

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY

Obor: Stavební inženýrství

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Karbonatace betonu a její vliv na nosnou konstrukci staveb

vedoucí práce: Ing. Luděk Vejvara, Ph.D., 2021
zpracovala: Bc. Darya Deiko

Plzeň 2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Darya DEIKO**
Osobní číslo: **A19N0052P**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Stavitelství**
Téma práce: **Karbonatace betonu a její vliv na nosnou konstrukci staveb**
Zadávací katedra: **Katedra mechaniky**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky a shromáždění současných údajů o karbonataci betonu.
2. Ukázky stanovení hloubky karbonatace a její výpočet pro různá prostředí a konstrukce, metody výpočtu, grafy.
3. Ukázka výsledků měření hloubky karbonatace u konkrétního objektu.
4. Předpoklad rozvoje karbonatace v čase a vliv na životnost železobetonové konstrukce.

Rozsah diplomové práce: **min. 80 stran**
Rozsah grafických prací: **práce skládající se z výkresů a textových částí**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

1. Matoušek, Drochytka: Atmosférická koroze betonů, CKAIT 1998.
2. Šmerda: Životnost betonových staveb, CKAIT 1999.
3. Platné normy – pro statiku – eurokódy EC 1 až EC 2, ČSN EN 206, ČSN ISO 13822.
4. Vejvara: Disertační práce, 2013.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luděk Vejvara, Ph.D.**
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **1. července 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **6. ledna 2021**

Radová

Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
děkanka



Jan Vimmr

Doc. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.
vedoucí katedry

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným dohledem vedoucího práce. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpala informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení bakalářské práce je legální.

V Plzni dne Podpis studenta:

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Ludřku Vejvarovi za spolupráci a odborné vedení při zpracování diplomové práce, za cenné rady, čas a vstřícnost při konzultacích. Také mu děkuji za poskytnuté informace a materiály, které mi pomohly při vypracování této práce.

Anotace

Diplomová práce popisuje problematiku karbonatace betonu, vlivu tohoto jevu na stavby a na jejich životnost, hodnocení účinků na nosné železobetonové konstrukce.

Metody a výpočty hloubky karbonatace betonu jsou popsány dle platných norem. Grafy, které ukazují hloubku karbonatace v čase, jsou provedeny v programu Excel a Word 2010. Pomocí těchto grafů a výpočtů můžeme stanovit předpokládanou životnost železobetonových nosných konstrukcí, hloubku karbonatace v závislosti na čase, prostředí a kvalitě betonu.

V diplomové práci jsou shromážděny údaje na toto téma z různých zdrojů a podklady pro porovnání výpočtů byly poskytnuty panem Ing. Luďkem Vejvarou, Ph.D.

Všechny metody a výpočty byly provedeny v souladu s platnými normami CSN EN.

Annotation

The diploma thesis describes the issue of carbonation of concrete, the impact of this phenomenon on buildings and their life, evaluation of the effects on load-bearing reinforced concrete structures.

Methods and calculations of concrete carbonation depth described according to valid standards. Graphs showing the depth of carbonation over time are performed in Excel and Word 2010. Using these graphs and calculations, we can assume the service life of reinforced concrete load-bearing structures by carbonation, depending on the time, environment and quality of concrete.

The diploma thesis collects data on this topic from various sources and the data for comparison of the calculation were provided by Mr. Ing. LudekVejvara, Ph.D.

All methods and calculations were performed in accordance with applicable CSN EN standards.

Klíčová slova

Karbonatace betonu, koroze výztuže, nosnost konstrukce, třída betonu, vlhkost prostředí, oxid uhličitý, výztuž, železobetonová konstrukce, alkalita betonu, pórovitost betonu, Eurokód, normy, hloubka karbonatace betonu, metody výpočtu hloubky karbonatace .

Keywords

Concrete carbonation, reinforcement corrosion, structural load capacity, concrete class, environmental humidity, carbon dioxide, reinforcement, reinforced concrete structure, concrete alkalinity, concrete porosity, Eurocode, standards, concrete carbonation depth, methods for calculating carbonation depth.

OBSAH

1. Úvod.....	9
2. Teoretická část.....	10
2.1 Pojem karbonatace betonu.....	11
2.2 Korozie, která je způsobená karbonatací.....	13
2.3 Stupně vlivu prostředí spojených s karbonatací.....	15
2.4 Vliv koncentrace plynu a vodní páry na karbonataci.....	17
2.5 Etapy (stadia) karbonatace.....	19
2.6 Tepelně ošetřené betony a jejich karbonatace.....	21
2.7 Dlouhodobá trvanlivost betonu a výztuže ohledně karbonatace.....	24
2.8 Třídy betonu v minulém a dnešním období.....	26
2.9 Cement v betonech starých konstrukcí.....	28
2.10 Vliv pórovitosti betonu na karbonataci.....	30
2.11 Vliv trhliny na karbonataci betonu.....	35
2.12 Hloubka karbonatace fenolftaleinovou zkouškou.....	36
3. Metody výpočtu postupu karbonatace.....	39
3.1 Modely výpočtu postupu karbonatace.....	39
3.2 Matematický výpočet karbonatace.....	44
4. Konstrukce panelové stavby zasažené karbonatací betonu.....	48
4.1 Prvky panelové soustavy zasažené karbonatací.....	48
4.2 Prvky v prostředí pro rozvoj karbonatace.....	49
4.3 Místa s největším nebezpečím karbonatace betonu.....	52
5. Praktická část diplomové práce.....	54
5.1 Vyhodnocení karbonatace na konstrukcích.....	54
5.2 Měření karbonatace na objektech.....	54
6. Výsledky měření hloubky karbonatace.....	65
7. Vyhodnocení výsledků měření hloubky karbonatace.....	83
7.1 Výsledky pro konstrukce s životností 50 a 90 let.....	83
7.2 Koeficient karbonatace podle zjednodušeného vzorce.....	83
7.3 Výsledky hloubky karbonatace pro jednotlivé betony vnitřních konstrukcí.....	84
7.4 Doporučení pro stávající a nové konstrukce.....	90
8. Závěrečné shrnutí.....	102
9. Podklady a použitá literatura.....	104
9.1 Seznam literatury.....	104
9.2 Seznam obrázků.....	105
9.3 Seznam tabulek a grafů.....	107

1. Úvod

V moderní době je železobeton široce používán k výstavbě nejrůznějších konstrukcí. Jedním z důležitých faktorů jeho životnosti je karbonatace betonu. Ta zasahuje různé prvky, bez ohledu na jejich užití.

V současné době a v blízké budoucnosti jsou beton a železobeton hlavní stavební materiály. Objemy a jejich oblast aplikace se nadále rozšiřují. Kromě obvyklých silových účinků od zatížení jsou konstrukce během roku vystaveny všem druhům vlivů prostředí. Na beton působí různé formy látek (pevné, kapalné, plynné, plazmové), energie (mechanické, tepelné, chemické, jaderné, elektromagnetické) nebo jejich kombinace.

Podle statistických odhadů je 15 až 75 % budov a staveb vystaveno různým účinkům agresivní prostředí. Na základě výsledků čtených průzkumů železobetonu se zjistilo, že nejcharakterističtější vady poškozených konstrukce představují poškození betonového krytu výztuže, tj. tzv. krytí výztuže.

Problém karbonatace betonu se promítá do všech staveb s nosnou železobetonovou konstrukcí. Konstrukce s ocelovou výztuží na základě karbonatace začínají korodovat, v důsledku čehož se objeví zkorodovaná výztuž, což zase vede k narušení celistvosti konstrukce a ke snížení únosnosti celé konstrukce.

Tématem diplomové práce je popis problematiky karbonatace betonu, teoretická a praktická část o zjištění hloubky karbonatace a vyhodnocení výsledků na konkrétních případech.
[1]

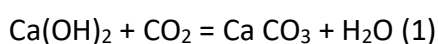
2. Teoretická část

2.1 Pojem karbonatace betonu

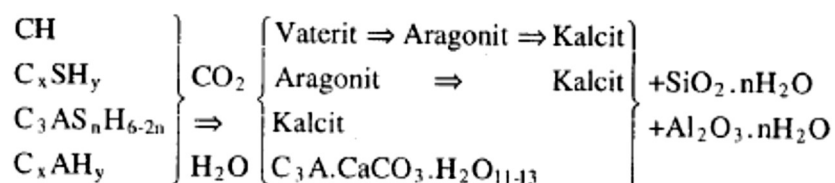
Karbonatace je proces neutralizace betonu působením oxidu uhličitého a vlhkosti absorbované z prostředí. Během tohoto procesu dochází k postupné změně počátečních vlastností materiálu - ke snížení jeho alkalické rovnováhy a tvorbě uhličitanu vápenatého.

Proces karbonizace začíná od okamžiku výroby materiálu a trvá po celou dobu provozu. Stává se to následovně: v betonu - ve styku se vzduchovým prostředím, konkrétně s kyselinotvornými plyny (oxid uhličitý) - dochází ke komplexní chemické reakci, při které se hydroxid vápenatý přemění na uhličitan vápenatý. Oxid uhličitý proniká do pórů betonové základny a při působení vlhkosti neutralizuje alkalické prostředí. V průběhu reakce klesají hodnoty pH z 12-12,5 na 9, v důsledku čehož jsou oslabeny ochranné vlastnosti materiálu a objeví se vhodné prostředí pro vývoj koroze.[2]

Zjednodušená reakce karbonatace betonu se dá zapsat takto:



Pojem karbonatace podle profesora Petra Pytlíka, CSc : *“Karbonatace betonu je projevem “stárnutí” betonu, který je soustavně napadán oxidem uhličitým z ovzduší.”* [3].
Většinou obsah oxidu uhličitého, který se nachází ve vzduchu, je 0,03% objemu (60 mg.m⁻³), ale tahle hodnota je vyšší v průmyslových oblastech. Také profesor Petr Pytlík, CSc uvádí: *“Rozklad probíhá na povrchu betonu a časem postupně proniká otevřenou pórovitostí do hloubky, napadá korozně ocelovou výztuž v železobetonu a konečným produktem je karbonát a především výrazné snížení pH betonu.”*[3].



Na rychlost karbonatace betonu má vliv jeho pórovitost. Čím více je beton pórovitý ve vrstvě krytí, tím vyšší je rychlost karbonatace, a tím kratší je čas potřebný k neutralizaci Ca(OH)₂ v krytí.

Karbonatace probíhá rychlostí patrné z rovnice

$$x = K\sqrt{t} \quad (2),$$

kde x je tloušťka betonu, ve které dochází k pronikání CO₂,

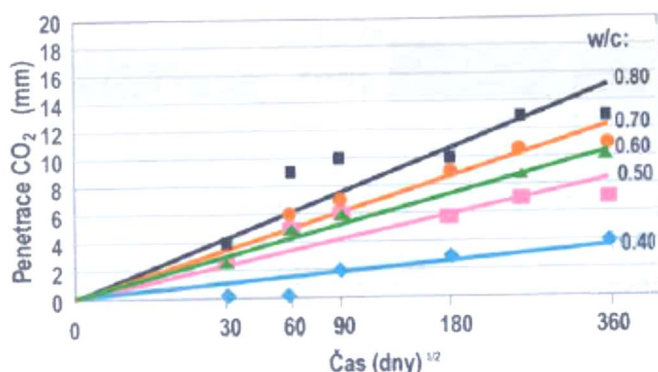
t = doba vystavení betonu působením vzduchu,

K = koeficient karbonatace, jehož hodnota závisí na následujících parametrech:

- relativní vlhkost vzduchu (r.h.)
- vodní součinitel
- typ cementu
- doba ošetřování před vystavením betonu působení vzduchu

Úloha r.h. je důležitá, protože koeficient karbonatace je nejvyšší při hodnotách r.h.

v intervalu 60 – 70% a klesá v suchém nebo velmi vlhkém prostředí.[2]



Obr. 2.1.1 – Vliv vodního součinitele [4]

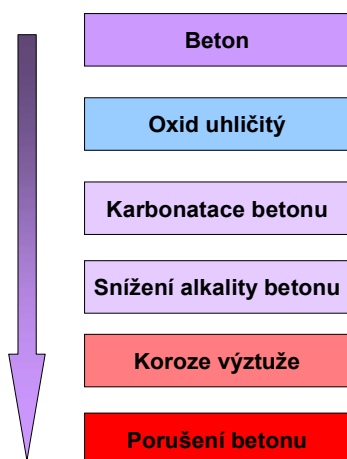
Čím vyšší bude vodní součinitel, tím vyšší bude kapilární pórovitost cementové matice a tím vyšší bude hodnota koeficientu K .

Jestliže beton obsahuje pucolánové cementy nebo strusku, potom je rychlost karbonatace vyšší než v obdobných betonech, které jsou vyrobeny jen z portlandského cementu při stejném vodním součiniteli $w/(c+m)$. Je to díky tomu, že množství portlanditu je nižší, protože je jedna část cementu nahrazena struskou nebo pucolánem, a ještě navíc pucolánová reakce spotřebuje vápno. Když porovnáme betony s podobnou tlakovou pevností, nenajde se výrazný rozdíl v rychlosti karbonatace pro různé typy cementů. To se dá zjistit z tabulky níže pro beton s 28 denní tlakovou pevností $f_{cu}/cm\ 40 - 45MPa$. [4]

Složení pojiva (cm)				cm (kg/m ³)	w/cm	f _{out/cm} (N/mm ²)	Hloubka karbonatice (mm) ve stáří					
Portland. cement (%)	vápe- nec (%)	popí- lek (%)	Stru- ska (%)				30 dní	45 dní	60 dní	90 dní	180 dní	360 dní
100	—	—	—	300	0,60	43,0	0,5	2,0	2,5	3,5	4,0	4,8
85	—	—	15	300	0,60	40,3	0,5	2,5	3,0	3,5	4,8	5,9
50	—	—	20	350	0,50	42,2	0,5	1,5	2,0	3,0	4,0	5,5
85	15	—	—	350	0,50	45,0	0,0	2,0	2,5	3,0	3,5	4,7
75	25	—	—	350	0,50	40,3	0,5	2,0	3,0	4,5	6,0	6,9
75	—	25	—	350	0,50	44,0	0,0	1,0	2,0	3,5	5,0	5,7
průměr						42,5	0,3	1,8	2,5	3,5	4,5	5,5

Obr. 2.1.2 – Rychlost karbonatice [4]

Všechny tyto parametry, které ovlivňují rychlost karbonatice, velice omezují použitelnost rovnice $x = K\sqrt{t}$ (2), která umožňuje vypočítat dobu, za jakou dojde k neutralizaci hydroxidu vápenatého působením CO₂ v krycí vrstvě, což ohrožuje výztuž v dané betonové konstrukci. Jinými slovy: kvůli změnám mikroklimatických podmínek (relativní vlhkosti prostředí) probíhá karbonatice nepravidelně a není plynulým procesem, jaký popisuje rovnice (2). Jinak, pokud známe stáří konstrukce a změříme tloušťku zkarbonatované vrstvy, může rovnice (2) výrazně pomoci, i když nevíme nic o vodním součiniteli a o typu použitého cementu.[4]



Obr.2.1.3 - Schéma nebezpečí karbonatice a ukázka odpadlé celé krycí vrstvy výztuže [21]

2.2 Koroze, která je způsobená karbonatací

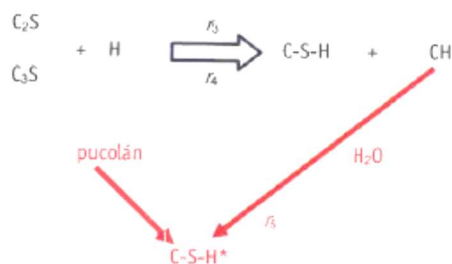
Proces koroze je umožněn vlhkým vzduchem, který obsahuje kyslík a vodu - složky, které jsou nutné pro přeměnu oceli v nesourodé hydroxidy železa. A proto se potom snižuje účinný průřez ocelového prutu alespoň o 20 $\mu\text{m}/\text{rok}$. Jinak je proces koroze podporován ještě jedním z následujících procesů:

- karbonatací betonu
 - pronikáním chloridu
- [5]

Ocelová výztuž v betonu je chráněna před korozí díky vrstvičce silné několik nanometrů, která je tvořena speciálními oxidy železa (FeOOH). Produkt je tak nepropustný, že voda a kyslík jím nemohou penetrovat a přicházet do kontaktu s ocelí a také docházet ke korozi, která je vyjádřena rovnicí :

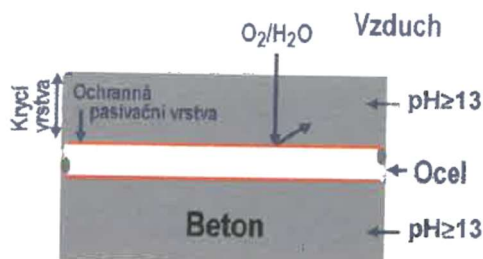


V zásaditém prostředí s pH nad 11,5 je tahle ochranná vrstvička stabilní. V průběhu hydratace vznikne Ca(OH)_2 , a to zřejmě podle rovnice:



Obr. 2.2.1 – Schéma hydratace [7]

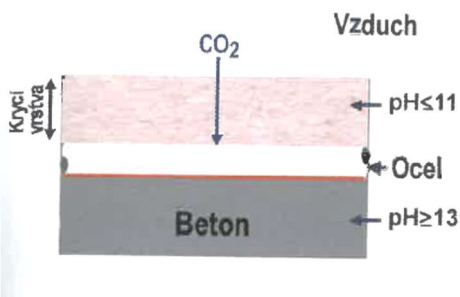
A to znamená, že pH vyšší než 13 je v kapalné fázi a vyplňuje póry a kapiláry v cementové pastě, takže výztuž je chráněna v tomto prostředí před korozí. Tahle vlastnost je známá dle dostupné literatury jako **pasivace** [6].



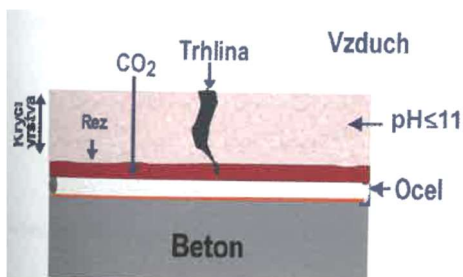
Obr. 2.2.2 – Pasivace [6]

Ale to se může změnit pronikáním CO_2 z vedlejšího prostředí přes vrstvu krytí, a proto dochází ke karbonataci - viz. rovnice (1). Takže když k tomu dojde a pH na kontaktu s výztuží klesne pod 9, tato hodnota je nižší než nutná pro pasivaci.

Tenhle proces se nazývá **depasivace** [1], a kvůli tomuto procesu je odstraněna ochranná vrstva FeOOH . Na straně, kde nastala karbonatace, reaguje železo z výztuže z rovnice (3) a vzniká rez. Pak se zvyšuje specifický objem, protože oxidy, jež jsou produkty koroze, mají objem vyšší než železo 6-7 krát. Krycí vrstva praská a ocelová výztuž má přímý kontakt se vzduchem, což ještě více zhoršuje korozi. [6]



Obr. 2.2.3 – Depasivace [6]



Obr. 2.2.4 – Porušení ocelových tyčí vlivem oxidace a objemových změn [6]

Karbonatace sama o sobě nezpůsobuje korozi ani výztuže ani betonu, proto není nebezpečná. Vlhký vzduch (voda a kyslík) je skutečnou agresivní složkou pro korozi výztuže. Ani

vysoký obsah CO₂ ve vedlejším prostředí nezpůsobí korozi, pokud vzduch v okolí je suchý, protože není přítomná voda. Ta je důležitou složkou pro vznik koroze. A také v betonových konstrukcích, které se nacházejí stále pod vodou, nenastane karbonatace jakož ani koroze, protože plyn nemůže pronikat vodou. Nevyskytuje se tam kyslík, a tím se nevyplňují kapilární póry.

2.3 Stupně vlivu prostředí spojených s karbonatací

Podle EN ČSN 206-1 stupně prostředí jsou značeny X. Jsou to prostředí, ve kterých má betonová konstrukce sloužit. Existující stupně jsou v tabulce uvedeny níže.

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

Obr.2.3.1 – Stupně vlivu prostředí [7]

Jak je v tabulce uvedeno, prostředí má vliv na karbonataci ve stupni XC. Nejvíce se to týká předpjatých a železobetonových konstrukcí, protože je tam větší riziko koroze výztuže vlivem jevu karbonatace. Existuje několik podtříd : XC1, XC2, XC3, XC4.

Největší riziko koroze výztuže bude u nejagresivnějšího prostředí XC4. Na konstrukci v tomto případě působí vlhké prostředí (nasakování vody) a střídavé suché prostředí (dochází k difuzi O₂ a CO₂). “ Ve všech případech se jedná o procesy umožňující neutralizaci hydroxidu vápenatého a podporující korozi výztuže díky karbonataci.” [7].

Nejmíň agresivní prostředí je například v interiéru, protože je to suché prostředí, a to je XC1.

Když je konstrukce stále pod vodou - v tomto případě agresivní prostředí bude XC2- kyslík a oxid uhličitý se nemohou dostat do betonu přes vodou zaplněné póry. Takže i v prostředí XC3 je beton vystaven vlhkému prostředí, ale ne přímému kontaktu s vodou (příkladem jsou vodotěsné betonové tunely).

Podle tabulky uvedené dále je prakticky vhodné použít třídu XC2 pro základové a vnitřní konstrukce a třídu prostředí XC4 pro vnější konstrukce.

Stupeň	Popis prostředí	Kde se s tímto prostředím setkáváme	Max. w/c	Min. třída pevnosti** <i>f_{yk1}/f_{yk2}</i>	Min. obsah cementu (kg/m ³)	Tloušťka krytí*** (mm)	
						r	p
XC1	suché nebo stále mokré	• Interiéry budov s nízkou vlhkostí vzduchu	0,65	20/25	260	15	25
XC2	mokrě, občas suché	• konstrukce zadržující vodu • základy	0,60	25/30	280	25	35
XC3	středně mokré, vlhké	• 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	• vnější konstrukce vystavené dešti	0,50	30/37	300	30	40

Obr. 2.3.2 – Stupně prostředí vlivem karbonatace [7]

V tabulce jsou znázorněny třídy pevnosti betonu a hodnoty vodního součinitele. Tak například změnou stupně XC3 na XC4 vodní součinitel se mění z 0,55 na 0,50, ale třída pevnosti betonu zůstává 37 MPa (C 30/37), protože je obtížné zkontrolovat skutečný vodní součinitel. Základní princip technologií betonu je takový, že tlaková pevnost se vztahuje jen k vodnímu součiniteli, nikoli k obsahu cementu.

S ohledem na stupně vlivu prostředí je karbonatace stanovena využitím zvýšení krytí výztuže a kvalitou betonu.[7]

Třída konstrukce	Stupně vlivu prostředí								
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1 XD1	XS2 XD2	XS3 XD3	Životnost /rok
S1	10	10	10	10	15	20	25	30	
S2	10	10	15	15	20	25	30	35	
S3	10	10	20	20	25	30	35	40	
S4	10	15	25	25	30	35	40	45	50
S5	15	20	30	30	35	40	45	50	80
S6	20	25	35	35	40	45	50	55	100

Tab. 2.3.1 - Minimální krycí vrstva výztuže z hlediska podmínek prostředí C_{min,dur}

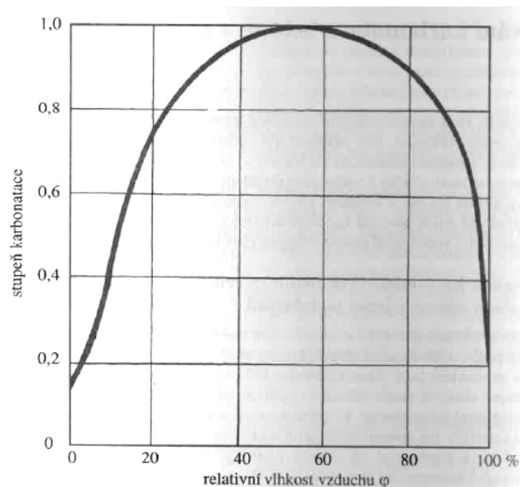
Třída konstrukce	Min.krytí C_{nom} pro stupně vlivu prostředí								
	XC1			XC2/XC3			XC4		
S1	10	10	20	10	10	20	15	10	25
S2	10	10	20	15	10	25	20	10	30
S3	10	10	20	20	10	30	25	10	35
S4	15	10	25	25	10	35	30	10	40
S5	20	10	30	30	10	40	35	10	45
S6	25	10	35	35	10	45	40	10	50

Tab.2.3.2-Minimální krycí vrstva výztuže z hlediska podmínek prostředí $C_{nom} = C_{min,dur} + \delta C_{dev}$

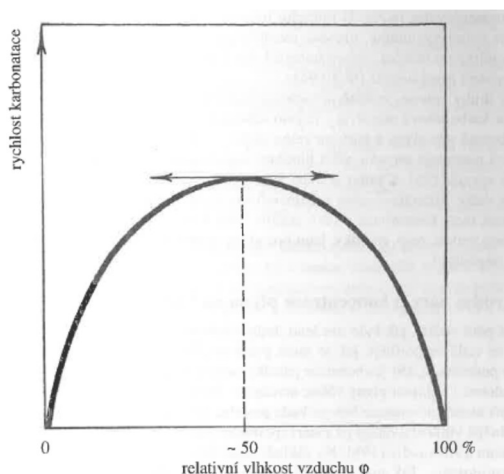
2.4 Vliv koncentrace plynu a vodní páry na karbonataci

Z předchozích kapitol je zřejmé, že pronikání plynu do vnitřních částí betonu chrání vyplnění pórů vodou, i když plyny ve vodě se rozpouštějí, jak je tomu u oxidu uhličitého. Na druhou stranu je v betonu přítomnost určité vlhkosti nutná, aby iontová reakce jako karbonatace mohla proběhnout. Ovšem jestli beton je vysušený tak jako i s CO_2 , tak i s ostatními plyny nereaguje. Také existuje nějaká střední mez vlhkosti prostředí, kde bude probíhat karbonatace co nejrychlejším způsobem.

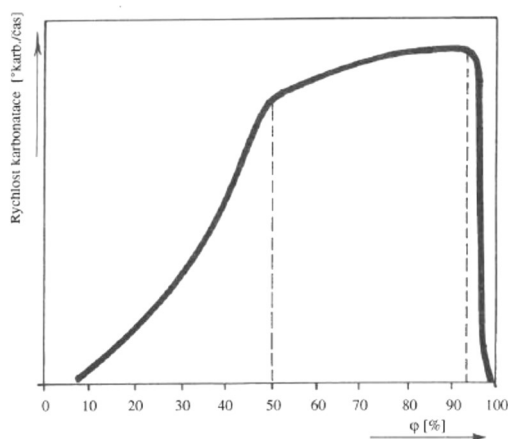
Závislosti doby a stupně karbonatace jsou uvedeny na obrázcích - rychlost karbonatace, a to podle Verbecka, Vénuata a Alexandria a Matouška.[8]



Obr.2.4.1 –Stupeň karbonatace závislý na relativní vlhkosti vzduchu podle Verbecka [8]



Obr.2.4.2 – Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu podle Venuata a Alexandria [8]



Obr.2.4.3 – Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu podle Matouška [8]

Takže vliv relativní vlhkosti prostředí na rychlost karbonatace je velmi značný. A také velkou roli hraje koncentrace oxidu uhličitého v prostředí. Fourierova rovnice ukazuje množství CO_2 v ovzduší :

$$dQ = \delta \cdot \frac{p_1 - p_2}{d} \cdot F \cdot dt [\text{kg}],$$

kde p_1 = parciální tlak CO_2 ve vzduchu = 30 Pa

kde p_2 = parciální tlak CO_2 v betonu pod zkarbonatovanou vrstvou Pa ≈ 0

d = tloušťka zkarbonatované vrstvy [m]

F = plocha kolmá k toku difundujícího CO_2 [m^2]

τ = čas [s]

δ = součinitel difuzní vodivosti CO₂ zkarbonatovaným betonem, který je závislý na složení tmelu a obsahu vlhkosti:

$$\delta = 6 \cdot 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 6 \cdot 10^{-12} \text{ s}.$$

Fourierův vztah můžeme transformovat za předpokladu, že je třeba stále stejné množství CO₂ ke karbonataci určitého objemu betonu. A to ze vztahu:

$$\text{Předpoklad } dQ = b \cdot dV,$$

kde b je 130 kg CO₂ potřebného na zkarbonátování 1 m³ betonu,

$$d = K \cdot \sqrt{\tau} [\text{m}],$$

kde $K = 1,67 \cdot 10^{-6} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$ [8].

