstupní data pro vliv typu cementu.

Vstupní parametr	Jednotka	Střední hodnota	COV	PDF
Faktor neurčitosti modelu	-	1	0,15	Lognormální (2par)
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	mg/m ³	800	0,12	Normální
Relativní vlhkost okolního vzduchu	%	70	0,07	Beta (a = 0, b = 100)
Množství cementu CEM I	kg/m ³	400 (280)	0,03	Normální
Množství vody	kg/m ³	160 (136)	0,03	Normální
Množství příměsí	kg/m ³	120	0,03	Normální
Hodnota vyjadřující účinnost příměsí	-	0,5	-	Deterministické
Množství kameniva I	kg/m ³	847	0,03	Normální
Množství kameniva II	kg/m ³	386	0,03	Normální
Množství kameniva III	kg/m ³	625	0,03	Normální
Obj. hmotnost cementu	kg/m ³	3100	0,02	Normální
Obj. hmotnost kameniva I	kg/m ³	2590	0,02	Normální
Obj. hmotnost kameniva II	kg/m ³	2540	0,02	Normální
Obj. hmotnost kameniva III	kg/m ³	2660	0,02	Normální
Krycí vrstva	mm	30	0,25	Lognormální (2par)

Tab. 43 - Srovnání predikované hloubky karbonatace pro různé expoziční časy.

Expoziční doba (roky)	Hloubka karbonatace (mm]					
	CEM I			CEM II/B-V		
	Min. hodnota	Stř. hodnota	Max. hodnota	Min. hodnota	Stř. hodnota	Max. hodnota
0	0	0	0	0	0	0
10	3,18	4,13	5,09	3,97	5,12	6,26
20	4,50	5,85	7,19	5,61	7,23	8,86
30	5,51	7,16	8,81	6,87	8,86	10,85
40	6,37	8,27	10,17	7,93	10,23	12,53
50	7,12	9,25	11,38	8,87	11,44	14,01
60	7,80	10,13	12,46	9,72	12,53	15,34
70	8,42	10,94	13,46	10,50	13,54	16,57
80	9,00	11,70	14,39	11,22	14,47	17,72
90	9,55	12,41	15,26	11,90	15,35	18,79
100	10,06	13,08	16,09	12,55	16,18	19,81

Rozdíly ve zjištěné hloubce karbonatace u betonu připraveného z cementu typu CEM I a CEM II/B-V nejsou příliš výrazné - viz tabulka 43. Pro případ betonu s CEM I jsou predikované hodnoty hloubky karbonatace mírně menší. Zjištěné hodnoty hloubky karbonatace mají v případě cementu CEM I rozptyl popsán variačním koeficientem o hodnotě 23,0 % a v případě cementu CEM II/B-V o hodnotě 22,6 %. U získané hloubky karbonatace je typ rozdělení pravděpodobnosti u cementu CEM I nejbližší rozdělení Lognormálnímu (3par) a u cementu CEM II/B-V pak rozdělení Gamma (2par). Stanovené indexy spolehlivosti β , které vyjadřují pravděpodobnost dosažení krycí vrstvy hloubkou karbonatace, pro expoziční dobu 50 let v obou případech splňují hodnotu požadovanou dle EN 1990 [56] - $\beta = 1,5$. V případě cementu CEM I je $\beta = 2,7$ a v případě cementu CEM II/B-V pak $\beta = 2,3$.

V obou případech byly stanoveny emise CO₂ vztahované na 1 m³ jednotlivých betonových směsí – pro cement CEM I je to 388 ± 12 kg CO₂ a pro cement CEM II/B-V 272 ± 8 kg CO₂. Z uvedeného vyplývá, že ačkoliv nahrazení portlandského cementu 30 % křemičitého popílku nevede k výraznému zvýšení hloubky karbonatace, emise CO₂ uvolněné při výrobě potřebného množství portlandského cementu v případě použití CEM II/B-V výrazně poklesnou.

13.2.3.4 Posouzení spolehlivosti pro betonové směsi s obsahem křemičitého popílku

V této kapitole je s použitím pravděpodobnostního přístupu a s využitím modelu Carb4b zkoumáno posouzení spolehlivosti směsí pro výrobu betonu s obsahem křemičitého popílku, jejichž složení splňuje všechny mezní požadavky doporučené Eurokódy a rovněž splňuje

všechny požadavky týkající se koncepce *k*-hodnoty zahrnuté v kapitole 5.2.5.2 normy EN 206-1 [10].

Tab. 44 – Vstupní data pro posouzení spolehlivosti.

Vstupní parametr	Jednotka	Střední hodnota	COV	PDF
Faktor neurčitosti modelu	-	1	0,15	Lognormální (2par)
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	mg/m ³	800	0,06	Normální
Relativní vlhkost okolního vzduchu	%	75	0,11	Normální
Množství cementu CEM I	kg/m ³	a, b) 270 c, d) 315 e, f) 360 g, h) 405	0,03	Normální
Množství vody	kg/m ³	a) 150 b) 155 c) 174 d) 180 e) 199 f) 205 g) 224 h) 231	0,03	Normální
Množství příměsi	kg/m ³	a, b) 30 c, d) 35 e, f) 40 g, h) 45	0,03	Normální
Objemová hmotnost cementu	kg/m ³	3100	0,01	Normální
Hodnota vyjadřující účinnost příměsi	-	a, c, e, g) 0,2 b, d, f, h) 0,5		Deterministické
Krycí vrstva	mm	35	0,14	Lognormální (2par)

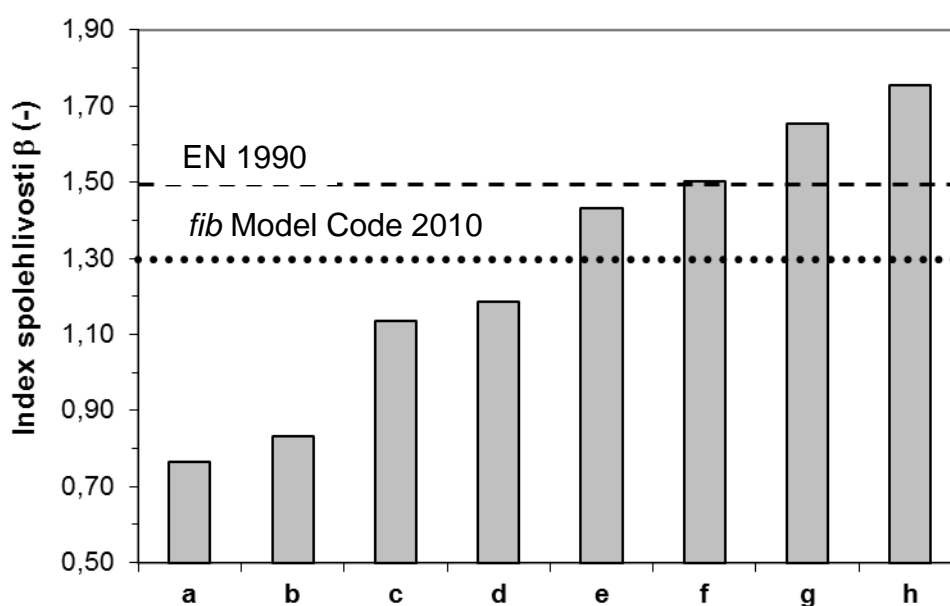
K parametrické studii byl zvolen cement CEM II/A-V s obsahem 10 % křemičitého popílku. Tento typ cementu může být dle tabulky F.2 normy EN 206-1 [10] použitelný pro všechny stupně vlivu prostředí pro případ koroze způsobené karbonatací (XC1 – XC4) – více viz kap. 7.1. Pro tuto parametrickou studii byl zvolen stupeň vlivu prostředí XC2 (mokré, občas suché

prostředí), kterému podle tabulky F.1 normy EN 206-1 [10] přísluší následující doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu – maximální vodní součinitel 0,60 a minimální obsah cementu 280 kg/m^3 – viz tab. 11. Dle normy EN 1992-1 [52] byla zvolena strukturní třída S4 (navrhovaná životnost 50 let, tloušťka krytí 35 mm). Pro parametrickou studii byly použity střídavě k -hodnoty 0,2 (dle normy EN 206-1 [10]) a 0,5 (experimentálně určená hodnota Papadakisem pro křemičitý popílek [73]). Množství vody ve všech případech parametrické studie je zvoleno tak, aby efektivní vodní součinitel byl 0,54. Všechny vstupní parametry jsou shrnuty v tabulce 44.

V případě použití popílku jako příměsi musí být dle kapitoly 5.2.5.2.2. dle normy EN 206-1 splněny ještě následující požadavky:

- Maximální množství popílku musí vyhovovat požadavku hmotnostního poměru popílek/cement $\leq 0,33$.
- Minimální obsah cementu požadovaný pro příslušný stupeň vlivu prostředí (v našem případě 280 kg/m^3 – viz výše) se může snížit maximálně o množství $k \times$ (minimální obsah cementu – 200 kg/m^3). V případě $k = 0,2$ je tedy minimální množství cementu 264 kg/m^3 a v případě $k = 0,5$ je to 240 kg/m^3 .
- Množství (cement + popílek) nesmí být menší než je minimální obsah cementu pro příslušný stupeň vlivu prostředí (v našem případě 280 kg/m^3).
- Vodní součinitel je nahrazen efektivním vodním součinitelem $(w/c)_{\text{eff}} = \text{voda}/(\text{cement} + k \times \text{popílek})$ a musí být v našem případě $\leq 0,60$.

Všechny uvedené požadavky jsou splněny ve všech případech uvedené parametrické studie.



Obr. 59 – Indexy spolehlivosti β pro dobu expozice 50 let pro možnosti a) – h) ve srovnání s hodnotami doporučenými EN 1990 ($\beta > 1,5$) a fib Model Codem 2010 ($\beta \geq 1,3$).

Vypočítané hloubky karbonatace se pro dobu expozice 50 let pohybují od 29,1 do 23,1 mm pro možnosti a) až h) s variačním koeficientem o hodnotě 20,3 – 20,6 %. Index spolehlivosti β , vyjadřující pravděpodobnost dosažení krycí vrstvy karbonatace, je pro dobu expozice

50 let znázorněn pro všechny možnosti na obrázku 59. Ačkoliv složení všech směsí pro výrobu betonu vyhovovalo všem mezním hodnotám určeným Eurokódou a rovněž všem požadavkům koncepce k -hodnoty v normě EN 206-1 [10] pro stupeň vlivu prostředí XC2 a strukturní třídu S4, pouze možnosti f), g) a h) tohoto ilustrativního příkladu splňují hodnotu požadovanou dle EN 1990 [56] - $\beta = 1,5$ a možnosti e) – h) hodnotu $\beta = 1,3$ danou *fib Model Codem* 2010 [51]. V případě možností s využitím $k = 0,5$ (b, d, f, h) dosahují odpovídající hodnoty β vždy mírně lepších hodnot v porovnání s $k = 0,2$. Z uvedeného vyplývá, že doporučení dané normou EN 206-1 zasluhuje jisté ověření a lepší nastavení. Je však nutné poznamenat, že uvedená studie je pouze ilustrativní a zahrnuje pouze cement CEM II/A-V. Výsledky tedy nemohou být zobecněny.

V návrhu složení betonu z hlediska trvanlivosti (příloha J normy EN 206-1 [10]) se uvádí, že jednou z možných metod je použití analytických modelů, které byly porovnány s údaji ze zkoušek, reprezentujících skutečné podmínky v praxi. Uvedené softwarové nástroje tedy mohou po srovnání s experimenty sloužit pro tyto účely.

13.3 Srovnání hodnot hloubek karbonatace dle modelů s výsledky experimentů

Ověření správnosti numerického modelu a rovněž vhodné k -hodnoty je možné dosáhnout jen porovnáním s výsledky laboratorních experimentů, nebo ještě lépe s dostatečně věrohodnými výsledky měření karbonatace na existujících konstrukcích v reálném prostředí. Vypočítané hodnoty hloubky karbonatace byly získány buď pomocí softwarového nástroje RC LifeTime (viz kap. 13.2.1), nebo FReET-D (viz kap. 13.2.2).

13.3.1 Srovnání s měřením hloubky karbonatace na chladicí věži

Pro verifikaci modelů Carb1a,b, Carb2a,b a Carb8 bylo využito poměrně podrobné měření hloubky karbonatace na vnějším i vnitřním povrchu 19,1 let staré železobetonové chladicí věže, provedené v roce 1994 Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze -viz též [82]. Na věži o výšce 206 m byla hloubka karbonatace zjištěna pomocí fenolftaleinového testu u 75 vývrtů. Současně byl vizuálně posouzen rozsah koroze výztuže a rozdělen do tří skupin. Byla tak získána relativně spolehlivá statistická data. Rovněž byla na místě zjištěna pevnost v tlaku o průměrné hodnotě 34 MPa s variačním koeficientem 28,3 % pro vnější povrch a 14,3 % pro vnitřní povrch.

Vstupní data použitá pro výpočet hloubky karbonatace pro jednotlivé modely jsou shrnuta v příloze 6. Srovnání vypočtených hodnot hloubky karbonatace s experimentálně naměřenými je uvedeno v tabulce 45. Z tabulky vyplývá, že modely Carb1a a Carb2a, kde byla ponechána funkce $f(RH)$, popisující vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu RH , v původním tvaru (viz obr. 42 – Carb1a), poskytují výrazně nižší hodnoty hloubky karbonatace než experimentálně určené. Nejvíce je to patrné u hloubek karbonatace určených u vnitřního povrchu věže, kde byla $RH = 93$ %. K mnohem lepší shodě vypočítaných a experimentálně určených hodnot dochází u modelů Carb1b a Carb2b, kde byla funkce $f(RH)$ nahrazena alternativní funkcí založenou na kombinaci experimentálních dat (viz kap. 13.1.1., obr. 42 – Carb1b).

Tab. 45 – Srovnání vypočítaných a naměřených hloubek karbonatace.

	Vnější povrch (RH = 70%)		Vnitřní povrch (RH = 93%)	
	Střední hodnota (mm)	COV (%)	Střední hodnota (mm)	COV (%)
Carb1a	8,2	25	1,9	44
Carb1b	12,7	18	8,3	51
Carb2a	7,7	27	1,8	46
Carb2b	11,9	21	7,7	53
Carb8	10,8	48	4,4	60
Experimentálně určené [82]	14,9	56	8	29

Rovněž model Carb8 poskytuje nižší hodnoty ve srovnání s experimentálně zjištěnými. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že i u tohoto modelu závislost hloubky karbonatace na relativní vlhkosti okolí neodpovídá experimentům – viz obr. 53. Dalším důvodem je pak problematické zjišťování některých vstupních parametrů, jako jsou průměrný počet deštivých dnů za rok a pravděpodobnost směru deště. Také určení doby ošetřování betonu je u chladicí věže sporné.

Z uvedeného vyplývá, že široký výběr modelů je užitečný zejména díky problémům s dostupností statistických dat pro vstupní veličiny některých modelů. V uvedeném příkladě došlo k největší shodě s experimentálně zjištěnými hloubkami karbonatace v případě modelů Carb1b a Carb2b, u ostatních modelů došlo zejména v případě vnitřního povrchu věže k podhodnocení hloubky karbonatace, a to zejména u modelů Carb1a a Carb2a.

13.3.2 Srovnání s měřením hloubky karbonatace na televizní věži

Pro další srovnání výsledků modelů Carb2b a Carb8 s experimenty byly využity hloubky karbonatace zjištěné na televizní věži v Mnichově postavené před 33 lety. Stanovení hloubky karbonatace bylo prováděno na vzorcích odebraných ze všech stran 290,95 m vysoké věže v různých výškách (1, 8 a 28 m nad zemí). Tato věž je vystavena atmosféře obsahující běžné množství CO₂ (přítomnost chloridů je nepravděpodobná), proto zde dochází k depasivaci výztuže především působením karbonatace (více viz [83]). Vstupní parametry pro modely Carb2b a Carb8 jsou shrnuty v tabulce 46. Model Carb8 byl zvolen, protože byla k dispozici většina vstupních dat včetně pravděpodobnosti směru deště. Bohužel však nebylo dostupných mnoho informací o složení použité směsi pro výrobu betonu (pouze množství cementu a vodní součinitel), proto byl pro orientační srovnání použit model Carb2b.

Tab. 46 – Vstupní data pro srovnání vypočítaných a experimentálně určených hloubek karbonatace.

Veličina	Jednotka	Střední hodnota	COV	PDF	Model: Carb
Faktor neurčitosti modelu	-	1	0,15	Lognormální (2 par)	2b, 8
Čas	roky	33	-	Deterministické	2b, 8
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	mg/m ³	820	0,12	Normální	2b, 8
Relativní vlhkost okolního vzduchu	%	76,9	0,16	Beta (a = 0, b = 100)	2b, 8
Regresní exponent funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu k_c	-	-0,567	0,04	Normální	8
Doba ošetřování	days	1	-	Deterministické	8
Inverzní efektivní odolnost proti karbonatace pro suchý beton určená ACC-testem	(m ² /s)/ (kg/m ³)	$6,8 \cdot 10^{-11}$	0,45	Normální	8
Regresní parametr funkce $R_{NAC;0}^{-1}$	-	1,25	0,28	Normální	8
Korekční člen funkce $R_{NAC;0}^{-1}$	(m ² /s)/ (kg/m ³)	$1,0 \cdot 10^{-11}$	0,15	Normální	8
Průměrný počet deštivých dnů za rok	dny	99,6	-	Deterministické	8
Pravděpodobnost směru deště	-	V: 0,014 S: 0,021 Z: 0,375 J: 0,037	-	Deterministické	8
Regresní exponent funkce vlivu počasí w	-	0,446	0,36	Normální	8
Množství cementu CEM I	kg/m ³	320	0,03	Normální	2b
Množství vody	kg/m ³	160	0,03	Normální	2b

V tab. 47 jsou uvedeny výsledky srovnání experimentálních a modelem Carb8 vypočtených hodnot hloubky karbonatace, ze kterých vyplývá, že tyto hodnoty jsou v poměrně dobré shodě, ačkoliv hloubky karbonatace byly stanoveny pomocí roztoku fenolftaleinu. Při tomto stanovení dochází totiž často k nepřesnostem.

Tab. 47 – Hloubka karbonatace (mm) u televizní věže v Mnichově (stáří 33 let).

	Východ	Sever	Západ	Jih
Naměřená experimentálně	10,6	3,0	2,8	4,1
Carb8	11,1	10,6	5,2	9,8

Jedním z důvodů odlišnosti hodnot může být částečně skutečnost, že hodnoty některých vstupních parametrů byly pouze přibližně odhadnuty (byl volen konzervativní přístup – tj. na straně bezpečnosti), dalším důvodem je potom kruhová geometrie věže. Proces karbonatace totiž závisí mj. na vlhkosti betonu v krycí vrstvě, která je velmi ovlivněna pravděpodobností směru deště lišící se pro různé zeměpisné orientace. V tomto případě směřuje vítr především ze západu na východ. Pravděpodobnost směru deště z východní strany je tedy malá (1,4 %), což vede k větší hodnotě hloubky karbonatace u takto orientované strany věže. Naopak pravděpodobnost směru deště ze západní strany je mnohem větší (37,5 %), což v souladu s naměřenými hodnotami potlačuje průběh karbonatace. Větší rozdíly byly zjištěny v případě severní a jižní strany věže, což je způsobeno pravděpodobně již zmiňovanou kruhovou geometrií. Pravděpodobnost směru deště je reprezentována průměrným rozložením směru větru při dešti a již neuvažuje vliv geometrie stavby na směr proudu větru. U věže s kruhovou geometrií je pouze jedna strana chráněna před deštěm, ostatní návětrné strany jsou dešti vystaveny. To znamená, že televizní věž má v principu tři strany vystavené větru, popř. dešti (orientované na západ, sever a jih) a pouze jednu stranu chráněnou před deštěm (orientovanou na východ). Pokud tento fakt uvážíme, vypočítané hodnoty již mnohem lépe odpovídají těm naměřeným.

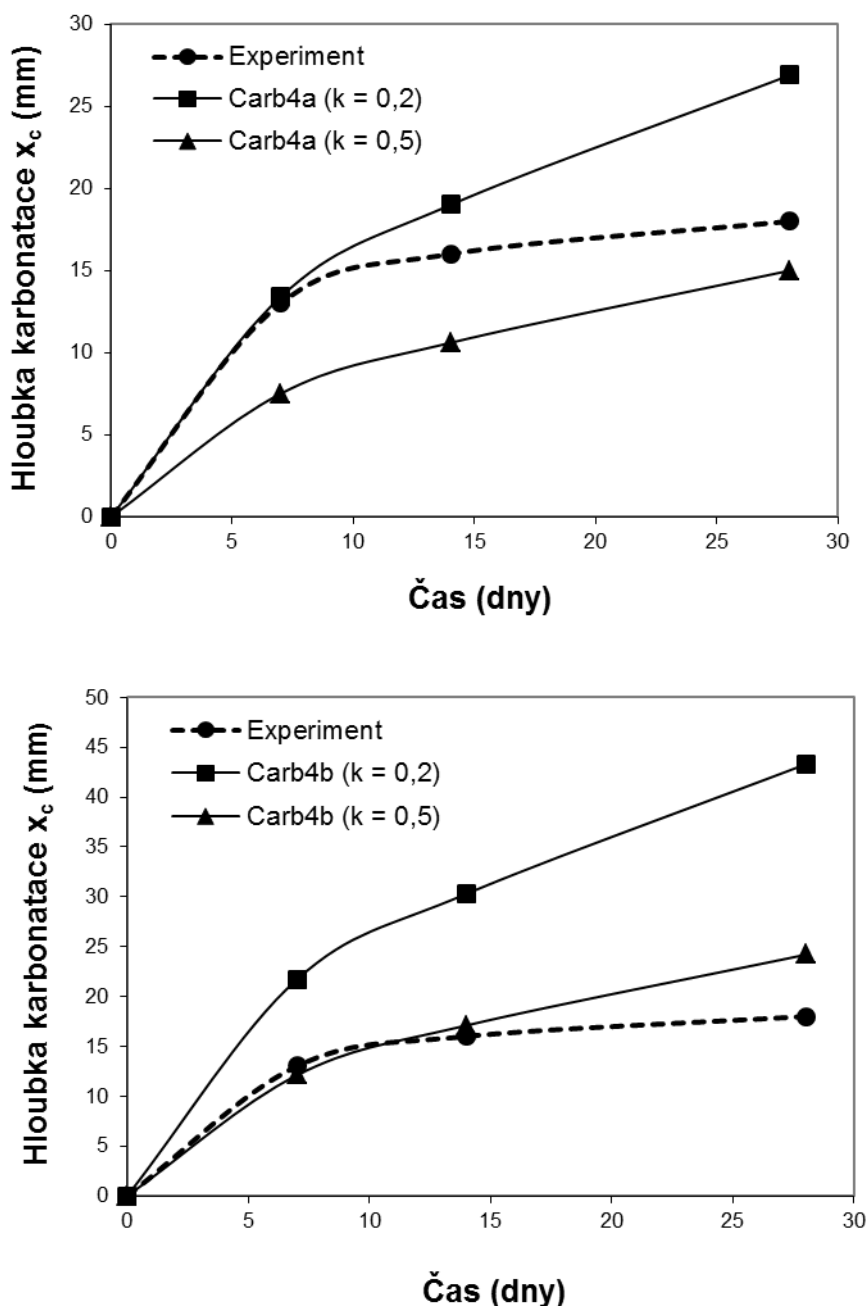
Model Carb2b může určit hloubku karbonatace pouze u strany chráněné před deštěm (východní), kde nedochází ke zpomalení procesu karbonatace z důvodu často mokrého betonu po dešti, kdy nemůže CO₂ pronikat do krycí vrstvy betonu. Hloubka karbonatace pro věž ve stáří 33 let vypočtená modelem Carb2b je 10,7 mm, což je ve velmi dobré shodě s naměřenou hodnotou pro východní stranu (10,6 mm).

Tab. 48 – Vstupní data pro srovnání vypočítaných a experimentálně určených hloubek karbonatace.

Veličina	Jednotka	Střední hodnota	COV	PDF
Faktor neurčitosti modelu	-	1	0,15	Lognormální (2 par)
Čas	roky	0,0192 - 0,0384	-	Deterministické
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	mg/m ³	366667	0,05	Normální
Relativní vlhkost okolního vzduchu	%	70	0,07	Beta (a = 0, b = 100)
Množství cementu CEM I	kg/m ³	150	0,03	Normální
Množství vody	kg/m ³	127	0,03	Normální
Množství příměsi	kg/m ³	183	0,03	Normální
Hodnota vyjadřující účinnost příměsi	-	0,2 0,5	-	Deterministické
Objemová hmotnost cementu	kg/m ³	3100	0,02	Normální

13.3.3 Srovnání s krátkodobými i dlouhodobými experimenty

Ověření správnosti k -hodnoty a modelů Carb4a,b lze provést srovnáním vypočítané hloubky karbonatice s experimentálně zjištěnými hodnotami. Srovnání hodnot hloubky karbonatice obdržných v krátkodobém testu [30] s predikovanými hodnotami je uvedeno na obr. 60. Hodnoty vstupních parametrů byly zadány v souladu s experimentálními podmínkami a složením vzorků použitých v experimentu Jiangem a kol. [30] a jsou shrnuty v tabulce 48. Vzhledem k tomu, že autoři použili jako příměs křemičitý popílek (obsahující 3,69 % CaO), byly zvoleny 2 varianty k -hodnoty: (i) $k = 0,2$ jak je doporučeno v normě pro složení a vlastnosti betonu EN 206 [10] v případě použití popílku a cementu typu CEM I 32,5 a (ii) $k = 0,5$ jak bylo experimentálně zjištěno Papadakisem [73].



Obr. 60 - Srovnání experimentálních a predikovaných hodnot hloubky karbonatice.