2.5 Etapy (stádia) karbonatace

V literatuře [9,10] jsou celkem popsány čtyři etapy (stádia) karbonatace. Ve výzkumech bylo zjištěno, jakou roli hraje vlhkost při karbonatačních reakcích. Zde jsou popsány degradace cementového tmelu a vliv karbonatace na výztuž, a to v jednotlivých etapách.

Počáteční stav

Beton je ve standardní kvalitě a má pH nad 12 a nachází se ve vnějším prostředí, které začíná působit.

1. Etapa

- V první etapě roztok Ca(OH)₂ se mění na nerozpustný CaCO₃ působením CO₂, který zvětšuje objem o 10% a částečně zaplňuje póry. A to znamená, že se snižuje propustnost povrchu betonu.
- Vlastnosti betonu v této etapě se stávají o trošku lepšími.
- Hodnota pH 12 klesá na 11.
- Pasivita prostředí v téhle etapě chrání výztuž.

2. Etapa

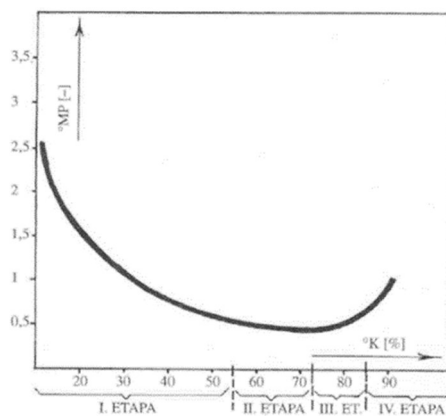
- Ve druhé etapě vznikají jemnozrnné, krystalické novotvary z probíhající přeměny ostatních produktů hydratace cementu.
- Vlastnosti betonu se tu nemění, ale mechanické vlastnosti kolísají jen kolem počátečních hodnot.
- Koncentrace vodíkových iontů klesá pod hodnotu pH 9,5.
- U výztuží nastává hranice, která ještě beton chrání pasivitou.

3. Etapa

- Vznikají až 10 krát větší krystaly aragonitu a kalcitu, a to v betonu nastává rekrytalizace za vzniku uhličitánových novotvarů z mezizrnečného roztoku.
- Mechanické vlastnosti betonu se zhoršují, klesá pevnost betonu.
- Pasivita prostředí již nechrání výztuže a začíná koroze.
- Hodnota pH klesá na hodnotu 8.

4. Etapa

- Ve čtvrté etapě celou strukturou cementového tmelu prostupují krystaly kalcitu a hrubé krystaly aragonitu. Nastává stoprocentní karbonatace.
- Snižuje se soudržnost betonu s výztuží. Beton má výraznou ztrátu pevnosti.
- Dochází ke korozi výztuží.
- pH klesá pod hodnotu 8.



Obr.2.5.1 – Závislosti mezi stupněm karbonatace a hodnotou pH, resp. stupněm modifikačních přeměn [9]

Etapy	0	I	II	III	IV
Stav konstrukce		Dobry, neomezeny karbonataci	Uspokojivy – pokročila karbonatace	Nebezpečny stav – poškozenni výztuže a snižování nosnosti	Ztráta pevnosti a soudržnosti
Beton	nový	Přeměna Ca(OH)_2 v tmelu na CaCO_3 , výplň póru snižuje propustnost CO_2	Modifikace a vznik jemnozrnných krystalů CaCO_3	Překrystalizace novotvarů – rozvoj velkých krystalu aragonitu a kalcitu	Velké krystaly zasahují celý beton
Pevnost betonu	dle návrhu	Kolem obvyklých hodnot	Kolem obvyklých hodnot	Postupně se snižuje	Snížená pevnost
Výztuž	nová	Ochrana posivací	Na kraji pasivační ochrany	Koroduje- bez pasivační ochrany	Koroze při vlhkosti 30-70%
pH	12,5	12 – 10,8	10,8 – 9,6	9,6 – 8	pod 8
Stupeň přeměn poměr hrubé a jemné f. krystalu		pod 0,5	0,4 – 0,5	0,4 – 0,8	nad 0,8
Stupeň karbonatace		do 55	55 – 73	73 – 85	nad 85

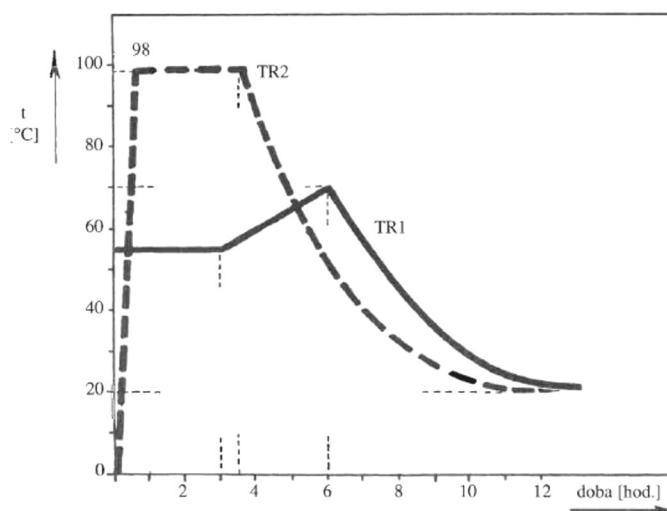
Tab.2.5 Postup karbonatace – účinky a etapy

2.6 Tepelně ošetřené betony a jejich karbonatace

Jedním ze způsobů urychlování tvrdnutí betonu je proteplování dílců z čerstvého betonu a zpracování čerstvých betonových směsí. Se zvýšením teplot se mění mikrostruktura cementového tmelu, a tím se mění jeho základní vlastnosti.

„Struktura cementového tmelu se proteplováním stává hrubší (Jambor 1972). Sledování účinků teplotních režimů na pórovitost se potvrdilo (SeishiGoto, Della M. Roy 1981 a další) a dokázalo také, jak použitá vyšší teplota zvětšuje plynopropustnost betonu.“[11].

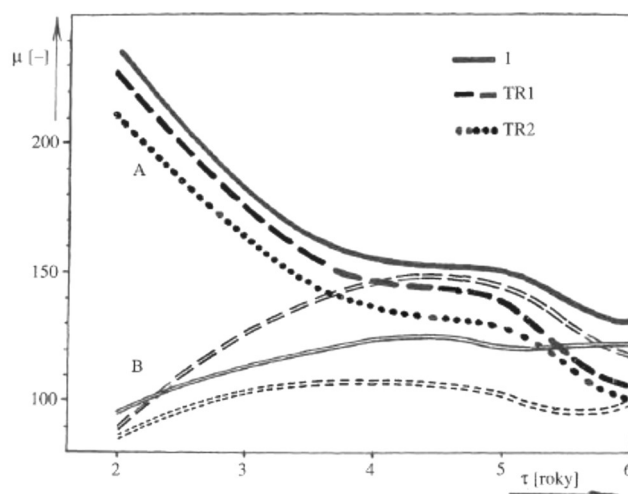
Difúzní charakteristiky betonu a hloubka pronikání oxidu uhličitého mohou být ovlivněny různými teplotními režimy a různými betonovými směsmi. Pro příklad vezmeme dvě betonové směsi. Jedna bude smíchána s přísávkem vody teplé 50 °C a druhá bude smíchána s vodou normální teploty. V propařovacích komorách nastavíme dva teplotní režimy ošetření (TR1, TR2). Na obrázku jsou parametry:



Obr.2.6.1 – Teplotní režimy [11]

Relativně mírné ošetření teplem představuje režim TR1, razantní ošetření představuje režim TR2. A to znamená, že režimy TR2 odpovídají teplotním režimům v těsně uzavřených formách a v bateriích, zatímco druhé režimy propařování jsou stejné jako režimy v tunelech a komorách.

Činitel difuzního odporu betonu lze pak ukázat v závislosti na době uložení betonu.



Obr.2.6.2 – Závislost na čase činitele difuzního odporu u betonové směsi 1/BS 1/ (5s VeBe, PC = 440 kg.m⁻³, 0/4 = 770 kg.m⁻³, 8/16 = 930 kg.m⁻³).

1 – normální uložení, A – neprotepované betonové směsi, B – protepované betonové směsi. [11]

Vzorce dokazují, že po dvou letech při tvrzení betonu za vyšších teplot činitel difuzního odporu klesá. Z důvodu změny propustnosti mikrostruktury cementového tmelu se stává beton propustnějším. Poznatkem je, že beton z neohřívaných směsí má třikrát menší propustnost než beton z teplých směsí. Z toho je vidět, jak se mění propustnost betonových vzorků v čase. Výsledkem je, že nejzajímavější interval je mezi 2 – 6 lety.

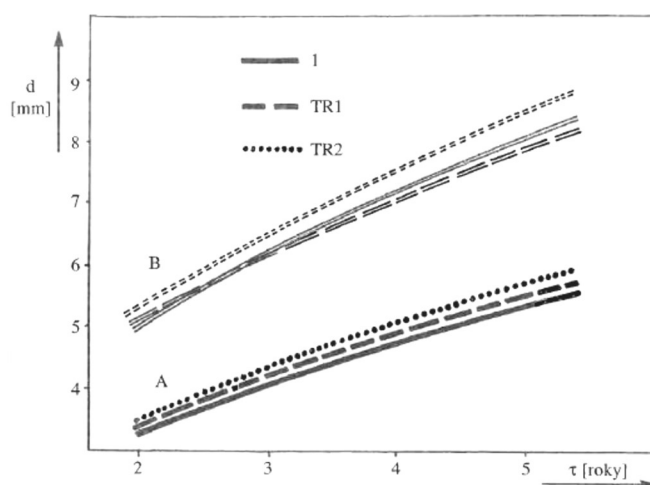
Přechodem gelu do xerogely se stává to, že se zmenšuje činitel difuzního odporu po dlouholetém uložení u všech neohřívaných betonových směsí.

Naopak s časem se zmenšuje propustnost u teplých směsí. Tohle se dá vysvětlit dodatečnou hydratací cementu. Na počátku hydratace u teplých betonových směsí dochází u cementu k šoku.

Propustnost vzorku betonu se postupně vyrovnává až po 4-6 letech po výrobě, ale za příznivých podmínek - např. vysoká relativní vlhkost vzduchu - všechny vzorky téměř stejným způsobem mohou dále hydratovat. Tím se potvrzuje podmínka, že teplé betonové směsi mají menší pevnost po určitém krátkodobém zvýšení pevnosti než neprotepované betony.

Pevnosti betonu se vyrovnávají až po delší době (více než 90 dnů).

Jak je ovlivněna propustnost betonu vybranými difuzními charakteristikami pro škodlivé plyny jako oxid uhličitý, je znázorněno níže:



Obr. 2.6.3 – Vyznačená hloubka vzniku atmosférického oxidu uhličitého v závislosti na čase do betonu BS 1. [11]

1 – normální uložení, A – neprotepované betonové směsi, B – protepované betonové směsi, d – hloubka průniku oxidu uhličitého do betonu.

Zde je vidět závislost na čase. A tady je patrné, že pro další průběh karbonatace rozhoduje zvýšení pórovitosti oteplovaných betonových směsí na počátku. Také je znázorněno, že do hloubky karbonatace, resp. pronikání oxidu uhličitého, dodatečná hydratace se mění stejně, tzn. že rozdíly se neztvrdí v chování různě připravených betonů.

U protepovaných betonů je velmi nebezpečná vzrůstající hloubka karbonatace, protože po dosažení cca 10 mm se zvyšuje koroze výztuže. To znamená, že se u protepovaných betonů obvyklým způsobem koroze výztuže a karbonatace zvyšuje více než u neotepovaných betonů.[11]

2.7 Dlouhodobá trvanlivost betonu a výztuže ohledně karbonatace

Trvanlivost betonu podle normy EN 206-1 a Eurokódu 2 je navržena alespoň na dobu 5 let. Ale pro mosty a prestižní architektonické objekty, a nebo z důvodu infrastruktury trvanlivost betonu má být zvětšena na 100 let a zpřísněny další podmínky. Z důvodu koroze výztuže díky karbonataci nejhorší agresivita prostředí odpovídá stupni XC4.

Další kapitola se bude týkat prodloužení životnosti jak konstrukce, tak i její části v nejvyšších stupních prostředí.

Pro prodloužení trvanlivosti ocelové výztuže jsou dvě základní řešení:

- I. Zkvalitnění betonu v krycí vrstvě betonu
- II. Zlepšení korozní odolnosti výztuže
 - I. První řešení se týká snížení pórovitosti betonu, a tím bude výztuž víc chráněna. Tím, že se CO_2 a Cl^- ionty nedostanou do výztuže se zvyšuje tloušťka krytí. Pro výpočet použijeme rovnici (2), která popisuje penetraci oxidu uhličitého a je možné z toho vypočítat dobu, za kterou CO_2 dosáhne až k výztuži.

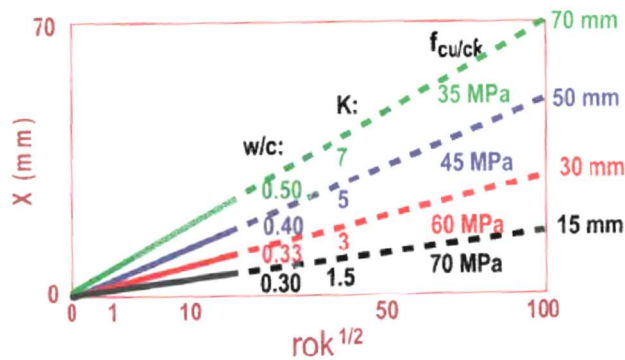
Například za dobu dosadíme 100 let, pak máme vypočítat přibližně reálný koeficient karbonatace K pro krytí 30 mm. To je požadováno pro trvanlivost železobetonových konstrukcí, které by měly vydržet více než 50 let. Toto je uvedeno v normě EN 206-1:

$$x = K\sqrt{t} \rightarrow K = x/\sqrt{t} = 30/\sqrt{100} = 30/10 = 3 \text{ mm.rok}^{1/2}$$

Pro výpočet z hlediska bezpečnosti v nejhodnějších podmínkách má být karbonatace stanovena hodnotou koeficientu K 3mm.rok^{1/2} (r.h. = 60 – 70%).

Během 10-12 let na betonech bylo provedeno měření hodnoty K při daných podmínkách. Betony odpovídají různým vlivům w/c 0,30 – 0,50 a mají také různou pevnost $f_{cu/ck}$ v rozsahu 30-70 MPa.

Podle výsledků se dá říct, že na dobu životnosti 100 let a tloušťku krytí 30 mm, používá se beton s pevností $f_{cu/ck} = 60$ MPa a s vodním součinitelem maximálně 0,33. Pro dobu životnosti 50 let se dá použít beton s pevností 45 MPa, a s $w/c = 0,40$. Ale pro tyto předpoklady má být beton dokonale zhutněn (stupeň zhutnění 0,99) a konstrukce, kterou odbedníme, má být ošetřena alespoň po prvních sedm dní vodou předtím, než beton začne karbonatovat v r.h. cca 65%. Dlouhodobé ošetřování vodou je požadováno vždy, jakož i to, že beton má být zhutněn. Tyto podmínky se stávají zcela nezbytnými v případě, že bude vyžadována dlouhodobá trvanlivost. [12]



Obr.2.7.1 – Penetrace Oxidu uhličitého v mm do betonu vystaveného působením vzduchu $RH = 65\%$ jako funkce času $\sqrt{\text{rok}}$ s charakteristickou krychelnou pevností $f_{cu/ck}$ a s různými vodními součiniteli w/c . Hodnota K je daná v $\text{mm} \cdot \text{rok}^{1/2}$. [12]

II. Druhy řešení lze shrnout do několika oblastí :

- Inhibitory koroze
- Ochrana ocelové výztuže: pozinkování, nátěry na bázi epoxidů
- Změna ve složení oceli - výztuž z nerezové oceli, skelná výztuž, laminát
- Katodická ochrana výztuže

Inhibitory koroze jsou důležité při karbonataci a použití kyselých aktivačních přísad jako CaCl_2 a SO_4^{2-} . Ty vytvářejí proti korozivnímu okolí pasivní povrch oceli. Tak inhibitory koroze mohou zpomalovat nebo zrychlovat tuhnutí cementu podle jejich dávky, ale většinou nemají vliv na reologické vlastnosti čerstvého betonu (například trietanolamin plastifikuje čerstvý beton). Ale nejenom trietanolamin může snížit pevnost betonu, ale i většina inhibitorů.

Dávka je velmi důležitou podmínkou, protože při větší dávce se projevuje účinnost inhibitorů. Kdyby se používaly kyselé urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu, potom by nebyla potřeba používat inhibitory koroze.

Inhibitory koroze jsou složeny z benzoátu vápenatého, dusitanu sodného, fluorokřemičitanu, trietanolaminu a thiomocoviny. [13]

Ochrana ocelové výztuže, která je vystavena korozi, spočívá v použití epoxidových nátěrů nebo pozinkování. Tyto varianty jsou náchylné na provádění ohybů, na dopravu a mechanické poškození. Pozinkování má dva problémy. První problém je v tom, že zinek reaguje s vápnem z cementu, a druhý je v tom, že výztuž nemůže s obvyčejnou ocelovou výztuží přijít do styku v době vzniku galvanického článku podporující koroze. První problém má vliv na vznik

retardéru zpožďujícím hydrataci betonu kolem výztuže a může snížit soudržnost výztuže s betonem.

Výztuž z jiných materiálů

Jedná se o jiné materiály výztuže jako například výztuž kompozitní se skelnými vlákny. Ještě existuje výztuž z nerezové oceli, ale je drahá pro použití a má nízkou přilnavost k betonu. Z důvodu nižší soudržnosti je potřeba větší kotevní délky a pak se zvětšuje i potřeba nerezové oceli a váha. Další výztuž může být kompozitní ze skelných vláken, které jsou zalaty v polyesterové pryskyřici. Tahle výztuž má výhody a nevýhody. Záporem je, že tahle výztuž není tažná, ale plusem je to, že není vodivá a nekoroduje. Tyhle typy mohou být upraveny nebo mít hladký povrch.

Katodická ochrana výztuže brání výztuž vystavenou korozi neustálým řízením elektrického potenciálu. Metoda je moc drahá a vyžaduje vodivé propojení a ještě další prvky. Musí být neustále pod zabezpečenou kontrolou. [13]



Obr.2.7.2 – Ochrana ocelové výztuže

2.8 Třídy betonu v minulém a dnešním období

Pro informaci ohledně karbonatce potřebujeme popsat značení betonu. Týká se to 20.století po současnost. Údaje budou uvedeny v tabulce značení tříd betonu podle různých norem.

ČSN 1090 ČSN 1230 (dle druhu)	ČSN 732001:56 736206:71 (dle značky r.1948)	ČSN 731201:86 (dle třídy)	ČSN 731201:67 (dle třídy)	ČSN EN 206-1
a	60		1	C 3/3,5
b	80	B 5		C 4/5
c	105	B 7,5	0	C 6/7,5
d	135	B 10	1	C 8/10
		B 12,5	II	C 9/12,5
e	170			C 10/13,5
		B 15	III	C 12/15
f	250	B20		C 16/20
		B25	IV	C 20/25
g	330			C 23/28
		B30		C 25/30
		B35		C 25/35
				C 30/37
				C 35/45
				C 40/50
				C 45/55
				C 50/60
				C 55/67
				C 60/75
				C 70/85
				C 80/95
				C 90/105
				C 100/115

Tab.2.8 – Třídy betonů podle různých norm (ČSN EN 206-1 a ČSN EN 206)

Z betonů uvedených v tabulce jsou patrné třídy nejnižší jakosti pro železobetonové konstrukce:

- V dnešní době z normy ČSN EN 206-1 je to třída C 16/20 pro suché vnitřní prostředí.
- Od roku 1967 to byla třída II.
- V letech 1931, 1935, 1937, 1948 je to značení d.
- Od roku 1986 je to třída B 12,5 a pro nosné dílce je to B15.
- V letech 1950, 1956, 1971 to byly značky 135 a B135.

V dnešní době při zkouškách bylo poznamenáno, že staré železobetonové konstrukce se mohou uvádět jako betony s nízkou třídou a odpovídat dnešnímu značení jako například C 8/10, C 9/12,5, C 10/13,5 a C 12/15.

A pak se nabízí otázka, zda ještě tyhle prozkoumané konstrukce podle dnešních norem a předpisů můžeme považovat za železobetonové. Betony starších konstrukcí už nesplňují podmínky únosnosti, pevnosti a i celkem konstrukčních zásad. Je nutno už tyhle betony odstranit a nahradit novými konstrukcemi.

Když tyto betony nesplňují ani konstrukční zásady a většinou už i vykazují velmi hluboký zásah karbonatice, nelze je zesílit ani sanovat.[14]

2.9 Cement v betonech starých konstrukcí

Od roku 1935 (ČSN 1091-1935) v normě pro navrhování betonových konstrukcí bylo stanoveno minimální množství cementu podle tříd betonu. Množství cementu v betonu je důležitou podmínkou u karbonatice betonu pro určení množství reagujícího cementu. Dříve se železobeton nazýval železový beton.

Beton r.1948 (dle značky)	Beton ČSN 1090 ČSN 1230	Beton podle EN 206-1 (dnešní značení)	Množství cementu minimální Pro pozemní stavby v kg	Množství cementu minimální Pro mosty v kg	Optimální Množství cementu v kg
135	D	C 8/10	270	300	300
170	E	C 10/13,5	270	300	350
250	F	C 16/20	350	350	400
330	G	C 23/28	450	450	500

Tab. 2.9.1 - množství cementu betonu na jeden metr kubický podle ČSN z roku 1935

Z tabulky je vidět, že minimální množství cementu podle ČSN 1091 z roku 1935 pro betony je 270 kg. Kvalita cementu není stanovena podle toho ČSN, k tomu došlo až v roce 1950.

Jednotlivé třídy cementu byly upraveny na některých konstrukcích výnosem ministerstva techniky č. 22/35. Většinou byl užíván cement 325. To se týkalo nosných konstrukcí průmyslových a pozemních staveb.

V tabulce je vidět kvalita cementu, která byla stanovena od roku 1950.

Značka cementu	Betonové konstrukce pro pozemní stavby	Prefabrikované konstrukce	Mosty	Jiné konstrukce	Cementové zboží
275	Méně namáhané				Méně namáhané
325, 350	Důležité konstrukce	ano			ano
450	Předpjaté konstrukce		ano	Tenkostěnné konstrukce	
650				Zvláštní práce	

Tab.2.9.2 - kvalita cementu, která byla stanovena od roku 1950

Dále od roku 1950 bylo stanoveno nejnižší možné použité dávkování cementu v betonu výnosem ministerstva techniky. Jakostní třídy ještě v tuhle dobu neměly vliv na množství určeného cementu. Ale stanovené množství bylo uvedeno pro beton třídy B 135 a pro průmyslové a zemědělské stavby značky 325. K tomu patřily i betonové stavby.

Tenhle výnos měl název „Směrnice pro šetření a řádné hospodaření s cementem“, a tím bylo omezeno užití cementu. Podmínky výnosu vyčteme z tabulky níže uvedené.

Konstrukce	Prostý beton v kg	Cement	Zhutněný beton bez vibrátorů v kg	Zhutněný beton s vibrátory v kg
Vnitřní – chráněné před povětrností	100	325	200	265
nechráněné před povětrností	100	325	220	250
Ve styku s vodou	100	325	240	220
Ve styku s vodou a účinky střídavého zamrzání a rozmrzání		325	240	220

Tab.2.9.3 - povolené množství cementu od roku 1950

Citováno z norem a knihy „Úsporná míšení nejpevnějších betonů“. [15]

V dnešní době vycházíme z normy EN 206-1 a z části 1 „Beton – část 1: Specifikace, vlastnost, výroba a shoda“ a určuje se podle ní množství cementu závislé na stupni vlivu prostředí. Pro karbonataci, která způsobuje koroze výztuže, jsou hodnoty uvedeny v tabulce níže.

	XC1	XC2	XC3	XC4
Maximální vodní součinitel	0,65	0,60	0,55	0,50
Minimální obsah cementu	260	280	280	300
Minimální pevnostní třída	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 30/37

Tab.2.9.4 - Množství cementu podle stupni vlivu prostředí

Pro prostředí X0 pevnost má být minimální C 12/15.

2.10 Vliv pórovitosti betonu na karbonataci

O vlastnostech látky vypovídají póry a mohou sloužit jako cenný zdroj informací. Například jaký je stupeň mechanického napětí, deformace struktury... a v důsledku toho vodotěsnost, smrštění, pevnost, mrazuvzdornost atd. Pórovitost se vypočítá podílem pórů z celkového objemu látky, a to se nazývá celková pórovitost P_{ck} . Jedná se o velikost a distribuci pórů a tvar.

Rovnice pórovitosti podle literatury [16]:

$$P_{ck} = 1 - \frac{p_{ck}}{p} [-]$$

P – měrná hmotnost cementového kamene (bez pórů),

P_{ck} – objemová hmotnost (včetně pórů) v kg na m^3

Na prostředí a pronikání kapaliny nebo plynu závisí i tvar pórů. Existují tři typy pórů: neprůchodné (požadují výrazný tlak kapaliny pro úplné vyplnění pórů), otevřené a uzavřené (nezaplnitelné). Otevřené průchodné póry (kapiláry) se zužují a rozšiřují, nemají konstantní průřez po celé délce, mají rozdílný průřez a velikost.

Póry se dají rozdělit podle:

- velikosti
- vlivu na vlastnosti cementového kamene, a to i betonu
- podle vzniku pórů

Podle závislosti objemu celkové otevřené pórovitosti na velikost pórů můžeme spočítat distribuci pórů. Distribuce pórů vypočítáme z rtuťové pórozometrie (MIP – Mercury Intrusion Porosimetry).

MIP – je metoda, kde tlakem rtuti až 10 MPa vyplňujeme póry od 0,1- 2.10⁻⁹ m, kde je poloměr kapilárů nepřímo úměrný tlaku rtuti. Dále z obrázků a z tabulky zjistíme kumulovanou četnost velikosti pórů v cementovém kameni s různým součinitelem a hodnoty typické pórovitosti.

Póry rozdělujeme na:

- makropóry (d > 1μm, technologické P_T a provzdušňovací P_p)
- mikropóry(d do 1 μm)

Mikropóry pak rozdělíme na:

- hydratační P_H
- gelové P_G
- kapilární P_K

Celkovou pórovitost potom vyjádříme součtem:

$$P_{ck} = (P_T + P_p) + (P_G + P_H + P_K)$$

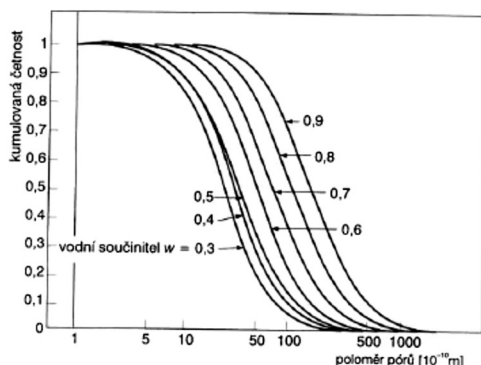
w	Průměr d (μm)	Medián d (μm)	Pórovitost (%)	k (10 ⁻¹⁵ m.s ⁻¹)
0,3	3,68	2,45	27,2	1
0,4	5,20	3,31	35,6	2
0,5	4,49	3,00	44,2	3
0,6	7,36	4,89	52,5	23
0,7	10,29	6,87	55,5	220
0,8	14,57	9,75	57,9	963
0,9	22,08	14,69	64,9	4100

Tab.2.10.1 - Závislost cementového kamene na vodním součiniteli

w – vodní součinitel

d – průměr kapilár

k – permeabilita



Obr. 2.10.1 – Kumulovaná četnost pórů cementového kamene různého vodního součinitele w . [16]

Technologické póry P_T

Když v betonu cementový kámen tvoří matici, budou se tam projevovat technologické póry. Projevy těchto pórů mohou ovlivnit nedostatečné zhutnění čerstvého betonu při nedostatku cementového tmele a jeho vztah k mezerovitosti kameniva. Nedostatečná intenzita zhutnění tuhé konzistence čerstvého betonu se může projevit také na těchto pórech. Při sedimentaci jemných částic také vzniknou technologické póry – když dutina nasaje vodu pod plochou zrna kameniva a pak se ve ztvrdlém betonu vysuší a zůstane tam vzduchová mezera (dutina). [16]

Z rovnice se dá vypočítat technologická pórovitost:

$$P_T = 1 - \frac{P_{CB}}{P_{AV}},$$

p_{CB} – objemová hmotnost čerstvého betonu v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

p_{AV} – hmotnost vypočtená z absolutních objemů složek v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Gelové póry P_G

Je to typ pórů, které jsou zaplněné vodou neodpařitelnou při normálních teplotách - pouze při 105°C . Velikost takových pórů je většinou $d \approx 2\mu\text{m}$ a se strukturou měrného povrchu $2,1 \cdot 10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Měrná hmotnost je $p_v = 1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pak 45% gelu jde na povrch zrn cementu a 55% v okolní kapiláry, které vyplňuje, a to vše z 1 cm^3 gelové vody, z které se tvoří $2,2 \text{ cm}^3$ gelu.