V tomto případě jsme získali největší shodu s experimentálně naměřenými hodnotami hloubky karbonatace při použití modelu Carb4b a Papadakisem experimentálně zjištěné k -hodnoty ($k = 0,5$). Z uvedeného tedy vyplývá, že k -hodnota doporučená normou EN 206-1 [10] ($k = 0,2$) byla pravděpodobně vyvinuta pro účely pevností betonu. Jak již bylo zmíněno dříve, tato hodnota se mj. liší též podle vlastnosti, ke které se vztahuje (pevnost betonu, odolnost proti karbonataci, či působení chloridů), proto pravděpodobně použití k -hodnot z normy neposkytuje při výpočtu výsledky odpovídající experimentu. U obou modelů jsou v případě použití této k -hodnoty vypočteny vyšší hodnoty hloubky karbonatace než experimentálně určené.

Tab. 49 – Vstupní data pro srovnání vypočítaných a experimentálně určených hloubek karbonatace.

Veličina	Jednotka	Střední hodnota	COV	PDF
Faktor neurčitosti modelu	-	1	0,15	Lognormální (2 par)
Čas	roky	2	-	Deterministické
Množství CO ₂ v okolní atmosféře: Městské – chráněné před deštěm Venkovské Přímořské	mg/m ³	1227 589 442	0,05	Normální
Relativní vlhkost okolního vzduchu: Městské – chráněné před deštěm Venkovské Přímořské	%	83 80 72	0,07	Beta (a = 0, b = 100)
Množství cementu CEM I: vzorek 1 vzorek 2 vzorek 3	kg/m ³	192 214 132	0,03	Normální
Množství vody: vzorek 1 vzorek 2 vzorek 3	kg/m ³	165 153 159	0,03	Normální
Množství příměsi: vzorek 1 vzorek 2 vzorek 3	kg/m ³	82 92 132	0,03	Normální
Hodnota vyjadřující účinnost příměsi	-	0,2 0,55	-	Deterministické
Objemová hmotnost cementu	kg/m ³	3100	0,02	Normální

Stejně jako v kap. 13.3.1. bylo zjištěno, že experimentálně zjištěným hodnotám méně odpovídají výsledky poskytnuté modelem Carb4a, kde byla ponechána funkce $f(RH)$ v původním tvaru (viz obr. 42 – Carb1a). V případě použití $k = 0,5$ poskytuje model nižší

hodnoty hloubky karbonatace než bylo zjištěno experimentem, v případě $k = 0,2$ pak vyšší hodnoty hloubky karbonatace. K lepší shodě vypočítaných a experimentálně určených hodnot dochází u modelu Carb4b, kde byla funkce $f(RH)$ nahrazena alternativní funkcí založenou na kombinaci experimentálních dat (viz kap. 13.1.1., obr. 42 – Carb1b).

Srovnání hodnot hloubky karbonatace obdržných dlouhodobým testem [61] v různých prostředích (viz tab. 49) s hodnotami určenými modelem Carb4b je uvedeno v tab. 50. Vzhledem k tomu, že autoři použili jako příměs popílek (obsahující 8,28 % CaO), byly zvoleny 2 varianty k -hodnoty: (i) $k = 0,2$ jak je doporučeno v normě pro složení a vlastnosti betonu EN 206 [10] v případě použití popílku a cementu typu CEM I 32.5 a (ii) $k = 0,55$. Druhá hodnota byla získána lineární interpolací mezi hodnotami experimentálně zjištěnými Papadakisem [73] – 3,38 % CaO ($k = 0,5$), 22,78 % CaO ($k = 0,7$). Zbývající hodnoty pro vstupní parametry byly zadány v souladu s experimentálními podmínkami a složením testovaných vzorků [61] – viz tab. 49.

Tab. 50 - Srovnání experimentálních a predikovaných hodnot hloubky karbonatace (mm).

	Městské prostředí - chráněné před deštěm			Venkovské prostředí			Přímořské prostředí		
	Exp.	$k = 0,2$	$k = 0,55$	Exp.	$k = 0,2$	$k = 0,55$	Exp.	$k = 0,2$	$k = 0,55$
Vzorek 1	8,8	14,8	11,8	6,0	10,5	8,3	5,1	8,9	7,1
Vzorek 2	6,2	10,9	8,3	5,1	7,8	5,9	4,0	6,6	5,0
Vzorek 3	13,8	21,8	14,6	11,3	15,4	10,4	10,7	13,1	8,8

Rozdíly mezi hodnotami hloubky karbonatace získanými experimentálně a predikovanými modelem závisí na složení použité směsi pro výrobu betonu a na podmínkách průběhu karbonatace. Ve většině případů bylo dosaženo větší shody hodnot při použití k -hodnoty zjištěné experimentálně Papadakisem ($k = 0,55$).

ZÁVĚR

V první části disertační práce byl sledován vliv některých faktorů na průběh karbonatačního procesu. V této části se dospělo k následujícím výsledkům:

Studiem vlivu relativní vlhkosti vzduchu na karbonataci bylo zjištěno, že karbonatace při nízké relativní vlhkosti ($RH < 43$) a při vlhkosti blízké $RH = 100\%$ vůbec neprobíhá ani po 9 týdnech zrychlené karbonatační zkoušky. Karbonatace naopak probíhá při $RH = 50 - 90\%$. Nejvyšší rychlost byla dosažena při RH kolem 84% , a proto byla většina karbonatačních zkoušek prováděna při této relativní vlhkosti.

Studiem vlivu doby ošetřování na karbonataci bylo pak zjištěno, že s rostoucí dobou ošetřování klesá hloubka karbonatace. Postup karbonatace je totiž velmi ovlivněn pórovou strukturou použité cementové malty. Rozdíl mezi zjištěnou hloubkou karbonatace u vzorku s dobou ošetřování 1 rok a 28 dní však není výrazný, proto můžeme usoudit, že obvyklá doba ošetřování (28 dní) je pro odolnost proti karbonataci dostačující a tento faktor tedy není nutné zahrnout do modelu popisujícího průběh karbonatace.

Ke studiu vlivu typu a množství příměsí na průběh karbonatace byly jako příměs zvoleny popílek, vysokopecní struska a metakaolin. Ze získaných výsledků je patrné, že u všech příměsí dochází s jejím rostoucím množstvím k rychlejšímu postupu karbonatace, tj. k vyšším hodnotám hloubky karbonatace. To je u popílku v souladu s výsledky studia pórové struktury. U cementových malt s rostoucím obsahem příměsí dochází k rychlejšímu postupu karbonatace rovněž z důvodu nižšího obsahu OH^- iontů. Použité příměsí jsou pucolánově aktivní látky, které v přítomnosti vody reagují s hydroxidem vápenatým za vzniku produktů s pojivými vlastnostmi. Zvýšení množství příměsí tedy vede k vyšší spotřebě hydroxidu vápenatého, vzniklého při hydrataci cementu. To se projeví rychlejším snížením koncentrace hydroxidových iontů. Rovněž vzájemné srovnání průběhu karbonatace v přítomnosti různých příměsí je v souladu s výsledky studia pórové struktury daných vzorků. Nejvyšší celkový objem pórů má vzorek s obsahem popílku. Celkový objem pórů u malt s metakaolinem je nejnižší, ale velmi podobný celkovému objemu pórů u malt se struskou. Podobné výsledky byly dosaženy u naměřených hloubek karbonatace.

V případě nahrazení cementu popílkem dochází s rostoucím množstvím popílku k rychlejšímu průběhu karbonatace. Snížení množství cementu vede ke vzniku menšího množství hydroxidu vápenatého během hydratace cementu a současně zvýšení množství popílku pak k jeho vyšší spotřebě. To se projeví rychlejším snížením koncentrace hydroxidových iontů v přítomnosti popílku, a tedy i rychlejším průběhem karbonatace. Ve vzorcích malt s náhradou kameniva popílkem je relativně vyšší procento cementu ve vztahu k množství popílku, což se projeví vyšší koncentrací hydroxidových iontů v pórovém roztoku. Snížení množství hydroxidu vápenatého v důsledku pucolánové aktivity popílku není pravděpodobně tak výrazné a převládá pozitivní vliv snížení porozity těchto cementových malt a zvýšení pevností.

Dále bylo stanoveno množství zbytkového hydroxidu vápenatého u cementových past s příměsmi a pucolánová aktivita těchto příměsí (popílek, vysokopecní struska, metakaolin). U cementových past s příměsmi dochází k postupnému snižování obsahu $Ca(OH)_2$ v čase, jelikož postupně dochází k pucolánové reakci dalších podílů příměsí. Rychlost pucolánové reakce, při které dochází ke spotřebě hydroxidu vápenatého, je v těchto případech větší než rychlost hydratace dalších podílů cementu, kdy hydroxid vápenatý vzniká. U metakaolinu

však po 56 dnech dochází k překvapivému zvýšení obsahu zbytkového Ca(OH)_2 , což je způsobeno pravděpodobně tím, že povrch zrn příměsí již zreagoval a nyní pucolánová reakce již probíhá pomaleji.

Se stoupajícím množstvím silikátové příměsí dochází ve všech případech ke snižování koncentrace Ca(OH)_2 , protože hydroxid vstupuje do reakce s příměsí. Z použitých pucolánových příměsí se zdá být neúčinnější metakaolin, protože spotřebuje ze všech sledovaných příměsí nejvíce Ca(OH)_2 . Vysokopecní granulovaná struska je latentně hydraulické pojivo, které obsahuje vápenaté sloučeniny. K reakci, která vede k vytvoření pevné struktury, tak spotřebuje nejméně Ca(OH)_2 . Výsledky jsou v souladu se stanovením pucolánové aktivity, kdy z použitých příměsí má metakaolin nejvyšší a vysokopecní struska nejnižší pucolánovou aktivitu.

Uvedené výsledky jsou však v rozporu se vzájemným srovnáním průběhu karbonatace v přítomnosti těchto příměsí, kdy bylo nejvyšších hloubek karbonatace dosaženo u vzorků s obsahem popílku a nejnižších karbonatačních hloubek pak u vzorků s metakaolinem. Nejnižší množství zbytkového hydroxidu vápenatého v přítomnosti metakaolinu by se naopak mělo projevit rychlejším snížením koncentrace hydroxidových iontů a dosažená hloubka karbonatace by tedy měla být nejvyšší. Důvodem, proč malty s příměsí metakaolinu karbonatují nejpomaleji, je skutečnost, že velikost jeho zrn je malá (5 μm), a proto zcela zreagují a vzniklé produkty zaplní možné kapilární póry ve struktuře cementového tmelu. Propustnost cementové malty pro CO_2 je pak u tohoto vzorku nízká a karbonatace neprobíhá.

Rovněž byl sledován vliv karbonatace vzorků ze zatvrdlé cementové pasty na její lomově-mechanické vlastnosti. Karbonatace zatvrdlé cementové pasty měla podstatný vliv na všechny sledované vlastnosti. Objemová hmotnost se u vzorků druhé sady zvýšila asi o 20 % oproti vzorkům srovnávacím. Pevnost v tlaku na zlomcích vzrostla dokonce o přibližně 90 %. Přitom modul pružnosti poklesl o 20 %. Také hodnoty obou lomových charakteristik poklesly u zkarbonatovaných vzorků – efektivní lomová houževnatost o přibližně 30 % a efektivní houževnatost o bezmála 40 %.

Využití frekvenční inspekce jako jedné z nedestruktivních metod pro zjištění hloubky karbonatace bylo dalším předmětem studia. Rozdíl ve výsledném frekvenčním spektru po úder realizovaný do nejvíce zkarbonatované strany činí sice 439 Hz ve fázi před a po ukončení testu. Výsledky v oblasti posunových tendencí dominantních frekvencí mohou být však ovlivněny hned několika faktory a využití této metody pro stanovení hloubky karbonatace tedy není v současné době zcela vhodné.

Pro modelování karbonatačního procesu bylo vybráno 9 karbonatačních modelů, které mají dostupnější vstupní parametry a jsou tedy uživatelsky přístupnější. U těchto modelů bylo provedeno několik parametrických studií, byly shrnuty výhody a nevýhody těchto modelů a rovněž byly vzájemně srovnány.

Dále byly popsány softwarové nástroje – RC-LifeTime a FReET-D, které využívají některé z uvedených modelů. RC-LifeTime zahrnuje 3 karbonatační modely, FReET-D využívá dokonce všech 9 modelů. Výhodou obou softwarových nástrojů je možnost zadávání

jednotlivých vstupů jako náhodných, což mnohem lépe odpovídá realitě. Náhodně proměnná je pak i výsledná veličina. Kromě statistických údajů poskytují programy též hodnoty indexu spolehlivosti β . Výhody obou programů jsou ukázány na provedených parametrických studiích. K FReEtu-D byl vytvořen teoretický a uživatelský manuál, u nichž jsem spoluautorkou.