Podíl daných pórů vypočítáme z rovnice (většinou podíl bývá 0,28 až 0,40) :

$$P_G = \frac{0,13 \alpha_H \cdot m_c}{p_V},$$

kde α_H – stupeň hydratace cementu = $0,9 \cdot \sqrt{w}$ (28 dní), nebo Fagerlung vyjadřuje vztah pro výpočet stupně hydratace.

$$\alpha_H = (0,12 \cdot \log t + 0,40) \cdot \sqrt[4]{P_{KV}}$$

P_{KV} – kapilární pórovitost zvětšená provzdušností pórů [-]

w – vodní součinitel

m_C – množství cementu v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

t – čas tvrdnutí betonu při 20°C (počet dnů)

m_V – množství vody v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Provzdušňovací póry P_P

Vznikají, když při pomoci provzdušňovací přísady provzdušní čerstvý beton. Tvoří 4 – 6% objemu betonu podle velikosti maximálního zrna kameniva a mají průměr 50-300 μm . [16]

Hydratační póry P_H

Uvolní se kapiláry kvůli tomu, že voda je použita na hydrataci silikonových minerálů, a tím se vytvoří hydratační póry. Silikonové zhydratované minerály mají objemovou hmotnost kolem 2440 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a voda 1350 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, cementový gel 1750 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Cement pro svoji hydrataci potřebuje kolem 23-26% vody z jeho celkové hmotnosti, a tím se uvolní 25 procent objemu. [16]

Hydratační póry mají velikosti do 8 μm a můžeme je vypočítat z rovnice:

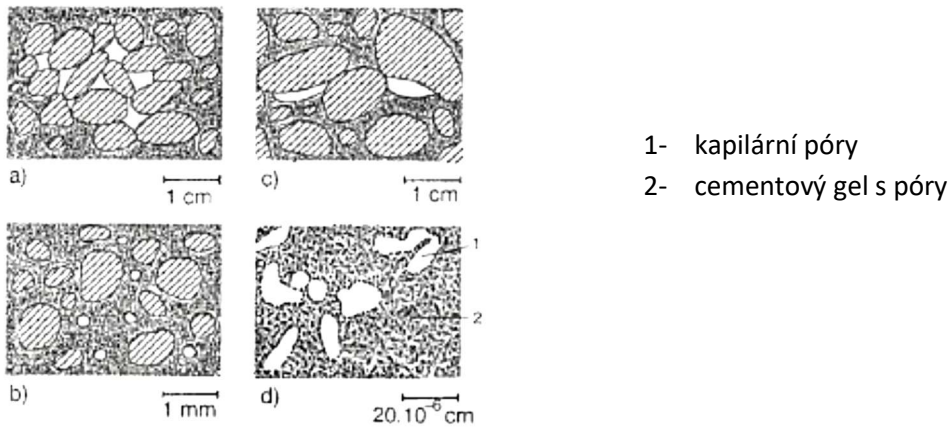
$$P_H = \frac{0,25 \cdot \alpha_H \cdot m_C}{4 \cdot P_V}$$

Kapilární pórovitost P_K

Je taková pórovitost, která souvisí s vysokým vodním součinitelem a je způsobena zvýšeným množstvím vody nad hodnotu 0,13 na gelovou vodu a 0,25 na hydrataci. Část cementu bude nehydratována, pokud vodní součinitel bude menší než 0,38.

Vyjádříme kapilární pórovitost z rovnice:

$$P_K = \frac{m_V - 0,38 \cdot \alpha_H \cdot m_C}{p_V} = \frac{m_C}{p_V} \cdot (w - 0,38 \cdot \alpha_H).$$



Obr.2.10.2 – Póry v betonu.[16]

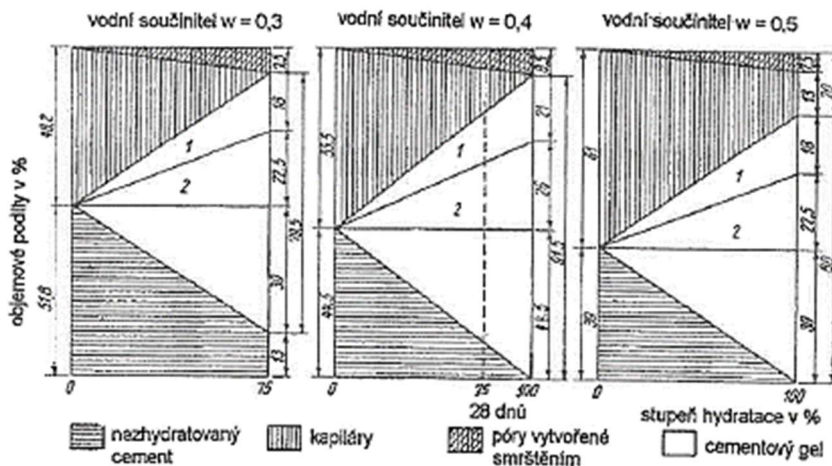
a) technologické b) provzdušňovací c) sedimentační d) kapilární póry

Celková pórovitost

Dobu hydratace cementu ovlivňuje distribuce pórů. Póry větší než 10^{-4} m mají vliv na pevnost a póry větší než $5 \cdot 10^{-5}$ mají vliv na velikost a vodotěsnost pórů. Když je menší než $5 \cdot 10^{-8}$ m, voda bude v minus 30 stupních přecházet v led. V pórech bude docházet ke kapilární kondenzaci při velikosti do $5 \cdot 10^{-7}$ m. Když budou póry větší než 10^{-7} m, budou provzdušněné. [16]

Rovnice celkové pórovitosti:

$$P_{CK} = \left(1 - \frac{p_{CB}}{P_{AV}}\right) + \frac{m_C}{p_V} \cdot (w - 0,1875 \cdot \alpha_H)$$



Obr.2.10.3 – Objem cementového kamene při rozdílném vodním součiniteli, který závisí na stupně hydrataci. [16]

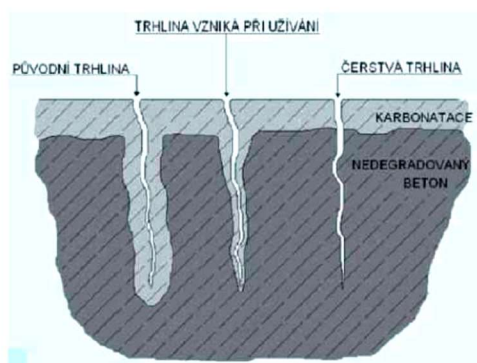
- 1- Gelový prostor s vodou, která je fyzikálně vázaná
- 2- Voda chemicky vázaná

2.11 Vliv trhliny na karbonataci betonu

Dalším zdrojem karbonatace jsou trhliny. CO₂ proniká do vnitřní struktury betonu rovnoměrně, když je beton bez trhlin a míra vzniku karbonatace je malá.

Při vzniku trhliny do betonu pronikají plyny a další škodlivé materiály z vnějšího prostředí, a tím vzniká postupně koroze výztuže. Koroze vždy postupuje od trhliny ve směru k výztuži. Koroze se zastavuje po 5-10 mm. Pronikání vlhkosti přes trhliny do betonu snižuje jeho alkalitu a rozvoj karbonatace je potom rychlejší. Existuje několik typů trhlin a míra karbonatace s každým typem.

- Trhlina čerstvá – ke karbonataci nedochází nebo jen ve velmi malé míře
- Původní – konstrukce je vystavená karbonataci už při její výstavbě, nebo hned ze začátku užívání konstrukce. Hloubka karbonatace je přitom stejná jak na povrchu konstrukce, tak i uvnitř struktury.
- Trhlina, která vznikla při užívání konstrukcí, má vliv na hloubku karbonatace. Je odlišná na povrchu konstrukce a na jejím konci. Vznik karbonatace je dlouhodobý a k degradaci dochází postupem času.[17]



Obr. 2.11.1 – Karbonatace kolem trhliny [17]

Šířky trhlin

K poškození výztuže v běžném prostředí dojde až při trhlíně široké 1mm a více, podmínkou ale je krytí výztuže 20-30mm. Může dojít i k napadení výztuže i při hloubce nad 0,4 mm například v průmyslovém prostředí nebo při šířce 0,8 mm v prostředí v blízkosti moře. Tyhle údaje platí pro hlavní výztuž s dostatečným krytím. Třmínková výztuž může být napadená i při šířce trhliny 0,1 mm.

V tabulce je uvedena závislost rozvoje koroze na šířce trhliny:

trhlina	1 rok	2 roky	3 roky	4 roky
0,1 mm	0,07	0,08	0,085	0,09
0,2 mm	0,08	0,1	0,12	0,125
0,3 mm	0,09	0,13	0,145	0,15
0,5 mm	0,1	0,14	0,165	0,18
0,7 mm	0,12	0,17	0,2	0,225
volná ocel	0,071	0,135	0,207	0,271

Tab. 2.11.1 - Závislost rozvoje koroze a šířky trhliny

Z tabulky je zřejmé, že po 3 letech volně uložená ocel ztratí 0,2 mm své tloušťky.

Existují dva úseky uvnitř trhliny nosné výztuže:

- Katodový – umístěný přímo na kovu výztuže
- Anodový – umístěný okolo trhliny v betonu

Proto nejdříve dochází k narušení kolem trhliny a až potom je narušení výztuže přímo v trhlíně. S postupem času se z agresivního prostředí anodový úsek přesouvá na povrch výztuže trhliny a způsobí hlubší porušení kovu.

2.12 Hloubka karbonatace fenolftaleinovou zkouškou

Při posuzování starých konstrukcí má být zjištěna alkalita betonu. Nejčastější metoda měření alkality betonu je pomocí acidobazických indikátorů. Tyto prvky obarví beton na určité úrovni pH. Nejznámější indikátor je indikátor fenolftalienu. Tím se zjistí přibližná hloubka karbonatace.

Pro měření hloubky karbonatace se nejčastěji používá bezbarvý lihový roztok 1% fenolftalienu, případně 10 % kyselina chlorovodíková. V blízkosti povrchu zkarbonatovaného betonu se nanáší postupně roztok. Sonda proniká do betonu a roztok musí dosahovat až za nosnou výztuž. V tom případě výsledky budou přesnější.

Principem metody je to, že povrch betonu se zabarví do fialovo-červených odstínů v případě, že karbonatace je nenalezená, a tudíž beton má $\text{pH} > 9,5$, ale pořád se jedná o alkalické prostředí. V případě, že se neobjeví žádná barva, znamená to, že beton je zasažen karbonatácí. Část konstrukce je nebezpečná pro výztuž, protože $\text{pH} < 9,5$ a začíná koroze výztuže.

Zkoušky se provádějí v různých prostředích: na staveništi, v laboratoři, přímo na části konstrukce a nebo na vzorcích.[18]

Existují i další méně používané látky jako jsou:

- Nitramin – má hnědo-oranžovou barvu, v případě přechodu na pH 11,5
- Nitrofenol – má žluto-oranžovou barvu s přechodem na hodnotu pH 8,0
- Thimolftalein – zabarví se modře při pH 10,0



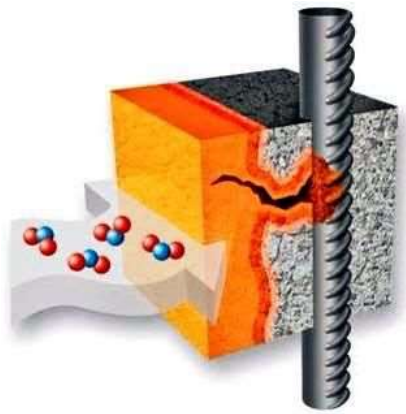
Obr. 2.12.1 – Hloubka karbonatce



Obr.2.12.2 – Oblast konstrukce bez zbarvení

Metody pro zjištění pH které se používají v laboratoři:

- stanovení pH betonu na výluhu;
- diferenční termická analýza (DTA)
- chemický rozbor materiálu;
- rentgenová difrakční analýza (RTG);



Obr.2.12.3 – Pronikání CO_2 do výztuže



Obr.2.12.4 a 2.12.5 – Roztok fenolftalienu

3. Metody výpočtu postupu karbonatace

3.1 Modely výpočtu postupu karbonatace

Pro výpočet hloubky karbonatace je důležité vybrat správný výpočtový model, soustředit se na vstupní údaje, vnější prostředí a okolní konstrukce. Výsledek často má velké odchylky, protože je těžko získat přesné parametry pro vstupní údaje.[19]

Pravděpodobnostní metoda:

Důležité zásady:

- Použité modely a jejich parametry musí být ověřené pomocí kvantifikovatelných zkoušek, pozorování nebo testů.
- Pro realistické a reprezentativní výsledky se musí používat pouze ověřené pravděpodobnostní modely.
- Nejistoty ve vstupních údajích musí být vzaty v úvahu. Tyhle modely musí být k dispozici pro posouzení materiálových parametrů.[19]

Z hlediska depasivace mají být splněny následující podmínky:

$$p\{ \} = p_{dep} = p\{a - x_c(t_{SL}) < 0\} < p_0$$

kde:

- $p\{ \}$ pravděpodobnost, že dojde k depasivaci;
- a krycí vrstva betonu [mm];
- $x_c(t_{SL})$ hloubka karbonatace v době t_{SL} , [mm];
- t_{SL} životnost [roky];
- p_0 pravděpodobnost poruchy

Vyhovující metoda:

Tahle metoda je souhrn pravidel [19]:

- pro postupy provádění
- pro výběr materiálu
- pro dimenzování

V případě, že je konstrukce namáhána v různých situacích, v průběhu životnosti nesmí konstrukce překročit mezní stav použitelnosti.

Existují dva způsoby pro návrh a výběr materiálů:

- Na základě dat získaných pozorováním v terénu a statického vyhodnocení.
- Na základě dat, která už známe z dlouholetých stavebních zkušeností.

Metoda k vyhnutí se degradaci:

Proces zhoršení neprobíhá v důsledku dalších věcí [19]:

- Používají se jiné materiály, například: kamenivo, které nebude alkalicky reagovat, nebo oceli, které mají protikorozní úpravu.
- Udržuje se část konstrukce nebo celá konstrukce pod kritickou vlhkostí - z důvodu oddělení složek, které reagují.
- Potlačení elektrochemickými metodami degradovaných reakcí.

Požadavky pro výběr materiálu a pro návrh se v téhle metodě stanoví v některých případech stejně jako u vyhovující metody.

Metoda dílčích součinitelů

Modely pro tuhle metodu jsou použity jako u pravděpodobnostních metod. Z důvodů návrhových hodnot se používá dílčích součinitelů. Z bezpečnostních důvodů může být použito zjednodušení.

Principem metody dílčích součinitelů je oddělení různých proměnných a ošetření nejistot. Vznik karbonatce z hlediska mezního stavu pro ošetřování je popsán v mezinárodní formě:

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}) \geq 0$$

kde:

- a_d návrhová hodnota krytí výztuže [mm];
- $x_{c,d}(t_{SL})$ návrhová hodnota hloubky karbonatce v čase (t_{SL}) [mm].

Návrhová hodnota betonové krycí vrstvy a_d se vypočte takto:

$$a_d = a_{nom} \cdot \Delta a$$

kde:

- a_{nom} jmenovitá hodnota pro krytí výztuže [mm];
- Δa míra bezpečnosti (povolená odchylka) betonového krytu [mm].

Hloubka karbonatace z hlediska návrhové hodnoty v době t_{SL} a $x_{c,d}(t_{SL})$ se počítá takto:

$$x_{c,d}(t_{SL}) = x_{c,k}(t_{SL}) \cdot \gamma_f$$

kde:

- $x_{c,k}(t_{SL})$ charakteristická hodnota hloubky karbonatace v době, (t_{SL}) [mm]
- γ_f dílčí bezpečnostní faktor hloubky karbonatace [-].

Dílčí součinitel má zvažovat, že:

- možnost nepříznivých akčních odchylek od typických hodnot
- možnost nepříznivých odchylek materiálů a vlastností výrobků od typických hodnot
- změny rozměru a nejistoty modelu

Ze dvou způsobů se dají zjistit číselné hodnoty dílčích součinitelů:

- Na základě dat získaných pozorováním v terénu a statického vyhodnocení podle pravděpodobnostní metody.
- Na základě dat, která už známe z dlouholetých stavebních zkušeností.

Jiné způsoby definování návrhové hodnoty hloubky karbonatace [20]:

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \epsilon_{t,d}) \cdot C_{S,d} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})}$$

kde:

- t_{SL} určena z tabulky Informativní návrhové životnosti z ČSN 1992 [roky]
- $k_{c,d}$ návrhová hodnota parametru provedení [-]
- $k_{t,d}$ návrhová hodnota regresního parametru [-]
- $R_{ACC,0,k}^{-1}$ charakteristická hodnota efektivní odolnosti proti karbonataci [(mm²/roky)/(kg/m³)]
- γ_R bezpečnostní součinitel pro inverzní karbonataci odolnosti betonu [-]
- $\epsilon_{t,d}$ návrhová hodnota chyby termínu [-]
- $C_{S,d}$ návrhová hodnota koncentrace oxidu uhličitého [kg/m³]
- $W(t_{SL})$ funkce počasí v čase [-]

Z hlediska životního prostředí návrhová hodnota se určí takto:

$$k_{e,d} = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real,k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e}$$

kde:

- $RH_{real,k}$ charakteristická hodnota relativní vlhkosti vzduchu [%]
- RH_{ref} referenční relativní vlhkost [%]
- f_e exponent [-]
- g_e exponent [-]
- γ_{RH} bezpečnostní součinitel relativní vlhkosti RH_{real} [-]

Parametr provedení má hodnotu $k_{c,d}$:

$$k_{c,d} = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c}$$

kde:

- b_c exponent regrese [-]
- t_c doba ošetřování [dny]

Nebo z tabulky:

Doba Ošetřování (dny)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$K_{c,d}$	3,00	2,03	1,61	1,37	1,20	1,09	1,00	0,92	0,86	0,81	0,77	0,73	0,70	0,67

Tab.3.1.1 – Parametr provedení

ACC test - je to zrychlený karbonatační test pro výpočet inverzní efektivní odolnosti proti karbonataci a zjištění charakteristické hodnoty efektivní odolnosti karbonatice $R^{-1}_{ACC,0,k}$. Testovány jsou suché betonové vzorky za dobu t_0 . Podle NAC (Natural Carbonation Conditions/Přírodní karbonatační podmínky) karbonatační inverzní odolnost bude větší o průměrný faktor $A=0,25$. A to znamená, že za přírodních podmínek vysušení je menší do hloubky než u testovaných vzorků ve zrychleném testu.

Pak se dá říct, že pro velmi suchý beton platí podmínka $R^{-1}_{ACC,0} = 0$.

Karbonatační odolnost můžeme zjistit dvěma způsoby:

1. přímou metodou (například ACC testem, měřením hloubky karbonatace)
2. nepřímou metodou (měřením plynové permeability)

Plusy ACC testu:

- neuvažuje se v případě karbonatace o změně odporu syčení CO₂
- nemusí se zvažovat dodatečná vazebná kapacita betonu
- výsledky testu jsou reproduktivní
- trvání je krátké

Pro orientaci se dá využít hodnotu odolnosti proti karbonataci z tabulky, v případě že nemáme výsledky z testu.

Typ cementu	ω_{eff}^1					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I 42,5 R	-	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
CEM I 42,5 R + FA (k=0,5)	-	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
CEM I 42,5 R + SF (k=2,0)	3,5	5,5	-	-	16,5	-
CEM III/B 42,5	-	83	16,9	26,6	44,3	80

Pozn.: ω_{eff}^1 – efektivní vodní součinitel zohledňující FA (popílek) a SF (křemičité úlety) s využitím uvedené k-hodnoty

Tab.3.1.2. – Lineární hodnoty $R^{-1}_{ACC,0,k}$

Dále hodnota pro návrh koncentrace CO₂, $C_{S,d}$:

$$C_{S,d} = C_{S,atm.} + C_{S,emi.}$$

Kde,

- $C_{S,atm.}$ koncentrace CO₂ v atmosféře [kg/m³]
- $C_{S,emi.}$ další koncentrát oxidu uhličitého v důsledku emisních zdrojů [kg/m³]

Funkce počasí v čase $W(t_{SL})$ se vypočte takto:

$$W(t_{SL}) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR}-T_{oW})^{b_w}}{2}}$$

Kde,

- t_0 čas reference [roky]
- p_{SR} pravděpodobnost deště [-]
- b_w exponent regrese [-]
- ToW doba vlhkosti [-]

Doba vlhkosti ToW se vypočte takto:

$$ToW = \frac{\text{dešťové dny } h_{Nd} \geq 2,5 \text{ mm srážek v roce}}{365}$$

3.2 Matematický výpočet karbonatace

Tyhle modely vyjádřeny z II. Fickova zákona, a jsou uvedeny pro difuzi.

$$\delta C / \delta t = D \cdot \delta^2 C / \delta c^2$$

kde

C – koncentrace látky difuze

t – je difuzní čas

D – součinitel difuze

Dále hloubka karbonatace je popsána vzorcem, který je vyjádřen v II. Fickově zákonu:

$$X = A \cdot t^{0,5}$$

kde

A – je karbonatační parametr

t – je čas v sekundách

Tento parametr A je také v některé literatuře popsán jako parametr K a podle různých autorů má jinou hodnotu.

Pro výpočet parametru A - resp. K existují různé matematické modely, které ve své práci popsal Ing. Luděk Vejvara, Ph.D. (Rekonstrukce průmyslových staveb, str.53-55)[21]:

1. Bobův model

Je to model z empirickými parametry :

$$A = \frac{150 \cdot C \cdot k \cdot d}{f_c},$$

Kde

C – vliv cementu (hodnoty 0,8-2)

d – difuzní koeficient (d = 1 – pro atmosféru s obsahem CO₂ = 0,03%; d = 2 – pro CO₂ = 0,10%)

k – vlhkostní vliv prostředí (1 – pro uzavřený prostor)

f_c - tlaková pevnost betonu (N/m²), která zahrnuje vliv vodního součinitele, kameniva, cementu a betonové zpracování.

2. Siesslův model

Je to poloempirický model

$$A = \sqrt{\frac{2D_B \cdot C_{CO_2}}{m \cdot C_{CO_2} / 100}}$$

Kde,

D_B – betonový koeficient difuze (m²s⁻¹)

C_{CO₂} – obsah CO₂ v betonu k přeměně produktu při karbonataci

m – dávka cementu na 1 m³ betonu

3. Papadakisův model

$$A = \sqrt{\frac{2[CO_2] D_{e,CO_2}}{[CH] + 3[CSH]}}$$

CO₂ – obsah oxidu uhličitého ve vnějším prostředí (mol· m⁻³)

D_{e,CO₂} – efektivní součinitel difuzi CO₂ v betonu vlivem karbonataci.

CH – molární koncentrace Ca(OH)₂ (mol· m⁻³)

CSH - (mol· m⁻³)

Rovnice, která je upravená pomocí objemových hmotností vody, kameniva a cementu:

$$A = 350 \frac{p_c \left(\frac{m_v}{m_c} - 0,3\right)}{p_v \left(1 + \frac{p_c m_v}{p_v m_c}\right)} \cdot f_{RH} \sqrt{\left(1 + \frac{p_c m_a}{p_a m_c} + \frac{p_c m_v}{p_v m_c}\right)} C_{CO_2}$$

$$f_{RH} = \left(1 - \frac{RH}{100}\right)$$

Po úpravě:

$$A = 350 \cdot p_c \cdot \frac{(w-0,3)}{(1+p_c \cdot w)} \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \cdot \sqrt{1} + p_c \cdot w + \frac{p_c m_a}{p_a m_c} C_{CO_2}$$

Takže můžeme pro dosažení užívat průměrné objemové hmotnosti kameniva a cementu.

4. Sitterův model

$$A = \sqrt{\frac{46w-1,6}{2,7}} Rk$$

Kde

w – je vodní součinitel < 0,6

k – koeficient vlivu vlhkosti prostředí (0,3 – mokré prostředí, 1,0 – v interiéru)

R – součinitel vlivu druhu cementu (0,6 – 2,2)

5. Model profesora Pytlíka

$$h_k = \frac{\sqrt{2,978 \cdot 10^{-6} \cdot p \cdot t}}{\sqrt{\mu \cdot p_B \cdot A \cdot k_{max}}}$$

Kde

$2,978 \cdot 10^{-6}$ – součinitel difuzní vodivosti oxidu uhličitého ve vzduchu

p – parciální tlak oxidu uhličitého ve vzduchu – 30 Pa

t – doba v sekundách

μ - součinitel difuzního odporu betonu vůči oxidu uhličitého, většinou 150-300

m_c – množství v betonu v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

p_B - objemová hmotnost betonu v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

k_{max} – maximální stupeň karbonatace, většinou karbonatace se zastavuje na hodnotách 80-85% je v %.

$$A = \frac{64 \cdot m_c}{p_B}$$

Je obsah v cementu CaO, které bude schopno reagovat s oxidem uhličitém, bývá kolem 8,75%, (CaO nezávisle na CaSO₄).

Za rok většinou rychlost karbonatace je od 0,1-1 mm. Vysoká hodnota platí pro málo pevné betony, a nízká hodnota je pro velmi hutné betony.

6. Model profesora Drochytky

Vztah je založený na staří konstrukce a popsán z knihy (Atmosférická koroze betonu):

$$X_c = 0,167 \cdot 10^{-6} \sqrt{t}$$

Kde

t – je čas v s

0,167 – je karbonatační konstanta

Odhad hloubky karbonatace

Z popsanych metod se dá říct, že vstupní podmínky mají vliv na každou metodu. Na hloubku karbonatace mají vliv různé veličiny:

- vodní součinitel
- množství cementu v konstrukci
- stáří konstrukce
- vlhkost prostředí
- vliv koncentrace CO₂
- pórovitost a hustota betonu, která je daná návrhem, strukturou a zpracováním
- trhliny a poškození povrchu

Dále pro určení postupu karbonatace jsou rozhodující údaje:

- množství cementu spojené s kvalitou betonu (třída betonu)
- propustnost betonu - tzv. pórovitost
- vodní součinitel

Pro rychlý odhad se dá použít postup pomocí tzv. karbonatační konstanty. Ta je u běžného betonu kolem 0,2 – 0,4 mm za rok.

$$0,2 \text{ do } 0,4 \text{ mm} = x ,$$

$$x / \text{počet dní}^{0,5}$$

Pro konstrukci, která je stará 50 let, při tomto výpočtu hloubka karbonatace vychází od 27 do 54 mm.

4. Konstrukce panelové stavby zasažené karbonatací betonu

4.1 Prvky panelové soustavy zasažené karbonatací

Karbonatace postihuje veškeré monolitické i prefabrikované vyztužené betonové konstrukce a prvky panelových staveb, které byly v minulosti postaveny. Jedná se o vyztužené prvky panelových deskových a stěnových montovaných soustav užívaných od začátku 60. let minulého století po začátek let devadesátých.

V zásadě je třeba rozlišit čtyři skupiny prvků, které se liší podle způsobu jejich výroby, podle provádění a uložení na stavbě a také podle požadavků na nosnost.

- a) prefabrikované části nosné konstrukce – panely vyráběné ve výrobnách
- b) prefabrikované nenosné prvky
- c) monolitické části nosné konstrukce – prováděné na stavbě, mimo zálivky
- d) styky prvků s dobetonávkou, zálivkou

a) Prefabrikované nosné prvky zahrnují:

- stropní panely uvnitř stavby
- vyztužené vnitřní stěnové panely
- panely štítových stěn
- panely střešní
- atikové panely
- panely schodiště (podesty a ramena)
- suterénní bloky a suterénní stěnové panely
- stropní panely nad základy a suterény
- stropní panely lodžii
- stropní panely balkónů
- obvodové pláště (průčelní panely a parapetní pásy)
- panely vystupujících částí stavby – nevytápěná strojovna výtahu vystupující nad střechu
- panely vstupních částí (zavětrí, zádveří)

b) Prefabrikované nenosné prvky zahrnují:

- příčky železobetonové
- betonová jádra (s výztuží)
- další nenosné prvky

c) Monolitické části konstrukce panelových domů

Patří sem tyto prvky:

- základy
- nadzákladové suterénní stěny (pokud nejsou prefabrikované)
- dobetonávky stěn
- dobetonávky stropů

d) Styky prvků

- dobetonávky ve stycích stropů – stěny, věnce
- zálivky mezi stropními panely (s výztuží)
- zálivky mezi vnitřními stěnovými panely (s výztuží)
- zálivky styků vnějších panelů pláště a vnitřních příčných stěn
- zálivky styků štítových panelů a podélných stěn

Důsledky karbonatace betonu jsou nejvíce nebezpečné pro stropní prvky, prvky ve vnějším prostředí, v základech a na styku panelů. Podrobněji jsou tyto prvky specifikovány dále v textu.

4.2 Prvky v prostředí pro rozvoj karbonatace

Prvky je třeba rozdělit podle prostředí, ve kterém se nacházejí. Rozlišujeme několik typů prostředí pro vnitřní expozici v budovách, v podmínkách pro základy a expozici s vnějšími povětrnostními vlivy.

Podrobnější rozčlenění je následující:

a) Vnitřní suché prostředí a prostředí s nízkou vlhkostí

Prostředí můžeme zjednodušeně popsat jako suché. Prostředí bude s relativní vlhkostí do 30%, u staveb pro bydlení od 30 % až do 50% . Rozvoj karbonatace je do 30% malý, zvyšuje se až o 50% při relativní vlhkosti mezi 30 až 50%.

U panelových objektů se jedná o:

- vnitřní stropní panely
- vnitřní vyztužené stěnové panely
- panely vytápěného schodiště (podesty a ramena)
- nosnou vnitřní část panelů štitových stěn (při dostatečné vnější tepelné izolaci)

Toto prostředí bude definované dle ČSN EN 206 jako **XC1**.

b) Prostředí základů v zemině

Prostředí můžeme popsat jako mokré, občas suché. Odpovídající prostředí pro většinu základů je důležité při uložení v zemině. U panelových objektů se jedná o základy a další zasypané navazující konstrukce:

- železobetonové pasy pod nosnými stěnami a obvodovým pláštěm průčelí
- piloty pod stěnami
- převázky (pasy) nad piloty
- stěny suterénů nebo jejich části v zemině

Toto prostředí lze definovat dle ČSN EN 206 jako **XC2**.

c) Vnitřní prostředí se zvýšenou a velkou vlhkostí

V tomto prostředí pracujeme s vlhkostí nad 60% a s kolísáním vlhkosti mezi 60% až 80 %, krátkodobě až s 95%. Jedná se o prvky:

- stropní panely v podlaze přízemí, nad základy a prostory pod přízemím pro instalační rozvody
- stropní panely v mokrých provozech – prádelnách, sušárnách, koupelnách
- vyztužené stěnové panely v užívaných prádelnách, sušárnách a v koupelnách
- střešní panely nad větranou vzduchovou dutinou
- nenosné příčky koupelen

Pro stav betonu u vnitřních prostor je důležité, aby prostory byly využívány k původnímu účelu s mokrým provozem a byla dodržena délka probíhajícího procesu.

Toto prostředí si lze představit jako prostředí definované dle ČSN EN 206 - jako **XC3**.

d) Vnější prostředí - prvky zakryté střechou

Jedná se o prvky, které jsou vystaveny změnám teplot a vlhkosti vnějšího prostředí, ale nejsou přímo vystaveny dešti. Jsou pod střechou. Příkladem jsou:

- lodžiové stropní panely (zejména namáhaný spodní povrch)
- lodžiové stěnové panely

Prostředí lze definovat dle ČSN EN 206 jako **XC3**.

Poznámka:

U stropních lodžiových panelů je třeba zvažovat, že pro vnější prostředí byly použity standardní panely užívané pro vnitřní části stavby. Nemají nebo nemusejí mít (podle soustavy) dostatečné krytí výztuže pro vnější prostředí. Používaly se zde tak běžné vnitřní panely. Jedná se o krytí spodní výztuže.

e) Vnější povrchy panelů

Panely jsou vystaveny dešti v pozici svislé nebo vodorovné. Zasažena může být jen jejich část. Jedná se o následující prvky:

- balkónové desky
- stěnové panely
- atiky
- vnější krycí železobetonové desky (skořepiny) stěnových sendvičových panelů

Prostředí s vlivem deště lze definovat dnes dle ČSN EN 206 stupněm prostředí **XC4**.

f) Styky panelů

Samostatnou kapitolou jsou styky jednotlivých panelů, neboť styky zajišťují spojení prvků nosné konstrukce mezi sebou, konstrukce obvodového pláště a dalších prvků. Styky je třeba rozdělit podle expozice na vnitřní a na ty s vlivem přístupu vnějšího prostředí a s možnou kondenzací vlhkosti.

4.3 Místa s největším nebezpečím karbonatace betonu

Místa nejvíce ohrožená korozí výztuže od postupu karbonatace betonu jsou následující:

1. Stropní panely starších soustav

Jedná se o panely se stářím přes 50 let a provedené z betonů pod dnešní třídou C16/20. U panelů bývá také malé krytí výztuže, většinou 10 mm.

2. Prádelny a sušárny

Ohrožení spodní výztuže lze předpokládat na stropních panelech v místnostech prádelen a sušáren. Jedná se o místnosti s dlouhodobě nebo déle trvající zvýšenou vlhkostí způsobenou praním a vysycháním prádla. Zde dosáhla vlhkost nad 60% RH. Stav jednotlivých konstrukcí ale očekáváme rozdílný v důsledku různého využití daných prostor, tj. kolik hodin denně nebo týdně skutečně výztuž trpěla zvýšenou vlhkostí.

Prostory jsou vždy vytápěny nebo temperovány, nemají povětšinou odvod vzduchu a vlhkosti vzduchotechnikou a větrání je možné okny malých nebo standardních rozměrů (podle soustavy a umístění). Příčinou degradace jsou:

- stáří konstrukce
- střídání vyšší vlhkosti prostředí nad 60% se sušším prostředím
- malé krytí výztuže, často jen 10 mm, odpovídající dobovým předpisům

3. Stropní panely koupelen

Stropní panely koupelen představují podobnou situaci jako v bodě 1. Je zde ale nutné předpokládat přítomnost tekoucí vody, horké vody a páry. Koupelny jsou umístěny ve vnitřních jádrech s možností nuceného odtahu vzduchu. Záleží na individuálních podmínkách užívání koupelny a vzduchotechniky. Přesto je možné poškození betonu karbonací vyšší nežli u sušáren uvedených v bodě 1. Zvýraznění poloh výztuže bylo například zjištěno u koupelny v soustavě T06B již před 5 lety, tj. asi po 45 létech užívání.

4. Stropní panely lodžii

Ohrožení spodní výztuže panelů ve vnějším prostředí lze očekávat u lodžii. Byly povětšinou **užívány běžné panely** s krytím obvyklým pro vnitřní prostředí (dnes stupeň prostředí XC1 podle norem EC2 a EN 206). Pro vnější prostředí by panely měly mít vyšší krytí. Původní krytí výztuže lze očekávat 10 nebo 15 mm, po roce 1986 a platnosti novely ČSN 731201 kolem 15 mm. Správně by pro vnější prostředí v této době mělo být 20 mm.

5. Panely pod místy zatékání vody

Jedná se o místa dlouhodobého nebo občasného průsaku vody a také důsledky provozu a údržby vstupů (rozmrazovací prostředky):

- pod vstupy do objektů, většinou na hraně a styku spodních panelů
- pod vyrovnávacími schodišti
- dilatace přístupné vnějšímu prostředí a dešti
- balkóny

6. Styky vnějších a vnitřních panelů

Bodové styky s uchycením fasádních panelů vykazují při termografickém měření výrazně nižší teploty než plochy panelů.

Jsou zde jiné podmínky teplot s možným následováním vlhkosti kondenzací. Míru důsledků nižší teploty nelze bez podrobných výpočtů a sond potvrdit.

7. Panely dvouplášťové střechy

Střešní panely, zejména vodorovné panely střešního pláště, jsou ohroženy vlhkostí pronikuvší do dutiny dvouplášťové střechy ze spodního podlaží objektu. Dutina je běžně větraná, ale při uzavření a vnějším zateplení na plášti se mění podmínky a vlhkost se může více koncentrovat. Únik přetlaku vodních par se řeší několika ponechanými otvory nebo prostupy pro odfuk vzduchu (systém ventilku).

5. Praktická část diplomové práce

5.1 Vyhodnocení karbonatace na konstrukcích

Zkoušky různých konstrukcí byly provedeny v letech 1992-2016 a 2020, a to na objektech veřejných staveb, průmyslových staveb, panelových budov, provozních staveb a mostů. Zkoušky byly provedeny Ing. Luděkem Vejvarou, Ph.D., a mnou. Pan inženýr Vejvara mně poskytl materiály pro vyhodnocení výsledků zkoušek pro zjištění hloubky karbonatace.

U objektů byly provedeny zkoušky jak ve vnitřním prostředí, tak i ve vnějším. Pro betony vyšší pevnosti byly prozkoumány konstrukce mostů.

V některých případech u konstrukcí byla zjištěna kvalita betonu a hloubka karbonatace, u ostatních objektů hloubka karbonatace a kvalita betonu pouze orientační a předpokládaná podle roku výstavby, části konstrukce a prostředí.

Byla stanovená směrodatná odchylka 5% kvantit ze 100% odpovídající metodice charakteristických pevností v počtu 95% vzorků. Ze změřené pevnosti betonu byla také stanovena střední hodnota.

Všechny údaje byly zpracovány a zavedeny do tabulek a grafů, které budou zobrazeny dále.

$$R = R_m - k \cdot S_r,$$

Kde

$k = 1,645$, pro normální rozdělení

5.2 Měření karbonatace na objektech

Pro ověření postupu karbonatace betonu bylo provedeno celkem 54 měření. 9 měření bylo popsáno dále na konkrétních objektech. Na mostních konstrukcích bylo provedeno 7 zkoušek, které byly doplněny pouze výsledky pro betony vyšší jakosti. Měření byla provedena Ing. Luděkem Vejvarou a společně jsme je vyhodnotili.

5.2.1 Karbonatace betonu stropních panelů soustavy VVU - ETA v Praze

Pro zkoušky byl využit rekonstruovaný objekt ve Fantově ulici v Praze. Sondy byly prováděny do stropní desky zespodu v suterénu budovy, v bývalé sušárně. Celkem bylo zkoušeno 7

vzorků na stropě a jeden na stěně. Na stropě bylo zjištěno narušení betonu do hloubky až 2 mm. 1

Stáří objektu je 31 let. Zkoušky probíhaly 11.4. 2016.

5.2.2 Karbonatace u krycí betonové skořepiny fasádních panelů soustavy P1.11

Pro zkoušky bylo využito provádění opravy fasády na objektu U Prioru 938/6 v Praze Ruzyni. Stáří objektu je 29 let. Zkoušky byly prováděny 13. 5. 2016 na celkem 7 panelech přízemí, každý se třemi sondami (vývrty). Celkem bylo zkoušeno 22 míst, z čehož vycházejí následující výsledky:

panel 1	panel 2	panel3	panel 4	panel 5	panel 6	panel 7	roh panelu
sever	sever	západ	západ	sever	západ	západ	7
24,23,23	22,21,19	21,21,22	20,21,22	23,23,24	25,25,26	26, 25	1, 3

Při zpracování vychází průměrná hodnota okolo 22,8 mm.

Je zajímavé, že byla zjištěna na poměrně mladé konstrukci velká hodnota hloubky karbonatace. Je otázkou, jaký beton byl na skořepinu použit. Dva vývrty v rohu panelu vykazovaly hodnoty zcela jiné než u ostatních, při průzkumu se zde beton jevil kompaktnější.

5.2.3 Karbonatace betonu stropních panelů soustavy PS 61

Měření probíhala dne 10.5. 2016 v objektu Krejčíkova 2 v Plzni na stropu suterénu. Strop je umístěn v sušárně s předpokladem větší vlhkosti v průběhu užívání stavby nežli u bytových prostor. Stáří objektu je 54 let.

U objektu byly zjištěny následující hloubky: 8, 4 a 5 mm, s přechodem do mírně fialové (fenolftaleinová zkouška). Bez zabarvení zůstala vrstva o tloušťce 5, 3 a 3 mm.

5.2.4 Karbonatace betonu balkonů T03 B

Zkoušen byl beton pod vrstvou podlahy a vodotěsné izolace. Zjištěn byl velmi dobrý stav, karbonatace do hloubky max. 2 mm, jasné zbarvení betonu. Provedeno v květnu 2016. Zkoušky obsahovaly sondáž u dvou balkonů na jižní straně objektu v Táborské ulici 32. Stáří objektu 55 let.

5.2.5 Karbonatace betonu stropních panelů PS69

Zkoušky provedeny v rámci průzkumu při posudku konstrukce panelového objektu v Tachově. Hloubku karbonatace měřila odborná firma – Test s.r.o. Plzeň. Stáří objektu bylo 26 let.

Na stropních panelech byla zjištěna hloubka karbonatace 10 mm na betonu třídy III (1987).

5.2.6 Karbonatace stropních panelů schodiště T06B

Pro zkoušky bylo dovoleno testovat spodní líc panelu podesty schodiště v suterénu budovy v Adélově ulici č. 12 v Plzni. Zkoušky probíhaly 26.5. 2016 v 9 hodin.

Provedeny byly dva vývrty se shodnými výsledky – zkarbonatovaná vrstva byla cca 1 mm. Důkazem byla také velmi intenzivně zbarvená konstrukce fenolftaleinem.

5.2.7 Karbonatace u krycí betonové skořepiny fasádních panelů soustavy Larsen- Nielsen

Pro zkoušky bylo využito provádění opravy fasády na objektu v Botevově ulici v Praze - Modřanech. Stáří objektu je 29 let. Zkoušky byly prováděny 27.5. 2016 na panelech v přízemí, každý se třemi sondami (vývrty). Celkem bylo zkoušeno 10 míst, z čehož vycházejí následující výsledky:

Průměrná hloubka karbonatace je 12 mm.

5.2.8 Karbonatace u krycí vrstvy stropu lodžie panelů soustavy Larsen- Nielsen

Pro zkoušky bylo využito provádění opravy fasády na objektu v Botevově ulici v Praze - Modřanech. Stáří objektu je 30 let. Zkoušky byly prováděny 2.6. 2016 celkem na dvou panelech přízemí, každý se třemi sondami (vývrty). Celkem bylo zkoušeno 6 míst, z čehož vycházejí následující výsledky:

Panel 1 4,0 3,0 2,0 mm

Panel 2 3,5 3,0 3,2 mm

Orientace lodžie je na západ, teplota v místě při měření 33°C, vlhkost vzduchu 30%.

Komentář

Zatím provedené zkoušky ukazují na následující:

1. Stropní panely z betonů - v dnešním značení od C16/20 výše - nejsou při vnitřní expozici na spodní straně výztuže výrazně zkarbonatované.
2. Stropní panely ve vnitřním prostředí pro třídy nižší nežli dnešní C16/20 (např. pro B170 = C10/13) vykazují karbonataci kolem 5 mm při stáří 50 až 55 let.
3. Obvodové krycí moniérky sendvičových panelů vykazují výrazné hloubky karbonatace mezi 10 až 25 mm, tj. může být zasažena svislá a vodorovná nosná výztuž. Důležitý je ale stav a ocel závěsů v nosné vnitřní části panelu.

Uvedené závěry jsou orientační a na základě omezeného malého počtu zkoušek objektů.[22]

Poznámka: Veškeré údaje v části 4 a 5 převzaty z prací a archivu Ing. Ludřka Vejvary, Ph.D.

Vlastní měření

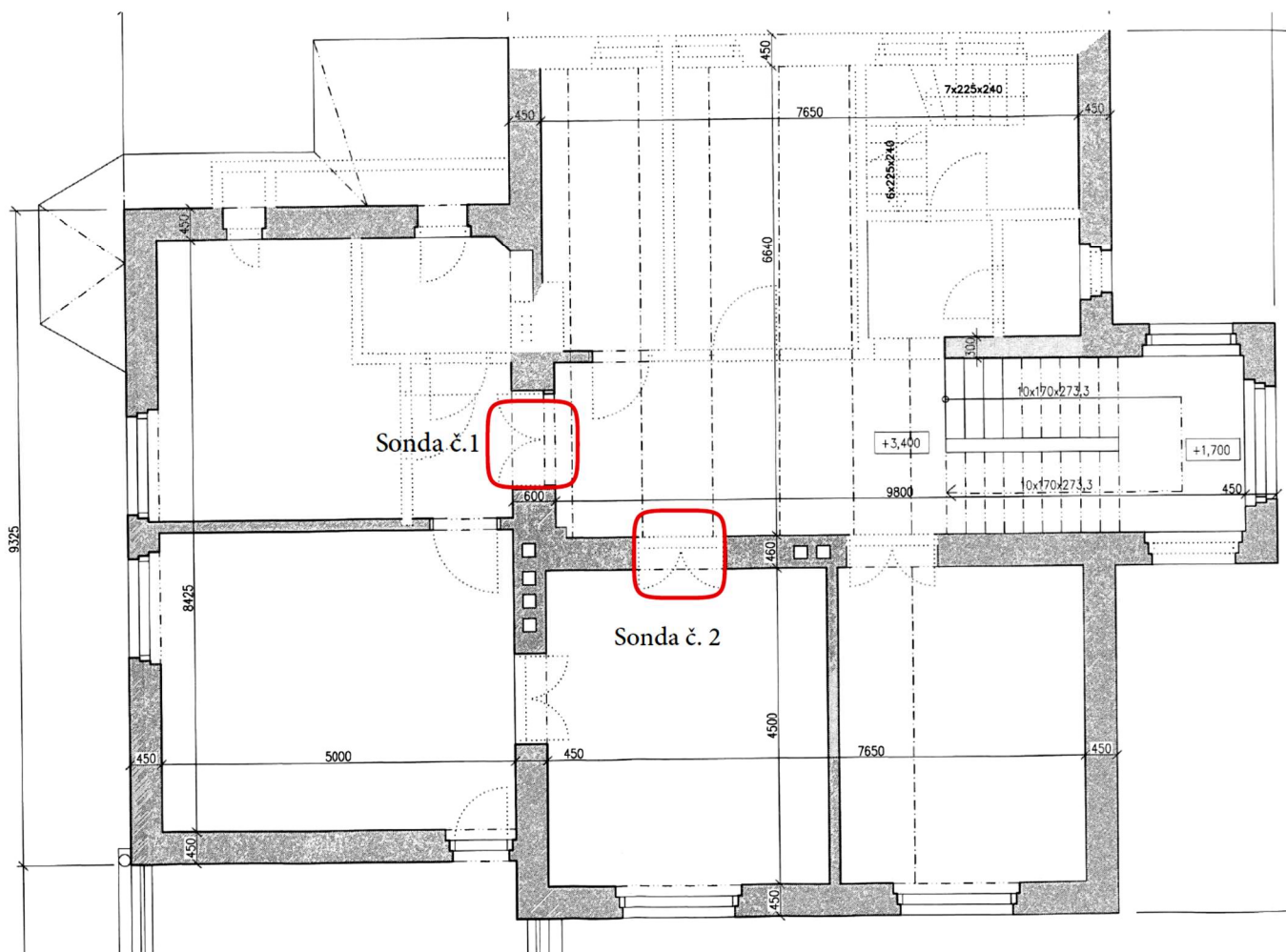
5.2.9 Karbonatace stropní konstrukce vily v Maškově ulici v Klatovech

Měření probíhalo dne 20.10.2020 v objektu v Maškově ulici v Klatovech na stropu v 1. NP. Strop je umístěn v chodbě bez předpokladu větší vlhkosti v průběhu užívání stavby. Stáří objektu cca 90 let - od roku 1930.

U objektu byly zjištěny následující hloubky kolem 55 mm, beton se nezabarvil do fialové barvy (fenolftaleinová zkouška). A to znamená, že beton klesl pod hodnotu pH 9. Beton už nechrání výztuž a na některých fotografiích můžeme vidět, že výztuž je odhalena.

Předpokládaná kvalita betonu podle stáří konstrukce a objektu je C12/15 nebo C16/20.

Fotodokumentace z 20.10.2020 celý výzkum dokladuje.



Obr.5.2.9.a – Půdorys 1 NP. vily v Maškové ulici v Klatovech



Obr. 5.2.9.b – Pohled na sondu č.1



Obr. 5.2.9.c – Pohled na sondu č.2



Obr.5.2.9.d – Sonda č.2 – porušení překlady



Obr.5.2.9.e – Sonda č.1 – porušení překlady



Obr.5.2.9.f – Sonda č.2 – Aplikace fenolftalienu- pohled z boku



Obr.5.2.9.g a 5.2.9.h – Sonda č.2 – Aplikace fenolftalienu- pohled zespodu



Obr.5.2.9.i – Aplikace fenolftalienu – beton se nezabarvil

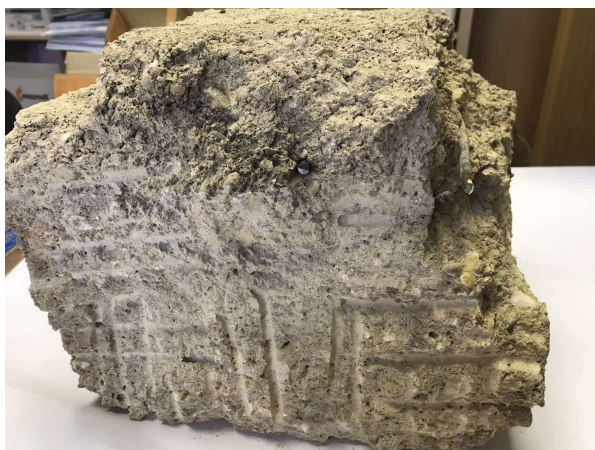
5.2.10 Karbonatace vzorku z konstrukce překlady v budově v ulici Bohuslava Martinů 657/7, Plzeň

Zkoušení vzorku probíhalo dne 21.11.2020 ; vzorkem je část překlady z přízemí rodinného domu v ulici Bohuslava Martinů 657/7 v Plzni. Budova je z roku 1930, je tedy 90 let stará. U stropu v chodbě nebyl předpoklad větší vlhkosti v průběhu užívání stavby.

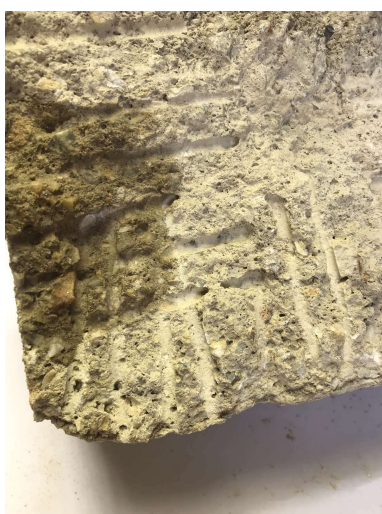
Fenolftaleinová zkouška byla provedena na vzorku části objektu nanesením roztoku fenolftaleinu (od kraje vzorku). Beton se nezabarvil do fialové, pouze v jedné části lehce do růžové. A to znamená, že beton klesl pod hodnotu pH 9 a už ztratil svou alkalitu.

Předpokládaná kvalita betonu je podle stáří konstrukce a objektu na úrovni C12/15.

Dalšími ukázkami bude fotodokumentace z 21.11.2020.



Obr.5.2.10.a – Zkoušený vzorek – pohled z boku



Obr.5.2.10.b – Aplikace roztoku

Fenolftaleinu z boku



Obr.5.2.10.c – Aplikace roztoku

Fenolftaleinu shora



Obr.5.2.10.d – Lehce zbarvení v 20 mm od kraje vzorků-pohled shora



Obr.5.2.10.e – Lehce zbarvení v 20 mm od kraje vzorků-pohled shora



Obr.5.2.10.f a 5.2.10.g – Beton se nezabarvil – pohled z boku



Obr. 5.2.10.h a 5.2.10.i – beton se nezabarvil v miste bývalé výztuže

6. Výsledky měření hloubky karbonatace

Výsledky měření, které byly provedeny Ing. Luděkem Vejvarou, Ph.D., byly zaneseny do tabulek a výpočty zpracovány a uvedeny v grafech.