V neposlední řadě bylo provedeno srovnání hloubek karbonatace vypočtených pomocí modelů s výsledky laboratorních experimentů, nebo dokonce s dostatečně věrohodnými výsledky měření karbonatace na existujících konstrukcích v reálném prostředí. Vypočtených hodnot hloubek karbonatace bylo dosaženo jedním z uvedených softwarových nástrojů. Srovnání vedlo k ověření správnosti použitých numerických modelů a rovněž ke zjištění vhodné k -hodnoty, která vyjadřuje účinnost příměsi. U srovnání s měřením hloubky karbonatace na chladicí věži došlo k největší shodě s experimentálně zjištěnými hloubkami karbonatace určenými pomocí modelů Carb1b a Carb2b, kde byla funkce vlivu relativní vlhkosti vzduchu nahrazena alternativní funkcí založenou na kombinaci experimentálních dat. U ostatních modelů (Carb1a, Carb2 a Carb8) došlo zejména v případě vnitřního povrchu veže k podhodnocení hloubky karbonatace. Větší shoda s výsledky modelu Carb8 byla dosažena při srovnání s měřením hloubky karbonatace na televizní věži v Mnichově, kdy bylo dostupné více potřebných vstupních parametrů. Ze srovnání s výsledky krátkodobých laboratorních experimentů vyplynula větší shoda s hloubkami karbonatace vypočtenými modelem Carb4b, kde byla opět nahrazena funkce vlivu relativní vlhkosti vzduchu alternativní funkcí založenou na kombinaci experimentálních dat. Jako vhodnější k -hodnota se v případě srovnání s krátkodobými i dlouhodobými experimenty jeví hodnota určená experimentálně Papadakisem. Použití k -hodnoty z normy EN 206-1 neposkytuje při výpočtu výsledky odpovídající experimentům, jelikož byla pravděpodobně vyvinuta pro účely pevností betonu.

14 LITERATURA

- [1] Pytlík, P. *Technologie betonu*. 2. vydání. Brno: VUTIUM Brno, 2000. 390 s. 80-214-1647-5
- [2] Emmons, P.H., Drochytka, R., Jeřábek, Z. *Sanace a údržba betonu v ilustracích*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. 334 s. ISBN 0-87629-286-4.
- [3] Schueremans, L., Gemert, D.V., Giessler, S. Chloride penetration in RC-structures in marine environment – Long term assessment of a preventive hydrophobic treatment. *Construction and Building Materials*, 2007, Vol. 21, 1238-1249.
- [4] Šauman, Z. *Maltoviny I*. Brno: VUT Brno, PC-DIR, 1993. 198 s. ISBN 80-214-0509-0.
- [5] Jirásek, J., Vavro, M. *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3. [cit. 2010-02-20].
Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html
- [6] Colleparidi, M. *Moderní beton*. 1. vydání. Praha: ČKAIT, 2009. 344 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [7] ČSN EN 197-1 *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2001.
- [8] Moir, G. Cements. In *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials*, First published 2003. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2003. ISBN 0 7506 5103 2. Part 1: Cements, 1/3-1/45
- [9] ČSN EN 196-1 (722100) *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. 2005.
- [10] ČSN EN 206-1 *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Česká technická norma, ČNI, 2001 (vč. změn Z1/2002 a Z2/2003).
- [11] Rovnaník, P., Rovnaníková, P. Alternativní silikátové příměsi ve vztahu k obsahu hydroxidu vápenatého v betonu (TL 1.1.3.2.-15). In *Technické listy 2007 – Díl 1: Integrovaný návrh konstrukcí a systémů pro výstavbu*. 1. vydání. Praha: CIDEAS, 2008. 136 s. ISBN 978-80-01-04175-8. TL 1.1.3.2.-15, 69-70. [cit. 2010-02-27].
Dostupné z: http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/4tlv/TL07CZ_1132-15.pdf
- [12] Rovnaníková, P., Teplý, B. Obsah hydroxidu vápenatého v betonech se silikátovými příměsmi – důležitý faktor při posuzování životnosti betonových konstrukcí. *Beton*, 2009, Vol. 2, 38-41.
- [13] Mehta, P.K. Pozzolanic and cementitious by products as mineral admixtures for concrete - a critical review. *Fly Ash, Silica fume, Slag and Other Mineral by Products in Concrete, ACI Special Publication, SP-79*, 1983, Vol. 1, 1–46.
- [14] Rovnaníková, P., Rovnaník, P. *Stavební chemie: Modul 2 – Anorganická chemie a chemie anorganických stavebních materiálů*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2005. 48 s. ISBN 80-7204-409-5.
- [15] Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P., Ryle, R. Cementitious additions. In *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials*, First published 2003. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2003. ISBN 0 7506 5103 2. Part 3: Cementitious additions, 3/3-3/66.
- [16] *Popílek* [online]. Last modified 2004-01-12 [cit. 2010-02-13]. Dostupné z: <http://waste.fce.vutbr.cz/Odpad/Popilek.html>

- [17] ČSN EN 450 (722064) *Popílek do betonu – Definice, požadavky a kontrola jakosti*. 1995.
- [18] Modrý, S. *Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací* [online]. Projekt výzkumu a vývoje Ministerstva dopravy a spojů ČR, Podprogram č.3–Rozvoj dopravní infrastruktury a dopravních technologií - číslo projektu: 803/120/114. [cit. 2010-07-25].
Dostupné z: web.cvut.cz/ki/research/alkrea/ALK-reakce_soubory/reserse.doc
- [19] Pticen, F. *Metakaolin-Stavebnictví a interiér* [online]. 2007-06-25 [cit. 2010-02-13].
Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/metakaolin/>
- [20] Siddique, R., Klaus, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Applied Clay Science*, 2009, Vol. 43, 392-400.
- [21] *Advanced Cement Technologies - Metakaolin and Silica Fume - USA & Worldwide Supplier – Home* [online]. c2010 [cit. 2010-02-13]. Dostupné z: www.metakaolin.com
- [22] Hurta, J. Studium vlivu metakaolinu Mefisto K05 na pevnostní vlastnosti modifikovaných cementových malt, *Juniorstav 2008*, 2008, 1-6. [cit. 2010-02-27].
Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_1/Hurta_Jan_CL.pdf
- [23] *Struska* [online]. Last modified 2004-01-12 [cit. 2010-02-14]. Dostupné z <http://waste.fce.vutbr.cz/Odpad/struska.html>
- [24] Papadakis, V.G., Fardis, M.N., Vayenas, C.G. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. *ACI Materials Journal*, 1992, 119-130.
- [25] Šnirch, Z., Dufka, A., Lukavec, M. Metodika stanovení vlivu vertikálních trhlin na plášť chladič věže, *Beton TKS*, 2010, Vol. 3, 64-67.
- [26] Steffens, A., Dinkler, D., Ahrens, H. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures, *Cement and Concrete Research*, 2002, Vol. 32, 935-941
- [27] Papadakis, V.G., Fardis, M.N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. *AIChE Journal*, 1989, Vol. 35, No. 10, 1639-1650.
- [28] Lagerblad, B. *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art*, Nordic Innovation Centre project number: 03018, Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), 2005, 48 s.
- [29] Bertos, M.F., Simons, S.J.R., Hills, C.D., Carey, P.J. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂, *Journal of Hazardous Materials B112*, 2004, 193-205.
- [30] Jiang, L., Lin, B., Cai, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30, 699-702.
- [31] Matoušek, M. *Působení vybraných atmosférických činitelů na stavební konstrukce*. Doktorská disertační práce, Fakulta stavební, VUT v Brně, 1977.
- [32] Matoušek, M., Drochytka, R. *Atmosférická koroze betonů*. 1. vydání. Praha: IKAS, 1998. 171 s. ISBN 80-902558-0-9.
- [33] Matoušek, M., Drochytka, R. Vliv oxidu uhličitého a siřičitého na životnost betonu. *Stavivo*, 1985, Vol. 10, 394-398.
- [34] Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., Fardis, M.N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, 1991, 363-373.

- [35] Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., Fardis, M.N. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. *Chemical Engineering Science*, 1991, Vol. 46, No. 5/6, 1333-1338.
- [36] Šmerda, Z. a kol. *Životnost betonových staveb*. 1.vydání. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1999. 184 s. ISBN 80-902397-8-8.
- [37] Papadakis, V.G., Fardis, M.N., Vayenas, C.G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and Structures*, 1992, Vol. 25, No.149, 293–304.
- [38] Roy, S. K., Poh, K. B., Northwood, D. O. Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies. *Building and Environment*, 1999, Vol. 34, 597-606.
- [39] Králová, H. Výsledky měření koncentrace CO₂ v městském prostředí. Sborník konference *Pravděpodobnost porušování konstrukcí*, Brno, 2006, 233-238.
- [40] Sietta, A.V., Vitaliani, R.V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures - Part I: Theoretical formulation. *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, 571–579.
- [41] Schiessl, P. Zur Frage der zulässiger Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 255, Berlin, 1976.
- [42] Morinaga, S. *Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel*. Special Report No. 23, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Tokyo, Japan, 1988.
- [43] Malhotra, V.M. Role of supplementary cementic materials in reducing greenhouse gas emissions. In Proc. of Int. Conf. on *Infrastructure Regeneration and Rehabilitation Improving the Quality of Life Through Better Construction*, Ed. by Swamy, R.N., Sheffield Academic press Ltd, Sheffield, England, 1999, 27-42.
- [44] Koukal, P., Českomoravský cement, Mokrý, soukromé sdělení.
- [45] Bob, C., Afana, E. On-site assessment of concrete carbonation. In Proc. Inter. Confer. on *Failure of concrete structures*, Štrbské Pleso, Slovak Republic, 1993, 84-87.
- [46] Richarson, M. *Carbonation of Reinforced Concrete*. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, University College Dublin, Citis Ltd. - Dublin, Ireland, 1988.
- [47] Wang, A., Zhang, Ch., Sun, W. Fly ash effects II. The active effect of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, 2057-2060.
- [48] Smith, I.A. The design of fly-ash concretes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1967, Vol. 36, 769-790.
- [49] Papadakis, V. G. Efficiency factors (*k*-values) for supplementary cementing materials regarding carbonation and chloride penetration. Proc. of Fifth Int. Conf. on *Durability of Concrete*, CANMET/ACI, ed. V.M.Malhotra, Vol. I, Barcelona, Spain, 2000, 173-187.
- [50] Gehlen, Ch. *Probabilistische Lebensdauerbemessung Stahlbetonbauwerken, Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Heft 510 der Schriftenreihe des DAfStb, Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [51] *fib Model Code 2010, Model Code for Service Life Design*, *fib Bulletin*, Vol. 34, 2006.

- [52] EN 1992-1 Eurocode 2 Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings. CEN, 2003.
- [53] Teplý, B., Keršner, Z., Rovnaníková, P. K navrhování železobetonových konstrukcí s ohledem na životnost, *Beton TSK*, 2002, Vol. 6, 46-49.
- [54] Teplý, B. Performance-based navrhování betonových konstrukcí a specifikace betonu, *Beton TKS*, 2009, Vol. 2, 46-49.
- [55] Teplý, B., Rovnaníková, P., Vořechovská, D., Chromá, M., Rovnaník, P., Bayer, P., Podroužek, J. Rozvoj metod navrhování konstrukcí na trvanlivost a spolehlivost. In Sborník konference *IDEAS 09*, Ostrava, 2009, 55-64.
- [56] ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí (ČNI 2003).
- [57] ISO 13823 General Principles on the Design of Structures for Durability, 2008.
- [58] Matesová, D., Veselý, V., Chromá, M., Rovnaník, P., Teplý, B. Mezní stavy trvanlivosti a jejich posuzování. In: Sborník příspěvků ke konferenci 13. *Betonářské dny 2006*, Hradec Králové: ČBS, 2006, 288-294.
- [59] ČSN 721200 *Křemenné písky. Základní technické požadavky*. 1994.
- [60] Atis, C.D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials*, 2003, Vol. 17, 147-152.
- [61] Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S., Leelawat, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 2006, Vol. 20(9), 744-753.
- [62] Castro, P., Sanjuán, M.A., Genescá, J. Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. *Building and Environment*, 2000, Vol. 35, 145-149.
- [63] Sisomphon, K., Franke, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Research*, 2007, Vol. 37, 1647-1653.
- [64] Valcuende, M., Parra, C. Natural carbonation of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 2010, Vol. 24, 848-853.
- [65] De Ceukelaire, L., Van Nieuwenburg Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 1993, Vol. 23, 442-452.
- [66] Roy, S.K., Beng, P.K., Northwood, D.O. The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates. *Magazine of Concrete Research*, 1996, Vol. 48(177), 293-300.
- [67] Lo, Y., Lee, H.M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. *Building and Environment*, 2002, Vol. 37, 507-514.
- [68] Chang, Ch.F., Chen, J.W. The experimental investigation of concrete carbonation depth. *Cement and Concrete Research*, 2006, Vol. 36(9), 1760-1767.
- [69] ČSN EN 14630 (732154) *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení hloubky zasažení karbonatací v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody*, 2008.
- [70] Mikulková P., Kořenská M., Martinek J., Chobola Z. A Study of the Burnt Roofing Response Vs. Pickup Location and Transmission Medium Dependence. In: Proc. of

International Workshop on Physical and Material Engineering 2003, Bratislava, 2003, ed. by Slovak University of Technology, 145-148.

[71] Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M., Fairbairn, E.M.R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 2008, Vol. 30, 410-418.

[72] Adamiec, P., Benezet, J.Ch., Benhassaine, A. Pozzolanic reactivity of silico-aluminous fly ash. *Particuology*, 2008, Vol. 6, 93–98.

[73] Papadakis, V.G., Tsimas, S. Supplementary cementing materials in concrete, Part I, Efficiency and design. *Cement and Concrete Research*, 2002, Vol. 32(10), 1525-1532.

[74] Matoušek, M. Carbonation of cellular concrete under the conditions in exposed structures. In Proc. of *RILEM International Symposium*, Wexham Springs, 1976, part 6.4, 1-4.

[75] Bentur, A. Impact of additions: Indicator for durability and strength performance. In: Proc. of the *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability - Proceedings PRO 47*, 2007, Madrid, Spain, 297-310.

[76] Bentur, A, Mitchell, D. Material performance lessons, *Cement and Concrete Research*, 2008, Vol. 38, 259-272.

[77] Novák, D., Vořechovský, M., Rusina, R. Small-sample Probabilistic Assessment – software FREET. In: Proc. of *9th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering ICASP 9*, Millpress Rotterdam, San Francisco, USA, 2003, 91–96.

[78] Novák, D., Vořechovský, M., Rusina, R. FREET v.1.3 – program documentation, User's and Theory Guides, 2003.

[79] Vořechovský, M., Novák, D.: Statistical correlation in stratified sampling, In: Proc. of *9th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering ICASP 9*, Millpress Rotterdam, San Francisco, USA, 2003, 119-124.

[80] Teplý, B., Chromá, M., Matesová, D., Rovnaník, P. FREET-D. Program Documentation, Part 1 – Theory, 2006.

[81] Veselý, V., Teplý, B., Chromá, M., Matesová, D. FREET-D. Program Documentation, Part 2 - User Manual, 2006.

[82] Keršner, Z., Novák, D., Teplý, B., Bohdanecký, V. Karbonátace betonu, koroze výztuže a životnost chladicí věže. *Sanace*, 1996, Vol. 4, 21–23.

[83] Gehlen, C., Sodeikat, C. Maintenance planning of reinforced concrete structures: Redesign in a probabilistic environment inspection update and derived decision making. In Proc. of the *9th DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components*, Brisbane, Australia, 2002, paper 131, 10 pages.

15 PUBLIKACE SE VZTAHEM K DISERTAČNÍ PRÁCI

1. Teplý, B., Keršner, Z., Rovnaník, P., Chromá, M. Durability vs. reability of RC structures. In: Proc. of the *10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components*, Lyon, Francie, 2005, TT05-042, 6 pages.
2. Chromá, M., Pernica, F., Teplý, B. Blended cements, durability and reliability of concrete structures. In: Proc. of the *2nd International Symposium Non-Traditional Cement & Concrete*, Brno: Brno University of Technology & ŽPSV Uherský Ostroh, a.s., 2005, 216-223, ISBN 80-214-2853-8.
3. Chromá, M., Rovnaník, P., Schmid, P., Keršner, Z. Vliv karbonatace na lomově-mechanické vlastnosti zatvrdlé cementové pasty. In: Sborník semináře *Problémy lomové mechaniky V. – Lomová mechanika obecných singulárních koncentrátorů napětí*, Brno: FAST VUT a AV ČR, 2005, 21-23, ISBN 80-214-2854-6.
4. Chromá, M. Vliv relativní vlhkosti na průběh karbonatace betonu. In: *ChemZi, 57. zjazd chemických spoločností*, Tatranské Matliare: Slovenská chemická spoločnosť, 2005, 173-174, ISSN 1336-7242.
5. Chromá, M., Křístek, R., Teplý, B. Matematické modely karbonatace betonu. In: Zborník príspevkov z XI. medzinárodnej konferencie o stavebných materiáloch, *Construmat 2005*, Rajecké Teplice: ŽU, FCE, 2005, 38-41, ISBN 80-8070-451-1.
6. Chromá, M., Pernica, F., Teplý, B. Durability modelling of RC structures made from blended cements. In: Proc. of the *4th International Conference on Concrete and Concrete Structures*, Žilina: ŽU, FCE, 2005, 52-57, ISBN 80-8070-462-7.
7. Teplý, B., Chromá, M., Rovnaník, P. Karbonatace, cementy typu CEM II a doporučení ČSN EN 206-1. In: Sborník příspěvků ke konferenci *12. Betonářské dny 2005*, Hradec Králové: ČBS, 2005, 78-83, ISBN 80-903502-2-4.
8. Teplý, B., Chromá, M., Pernica, F. Metody a postupy navrhování nosných konstrukcí na specifikovanou životnost. Dílčí výzkumná zpráva k TL 1.1.3.1-1. Brno, CIDEAS. 2005.
9. Rovnaník, P.; Chromá, M. RC LifeTime - softwarová podpora navrhování životnosti železobetonových konstrukcí. Dílčí výzkumná zpráva k TL 1.1.3.2-1. Brno, CIDEAS. 2005.
10. Teplý, B., Chromá, M., Rovnaník, P., Rovnaníková, P. Karbonatace betonu, druhy cementů a doporučení ČSN EN 206-1. In: *Beton TKS*, 2006, No. 1., 39-41. ISSN 1213-3116.
11. Rovnaník, P., Chromá, M., Teplý, B., Keršner, Z. Durability Limit States of Concrete Structures: Carbonation. In: Proc. of the *European Symposium on Service Life and Serviceability of Concrete Structures*, Espoo: Concrete Association of Finland, Helsinki, Finland, 2006, 246-251. ISBN 952-5075-79-6.
12. Chromá, M., Teplý, B., Veselý, V. Softwarový nástroj pro sledování průběhu karbonatace. In: Sborník z *XII. mezinárodní konference Construmat 2006 – Conference about structural materials*, Račková dolina: Mechanizačná fakulta SPU v Nitre, září 2006, Nitra, SR, 34-37. ISBN 80-8069-747-7.

13. Chromá, M., Rovnaník, P., Matesová, D., Teplý, B. Modelování životnosti železobetonových konstrukcí: Depasivace výztuže. In: Sborník II. konference s mezinárodní účastí *Pravděpodobnost porušování konstrukcí – PPK 2006*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Brno, říjen 2006, 205-212. ISBN 80-214-3251-9.
14. Matesová, D., Chromá, M., Rovnaník, P., Teplý, B. Tools for assessment of durability of concrete structures. In: Sborník II. konference s mezinárodní účastí *Pravděpodobnost porušování konstrukcí – PPK 2006*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Brno, říjen 2006, 219-226. ISBN 80-214-3251-9.
15. Trebuláková, P., Chromá, M., Chobola, Z. Detection of the response parameter change prior to and after the application of epoxy varnish on the surface of cement-mortar-made specimens. In: Proc. of the *International Seminar Physical and Material Engineering 2006*, Račková dolina: SUT Bratislava, září 2006, SR, 256-259. ISBN 80-227-2467-X.
16. Trebuláková, P., Chromá, M., Chobola, Z. A study of the change in AE response parameters resulting from accelerated cement mortar carbonation. In Proc. of the *International Seminar Physical and Material Engineering 2006*, Račková dolina: SUT Bratislava, září 2006, SR, 248-251. ISBN 80-227-2467-X.
17. Matesová, D., Veselý, V., Chromá, M., Rovnaník, P., Teplý, B. Mezní stavy trvanlivosti a jejich posuzování. In: Sborník příspěvků ke konferenci *13. Betonářské dny 2006*, Hradec Králové: ČBS, 2006, 288-294. ISBN 80-903807-2-7.
18. Trebuláková, P., Chromá, M., Chobola, Z. Detection of the response parameter change prior to and after the application of beeswax cover on the surface of cement-mortar-made specimens. In: Proc. of the *Workshop NDT 2006 Non-destructive Testing in Engineering Practice Engineering*, 2006, Brno, Czech Republic, 224-227. ISBN 80-7204-487-7.
19. Trebuláková, P., Chromá, M., Chobola, Z. A study of the change in AE response parameters resulting from accelerated cement mortar carbonation pre-treated by applying the beeswax cover. In: Proc. of the *Workshop NDT 2006 Non-destructive Testing in Engineering Practice Engineering*, 2006, Brno, Czech Republic, 228-231. ISBN 80-7204-487-7.
20. Teplý, B., Chromá, M., Matesová, D., Rovnaník, P. FReET-D. Program Documentation, Part 1 – Theory, 2006.
21. Veselý, V., Teplý, B., Chromá, M., Matesová, D. FReET-D. Program Documentation, Part 2 - User Manual, 2006.
22. Matesová, D., Chromá, M., Rovnaník, P., Veselý, V., Teplý, B. Mezní stavy železobetonových konstrukcí s vazbou na trvanlivost. Dílčí výzkumná zpráva k TL 1.1.3.1-2, CIDEAS 2006.
23. Matesová, D., Chromá, M., Rovnaník, P., Teplý, B. Aplikace a popis software pro pravděpodobnostní hodnocení degradace materiálů. Dílčí výzkumná zpráva k TL 1.1.3.2-4, CIDEAS 2006.
24. Chromá, M., Rovnaník, P., Teplý, B., Karbonatce betonů - modely pro betony z portlandských cementů. Dílčí výzkumná zpráva k TL 1.1.3.2-5, CIDEAS 2006.
25. Chromá, M., Rovnaník, P., Teplý, B., Karbonatce betonů - modely pro betony ze směsných cementů, Betony ze směsných cementů - aplikace software *RC LifeTime-SCM*. Dílčí výzkumná zpráva k TL 1.1.3.2-6,7, CIDEAS 2006.

26. Chromá, M., Rovnaník, P., Teplý, B.: Carbonation modelling and reliability analysis of RC structures made from blended cements. In: Proc. of the *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability - Proceedings PRO 47*, 2006, 2007, Madrid, Spain, 319-325. ISBN 978-2-912143-95-2.
27. Chromá, M., Rovnaník, P., Matesová, D. Durability of RC structures made from blended cement: Carbonation and chloride ingress. In: Proc. of the *6th International Seminar on Environmentally Compatible Structures and Structural Materials (ECS)*, Prague: IASS WG 18, October 2006, 2007, Prague, Czech Republic, 97-102. ISBN 978-80-01-03687-7.
28. Chromá, M., Teplý, B. Problematika *k*-faktoru při karbonataci betonu, In: Zborník přednášok, *VIII. vedecká konferencie Stavebnej fakulty TU v Košiciach*, Sekcia 4: Stavebníctvo, květen 2007, Košice, SR, 153-158. ISBN 978-80-8073-792-4.
29. Chromá, M., Teplý, B., Rovnaník, P. Degradation modelling of blended cement concretes. In: Proc. of *11th International conference Ecology and new building materials and products*, Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, červen 2007, Telč, ČR, 337-340. ISBN 978-80-239-9347-9.
30. Chromá, M., Trebuláková, P. Sledování změn parametrů frekvenčního spektra metodou FI v průběhu karbonatace cementové malty. In: Sborník z XIII. mezinárodní konference *Conference about structural materials (Construmat 2007)*, září 2007, Ostrava: Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Chata Svoboda, Rejvíz, ČR, 194-198. ISBN 978-80-248-1536-7.
31. Teplý, B., Matesová, D., Chromá, M., Rovnaník, P. Stochastic degradation models for durability limit state evaluation: SARA – part VI. In *Proc. of 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2007, 187 (Abstract), full length paper on CD-ROM. ISBN 978-0-9736430-4-6.
32. Chromá, M., Rovnaníková, P., Bayer, P. Vliv popílku na odolnost cementové malty proti karbonataci. In: Sborník příspěvků ke konferenci *14. Betonářské dny 2007*, Hradec Králové: ČBS, 2007, 326-331. ISBN 978-80-87158-04-3.
33. Teplý, B., Chromá, M., Matesová, D. Kumulativní modely a totální pravděpodobnost poruchy: možnosti aplikace. Dílčí výzkumná zpráva k TL 1.1.3.1-9, CIDEAS 2007
34. Chromá, M., Rovnaník, P., Teplý, B. Durability Limit States for Concrete Structures – Assessment Tools. In *Proc. of Int. Conference and EurekaBuild event Networks for sustainable environment and high quality of life*, Dubrovnik, Croatia, 2008, 125-132. ISBN 978-953-95428-7-8.
35. Teplý, B., Rovnaníková, P., Vořechovská, D., Chromá, M., Rovnaník, P., Bayer, P., Podroužek, J. Rozvoj metod navrhování konstrukcí na trvanlivost a spolehlivost. In *Sborník konference IDEAS 09*, Ostrava, 2009, 55-64. ISBN 978-80-01-04449-0.
36. Teplý, B., Chromá, M., Rovnaník, P. Durability assessment of concrete structures: Reinforcement depassivation due to carbonation. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2010, 6 (3), 317-327. ISSN 1573-2479.
37. Vořechovská, D., Teplý, B., Chromá, M. Probabilistic assessment of concrete structures durability under reinforcement corrosion attack. *Journal of Performance for Constructed Facilities*, ASCE, Vol. 24 (6), 2010, 571-579. ISSN 0887-3828.