Tab. 6.1- Průmyslové objekty - vnitřní prostor

číslo stavby	název	stáří konstr.	B10	B15 a	B20	B25	B30	B35
			C10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C28/35
1	hala aero Vod.	53			20,81			
2	ČLUZ hala	56				5,00		
3	Zakl. Sokolov	78				15,22		
4	RKS Krašov	32				13,50		
5	Benz. Tře mošná	35					5,06	
6	Pekárna	60				20,86		
7	Jeřáb. Dráha	80				17,80		
8	Sklad textilu	17				9,83		
9	ETD Plzeň	30	4,20					
10	Vydav. Vltava	60			52,00			
11	Prazdroj	32				7,30		
12	Kotel. Křimice	38				26,80		
13	Rozvodna ZČE	80				30,00		
14	Hala stáčírny	48			53,33			
15	Objekt Božkov	59			30,00			
16	Stáčír. Prazdroj	11					7,50	
17	hala Skoda KT	33					11,00	
18	zásobník EPR	48			35,00			
19	stanice EPR	48			8,00			
20	úpravna EPR	48		20,00				
21	úpravna EPR	48					5,00	
22	stanice ELE	38				25,00		
23	haly Janovice	41					32,20	
24	NLPU Prazdroj	16						5

Tab.6.2- Správní a občanské stavby - vnitřní prostor

číslo stavby	název	stáří konstr.	B10	B15	B20	B25	B30	B35	
			C10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C28/35	
25	ZS Doudlevice	71	57,49						B 7,5
26	dtto	71	18,00						B12,5
27	skelet ASS KV	69					11,76		
28	DO KV	53				6,75			
29	ZS Tábořs	31			6,25				
30	DCDobravka	23						3,33	B35
31	Dílny Roudná	59	50,00						B10
32	Kolumb US	80		30,00					
33	Dům Neherov	86		55,00					
34	Janovice.24/1	58			37,07				
35	Janovice 24/S	58			26,58				
36	Tachov	24			10				
37	Ořechová 4	81		30					
38	Ořechová 4	81		60					
39	Salon Roudná	74		33,00					
40	Salon Roudná	74		83,3					
41	panel. PS61 Nep.suter.	54			5,66				
42	panel VUETA	30				2			
43	PS61 Doubravka2020	55			6				
44	PS61 Krejčíkova2020	59			5				
45	T06B Adelova 2016	50			1				
46	Tylova B57	72		6,25					
47	TYlova B57 -desky 4NP	72	30	30					
48	Mašková ul. Klatovy	90		55					
49	Bohuslava Martinů,Plzeň	90		55					

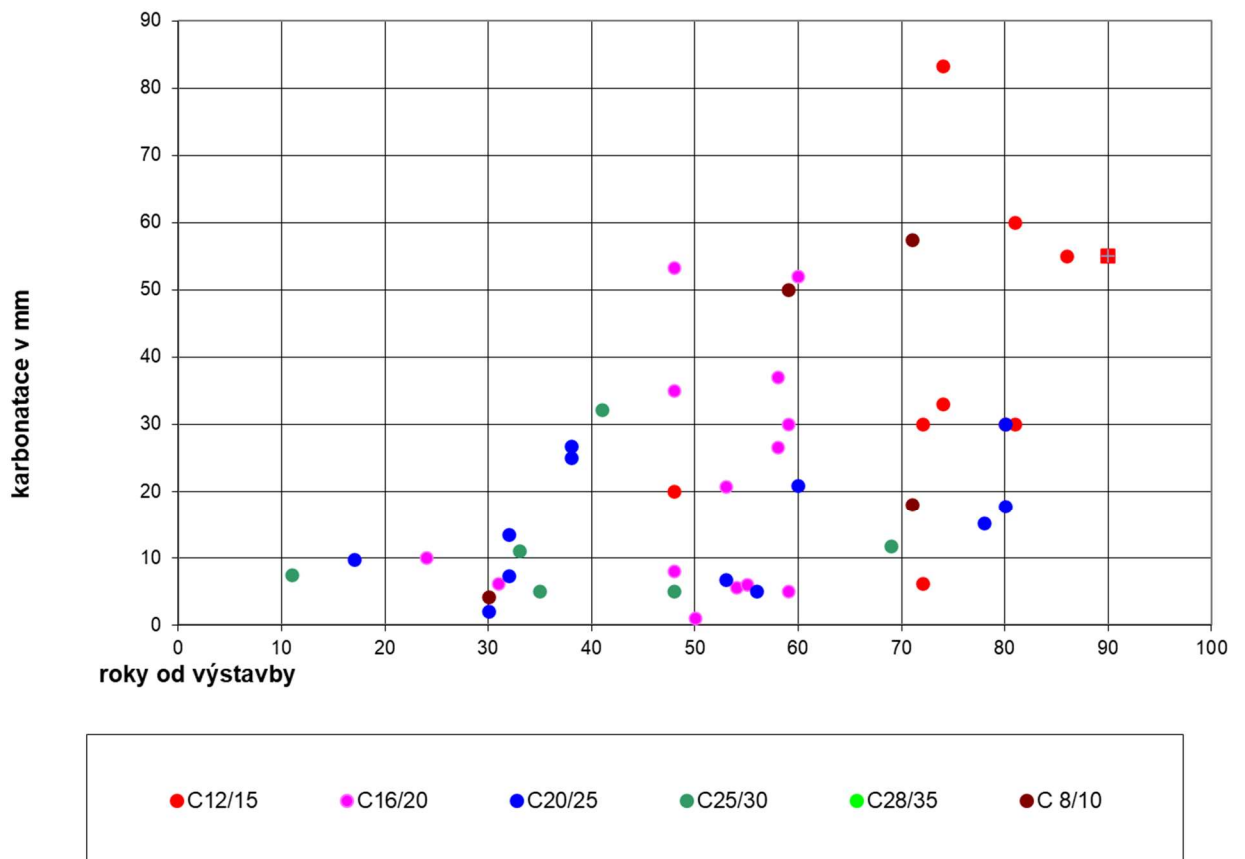
Tab.6.3 - Vnější prostor

číslo stavby	název	stáří konstr.	B10	B15	B20	B25	B30	B35
			C10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C28/35
49	věž čerchov	40		6,70				
50	nádrž EPR	28		10,00				
51	liapor Vint	30					1,00	
52	Skoda KT	33				6		
53	ZEZ Rokyc	30			2,14			
54	T06B Hor.Bříza lodžie s.	50			7,00			
55	LN Praha lodžie	30			3,12			
56	LN Praha plášť	29			3,15			
57	P1.11 Praha plášť	29			22,80			
58	T03B Plzeň	55			2			
59	Tylova B57 - vnější sl.	72			26,67			

Tab.6.4 - Vnější prostor – mosty

číslo stavby	název	stáří konstr.	B10	B15	B20	B25	B30	B35
			C10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C28/35
60	most Man.	35					0,29	
61	most 6-045	31						2,00
62	most 25-001.	53					25,00	
63	most 210-015	82						20,00
64	most 64-005	29						5,00
65	most 13-002	29						3,00
66	most 6-056	39						3,00

Zobrazení hloubky karbonatice - 10/2020 podle třídy betonů pro vnitřní expozici u 46 pozemních staveb

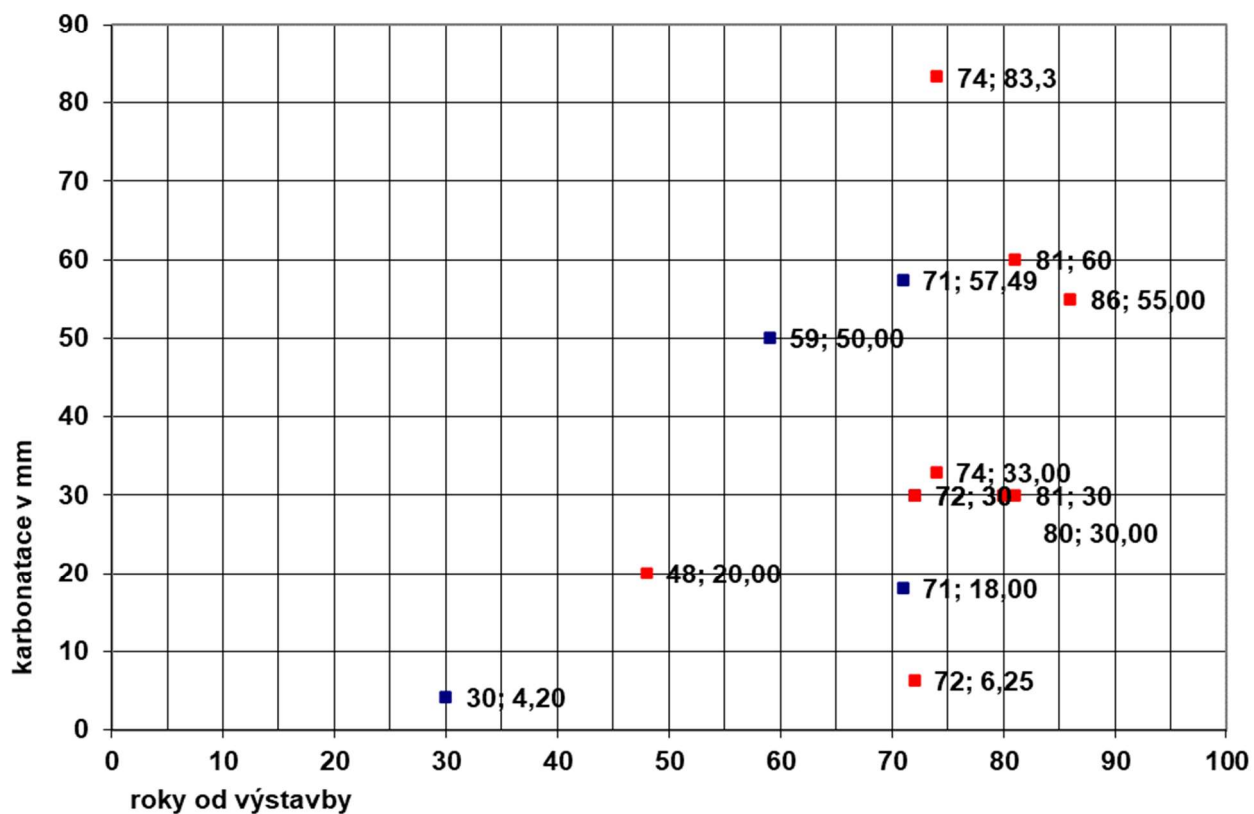


Graf.6.1 - Měření hloubky karbonatice různých tříd betonů

Červený čtverec ukazuje měření v ul. Masková od 20.10.2020, kvalita betonu je C 12/15

Z grafu je patrné že největší hloubky karbonatice dosahují konstrukci nižších tříd betonů C 8/10 a C12/15, C 16/20.

Zobrazení hloubky karbonatce pro betony C 8/10 a C 12/15

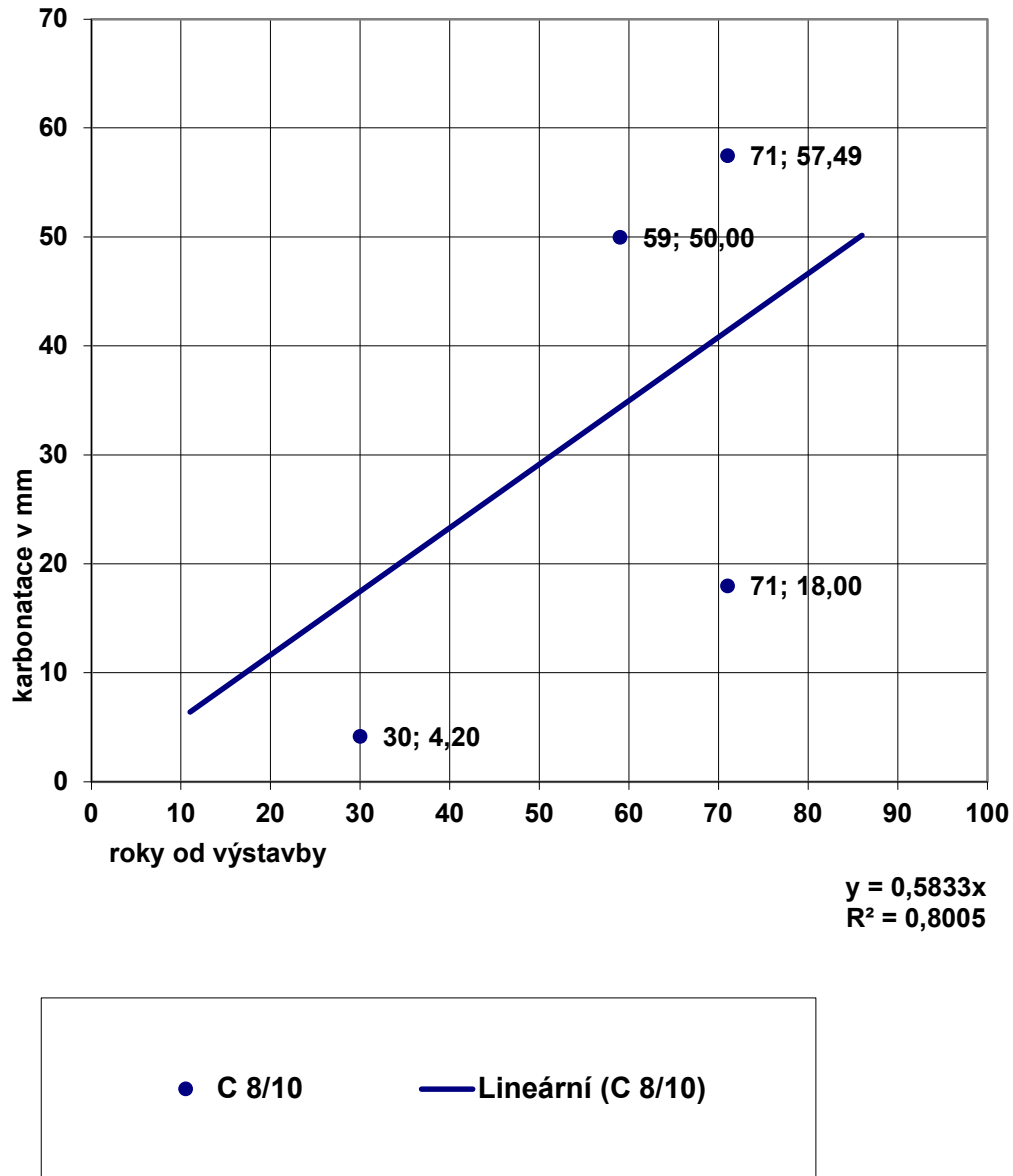


■ C 12/15

■ C 8/10

Graf 6.2 – Zobrazení hloubky karbonatce pro betony nižších tříd

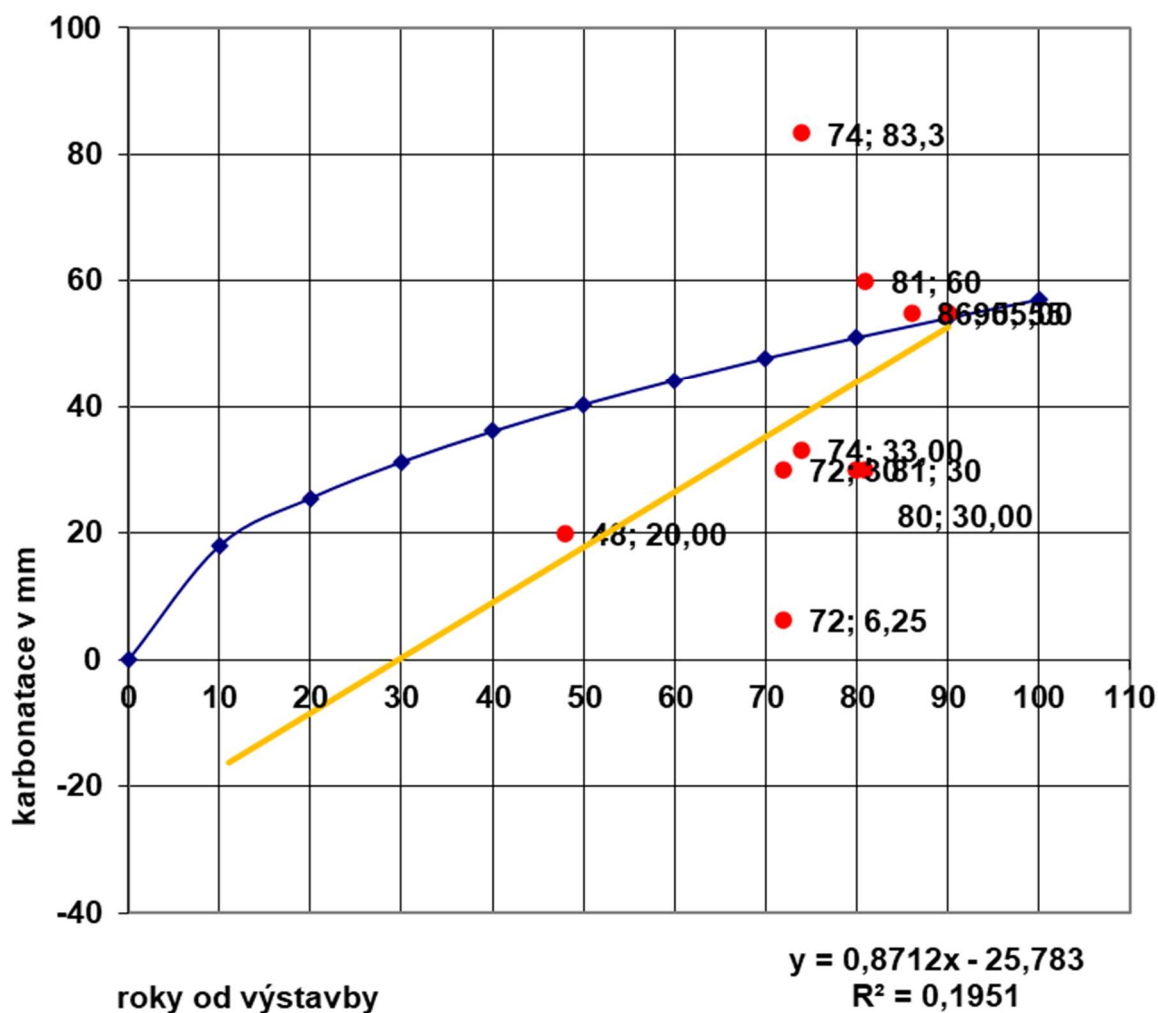
Beton C 8/10 zobrazení hloubky karbonatce



Graf 6.3 – zobrazení hloubky karbonatce betonu C 8/10

Z grafu je vidět výrazná hloubka u konstrukci, která je 70 až 90 let stara

Beton C 12/15 zobrazení hloubky karbonatce

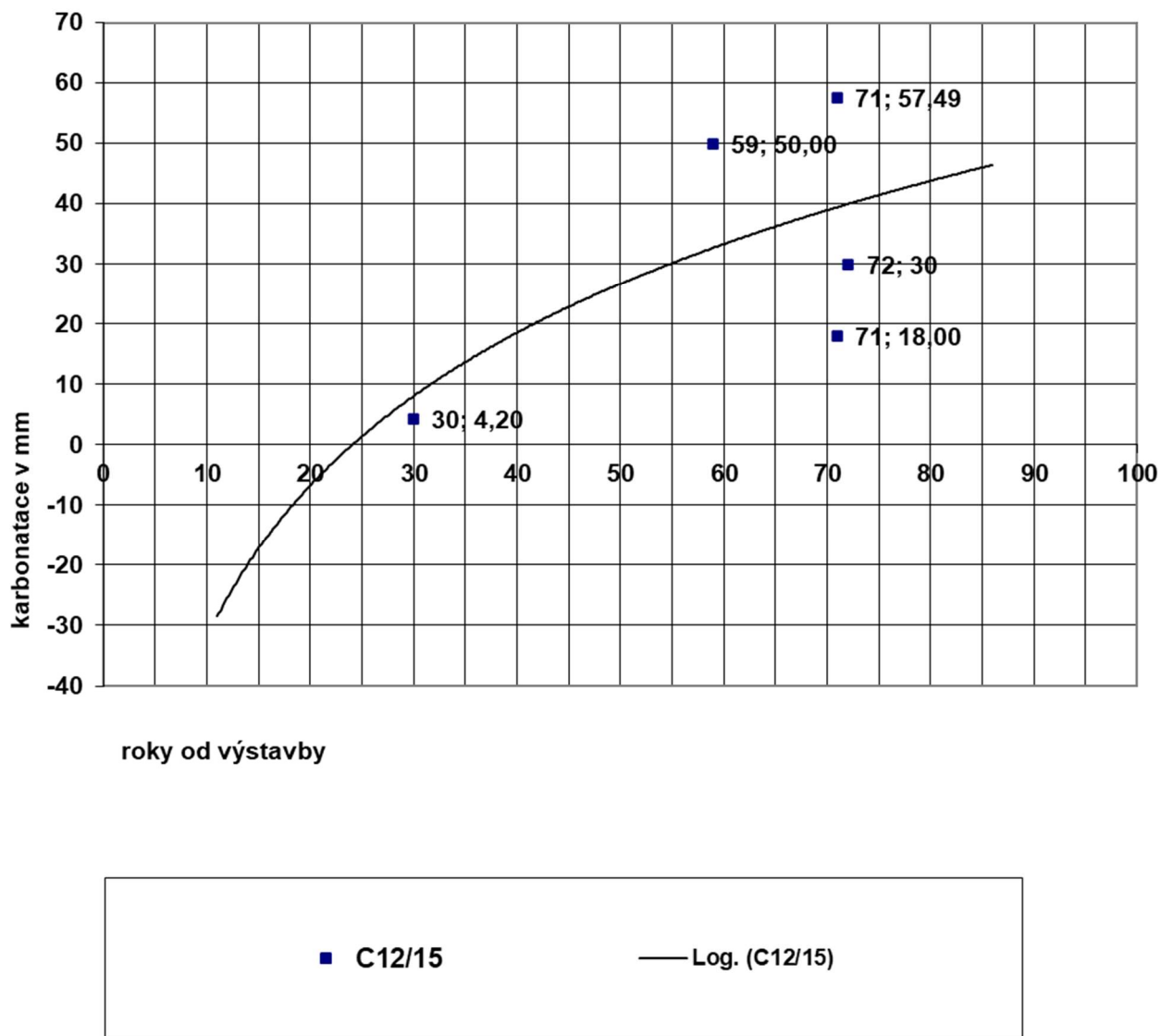


● C 12/15
 ◆ k
 — Lineární (C 12/15)

Graf 6.4 – zobrazení hloubky karbonatce betonu C 12/15 a její redukce

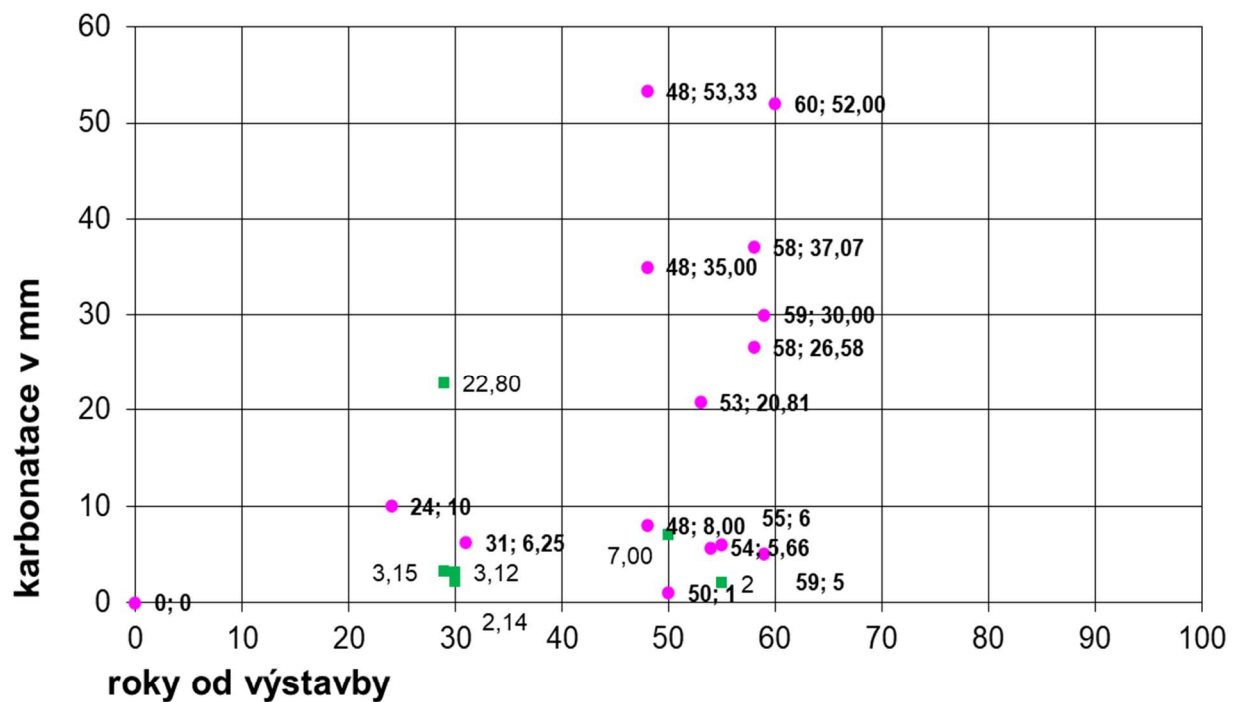
$K = \text{hloubka karbonatce} * \sqrt{\text{roky}}$

Zobrazení hloubky karbonatce pro betony C 12/15 a C 12/15a s redukcí krajních hodnot



Graf 6.5 – zobrazení hloubky karbonatce betonu C 12/15 a její redukce krajních hodnot

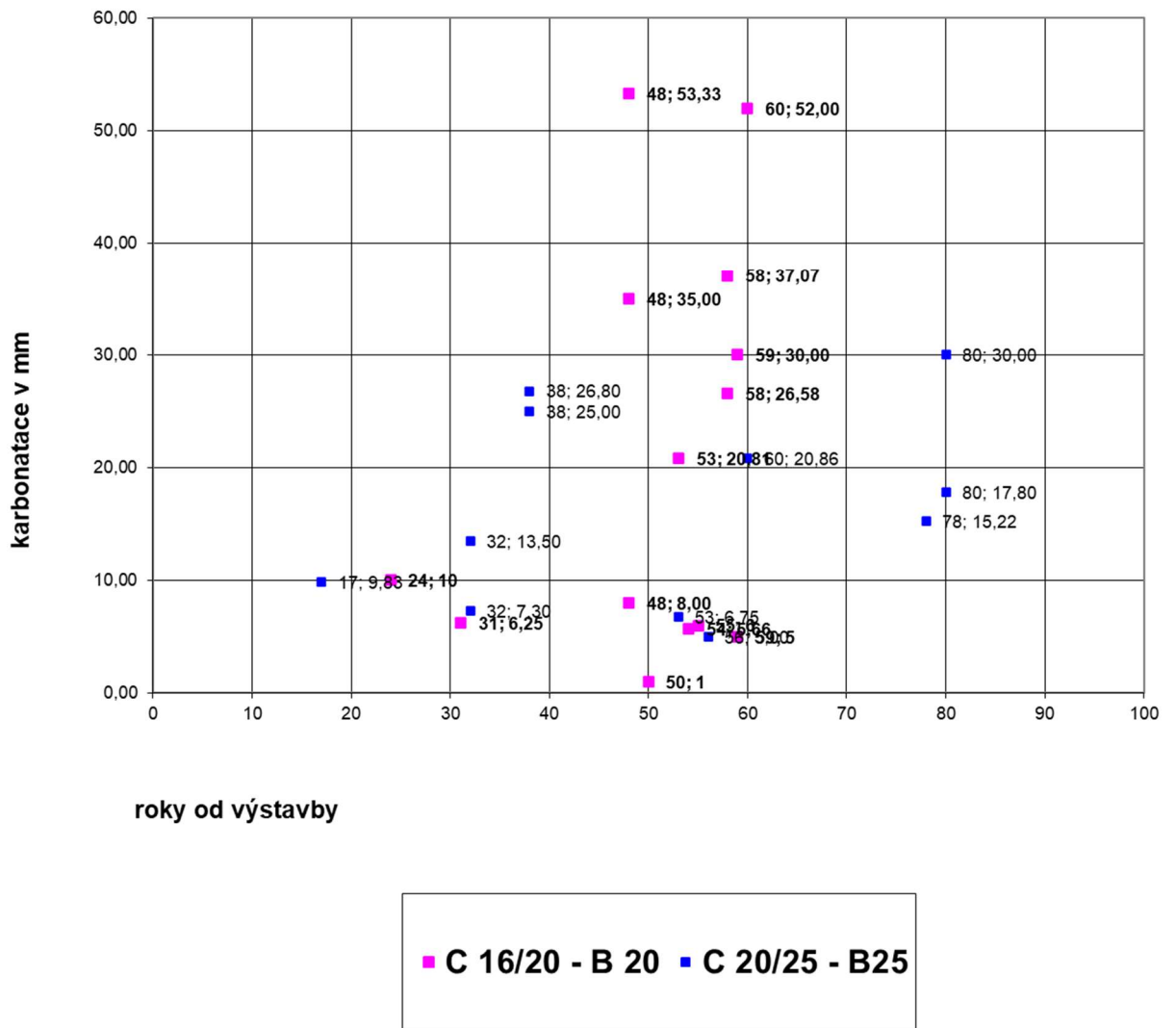
BETON C 16/20 - 2020 zobrazení hloubky karbonatice



Graf 6.6 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 16/20

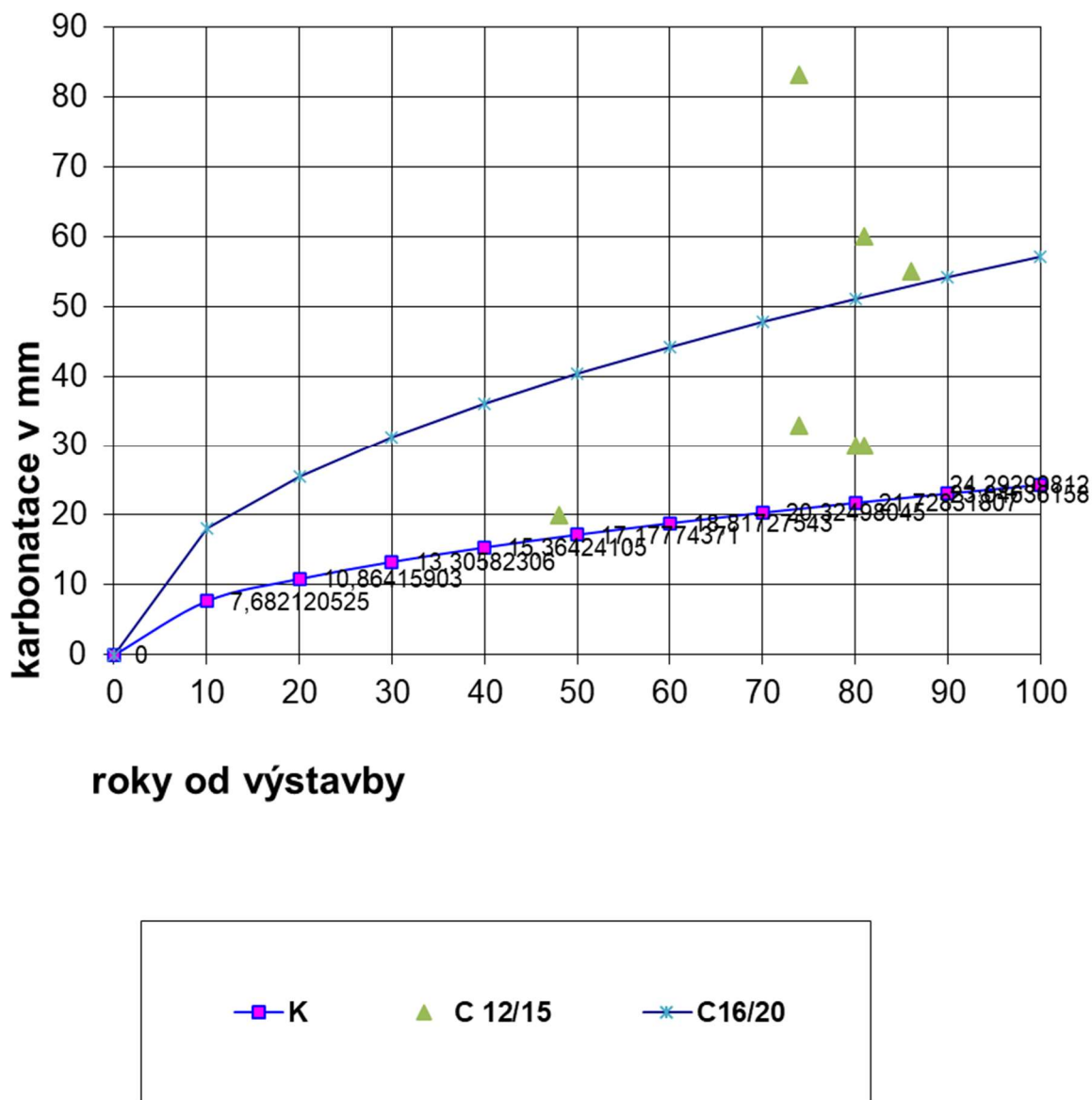
Zelenou barvou je vyznačena hloubka karbonatice betonu C 16/20 vnějšího prostředí.

Zobrazení hloubky karbonatce - 5/2020 vnitřní prostředí pro betony odpovídající třídám C 16/20 a C 20/25

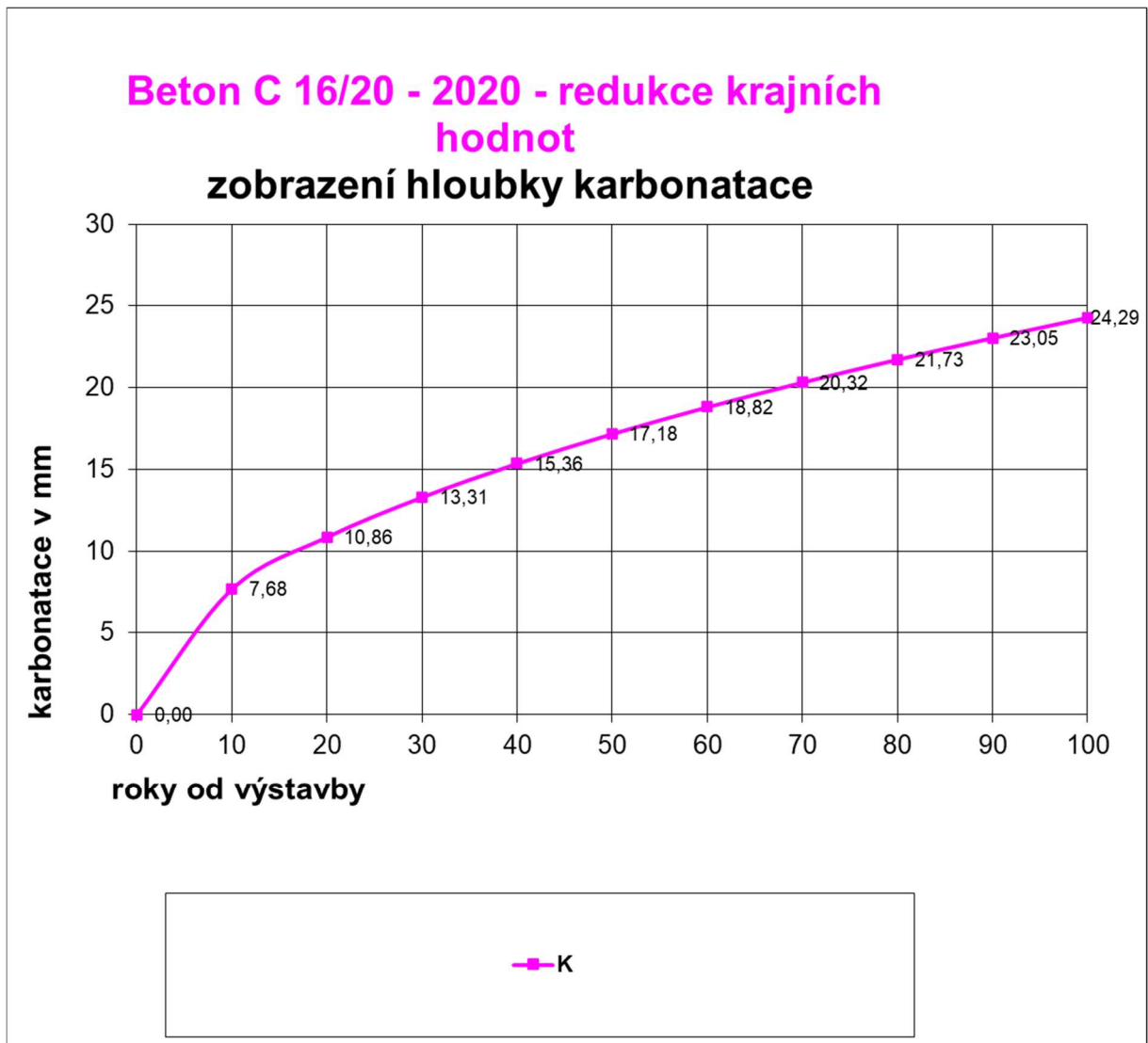


Graf 6.7 – zobrazení hloubky karbonatce betonu C 16/20 a C 20/25 vnitřního prostředí

Redukovaný rozsah - Beton C 16/20 zobrazení hloubky karbonatce

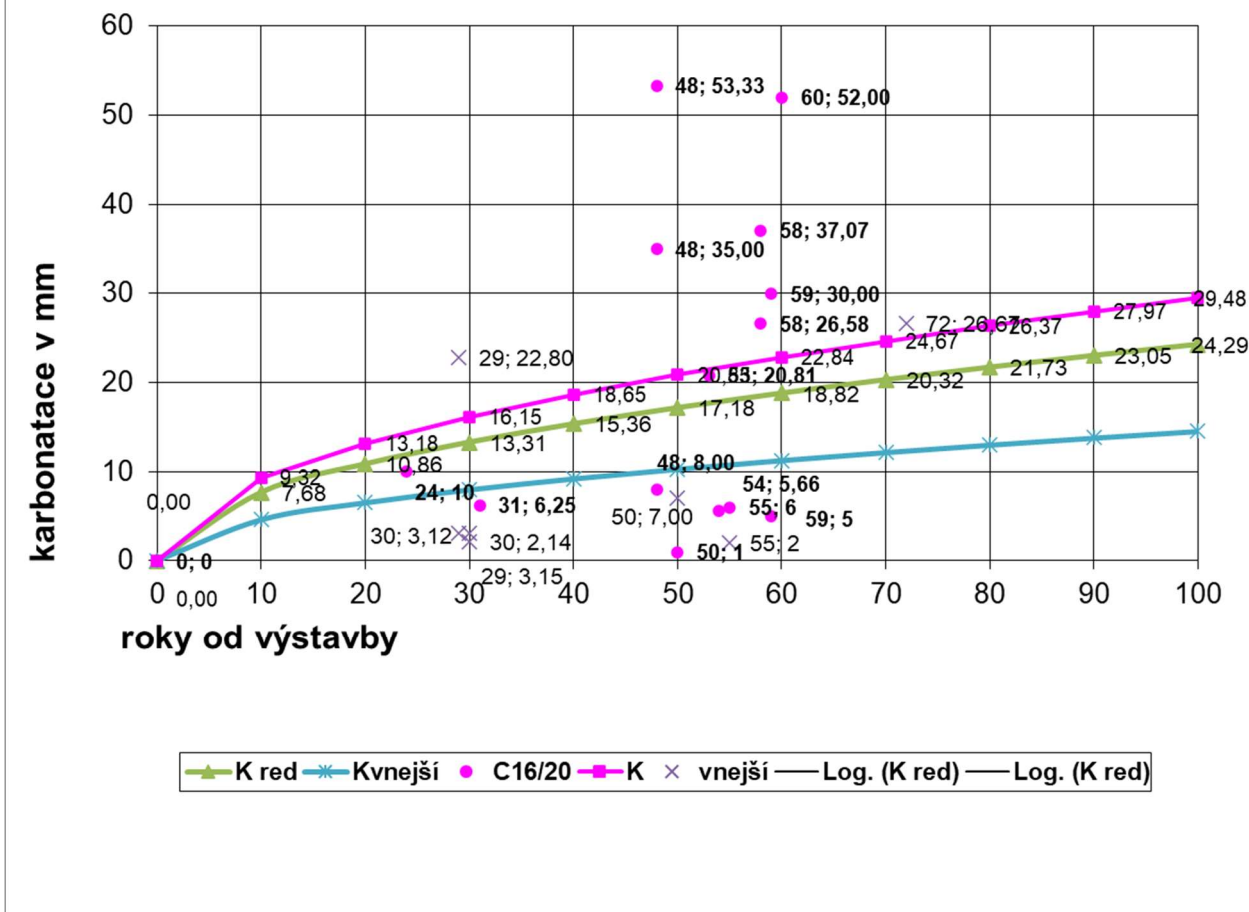


Graf 6.8 – zobrazení hloubky karbonatce betonu C 16/20 a její redukce



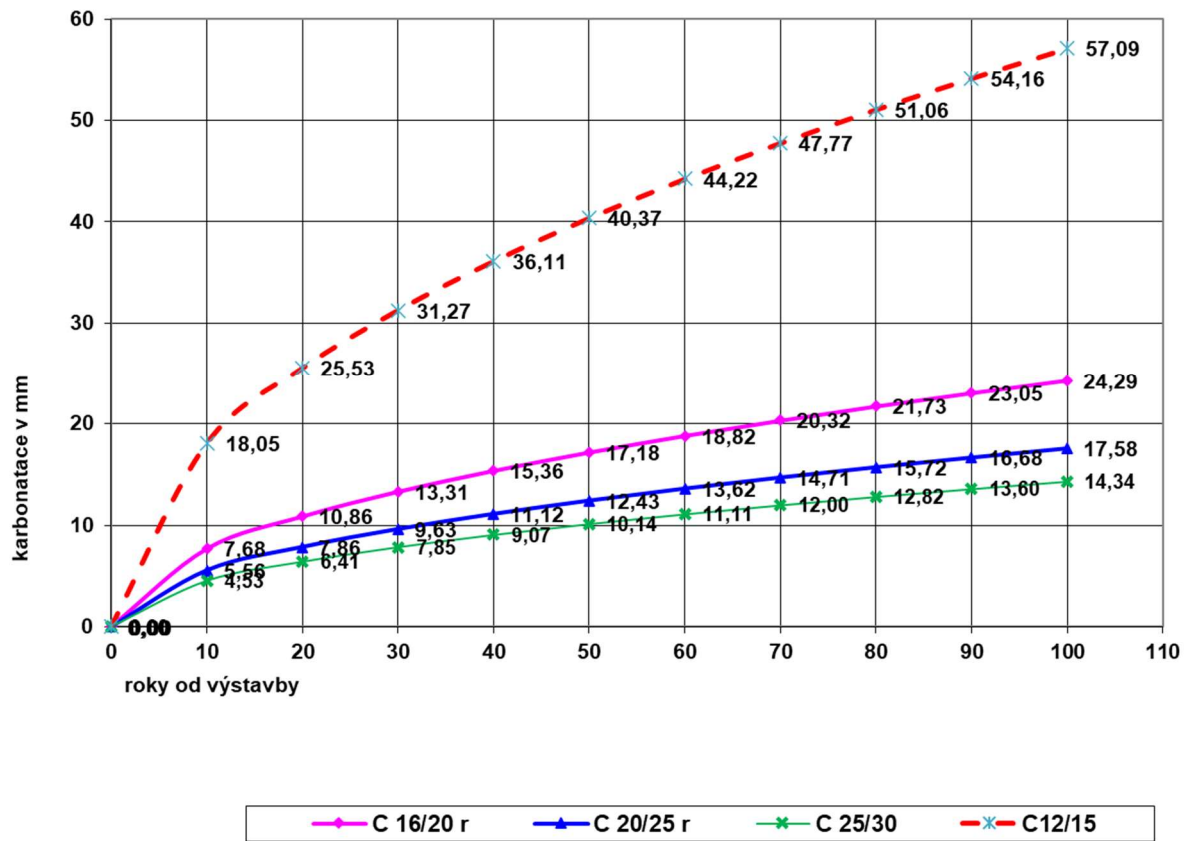
Graf 6.9 – zobrazení hloubky karbonatce betonu C 16/20 a redukce krajních hodnot

Beton C 16/20 - vč. redukce krajních hodnot a vnějšího prostředí - 5/2020 zobrazení hloubky karbonatace



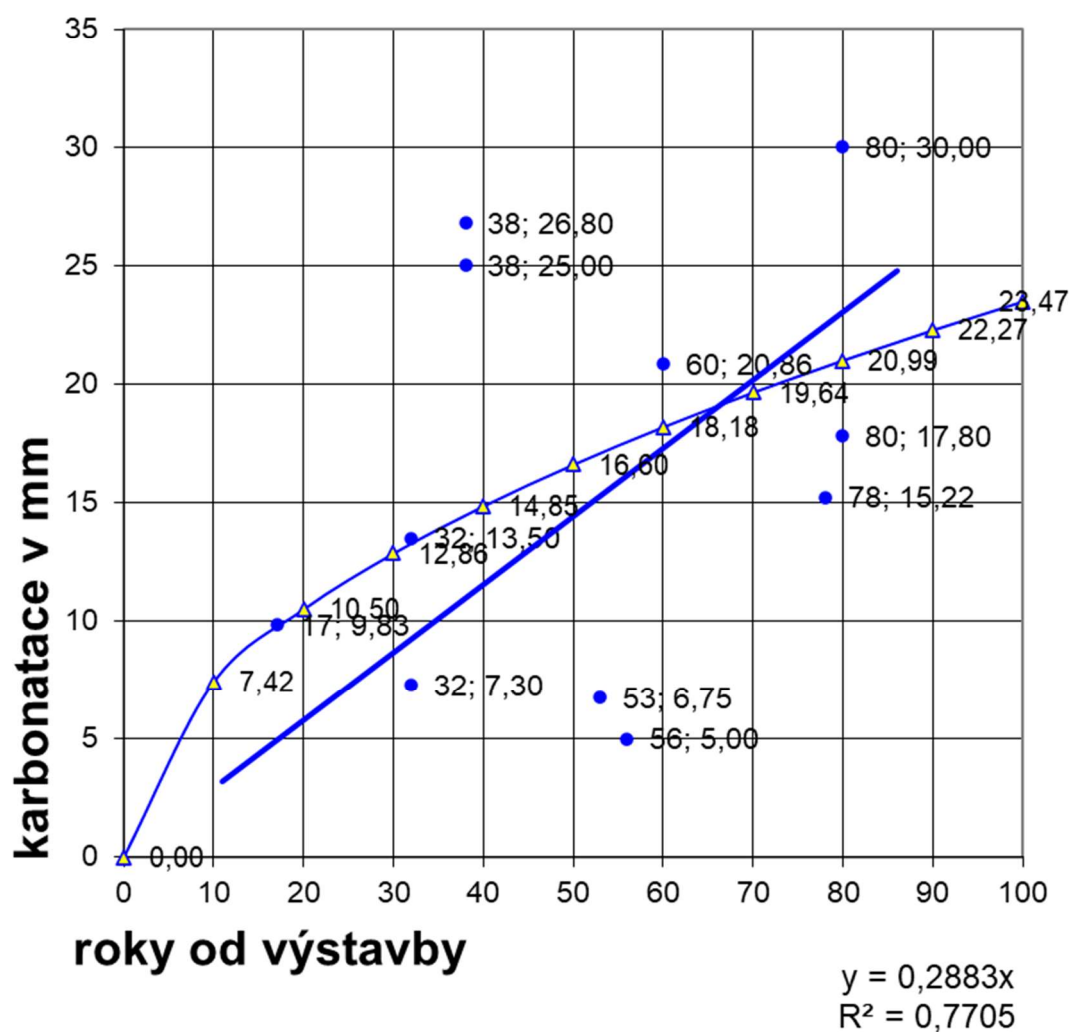
Graf 6.10 – zobrazení hloubky karbonatace betonu C 16/20 redukce krajních hodnot a vnějšího prostředí do května 2020

Betony C12/15 až C 25/30 hloubky karbonatce - dopočet z měření



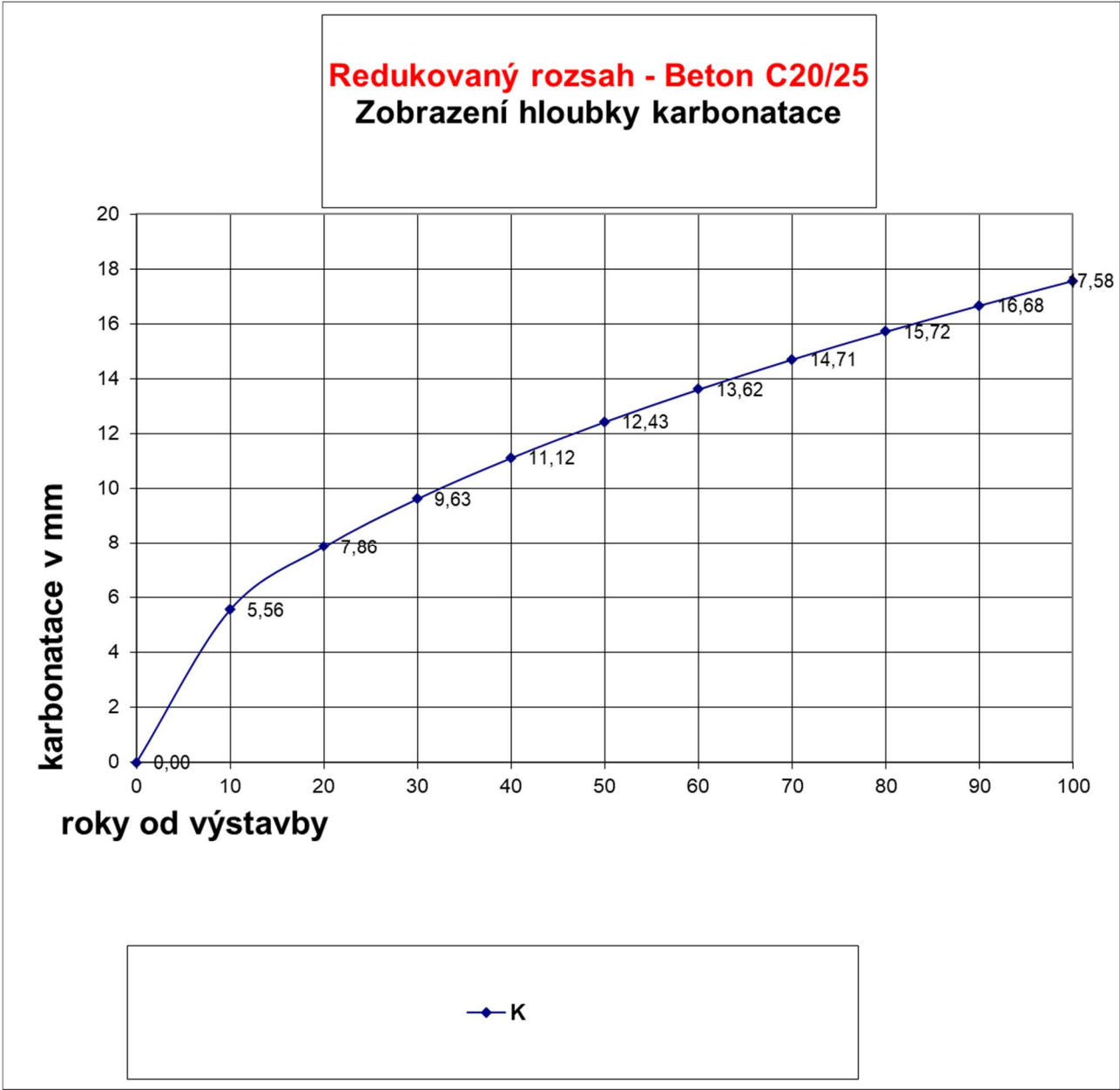
Graf 6.11 – zobrazení hloubky karbonatce betonů C 12/15 až C25/30

Zobrazení hloubky karbonatce pro beton C 20/25



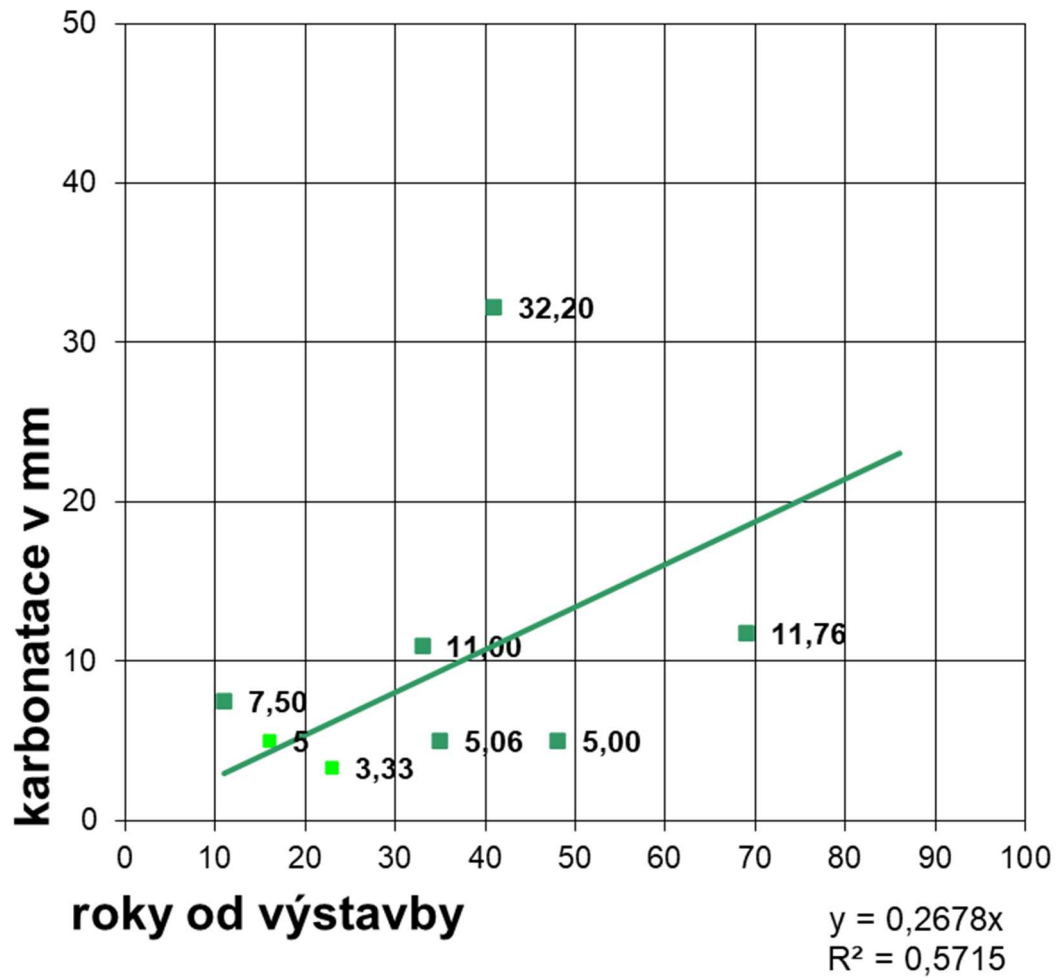
● C20/25 ▲ k — spojnice trendu

Graf 6.12 – zobrazení hloubky karbonatce betonu C 20/25



Graf 6.13 – Redukovaný rozsah betonu C 20/25

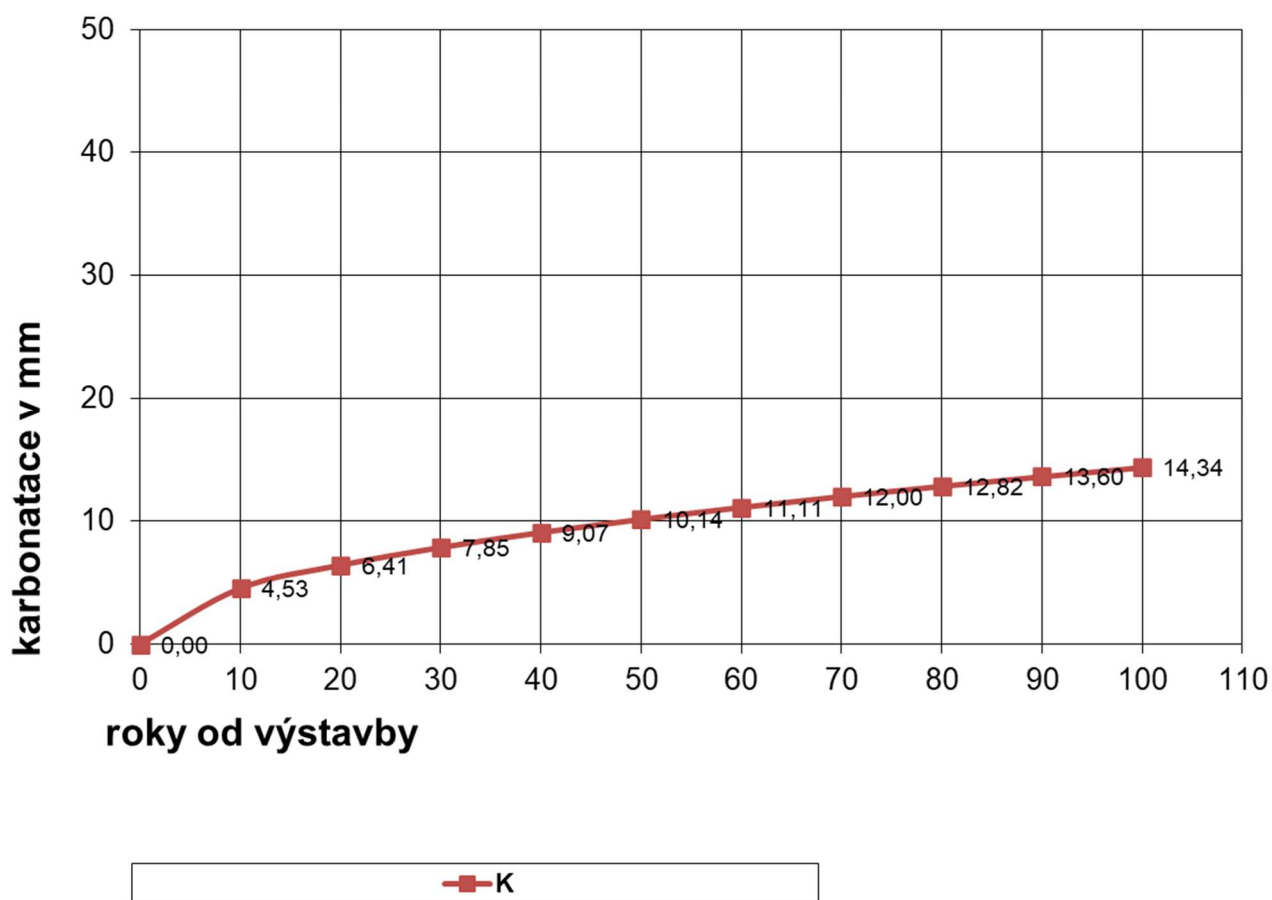
Beton C 25/30 a vyšší zobrazení hloubky karbonatce



■ c25/30 ■ c28/35-B35 — Lineární (c25/30)

Graf 6.14 – zobrazení hloubky karbonatce betonu C 25/30

Upravené - Beton C 25/30 zobrazení hloubky karbonatace



Graf 6.15 – Redukovaný rozsah betonu C 25/30

Poznámka: Grafy pro jednotlivé betony s využitím grafů z prací Ing. Ludka Vejvary, Ph.D. a vlastního měření.

7. Vyhodnocení výsledků měření hloubky karbonatace

7.1 Výsledky pro konstrukce životnosti 50 a 80 let.

Z tabulek a grafů pro jednotlivé betony určíme průměrnou hloubku karbonatace v mm

Třída betonu	Životnost 50 let	Životnost 80 let
C 8/10	29,17	46,64
C 12/15	29,86	47,77
C 16/20	29,41	47,05
C 20/25	11,21	17,93
C 25/30	13,39	21,43

Tab. 7.1 – průměrná hloubka karbonatace v mm

Velké hloubky karbonatace vyskytují zřejmě u betonech tříd C 12/15 a C 16/20, beton třídy C 8/10 v dnešní době nevyhovuje pro nosné části konstrukce.