38. Teplý, B., Chromá, M., Vořechovská, D., Novák, D. Multimodel software tool for durability design and assessment of concrete structures with respect to new Model Code, In Proc. of fib Symposium Prague 2011 Concrete engineering for excellence and efficiency, Praha, 2011, Vol. 1, 219-222. ISBN 978-80-87158-29-6.
39. Chromá, M., Rovnaníková, P., Teplý, B. Vliv typu a množství příměsi na průběh karbonatace, Roczniki Inżynierii Budowlanej, 2011, ISSN 1505-8425 – submitted.
40. Chromá, M., Teplý, B., Rovnaník, P. Probabilistic assessment of initiation periods in concrete structures: Comparison of models. *Computers and Concrete*, 2011, ISSN 1598-8198 – submitted.

16 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a/c	hmotnostní poměr kamenivo/cement (-)
ACC	zrychlené karbonatační podmínky (Accelerated Carbonation Conditions)
con	beton
CSH	hydratované křemičitany vápenaté
DLS	mezní stavy trvanlivosti (Durability Limit States)
F	Keilův index
FI	frekvenční inspekce
HVFA	vysoký obsah popílku (High-Volume Fly Ash)
k	hodnota vyjadřující účinnost příměsi (-)
MK	metakaolin
mor	vápenocementová omítka
MS	mezní stavy
M_z	modul zásaditosti
NAC	přirodní karbonatační podmínky (Natural Carbonation Conditions)
P_d	návrhová pravděpodobnost
P_f	pravděpodobnost poruchy
PC	portlandský cement
POP	popílek
R_c	pevnost v tlaku (MPa)
R_f	pevnost v tahu ohybem (MPa)
RH	relativní vlhkost vzduchu (%)
s	směrodatná odchylka
SCM	příměs (Supplementary Cementing Materials)
SLS	mezní stavy použitelnosti (Serviceability Limit States)
STR	struska
ULS	mezní stavy únosnosti (Ultimate Limit States)
V	křemičitý popílek
W	vápenatý popílek
w/c	vodní součinitel (-)
(w/c)_{eff}	efektivní vodní součinitel (-)
x_c	hloubka karbonatace (mm)
β	index spolehlivosti (-)
ρ	objemová hmotnost (kg/m ³)

17 SEZNAM SYMBOLŮ POUŽITÝCH U KARBONATAČNÍCH MODELŮ

a	množství kameniva v betonu (kg/m^3)
a_1	množství písku v betonu (kg/m^3)
a_2	množství kameniva s granulometrií 4-8 mm v betonu (kg/m^3)
a_3	množství kameniva s granulometrií 8-16 mm v betonu (kg/m^3)
a/c	hmotnostní poměr kamenivo/cement (-)
A	karbonatační parametr
A_1	hmotnostní procenta Al_2O_3 v cementu pro beton (%)
$A_{1,m}$	hmotnostní procenta Al_2O_3 v cementu pro maltu (%)
A_2	hmotnostní procenta Al_2O_3 v popílku (%)
b_c	regresní exponent funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu k_c (-)
b_w	regresní exponent funkce vlivu počasí W (-)
c	množství cementu v betonu (kg/m^3)
c_{CO_2}	množství CO_2 v okolní atmosféře (mg/m^3)
$c_{\text{CO}_2,\text{tot}}$	množství CO_2 potřebné k přeměně všech karbonatace schopných produktů hydratace v betonu (%)
c_m	množství cementu v maltě (kg/m^3)
C	koncentrace difundující látky
C_1	hmotnostní procenta CaO v cementu pro beton (%)
$C_{1,m}$	hmotnostní procenta CaO v cementu pro maltu (%)
C_2	hmotnostní procenta CaO v popílku (%)
$C_{l,m}$	hmotnostní procenta CaO ve vápně pro maltu (%)
CaO	obsah oxidu vápenatého schopného reakce s kyselinotvornými plyny (CO_2) (%)
CaO_{karb}	obsah zkarbonatovaného CaO (%)
CO_{2j}	obsah CO_2 vázaného na jemnozrnný CaCO_3 (%)
CO_{2h}	obsah CO_2 vázaného na hrubozrnný CaCO_3 (%)
d	tloušťka omítky (mm)
d_B	tloušťka vrstvy betonu (m)
D_B	difúzní koeficient betonu pro účinek CO_2 (m^2/s)
D_{e,CO_2}	efektivní difúzní koeficient CO_2 v betonu (m^2/s)
D_{eff}	difúzní koeficient
f_c	pevnost v tlaku (MPa)

$f(RH)$	funkce vyjadřující vliv relativní vlhkosti okolního vzduchu (-)
F	hmotnost popílku (kg/m^3)
F'	množství popílku, které může zreagovat (kg/m^3)
F_1	hmotnostní procenta Fe_2O_3 v cementu pro beton (%)
$F_{1,m}$	hmotnostní procenta Fe_2O_3 v cementu pro maltu (%)
F_2	hmotnostní procenta Fe_2O_3 v popílku (%)
G_1	hmotnostní procenta sádrovce v cementu pro beton (%)
$G_{1,m}$	hmotnostní procenta sádrovce v cementu pro maltu (%)
k	hodnota vyjadřující účinnost příměsi (-)
k'	koeficient odpovídající rychlosti karbonatace (-)
k_c	funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu na inverzní efektivní odolnost proti karbonataci (-)
k_e	funkce vlivu okolního prostředí na inverzní efektivní odolnost proti karbonataci (-)
k_t	regresní parametr funkce $R_{NAC,o}^{-1}$ (-)
$^\circ K$	stupeň karbonatace (%)
$^\circ K_{max}$	maximální stupeň karbonatace (%)
l_m	množství vápna v maltě (kg/m^3)
M	maximální množství popílku, které může zreagovat (-)
$^\circ MP$	stupeň modifikačních přeměn (-)
n	parametr zohledňující vliv pórového systému (-)
p	parciální tlak CO_2 v atmosféře (Pa)
p_{SR}	pravděpodobnost směru deště (-)
P	množství příměsi v betonu (kg/m^3)
r_a	koeficient typu kameniva (-)
$r_{c,a}$	koeficient typu cementu I (-)
$r_{c,b}$	koeficient typu cementu II (-)
$r_{c,c}$	koeficient typu cementu III (-)
$r_{c,d}$	koeficient typu cementu IV (-)
r_{CO_2}	koeficient vlivu koncentrace CO_2 v okolí (-)
r_{RH}	koeficient vlivu relativní vlhkosti okolí (-)
r_s	koeficient typu přísady (-)
R	poměr rychlosti karbonatace betonu s ochrannou vrstvou a bez ní (-)
$R_{ACC,o}^{-1}$	inverzní efektivní odolnost proti karbonataci pro suchý beton určená ACC testem ($\text{m}^2/\text{s}/(\text{kg}/\text{m}^3)$)

R_n	neutralizační faktor (-)
$R_{NAC,O}^{-1}$	inverzní odolnost proti karbonataci určená za přírodních karbonatačních podmínek (m^2/s)/(kg/m^3)
RH	relativní vlhkost okolního vzduchu (%)
RH_{ref}	referenční relativní vlhkost (%)
s_m	množství písku v maltě (kg/m^3)
S_1	hmotnostní procenta SiO_2 v cementu pro beton (%)
S_1'	hmotnostní procenta SO_3 v cementu pro beton (%)
$S_{1,m}$	hmotnostní procenta SiO_2 v cementu pro maltu (%)
S_2	hmotnostní procenta SiO_2 v popílku (%)
S_2'	hmotnostní procenta SO_3 v popílku (%)
t	délka karbonatace (čas difúze) (roky)
t_0	referenční čas (roky)
t_c	doba ošetřování betonu (dny)
t_m	čas aplikace omítky (roky)
t_w	průměrný počet deštivých dnů za rok (dny)
T	teplota okolí ($^{\circ}C$)
V_a	obsah vzduchu v betonu (%)
$V_{a,m}$	obsah vzduchu v maltě (%)
w	množství vody v betonu (kg/m^3)
w_m	množství vody v maltě (kg/m^3)
w/c	vodní součinitel (-)
$(w/c)_{eff}$	efektivní vodní součinitel (-)
W	funkce vlivu počasí (-)
x	vzdálenost od povrchu
x_c	hloubka karbonatace (mm)
α	stupeň hydratace cementu (-)
β	stupeň hydratace popílku (-)
ε_t	korekční člen funkce $R_{NAC,O}^{-1}$ (m^2/s)/(kg/m^3)
μ	součinitel difúzního odporu (-)
ρ	objemová hmotnost betonu (kg/m^3)
ρ_{a_1}	objemová hmotnost písku v betonu (kg/m^3)
ρ_{a_2}	objemová hmotnost kameniva 4-8 mm v betonu (kg/m^3)
ρ_{a_3}	objemová hmotnost kameniva 8-16 mm v betonu (kg/m^3)

ρ_c	objemová hmotnost cementu v betonu (kg/m^3)
$\rho_{c,m}$	objemová hmotnost cementu v maltě (kg/m^3)
$\rho_{l,m}$	objemová hmotnost vápna v maltě (kg/m^3)
$\rho_{s,m}$	objemová hmotnost písku v maltě (kg/m^3)
ρ_v	objemová hmotnost vody v betonu (kg/m^3)

PŘÍLOHY

18 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 – Tabulka vstupních parametrů pro studie dle modelu Carb9.

PŘÍLOHA 2 – Tabulka vstupních parametrů pro srovnání jednotlivých modelů.

PŘÍLOHA 3 – Vstupní a výstupní data pro RC-LifeTime v modu „Concrete Cover Assessment“ (model Carb1b).

PŘÍLOHA 4 – Vstupní a výstupní data pro RC-LifeTime v modu „Service Life Assessment“ (model Carb1b).

PŘÍLOHA 5 – Vstupní a výstupní data pro FReET-D (model Carb2b).

PŘÍLOHA 6 – Tabulka vstupních parametrů pro srovnání vypočítaných hloubek karbonatace s naměřenými na chladicí věži.

PŘÍLOHA 1 - Tabulka vstupních parametrů pro studie dle modelu Carb9.

Veličina	Označení veličiny	Jednotka	Hodnota
Čas	t	roky	0 - 100
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	c_{CO_2}	mg/m ³	800
Relativní vlhkost okolního vzduchu	RH	%	65
Množství cementu v betonu	c	kg/m ³	370
Množství vody v betonu	w	kg/m ³	185
Množství písku v betonu	a_1	kg/m ³	644
Množství kameniva s granulometrií 4-8 mm v betonu	a_2	kg/m ³	262
Množství kameniva s granulometrií 8-16 mm v betonu	a_3	kg/m ³	925
Objemová hmotnost cementu v betonu	ρ_c	kg/m ³	3100
Objemová hmotnost písku v betonu	ρ_{a_1}	kg/m ³	2590
Objemová hmotnost kameniva 4-8 mm v betonu	ρ_{a_2}	kg/m ³	2540
Objemová hmotnost kameniva 8-16 mm v betonu	ρ_{a_3}	kg/m ³	2660
Obsah vzduchu v betonu	V_a	%	2
Hmotnostní procenta CaO v cementu pro beton	C_1	%	62,9
Hmotnostní procenta SiO ₂ v cementu pro beton	S_1	%	21,5
Hmotnostní procenta Al ₂ O ₃ v cementu pro beton	A_1	%	5,4
Hmotnostní procenta Fe ₂ O ₃ v cementu pro beton	F_1	%	3,3
Hmotnostní procenta sádrovce v cementu pro beton	G_1	%	5
Čas aplikace omítky	t_m	roky	30
Tloušťka omítky	d	mm	10
Množství cementu v maltě	c_m	kg/m ³	163
Množství vápna v maltě	l_m	kg/m ³	246
Množství vody v maltě	w_m	kg/m ³	263
Množství písku v maltě	s_m	kg/m ³	1500
Objemová hmotnost cementu v maltě	$\rho_{c,m}$	kg/m ³	3100
Objemová hmotnost vápna v maltě	$\rho_{l,m}$	kg/m ³	2345
Objemová hmotnost písku v maltě	$\rho_{s,m}$	kg/m ³	2590
Obsah vzduchu v maltě	$V_{a,m}$	%	3
Hmotnostní procenta CaO v cementu pro maltu	$C_{1,m}$	%	64,2
Hmotnostní procenta SiO ₂ v cementu pro maltu	$S_{1,m}$	%	20
Hmotnostní procenta Al ₂ O ₃ v cementu pro maltu	$A_{1,m}$	%	6,5
Hmotnostní procenta Fe ₂ O ₃ v cementu pro maltu	$F_{1,m}$	%	2,3
Hmotnostní procenta sádrovce v cementu pro maltu	$G_{1,m}$	%	6,8
Hmotnostní procenta CaO ve vápně pro maltu	$C_{l,m}$	%	85

PŘÍLOHA 2 – Tabulka vstupních parametrů pro srovnání jednotlivých modelů.