7.2 Koeficient karbonatace podle zjednodušeného vzorce

Výpočet byl stanoven z grafů průměrných hodnot pro jednotlivé betony ze vzorce:

$$X = K (t)^{1/2}$$

Kde

K – je koeficient karbonatace určeny výpočtem

t – je čas, dosažení 50 a 80 let

Výpočty jsou uvedeny pouze pro třídy betonu, které odpovídají třídám dříve užívaným pro železobeton

Třída betonu	t = 50 let	t = 80 let	Průměr
C 12/15	4,223	5,340	4,780
C 16/20	4,159	5,260	4,710
C 20/25	1,585	2,006	1,796
C 25/30	1,894	2,396	2,144

Tab. 7.2.1 – koeficient karbonatace

Výsledky platí pro konstrukce vnitřních prostorů.

Dále v tabulce zobrazen výpočet hloubky karbonatace podle vzorce $X = 0,167 (t)^{0,5}$

$t^{0,5}$ (50 let) = 39708,9 s

$t^{0,5}$ (80 let) = 50228,3 s

Třída betonu	t = 50 let	t = 80 let	K	K
C 12/15	29,86	47,77	0,750	0,951
C 16/20	29,41	47,05	0,741	0,937
C 20/25	11,21	17,93	0,282	0,367
C 25/30	13,39	21,42	0,337	0,426

Tab. 7.2.2 – koeficient karbonatace, přepočten v sekundách

Z obou porovnání plyne, že karbonatační koeficient K pro betony tříd C 12/15 a C 16/20 je výrazně vyšší o cca 250% než pro betony tříd C 25/30 a výše, proto je doporučeno používat betony vyšších tříd jako C 20/25, C 25/30 a výše.

7.3 Výsledky hloubky karbonatace pro jednotlivé betony vnitřních konstrukce

Třída betonu	Životnost 50 let	Životnost 70 let	Životnost 80 let
C 8/10	30	41	46
C 12/15	30	42	48
C 16/20	30	42	47
C 20/25	13	16	18
C 25/30	14	19	22

Tab. 7.3.1. hloubky karbonataci vnitřních prostorů v mm

Je vidět, že pro životnost již 50 let u konstrukcích nižších tříd jako C 12/15, C 16/20 hloubka karbonatace zasahuje do výztuže, protože předpokládané krytí konstrukce je 20 mm.

Hloubka karbonatace podle Klokerova ústavu

Tento výpočet hloubky karbonatace se zaměřen na stanovení velikosti konstanty před odmocninou ve vzorci. Zavádí vliv různých veličin, jako je vlhkost, prostředí, ošetřování betonu, odolnost betonu a koncentrací CO₂ ve vzduchu. Viz. Příloha č.1

Hloubka karbonatace se vypočte takto:

$$d_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot [\gamma_R \cdot (k_t R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t)]} \cdot \sqrt{C_{CO_2,S}} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)$$

Kde

k_e – je koeficient vlhkosti prostředí = 1 ~ pro suché prostředí

k_c – je koeficient ošetřování betonu ≈ 3 ~ stanoven průměrnou hodnotou, vyjadřuje vliv délky ošetřování povrchu konstrukce před vystavením účinkům okolního prostředí.

γ_R - dílčí součinitel pro odolnost betonu = 1,5 ~ odpovídá hodnotě v EC 2

k_t – regresní parametr = 1,25

$R_{ACC,0}^{-1}$ – odolnost betonu proti karbonatace z tabulky

Druh cementu	Průměrné hodnoty $R_{ACC,0}^{-1}$ v (mm ² /rok) / (kg/m ³)					
	w/c_{eqv}^{-1}					
	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
CEM I 42,5 R	-	978	1640	2145	3091	4226
CEM I 42,5 R + FA (k = 0,5)	-	95	599	757	2050	2618
CEM I 42,5 R + SF (k = 2,0)	1104	1735	-	-	5203	-
CEM III/B 42,5	-	2618	5330	8389	13970	25229
Ekvivalentní vodní součinitel s uvážením vlivu popílku (FA) a křemičitého prachu součinitel k. Uvažované objemy: FA – 22% váhy cementu, SF – 5% váhy cementu.						

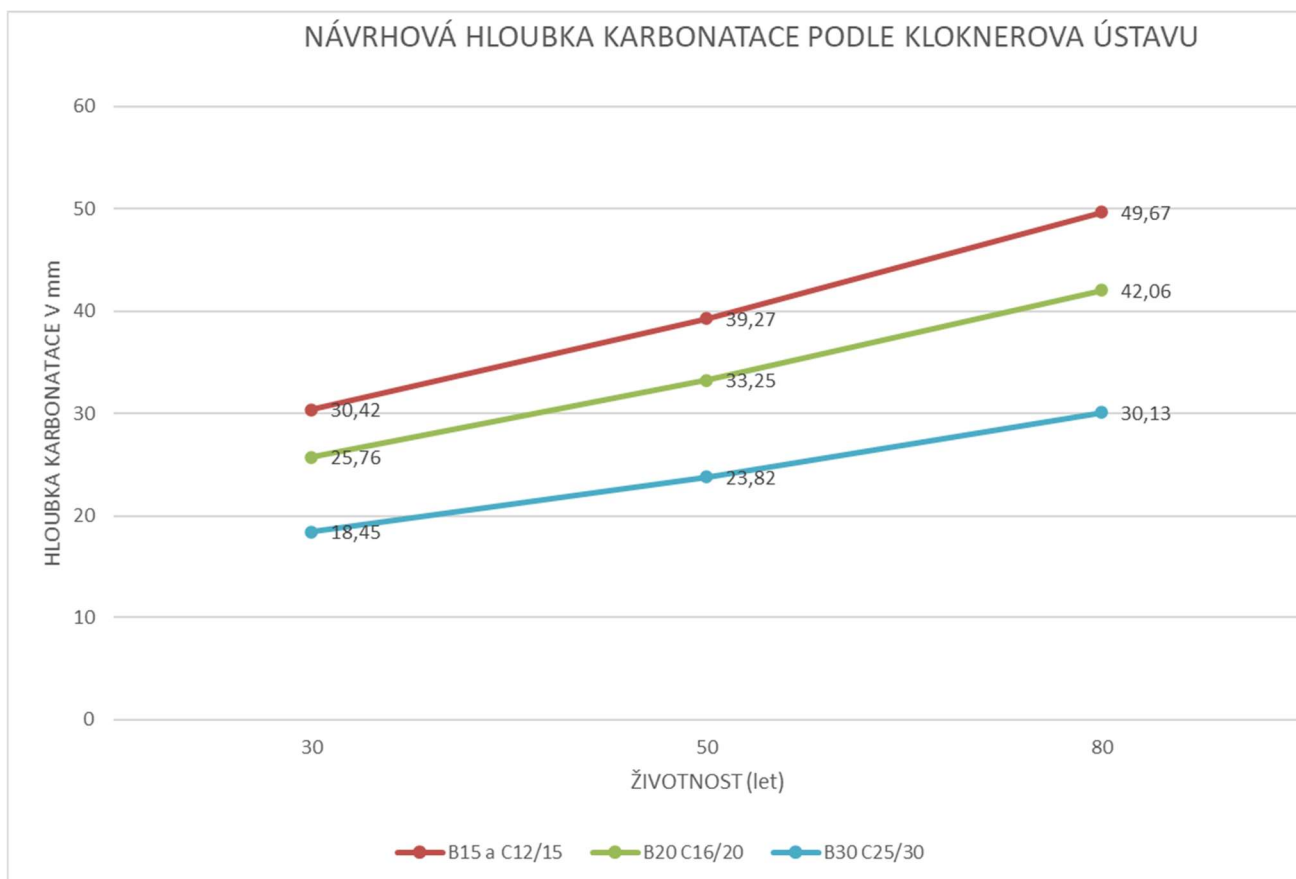
Tab. 7.3.2 – Odolnost betonu proti karbonataci

ε_t – možná odchylka od laboratorních hodnot = 315.5 (mm²/rok) / (kg/m³)

$C_{CO_2,S}$ – koncentrace CO₂ v okolním prostředí = 0.00082 kg/m³

t – čas , zadává se v rocích

W(t) – lokální klimatické podmínky = 1 ~ vnitřní prostředí

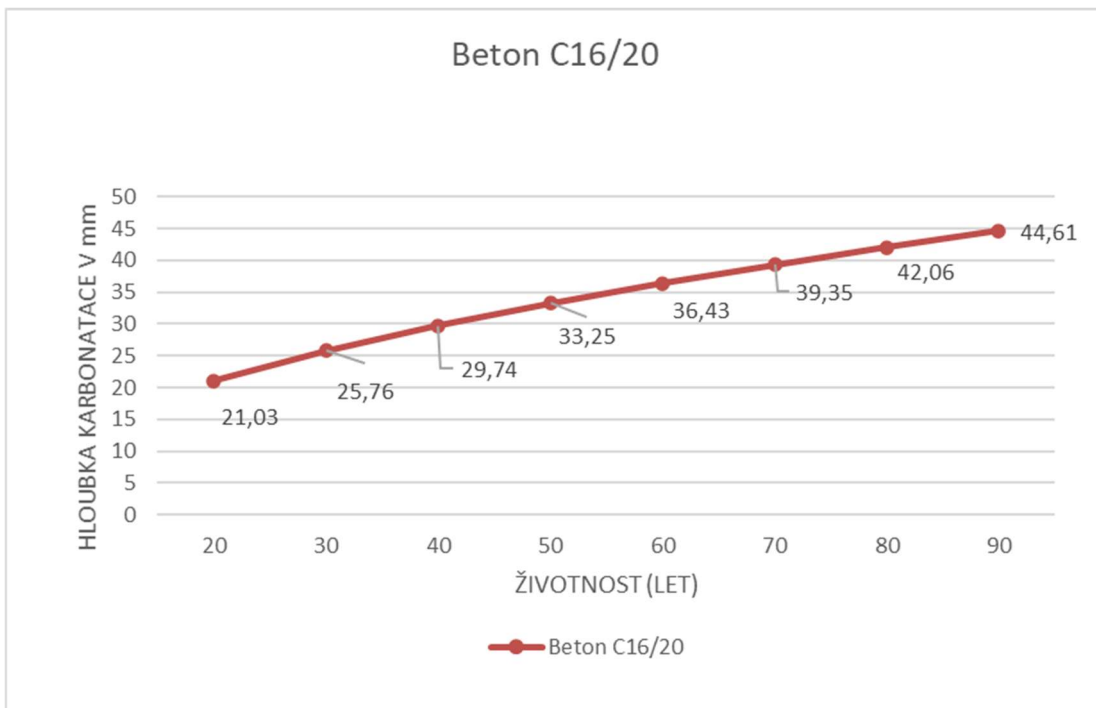


Graf. 7.3.1 – Stanovení hloubky karbonatace v čase t , v závislosti na odolnosti betonu proti karbonatace a vlhkosti okolního prostředí

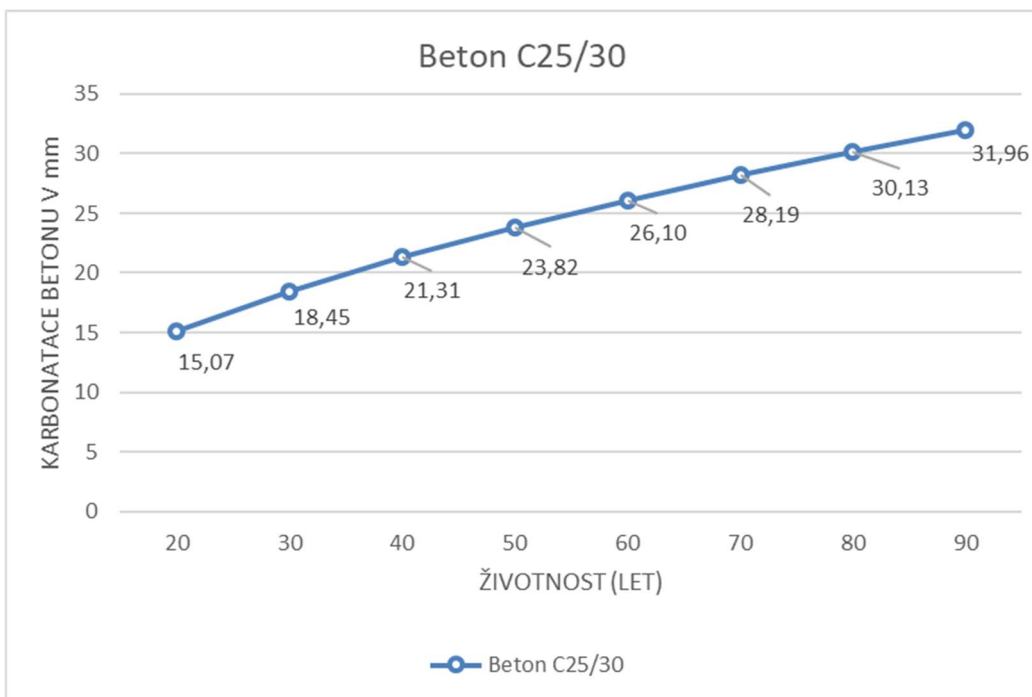
Hloubka karbonatace v mm

stáří konstr. (rok)	B15 C12/15	B20 C16/20	B30 C25/30
30	30,42	25,76	18,45
50	39,27	33,25	23,82
80	49,67	42,06	30,13

Tab. 7.3.3 – Vypočtena hloubka karbonatace podle Kloknerova ústavu.



Graf. 7.3.2 – Stanovení hloubky karbonatce v čase t, v závislosti na odolnosti betonu proti karbonatce a vlhkosti okolního prostředí podle Kloknerova ústavu pro beton C16/20



Graf. 7.3.3 – Stanovení hloubky karbonatce v čase t, v závislosti na odolnosti betonu proti karbonatce a vlhkosti okolního prostředí podle Kloknerova ústavu pro beton C25/3

Vyhodnocení výsledků ohledně hloubky karbonatace

Beton C12/15

Průměrná hloubka karbonatace u stávajících konstrukci pro beton C 12/15 a pro životnost 50 let je 29,86 mm, pro 80 let je 47,77 mm, u vnitřních prostorů pro životnost 50 let – 30 mm, 80 let- 48 mm.

Návrhová hloubka karbonatace pro beton C12/15 podle vzorce, odvedeného Kloknerovým ústavem je pro životnost 30 let – 30,42 mm, pro 50 let – 39,27, pro 80 let – 49,67. viz. graf.7.3.1.

Z toho důvodu v dnešní době pro kryti výztuže 25-30 mm a pro návrhovou životnost staveb 50 let, beton třídy C12/15 pro nosné konstrukce ohledně karbonatace vyhovovat nebude.

Beton C16/20

Průměrná hloubka karbonatace u stávajících konstrukci pro beton C 16/20 a pro životnost 50 let je 29,41 mm, pro 80 let je 47,05 mm, u vnitřních prostorů pro životnost 50 let – 30 mm, 80 let- 47 mm.

Návrhová hloubka karbonatace pro beton C16/20 podle vzorce, odvedeného Kloknerovým ústavem je pro životnost 30 let –25,76 mm, pro 50 let – 33,25 mm a pro 80 let – 42,06 mm. viz. graf.7.3.1.

Z toho důvodu v dnešní době pro kryti výztuže 25-30 mm a pro návrhovou životnost staveb 50 let, beton třídy C16/20 pro nosné konstrukce ohledně karbonatace vyhovovat nebude.

Beton C25/30

Průměrná hloubka karbonatace u stávajících konstrukci pro beton C 25/30 a pro životnost 50 let je 13,39 mm, pro 80 let je 21,47 mm, u vnitřních prostorů pro životnost 50 let – 14 mm, 80 let- 22 mm.

Návrhová hloubka karbonatace pro beton C25/30 podle vzorce, odvedeného Kloknerovým ústavem je pro životnost 30 let –18,45 mm, pro 50 let – 23,82 a pro 80 let –30,13 mm. viz. graf.7.3.1.

Z toho důvodu v dnešní době pro kryti výztuže 25-30 mm a pro návrhovou životnost staveb 50 let, beton třídy C25/30 pro nosné konstrukce ohledně karbonatace bude vyhovovat.

Je zřejmé že z důvodu karbonatace pro nosné konstrukce má být navržena vyšší třída betonu, od C 20/25, C 25/30 a výše.

Z tabulek a grafů převzatých od Ing. Ludka Vejvary, Ph.D. je vidět že zjištěná hloubka karbonatace u zkoumaných konstrukci vychází rozdílná. To souvisí s kvalitou betonu, kryti výztuže a mnoho dalších podmínek.

Hloubka karbonatace, která byla zjištěna teoretický a prakticky ukazuje na to, že beton v minulosti byl málo kvalitní a kryti výztuže bylo nedostatečné.

Pro betony nižších tříd C 8/10, C12/15 a C16/20 a pro životnost 50 let přibližná hloubka karbonatace pro vnitřní prostory podle měření Ing. Ludka Vejvary, Ph.D vychází kolem 30 mm, což odpovídá cca výpočtu podle Kloknerova ústavu, pro beton C12/15 je to 39,27 mm, a pro beton C16/20 je to 33,25 mm.

Pro životnost 80 let a pro stávající konstrukce je podle měření hloubka karbonatace kolem 46 - 48 mm. Podle předpokládaného měření je hloubka karbonatace pro nižší třídy betonu C12/15 a C16/20 je 49,67 mm a 42,06 mm. Velké hloubky jsou kvůli tomu, že beton byl nekvalitní v minulosti. Do budoucna máme používat vyšší třídy betonu.

Z grafu pro výpočet hloubky karbonatace podle Kloknerova ústavu da se předpokládat, že hloubka karbonatace u stávajících konstrukcí pro beton C 16/20 je pro životnost 30 let kolem 26 mm, pro 50 let 34 mm, což odpovídá přibližně hloubky karbonatace z měření od Ing.Ludka Vejvary, Ph.D pro beton C16/20 a je to cca 30 mm, pro 80 let podle měření je to 47 mm, a podle výpočtu je to 42 mm, je vidět rozdíl kolem 4-5 mm.

Pro beton C 25/30 podle výpočtu Kloknerova ústavu hloubka karbonatace pro životnost 30 let je kolem 19 mm, a pro 50 let – 24 mm, hloubka karbonatace z měření pro beton C 25/30 pro životnost 50 let je 14 mm, , zde naopak vidíme, že jsme na straně bezpečnosti, a rozdíl je kolem 10 mm, zase je v tomhle případě důvodem je kvalita cementu a betonu.

Z tabulek vychází, že hloubka karbonatace u konstrukce, které se nachází ve vnitřních prostorech podle výpočtu bude se lišit, ale ne o velkou částku.

Z grafu 7.3.2 pro beton C 16/20 je vidět, že hloubka karbonatace vzrůstá každých 10 let o cca 3-4 mm, a z měření, údaje znázorněny v tabulce 7.3.1 růst hloubky karbonatace pro beton C 16/20 cca 5 mm každých 10 let.

Z grafu 7.3.3 pro beton C 25/30 je vidět, že hloubka karbonatace vzrůstá každých 10 let o cca 2-3 mm, což odpovídá měření, údaje znázorněny v tabulce 7.3.1 růst hloubky karbonatace cca 3 mm každých 10 let.

Z toho vychází, že pro výpočet hloubky karbonatace u stávajících konstrukcí můžeme použít rovnici podle Kloknerova ústavu, rozdíl proti měření na skutečných konstrukcích cca $\pm 2-5$ mm v závislosti na stáři konstrukce a kvalitě betonu.

Stále se jedná o model pro určení předpokládané hloubky zásahu karbonatace v konstrukci. Můžeme ale takto v konstrukce odhadnout, kam až změna betonu zasahuje a jestli může ovlivnit nosnou výztuž. A to je pro hodnocení železobetonové konstrukce důležité.

Vzorec tak můžeme využít při posudcích železobetonových staveb.

7.4 Doporučení pro stávající a nové konstrukce

7.4.1 Stávající konstrukce

Měření hloubky karbonatace ukazují, že je to důsledkem koroze nosné výztuže a poruch konstrukce. Konstrukce ve stáří 20 až 90 let byly navrhovány před normou ČSN 731201-1986 vydané roku 1986. V současné době platí aktualizace této normy EC 2 (ČSN EN 1992-1-1) a EN 206-1(část 1 – Beton).

Pro betony odpovídající dnešní třídě C16/20 a nižší, hloubka karbonatace je cca 30 mm po 50 letech. Jiné provedení výztuže u konstrukcí z 20. století (kotevní délky, třmínky, rozdělovací výztuž) je další příčinou porušení konstrukce.

Vyhodnocení konstrukce

Nejprve při hodnocení stávajícího stavu nosné konstrukce se hodnotí její tvar, vnější viditelné poruchy, trhliny, poškození povrchu betonu, viditelný průhyb a změny konstrukce. Pro hlubší a neviditelné změny včetně karbonatace má být zajištěna sondáž.

Podle míry poškození konstrukce a schopnosti zvládnout nové požadavky na konstrukci můžeme dál rozhodovat o úpravě nebo náhradě konstrukce.

Pro fungování konstrukce podle míry poškození z hlediska karbonatace budou rozhodovat další možnosti:

- možnost opravy konstrukce
- možnost náhrady konstrukce
- možnost ponechání konstrukce bez oprav
- možnost zesílení konstrukce

Pro návrh úpravy nosné výztuže je důležitým faktorem zjištění hloubky a dosažení druhého stadia karbonatace.

Existuje několik způsobů opravy konstrukce proti karbonataci, například nátěry, speciální izolace, omítky.

Dále jsou popsány antikarbonatační přísady, které jsou nové na trhu.

BETON VEST (proti karbonataci betonu) [24].

Akrylátový vysoce omyvatelný ochranný nátěr na beton zabraňující karbonataci betonu a růstu řas a lišejníků.

Omyvatelnost > 20 000 cyklů

Použití a vlastnosti:

Přípravek účinně chrání betonové konstrukce proti působení atmosférických jevů způsobujících zvětrávání betonu a proti vývinu, růstu a destruktivnímu působení řas a lišejníků.

Beton Vest je na bázi akrylátové pryskyřice, vybraných pigmentů a lamelárních plnidel. Je vysoce omyvatelný.

Použití: Ochranné nátěry betonových konstrukcí vystavených vlivům povětrnosti

Zpracování a ředění:

Po 24 hodinách od nanesení penetračního nátěru aplikujte dvě vrstvy Beton Vestu ředěného 20 – 30% vody. Druhý nátěr aplikujte po 8 až 12 hodinách.

Teplotní a vlhkostní omezení pro aplikaci: teplota v rozmezí +5°C až +35°C , aplikovanou plochu chraňte před přímým sluncem a deštěm. Relativní vlhkost vzduchu: do 80 %.
[CC].

Intercrete 4890 od firmy PERGE

Antikarbonatační nátěr pro ochranu betonu

Intercrete 4890 je jednosložkový vodouředitelný akrylátem modifikovaný polymerický nátěr poskytující ochranu betonu a zdiva proti karbonataci a pronikání vlhkosti.

Vysoká pružnost nátěru umožňuje ochranu betonu a zdiva, které vykazuje praskání a tam, kde se předpokládá další pohyb. Poskytuje výbornou adhezi k minerálním podkladům.

Vysoká prodyšnost nátěru umožňuje dobré odpařování vlhkosti z betonového podkladu a je dobrou prevencí proti odlupování. [25]

Intercrete 4890

Objem sušiny:	32%
Odstín:	krémový
Typická tloušťka nátěrového systému: (filmu)	2 x 65µm (suchého)

Příklad opravy a ochrany železobetonové konstrukce od firmy SanaX [25]:

Poškození na konstrukčních prvcích z betonu požaduje ošetření s cílem obnovení původních vlastností.

Odkrytá ocelová výztuž musí být chráněna proti korozi. Původní konstrukce se obnovuje pomocí minerálních výrobků.

Poškození na konstrukčních prvcích z betonu požaduje ošetření s cílem obnovení původních vlastností. Odkrytá ocelová výztuž musí být chráněna proti korozi.

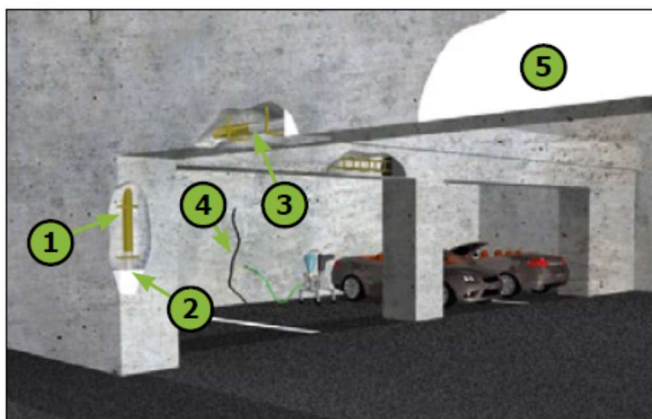
Původní konstrukce se obnovuje pomocí minerálních výrobků. V případě malých oprav a údržby betonových konstrukcí se aplikuje rychlé a jednoduché řešení – ResiBond Standard nebo ResiBond Klasik je materiál na ochranu před korozi a náhrada degradovaného betonu. Pro aplikaci nad hlavou je vhodný ResiBond HB.

Pro reprofilaci a náhradu betonu ve větších oblastech se používá ResiBond Max, Standard, Klasik, Final. Je vhodná pro aplikaci zednickou lžící anebo nástřikem- ResiBond Klasik, ResiBond Standard. Malta se aplikuje na připravený podklad. Na ochranu výztuže použijte ResiBond SP.

Trhliny bez vody se utěsňují produkty ResiInjekt E1 LV. Tato injektážní pryskyřice má vynikající lepící vlastnosti na betonové trhliny a používá se pro konstrukční lepení stavebních prvků.

Jako ochranný nátěr použijte pružný akrylátový nátěr ResiCote WB2 nebo nepružný silikonový nátěr ResiCote WB1, které se dodávají v odstínech RAL. [25]

Oprava betonu



- 1) Ochrana výztuže **ResiBond SP**
- 2) Reprofilace **ResiBond Max, ResiBond Klasik, ResiBond Standard, ResiBond Final**
- 3) Reprofilace podhledy **ResiBond HB**
- 4) Pevnostní injektáž **ResiInjekt E1, ResiInjekt E1 LV**
- 5) Ochrana betonu **ResiCote WB1, ResiCote WB2**

Obr.7.4.1.a – Oprava betonu od firmy SanaX [25]

MONODEX ULTRA od firmy CORRO BOHEMIA

MONODEX ULTRA je jedno komponentní, rychle schnoucí nátěr na vodní bázi, který nabízí výbornou obranu před vnikáním oxidu uhličitého a před působením zvětrávání. Zumožňuje vstup vody, přitom ale umožňuje vlhkým podkladům dýchat a vysychat. Je odolný proti špíně a UV záření. Dlouhodobá ochrana před růstem plísní a hub je zajištěna pomocí vyspělé technologie se zapouzdřeným biocidem.

Je ekonomicky výhodný pro použití všude, kde je důležité udržovat vzhled povrchu, chránit proti povětrnostním vlivům, CO₂, nečistotám, růstu plísně, hub a lišejníků. Jeho elastomerní vlastnosti a vynikající přilnavost umožňují pohyb podkladu a překrytí vlásečnicových trhlin. MONODEX ULTRA je ideální pro použití na dekorativní ochranu fasád, podhledů, vysokých staveb v mírných a tropických klimatických podmínkách.