Veličina	Označení veličiny	Jednotka	Hodnota	Model: Carb
Čas	t	roky	50	1a,b, 2a,b, 3, 4, 5a, 6, 7, 8, 9
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	c_{CO_2}	mg/m ³	800	1a,b, 2a,b, 3, 4a,b, 5a, 8, 9
Relativní vlhkost okolního vzduchu	RH	%	55	1a,b, 2a,b, 3, 4a,b, 5a, 8, 9
Teplota okolí	T	°C	9,4	3
Množství cementu v betonu	c	kg/m ³	313	1a,b, 2a,b, 3, 4a,b, 5a, 7, 9
Množství vody v betonu	w	kg/m ³	185	1a,b, 2a,b, 3, 4a,b, 5a, 7, 9
Množství příměsi v betonu	P	kg/m ³	0	4a,b
Hodnota vyjadřující účinnost příměsi	k	-	1	4a,b
Množství písku v betonu	a_1	kg/m ³	847	1a,b, 9
Množství kameniva s granulometrií 4-8 mm v betonu	a_2	kg/m ³	386	1a,b, 9
Množství kameniva s granulometrií 8-16 mm v betonu	a_3	kg/m ³	625	1a,b, 9
Objemová hmotnost cementu v betonu	ρ_c	kg/m ³	3100	1a,b, 4a,b, 9
Objemová hmotnost písku v betonu	ρ_{a_1}	kg/m ³	2590	1a,b, 9
Objemová hmotnost kameniva 4-8 mm v betonu	ρ_{a_2}	kg/m ³	2540	1a,b, 9
Objemová hmotnost kameniva 8-16 mm v betonu	ρ_{a_3}	kg/m ³	2660	1a,b, 9
Obsah vzduchu v betonu	V_a	%	2	9
Hmotnostní procenta CaO v cementu pro beton	C_1	%	62,9	9
Hmotnostní procenta SiO ₂ v cementu pro beton	S_1	%	21,5	9
Hmotnostní procenta Al ₂ O ₃ v cementu pro beton	A_1	%	5,4	9
Hmotnostní procenta Fe ₂ O ₃ v cementu pro beton	F_1	%	3,3	9
Hmotnostní procenta sádrovce v cementu pro beton	G_1	%	5	9
Čas aplikace omítky	t_m	roky	100	9
Tloušťka omítky	d	mm	0	9
Množství cementu v maltě	c_m	kg/m ³	163	9
Množství vápna v maltě	l_m	kg/m ³	246	9
Množství vody v maltě	w_m	kg/m ³	263	9
Množství písku v maltě	s_m	kg/m ³	1500	9
Objemová hmotnost vápna v maltě	$\rho_{l,m}$	kg/m ³	2345	9

Objemová hmotnost cementu v maltě	$\rho_{c,m}$	kg/m ³	3100	9
Objemová hmotnost písku v maltě	$\rho_{s,m}$	kg/m ³	2590	9
Obsah vzduchu v maltě	$V_{a,m}$	%	3	9
Hmotnostní procenta CaO v cementu pro maltu	$C_{1,m}$	%	64,2	9
Hmotnostní procenta SiO ₂ v cementu pro maltu	$S_{1,m}$	%	20	9
Hmotnostní procenta Al ₂ O ₃ v cementu pro maltu	$A_{1,m}$	%	6,5	9
Hmotnostní procenta Fe ₂ O ₃ v cementu pro maltu	$F_{1,m}$	%	2,3	9
Hmotnostní procenta sádrovce v cementu pro maltu	$G_{1,m}$	%	6,8	9
Hmotnostní procenta CaO ve vápně pro maltu	$C_{l,m}$	%	85	9
Koeficient typu cementu I	$r_{c,a}$	-	1	6
Koeficient typu cementu II	$r_{c,e}$	-	1	7
Koeficient typu cementu III	$r_{c,d}$	-	1	5a
Koeficient stupně hydratace	r_{HD}	-	0,9	5a
Koeficient vlivu relativní vlhkosti okolí	r_{RH}	-	0,62	6
Koeficient vlivu koncentrace CO ₂ v okolí	r_{CO_2}	-	1,2	6
Koeficient typu kameniva	r_a	-	1	7
Koeficient typu přísady	r_s	-	1	7
Pevnost v tlaku	f_c	MPa	35	6
Poměr rychlosti karbonatce betonu s ochrannou vrstvou a bez ní	R	-	1	3
Regresní exponent funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu k_c	b_c	-	-0,567	8
Doba ošetřování	t_c	dny	7	8
Inverzní efektivní odolnost proti karbonataci pro suchý beton určená ACC-testem	$R_{ACC,O}^{-1}$	(m ² /s)/ (kg/m ³)	$1,34 \cdot 10^{-10}$	8
Regresní parametr funkce $R_{NAC,O}^{-1}$	k_t	-	1,25	8
Korekční člen funkce $R_{NAC,O}^{-1}$	ε_t	(m ² /s)/ (kg/m ³)	$1 \cdot 10^{-11}$	8
Průměrný počet deštivých dnů za rok	t_w	dny	40	8
Pravděpodobnost směru deště	p_{SR}	-	0,01	8
Regresní exponent funkce vlivu počasí w	b_w	-	0,446	8

PŘÍLOHA 3 – Vstupní a výstupní data pro RC-LifeTime v modu „Concrete Cover Assessment“ (model Carb1b).

RC LifeTime
Concrete Cover Assessment

Input Variables

Variable	Mean Value	Standard Deviation	PDF
Ambient CO ₂ Content [mg/m ³]	800	40	Normal
Relative Humidity of Environment [%]	70	5	Normal
Unit Content of Cement [kg/m ³]	313	5	Normal
Unit Content of Water [kg/m ³]	185	3.5	Normal
Unit Content of Aggregate 1 [kg/m ³]	847	15	Normal
Unit Content of Aggregate 2 [kg/m ³]	386	8	Normal
Unit Content of Aggregate 3 [kg/m ³]	625	12	Normal
Mass Density of Cement [kg/m ³]	3100	0	Deterministic
Mass Density of Aggregate 1 [kg/m ³]	2590	0	Deterministic
Mass Density of Aggregate 2 [kg/m ³]	2540	0	Deterministic
Mass Density of Aggregate 3 [kg/m ³]	2660	0	Deterministic
Uncertainty Factor of Model	1	0.15	Log-normal
Cover [mm]	33	5	Normal
Life-Time [years]	75		
Price for 1 ton of Cement [Kc or EUR]	2500		
Inflation Rate [%]			
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Reset"/>			

w/c ratio	0.591
a/c ratio	5.936
Emission of CO ₂ per m ³ of Concrete Mix [kg]	304 ± 5
Costs of Cement per m ³ of Concrete Mix [Currency Unit]	783 ± 1

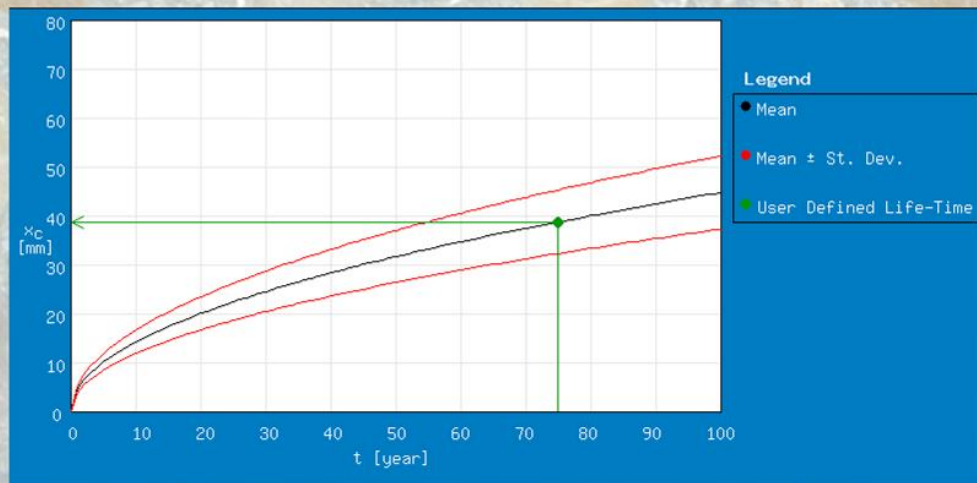
Results: Carbonation Depth vs. Time

t [years]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
x _c [mm]	Mean Value	14.1	20	24.5	28.3	31.6	34.6	37.4	40	42.4	44.7
	St. Dev.	2.39	3.38	4.13	4.77	5.34	5.85	6.31	6.75	7.16	7.55
	COV [%]	17									
Reliability Index for 33 mm Cover	3.46	2.2	1.34	0.7	0.19	-0.22	-0.56	-0.85	-1.1	-1.32	

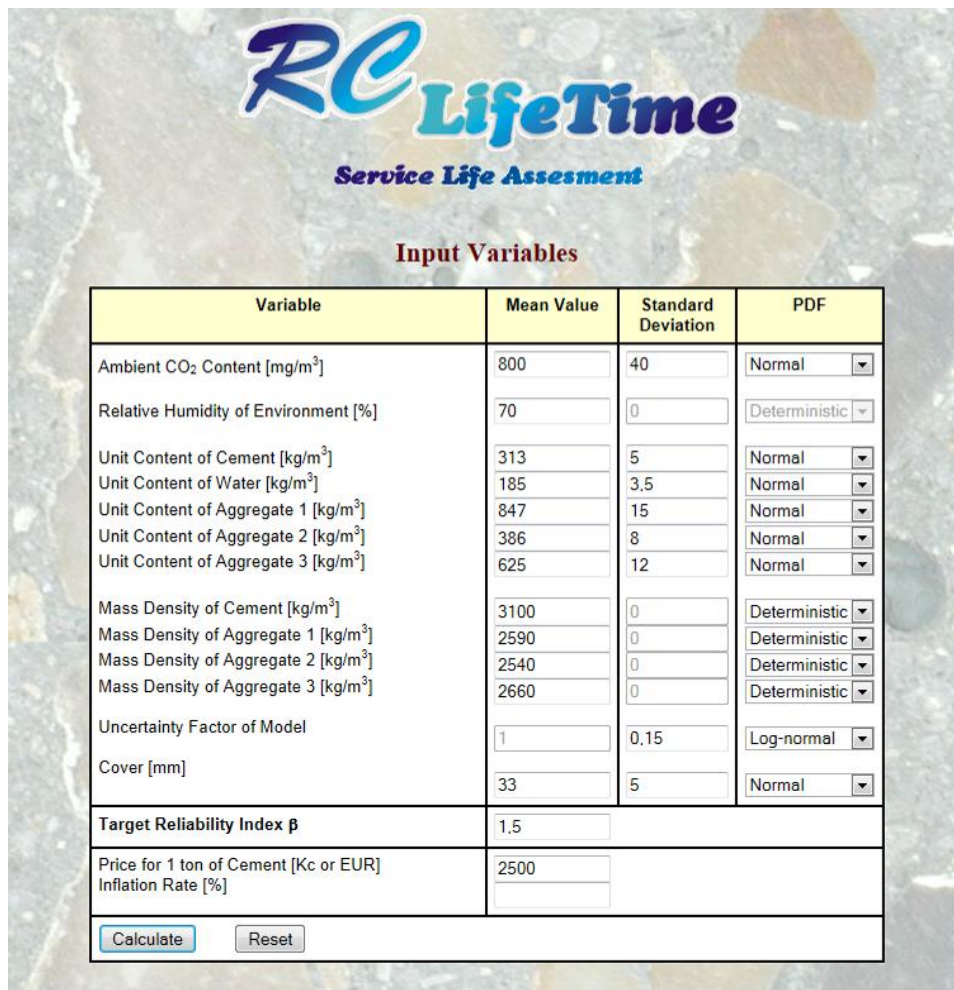
Results for User Defined Value

	Mean Value	St. Dev.	COV [%]
x _c [mm] for 75 Years Life-Time	38.7	6.54	17
Reliability Index for 33 mm Cover	-0.71		

Graph: Carbonation depth vs. time



PŘÍLOHA 4 – Vstupní a výstupní data pro RC-LifeTime v modu „Service Life Assessment“ (model Carb1b).



RC LifeTime
Service Life Assessment

Input Variables

Variable	Mean Value	Standard Deviation	PDF
Ambient CO ₂ Content [mg/m ³]	800	40	Normal
Relative Humidity of Environment [%]	70	0	Deterministic
Unit Content of Cement [kg/m ³]	313	5	Normal
Unit Content of Water [kg/m ³]	185	3,5	Normal
Unit Content of Aggregate 1 [kg/m ³]	847	15	Normal
Unit Content of Aggregate 2 [kg/m ³]	386	8	Normal
Unit Content of Aggregate 3 [kg/m ³]	625	12	Normal
Mass Density of Cement [kg/m ³]	3100	0	Deterministic
Mass Density of Aggregate 1 [kg/m ³]	2590	0	Deterministic
Mass Density of Aggregate 2 [kg/m ³]	2540	0	Deterministic
Mass Density of Aggregate 3 [kg/m ³]	2660	0	Deterministic
Uncertainty Factor of Model	1	0,15	Log-normal
Cover [mm]	33	5	Normal
Target Reliability Index β	1,5		
Price for 1 ton of Cement [Kc or EUR]	2500		
Inflation Rate [%]			

Calculate Reset

w/c ratio	0.591
a/c ratio	5.936
Emission of CO ₂ per m ³ of Concrete Mix [kg]	304 ± 5
Costs of Cement per m ³ of Concrete Mix [Currency Unit]	783 ± 1

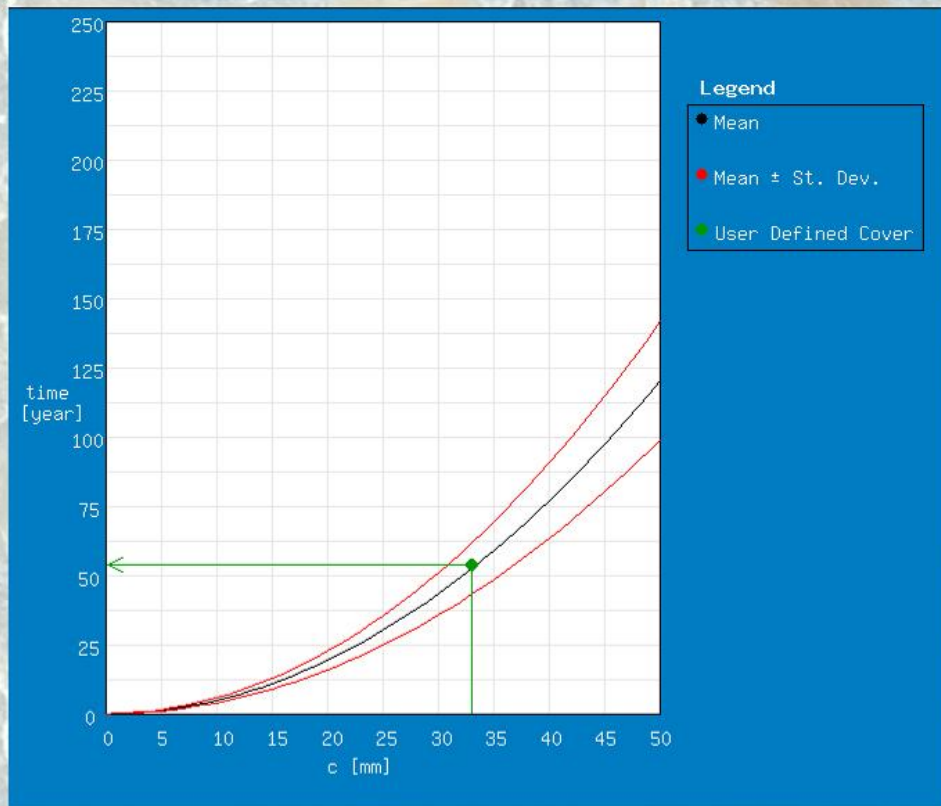
Results: Life-Time vs. Cover

cover [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
t_{ini} [years]										
Mean Value	1	5	11	19	30	43	59	77	97	120
St. Dev.	0.2	0.9	1.9	3.4	5.4	7.7	10.5	13.7	17.3	21.4
COV [%]	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

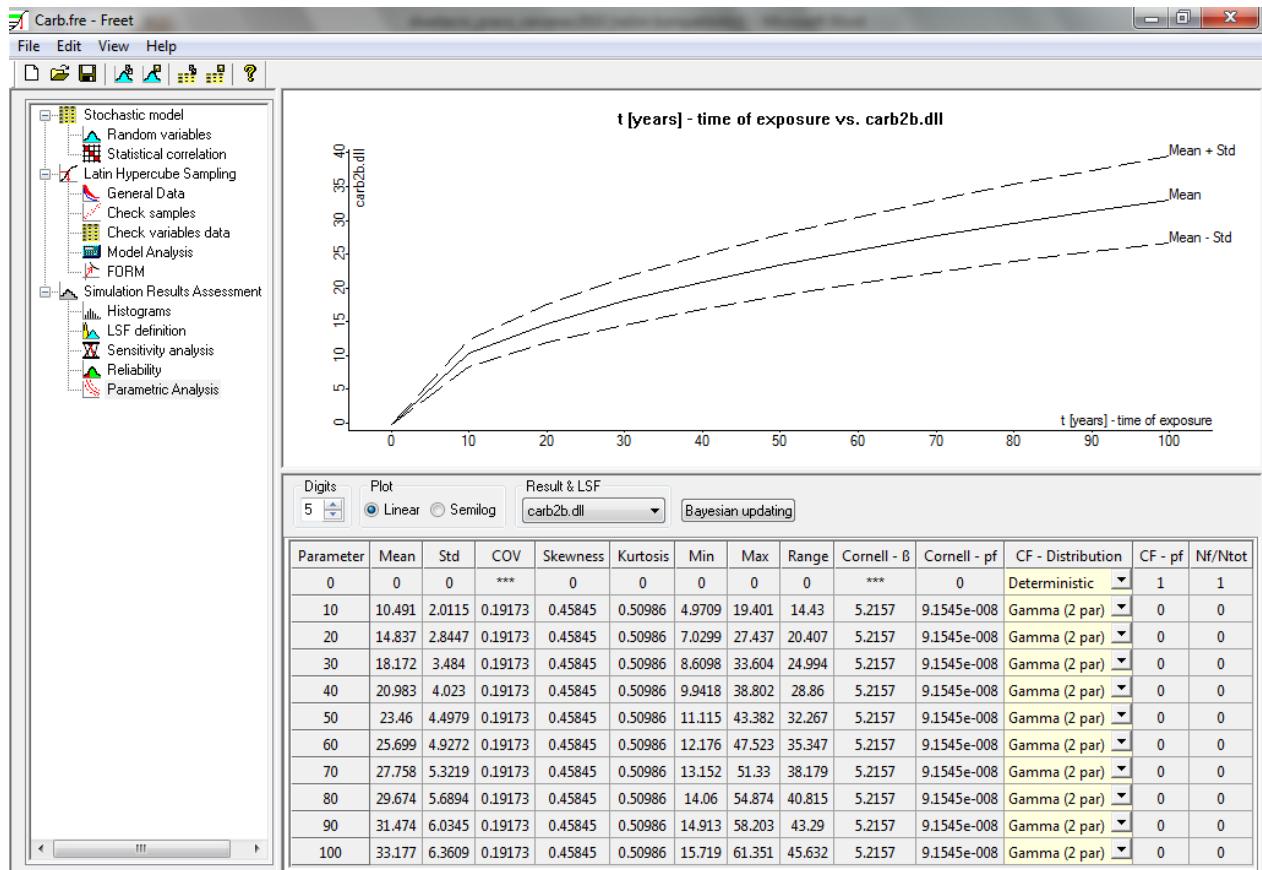
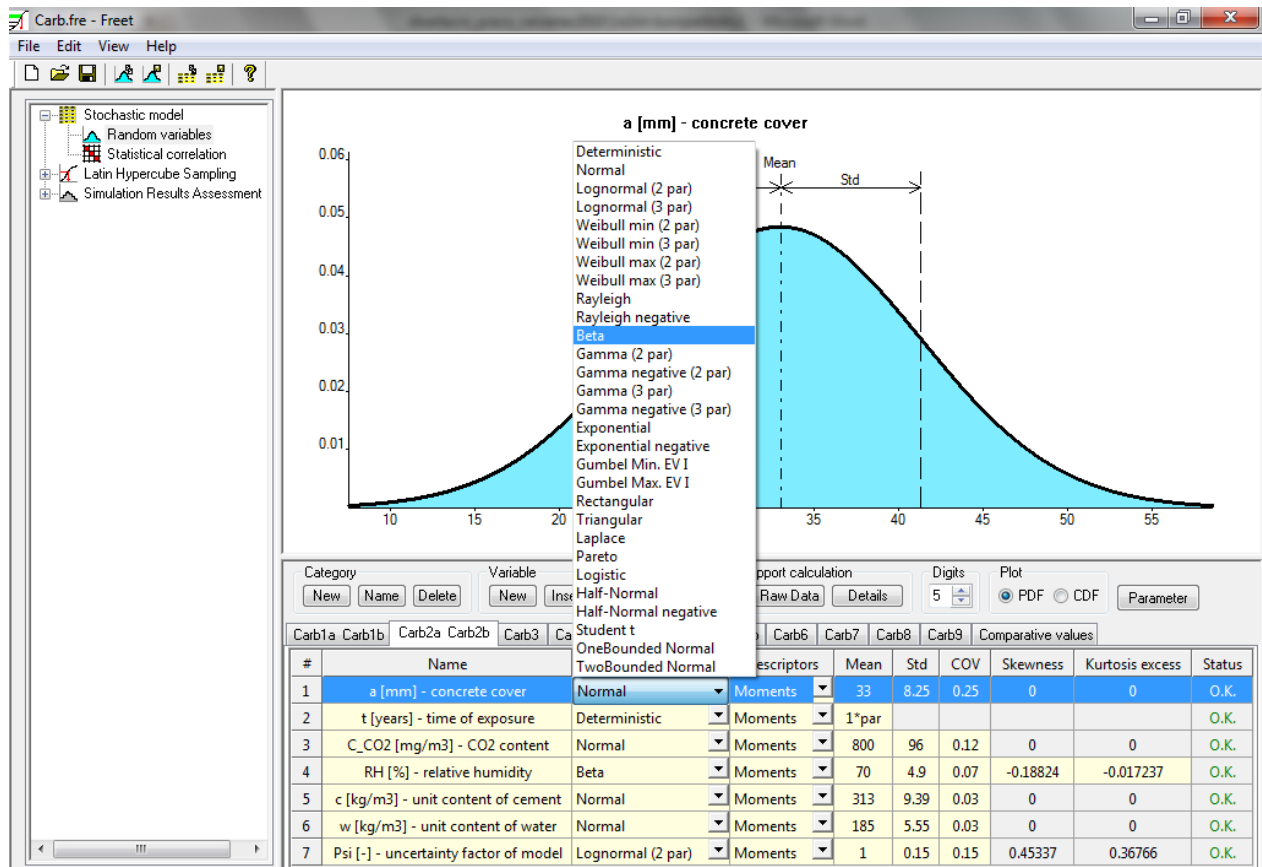
Results for User Defined Value

	Mean Value	St. Dev.	COV [%]
t _{ini} [years] for 33 mm Cover	54	19.1	36
Life-Time [years] for $\beta = 1,5$	34		

Graph: Life-time vs. cover



PŘÍLOHA 5 – Vstupní a výstupní data pro FReET-D (model Carb2b).



PŘÍLOHA 6 – Tabulka vstupních parametrů pro srovnání vypočítaných hloubek karbonatice s naměřenými na chladicí věži.

Veličina	Jednotka	Střední hodnota	COV	PDF	Model Carb
Faktor neurčitosti modelu	-	1	0,15	Lognormální (2 par)	1a,b, 2a,b, 8
Čas	roky	19,1	-	Deterministické	1a,b, 2a,b, 8
Množství CO ₂ v okolní atmosféře	mg/m ³	800	0,12	Normální	1a,b, 2a,b, 8
Relativní vlhkost: vnější vnitřní	%	70 93	0,07 0,03	Beta (a = 0, b = 100)	1a,b, 2a,b, 8
Množství cement v betonu	kg/m ³	342	0,03	Normální	1a,b, 2a,b,
Množství vody v betonu	kg/m ³	188	0,03	Normální	1a,b, 2a,b,
Množství písku v betonu	kg/m ³	834	0,03	Normální	1a,b
Množství kameniva s granulometrií 4-8 mm v betonu	kg/m ³	373	0,03	Normální	1a,b
Množství kameniva s granulometrií 8-16 mm v betonu	kg/m ³	614	0,03	Normální	1a,b
Objemová hmotnost cement v betonu	kg/m ³	3100	0,02	Normální	1a,b
Objemová hmotnost písku v betonu	kg/m ³	2590	0,02	Normální	1a,b
Objemová hmotnost kameniva 4-8 mm v betonu	kg/m ³	2540	0,05	Normální	1a,b
Objemová hmotnost kameniva 8-16 mm v betonu	kg/m ³	2660	0,05	Normální	1a,b
Regresní exponent funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu k_c	-	-0,567	0,04	Normální	8
Doba ošetřování	dny	1	-	Deterministické	8
Inverzní efektivní odolnost proti karbonatice pro suchý beton určená ACC-testem	(m ² /s)/ (kg/m ³)	$9,8 \times 10^{-11}$	0,48	Normální	8
Regresní parametr funkce $R^{-1}_{NAC;0}$	-	1,25	0,28	Normální	8
Korekční člen funkce $R^{-1}_{NAC;0}$	(m ² /s)/ (kg/m ³)	1×10^{-11}	0,15	Normální	8
Průměrný počet deštivých dnů za rok	dny	27,3	-	Deterministické	8
Pravděpodobnost směru deště vnitřní vnější	-	0,002 0,200	-	Deterministické	8
Regresní exponent funkce vlivu počasí w	-	0,446	0,37	Normální	8