Specifické vlastnosti:

- Označen značkou CE v souladu s ČSN EN 1504-2 a je v souladu s následující specifikací:
- Přenos vodních par není větší než 20g/m²/den v souladu s ČSN EN ISO 7783-2.
- Propustnost na oxid uhličitý není větší než 2,94 x 10⁻⁷ cm² / s v souladu s normou ČSN EN 1062-6 (ekvivalent tloušťky betonu 500 mm a ekvivalentní vzduchové vrstvy tloušťky 201m na 132μm tloušťky suchého filmu). [vv]

Výhody:

- Zdokonalená formulace kopolymeru s vynikající přilnavostí a odolností vůči povětrnostním vlivům.
- Ochrana proti karbonataci chloridových iontů a agresivních chemikálií na železobetonové konstrukce vlivem vysokého difúzního odporu na CO₂.
- Povrchová úprava odpuzující vodu, zároveň ale umožňuje vlhkým podkladům dýchat a vysychat bez vzniku bublin.
- Tvoří odolnou bariéru proti vniknutí dešťové vody s dostatečnou pružností, aby odolávala vzniku vlásečnicových trhlin na podkladu.
- Aktivní biocid zapouzdřený ve filmu inhibuje (zamezuje) růst plísní, hub a lišejníků.
- Dvě vrstvy nátěru mohou být aplikovány během jednoho pracovního dne.
- Šetrný k životnímu prostředí, nízký obsah VOC, na vodní bázi bez stanoveného bodu vznícení.
- Vytváří matný povrch a je k dispozici v řadě atraktivních barev.
- Ekonomické řešení pro ochranu budov a staveb po dobu až 10 let.[26]

Ochrana výztuže a betonu podle firmy Sika

Koroze výztužné oceli v betonové konstrukci nastává pouze za splnění těchto podmínek – ztráta pasivace, přítomnost kyslíku a přítomnost dostatečné vlhkosti v okolním betonu. Jestliže jedna z těchto podmínek není splněna, pak koroze nemůže nastat. Za normálních podmínek je výztužná ocel chráněna před alkalickým působením dostatečným krytím betonu. Alkalické prostředí vytváří na povrchu oceli pasivní film kyslíku, který chrání povrch oceli proti korozi.

Tento pasivní film ale může být poškozen snížením alkality prostředí karbonatací nebo působením chloridů. V obou těchto případech se pasivní ochranný film ztratí a dochází ke korozi. K dispozici jsou různé Metody k obnovení stavu (nebo zachování) pasivace výztuže.

Volba vhodné Metody bude záviset na různých parametrech, jako jsou např. příčina ztráty pasivace z důvodu karbonatace nebo působení chloridů, rozsah poškození, konkrétní podmínka místa, strategie opravy a ochrany, možnosti údržby, náklady apod.

Metody:

- Zvětšení tloušťky krycí vrstvy výztuže dodatečně nanesenou cementovou maltou nebo betonem
- Náhrada kontaminovaného nebo karbonatovaného betonu
- Elektrochemická realkalizace karbonatovaného betonu
- Realkalizace karbonatovaného betonu difuzí [27].

OCHRANA VÝZTUŽE

Požadavky na ochranu	Nízká úroveň	Střední úroveň	Vysoká úroveň
Karbonatace	11.3 Přidání inhibitorů do betonu	1.3 Nátěr 7.3 Elektrochemická realkalizace karbonatovaného betonu 7.4 Realkalizace karbonatovaného betonu difuzí	11.3 Přidání inhibitorů do betonu + 1.3 Nátěr 7.3 Elektrochemická realkalizace karbonatovaného betonu + 1.3 Nátěr

Malé poškození: místní poškození, žádný vliv na únosnost

Střední poškození: místní až rozsáhlé poškození, mírný vliv na únosnost

Rozsáhlé poškození: rozsáhlé až značné poškození, silný vliv na únosnost [27].

Popis	Hlavní kritéria	Sika® výrobky (příklady)
Jestliže výztuž nemá dostatečnou krycí vrstvu, pak zvětšením tloušťky krycí vrstvy výztuže dodatečně nanesenou cementovou maltou nebo betonem se sníží účinky chemikálií (např. od karbonatace nebo chloridů) na výztuž.	<p>Odolnost proti karbonataci:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Třída R4 nebo R3 <p>Pevnost v tlaku:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Třída R4 nebo R3 <p>Soudržnost:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Třída R4 nebo R3 	<p>Třída R4:</p> <p>Sika MonoTop®-412 N/NFG Sika MonoTop®-612 SikaGrout®-210/-212 SikaGrout®-311/-314/-318 SikaTop®-122 SP SikaFloor®-81/-82 EpoCem® SikaRep® CZ Sika MonoTop®-452</p> <p>Třída R3:</p> <p>SikaQuick®-506 FG Sika MonoTop®-723 N</p>
Prostřednictvím obnovy poškozeného betonu a betonového krytí nad výztuží je ocel znovu chráněna alkalitou svého okolí.	<p>Odolnost proti karbonataci:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Třída R4 nebo R3 <p>Pevnost v tlaku:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Třída R4 nebo R3 <p>Soudržnost:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Třída R4 nebo R3 	<p>Třída R4:</p> <p>Sika MonoTop®-412 N/NFG Sika MonoTop®-612 SikaGrout®-210/-212 SikaGrout®-311/-314/-318 SikaTop®-122 SP SikaFloor®-81/-82 EpoCem® SikaRep® CZ Sika MonoTop®-452</p> <p>Třída R3:</p> <p>SikaQuick®-506 FG Sika MonoTop®-723 N</p> <p>Technologie přísad do betonu Sika: Sika® ViscoCrete®; Sikament®</p>
Obnova alkality betonových konstrukcí elektrochemickým ošetřením je proces probíhající použitím elektrického proudu mezi zabudovanou výztuží do vnějšího systému, obsahujícího anodovou síť, která je zasazena do nádrže s elektrolytem, umístěné přechodně na povrchu betonu. Toto ošetření nezamezuje budoucímu vnikání oxidu uhličitého. Z dlouhodobého hlediska je nutné kombinovat s příslušnými ochrannými nátěry, které zabrání budoucí karbonataci a vnikání chloridů.	Žádná specifická kritéria.	<p>Pro dodatečnou ochranu: Sikagard®-720 EpoCem®</p> <p>Pro dodatečnou ochranu: Sikagard®-680 S</p>

Obr. 7.4.1.b – Protikarbonatační výrobky od firmy Sika [27]

MasterProtect 320 od firmy Master Builders Solutions CZ

Je disperzní akrylátový nátěr pro ochranu železobetonových povrchů před působením vlhkosti, chloridů a karbonátů. Používá se jak na nové betonové konstrukce, tak jako součást systému pro opravy betonu.

Rozsah použití:

- Pro vnitřní i venkovní použití.
- Na stěny a podhledy.
- Pro aplikace na beton a cementové malty.
- Jako ochranný systém na mosty třídy S4 dle TKP 31.
- Barevný nátěr fasád a betonových částí staveb, především v oblasti styku s rozmrazovacími solemi.
- K ochraně inženýrských staveb (mosty, vysílače, komíny, vodní díla apod.) a fasád před vodou a škodlivými plyny, např. před oxidem uhličitým, oxidy síry a dusíku a před chloridy. [28].

Vlastnosti a výhody:

- Vysoká odolnost proti difuzi škodlivých plynů, i přes vysokou propustnost vodní páry chrání beton a malty před průnikem škodlivých plynů.
- Vysoká odolnost proti karbonataci, udržení alkality betonu účinně chrání výztužnou ocel před korozi.
- Vodoodpudivý, chrání beton a malty před pronikáním vlhkosti a rozmrazovacích solí.
- Bezpečně drží, trvale pevný spoj na všech minerálních opravných a stěrkových maltách a rovněž na omítkách a betonu bez nutnosti penetrace.
- Na vodní bázi, nezatěžuje okolí a zpracovatele parami rozpouštědel. Nehrozí nebezpečí požáru nebo výbuchu.
- Odolný vůči působení mrazu a CHRL dle TKP 31 [28].

Aplikace:

- Teplota podkladu by měla být v rozmezí +8 až +30 °C a minimálně 3 °C nad aktuální teplotou rosného bodu.
- MasterProtect 320 důkladně zamíchat.
- MasterProtect 320 je nutno v závislosti na požadované tloušťce aplikovat min. ve dvou pracovních krocích (v případě zvýšeného požadavku překlenutí trhlin se aplikují tři vrstvy).
- První nátěr naředit 5-10 % vody a rovnoměrně, krycím způsobem nanést plochým štětcem, kartáčem, válečkem nebo nástřikem na připravený podklad.
- Druhou, resp. třetí vrstvu neředěného materiálu lze nanést po min. 8 hod. (při +20 °C).
- Při aplikaci airless stříkáním lze přidat do směsi max. 5-10 % vody.
- Tlak při nástřiku (150-180 bar), tryska (0,53- 0,68 mm). [28]

“Antikarbonatační systém” pro nízké krytí od firmy Master Builders Solutions CZ [29]

MasterSeal 6100 FX – je to pružna jednosložková cementová membrána

1,5 mm vrstva = 600 mm betonu.

Použití pružné cementové membrány MasterSeal 6100 FX:

- Pro objekty v exteriéru i interiéru.
- Vodotěsná stěrka pro nádrže na užitkovou, dešťovou nebo technologickou vodu.
- Pro plochy a objekty trvale ponořené ve vodě.
- Pro ochranu a hydroizolaci základů stavebních konstrukcí.
- Pro ochranu povrchu betonu před karbonatací a působením chloridů.
- Antikarbonatační membrána při nízkém krytí výztuže.
- Hydroizolace odvodňovacích žlabů na mostech.

Vlastnosti pružné cementové membrány MasterSeal 6100 FX:

- Jednokomponentní receptura s vysoce elastickými vlastnostmi: Prášková směs se míchá pouze s vodou. Snížené nároky na skladovací prostory, snížené náklady na transport a likvidaci obalů.
- Elastický až do -10 °C: Vysoká trvanlivost a funkčnost v důsledku trvalé pružnosti hmoty i při nízkých teplotách.
- Nízká objemová hmotnost / vylehčená receptura: Úspora materiálu až 45 % ve srovnání se standardními 2K hydroizolačními stěrkami a úspora času při aplikaci.
- Rychlé vytvrzení: Umožňuje velmi rychlé využití. Nádrže lze naplnit vodou již po 3 dnech.
- Vodonepropustnost při tloušťce pouze 2 mm: Odolává tlaku 5 barů (50 metrů vodního sloupce).
- Vynikající přídržnost.
- Elasticita hmoty je zachována i při ponoření.
- Umožňuje konstrukci dýchat.
- Propustný pro vodní páry.
- Vysoká odolnost vůči průniku oxidu uhličitého: Chrání železobetonové objekty před korozí výztuže. Nátěr s tloušťkou vrstvy 1 mm zajišťuje stejnou ochranu vůči karbonatácii jako 400 mm betonu.
- Odolnost vůči síranům, mrazu a CHRL.
- Omezené riziko tvorby výkvětů.

- UV odolnost, dostupnost v bílém a šedém odstínu: lze použít jako finální povrchovou úpravu ve venkovním prostředí.
- Bez čpavkového zápachu: lze aplikovat v interiérech a uzavřených prostorech.
- Přispívá k LEED účtu: obsahuje více než 5 % recyklovaného materiálu. [29]

Aplikace:

1. Ruční aplikace

1.1. Štětcem, válečkem, hladíkem

1.2. Kontaktní vrstva, izolační vrstva

2. Strojní aplikace

- Lze nanášet v jednom pracovním kroku
- Šneková nebo peristaltická pumpa
- Vysoká efektivita nanášení



Obr. 7.4.1.c - Zapracování první vrstvy MasterSeal 6100 FX do podkladu pomocí štětce [29]



Obr. 7.4.1.d - Aplikace MasterSeal 6100 FX nástřikem [29]

Obecné způsoby opravy železobetonových konstrukcí z hlediska karbonatací

Možností opravy vyplývají ze stavu konstrukce:

1. Konstrukce ponechána bez úprav, výztuž v tom případě nezasazena karbonatací

Pokud výztuž nezasazená karbonatací a konstrukce nevykazuje povrchové poškození, tak můžeme nechat konstrukci bez oprav, nebo je doporučeno navrhnout jenom úpravu povrchu k omezení pronikání oxidu uhličitého.

Ale vzhledem k přispívající životnosti konstrukce pro vylepšení stavu můžeme navrhnout další úpravy:

- Nátěry uzavírající povrch konstrukce
- Nová omítka
- Tvrdý nátěry k omezení průniku CO₂
- Obklad konstrukce nepropustnými deskami (například keramickými)

Další prostředky a systémy od různých výrobců (resp. firem), které byli popsány výše.

Hlavní nebezpečí je tom, aby konstrukce vyhovovala staticky. Když konstrukce nebude vyhovovat staticky máme navrhnout její zesílení, a to podle platných norem Eurokodu.

2. Karbonatace zasahuje po nosnou výztuž betonu

V případě, když hloubka karbonatace dosahuje po uloženou výztuž budeme postupovat podle bodu 1. Podle bodu 3 budeme postupovat při poškození povrchové vrstvy konstrukce.

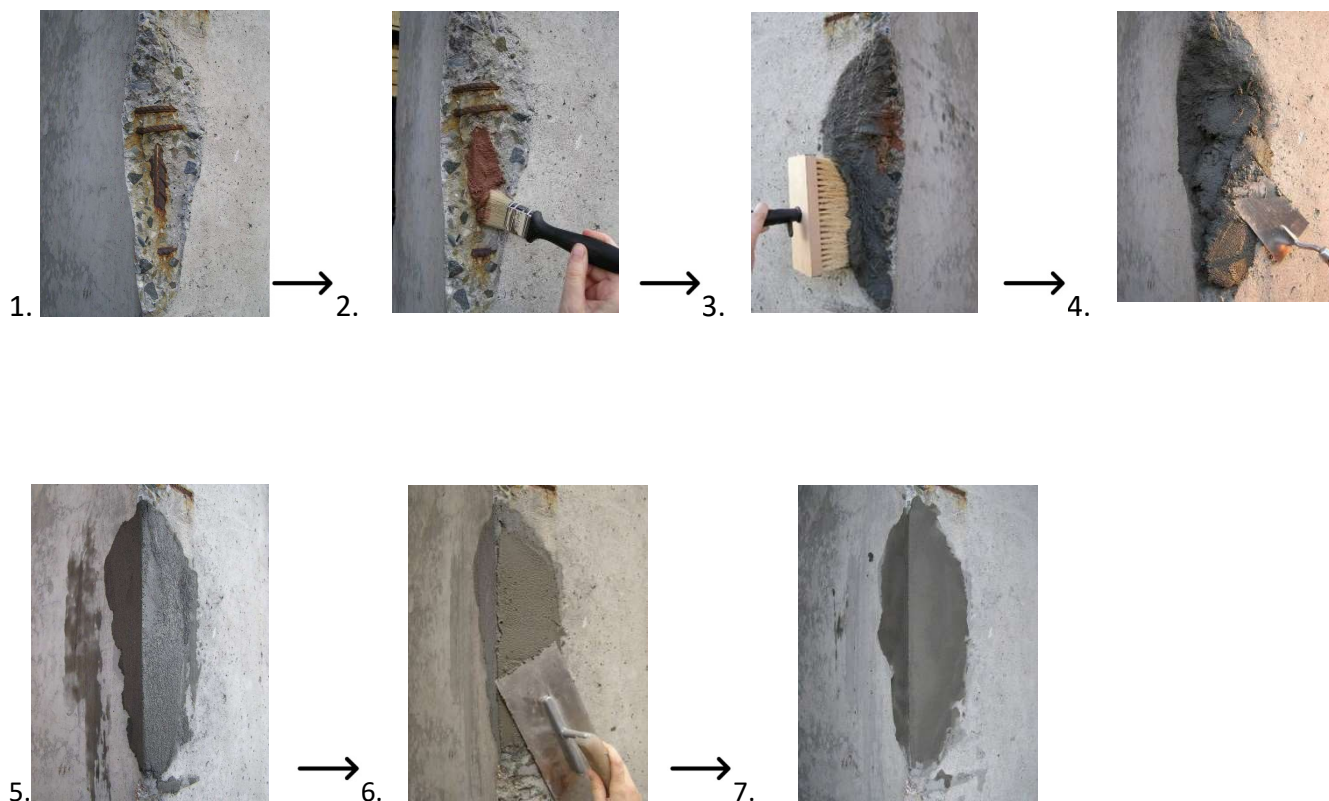
3. Karbonatace betonu zasahuje za nosnou výztuž, betonová konstrukce je poškozena

Pro konstrukce, kde hloubka karbonatace zasahuje za nosnou výztuž, je třeba ohodnotit stav betonu, jeho pevnost, statické chování, stav výztuže, a posoudit celkovou nosnost konstrukce a její technické vlastnosti.

Podle stavu konstrukce, a stavu lokálních trhlin je třeba navrhnout technologický postup opravy konstrukce, ale obecný postup může být popsány takto:

- Mechanické očištění povrchu konstrukce
- Otryskání poškozeného betonu
- Odstranění nefunkční vrstvy betonu po otryskávání
- Zesílení výztuže
- Pasivace výztuže
- Aplikace sanační malty na beton

- Aplikace finální sanační vysprávkové malty
- Ochranný nátěr nebo omítka na povrchu konstrukce



Obr.7.4.1.e – Soubor obrázků 1 až 7, který ukazuje postup opravy poškozené železobetonové konstrukce

4. Hodně poškozené konstrukce

V případě, kdy konstrukce je značně poškozená, nevyhovuje staticky a je velký zásah karbonatace, je nutno tuhle konstrukce nahradit novou, nebo v některých případech zesílit její průřez. [30]

7.4.2 Nové konstrukce

Nové konstrukce mají být navrhovány podle současných norem a předpisů jako jsou:

- A) Normy pro návrh betonových konstrukcí
- B) Normy pro zatížení stavebních konstrukcí
- C) Normy pro specifikaci materiálu (betonu a výztuže)

Normy pro návrh betonových konstrukcí:

- ČSN EN 1990 ed. 2 - Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, 2015
- ČSN EN 1991-1-1 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb, 2004
- ČSN EN 1991-1-3 ed. 2 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem, 2013
- ČSN EN 1991-1-4 ed. 2 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem, 2013
- ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 - Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2011[31].

Požadovaná třída konstrukce podle ČSN EN 1992-1-1 je S5 pro životnost 80 let, S4 pro životnost 50 let.

Při navrhování nové železobetonové konstrukce musíme zvažovat také další body:

- Správně stanovit prostředí
- Navrhnout co nejvyšší kvalitu betonu
- Stanovit dostatečnou a vhodnou výztuž a její krytí, včetně nátěru
- Správně předpokládat reálnou životnost stavby a jednotlivých konstrukcí
- Zajistit vhodné ošetřování betonu
- Vybrat vhodné složení betonu vůči prostředí
- Správně stanovit zatížení na konstrukci

8. Závěrečné shrnutí

Karbonatace je chemický proces v betonu, jehož důsledkem je koroze výztuže. Při tomto procesu do betonu proniká oxid uhličitý a pH betonu klesá pod hodnotu 9. Na rychlost karbonatace a její hloubku má vliv pórovitost betonu, vlhkost prostředí, obsah CO₂ ve vzduchu, kvalita betonu a mnoho dalších složek a jevů, které jsou popsány v této diplomové práci.

Známé jsou čtyři etapy karbonatace. V jednotlivých etapách dochází v betonu k poklesu pH. Pro odhad hloubky karbonatace byly popsány matematické a výpočtové modely zjištění její hloubky. Modely jsou závislé na velkém množství parametrů, aniž všechny známe. Proto musíme dobře zvážit, jakou metodu vybrat.

Hloubka karbonatace byla prakticky zjištěna na stávajících objektech fenalftalienovou zkouškou. Všechny údaje byly zpracované do tabulek a grafů, ze kterých byla odvozena závislost hloubky karbonatace a třídy betonu vzhledem k času. Takže lze tvrdit, že třída betonu je jednou z kritérií a má velký vliv na hloubku a rychlost karbonatace, a to pak má vliv i na korozi výztuže.

Na korozi výztuže způsobenou karbonatací u stávajících objektů má vliv její krytí a vlhkost prostředí. Trhliny mají rovněž vliv na korozi výztuže. Původní krytí 10 mm pro desky a 20 mm pro nosníky je v dnešní době nepostačující. Pro nové konstrukce je doporučeno použít vyšší hodnotu krytí podle ČSN EN 1992-1-1.

Předpokládanou hloubku karbonatace je možné zjistit výpočtem podle Kloknerova ústavu, která je závislá na funkci vlhkosti prostředí, odolnosti betonu proti karbonataci, ošetřování betonu, koncentraci oxidu uhličitého ve vzduchu a dílčích součinitelích pro odolnost betonu. Návrhová životnost pozemních staveb je 50 let, u mostů a inženýrských staveb 100 let.

Po vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, že betony tříd pod C 16/20 vykazují výrazně větší hloubku karbonatace. Také velký vliv má i pórovitost betonu, jeho menší hutnění. Betony tříd C12/15 a nižších mají pórovitost 20,5%, třída C 16/20 kolem 16% a betony třídy C20/25 kolem 10%. Proto je doporučeno používat betony C20/25 a vyšších tříd pro nosné konstrukce.

Pokud je stávající konstrukce poškozená nebo narušená karbonatací, není možné její využití dále prodlužovat. Při úpravě stávajících konstrukcí s životností 50 až 80 let máme uvažovat o náhradě této konstrukce. Zásadní sanace je dalším způsobem úpravy stávající konstrukce.

Postupy a možnosti úpravy byly popsány v této diplomové práci. Pro ochranu konstrukce proti karbonataci mohou být použity speciální nátěry, omítky, izolace a další antikarbonatační prvky.

Při navrhování nových konstrukcí z hlediska omezení karbonatace musí být zohledněna všechna doporučení, která byla uvedena výše v textu.

Hlavním problémem karbonatace betonu je nebezpečí reznutí výztuže. Protože beton má ochrannou funkci výztuže od okolního prostředí. V případě že beton ztratí svoje alkalické vlastnosti vlivem karbonatace, do výztuže začne pronikat vlhkost a další nežádoucí látky, které

způsobí její koroze. Při korozi se výztuž zvětšuje ve svém objemu bobtnáním a tím porušuje okolní strukturu betonu. Kvůli tomu mezi betonem a ocelí se ztratí soudržnost, což postupem času vede k rozvoje trhlin, a pak i k porušení konstrukce.

Proto důležitým faktorem je zjištění zásahu karbonatace do hloubky železobetonové konstrukce, čímž tahle diplomová práce se zabývala.

9. Podklady a použitá literatura

9.1 Seznam literatury

- [1]. Internetová stránka <https://www.krasko.ru/faqs/faq134/>
- [2]. Collepari Mario: *Moderni beton, Praha, CBS, 2009, str.112*
- [3]. Prof.Ing.Petr Pytlík: *CSc, Technologie betonu, 2000, str.368.*
- [4]. Collepari Mario: *Moderni beton, Praha, CBS, 2009, str.114-116*
- [5]. Collepari Mario: *Moderni beton, Praha, CBS, 2009, str.111*
- [6]. Collepari Mario: *Moderni beton, Praha, CBS, 2009, str.41, 112-113*
- [7]. Collepari Mario: *Moderni beton, Praha, CBS, 2009, str.41, 141-142*
- [8]. Matoušek, Drochytka: *Atmosferická koroze betonů: Praha, ČKAIT,1998, str.17-25*
- [9]. Matoušek, Drochytka: *Atmosferická koroze betonů: Praha, ČKAIT,1998, str.25-30*
- [10]. Pytlík Petr: *Technologie betonu: Brno, VUT Brno nakl. VUTIUM, str.369-370*
- [11]. Prof. Ing. Dr. Milan Matoušek, DrSc , Doc. Ing. Rostislav Drochytka: *CSc, Atmosférická koroze betonu, 1998, str.31-33*
- [12]. Modrý Sylva: *Trvanlivost betonu a železobetonu, Praha, ČVUT,2001*
- [13]. Pierre-Claude Aitcin: *Vysokohodnotný beton, Praha, ČKAIT, 2005, str.275-276*
- [14]. Ing. Luděk Vejvara: *Rekonstrukce průmyslových staveb, Vliv karbonatce betonu, Praha,2012*
- [15]. Jelen Ladislav: *Míšení úsporných betonů, nakl. práce, Praha, 1951*
- [16]. Pytlík Petr: *Technologie betonu: Brno, VUT Brno nakl. VUTIUM, str.312-316*
- [17]. Šnirch, Zdeněk, Amos Dufka a Martin Lukavec: *Metodika stanovení vlivu vertikálních trhlin na plášt chladící věže. Beton TKS: Sanace a rekonstrukce. (3/2010): 64-67, 84*
- [18]. Fagerlund, G. :*The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. RILEM.*
- [19]. ISO 16204: *Durability - service life design of concrete structures. Švýcarsko: ISO Copyright office, 2012, str. 31*
- [20]. FIB Bulletin 34: *Model Code for Service Life Design. 1. Švýcarsko: International Federation for Structural Concrete, 2006, str. 110*
- [21]. Ing. Luděk Vejvara, Ph.D.: *Rekonstrukce průmyslových staveb, str.53-55*
- [22]. Archiv Ing. Luděk Vejvara, Ph.D
- [23]. Internetová stránka: <http://www.differente.cz/sortiment/ochranna-barva-na-beton-beton-vest-antialga>, Technický list
- [24]. Internetová stránka: <https://www.perge.cz/eshop/p/intercrete-4890-0-80>
- [25]. Internetová stránka: https://www.sanax.cz/files/katalogy/Katalog_Sanace_betonuII_Sanax.pdf , str.27

- [26]. Internetová stránka: <https://www.corro.cz/produkt/monodex-ultra/>, Technický list
- [27]. Internetová stránka: <https://cze.sika.com/content/dam/dms/cz01/7/prospekt-cz-Sanace-Betonu-Komplexni-reseni-pro-opravy-a-ochranu-zelezobetonu.pdf>, str.32-35
- [28]. Internetová stránka: <https://www.master-builders-solutions.com/cs-cz/products/masterprotect/masterprotect-320>, Technický list
- [29]. Internetová stránka: <https://www.master-builders-solutions.com/cs-cz/products/masterseal/masterseal-6100-fx>, Technický list
- [30]. Ing. Zdeněk Vávra: *Sanace betonu a železobetonu, přednáška.*
- [31]. Internetová stránka ČKAITu, kolektiv: <https://profesis.ckait.cz/dokumenty-ckait/a-5/a-5-2/>, *Přehled soustavy Eurokódů pro navrhování konstrukcí, aktualizace 2020.*

9.2 Seznam obrázků

- Obr. 2.1.1 – Vliv vodního součinitele [4]*
- Obr. 2.1.2 – Rychlost karbonatace [4]*
- Obr.2.1.3 - Schéma nebezpečí karbonatace a ukázka odpadlé celé krycí vrstvy výztuže [21], str. 20*
- Obr. 2.2.1 – Schéma hydratace [7]*
- Obr. 2.2.2 – Pasivace [6]*
- Obr. 2.2.3 – Depasivace [6]*
- Obr. 2.2.4 – Porušení ocelových tyčí vlivem oxidace a objemových změn [6]*
- Obr.2.3.1 – Stupně vlivu prostředí [7]*
- Obr. 2.3.2 – Stupně prostředí vlivem karbonatace [7]*
- Obr.2.4.1 –Stupeň karbonatace závislý na relativní vlhkosti vzduchu podle Verbecka [8]*
- Obr.2.4.2 – Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu podle Vénua a Alexandrea [8]*
- Obr.2.4.3 – Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu podle Matouška [8]*
- Obr.2.5.1 – Závislosti mezi stupněm karbonatace a hodnotou pH, resp. stupněm modifikačních přeměn [9]*
- Obr.2.6.1 – Teplotní režimy [11]*
- Obr.2.6.2 – Závislost na čase činitele difuzního odporu u betonové směsi 1/BS 1/ (5s VeBe, PC = 440 kg.m⁻³, 0/4 = 770 kg.m⁻³, 8/16 = 930 kg.m⁻³). [11]*

Obr. 2.6.3 – Vyznačená hloubka vzniku atmosférického oxidu uhličitého v závislosti na čase do betonu BS 1. [11]

Obr.2.7.1 – Penetrace Oxidu uhličitého v mm do betonu vystaveného působením vzduchu RH = 65 % jako funkce času \sqrt{t} s charakteristickou krychelnou pevností $f_{cu/ck}$ a s různými vodními součiniteli w/c. Hodnota K je daná v mm.rok^{1/2}. [12]

Obr.2.7.2 – Ochrana ocelové výztuže, zdrojem je internetová stránka:

<https://mosstroylab.ru/carbonization>

Obr. 2.10.1 – Kumulována četnost pórů cementového kamene různého vodního součinitele w. [16]

Obr.2.10.2 – Póry v betonu. [16]

Obr.2.10.3 – Objem cementového kamene při rozdílném vodním součiniteli, který závisí na stupně hydrataci. [16]

Obr. 2.11.1 – Karbonatace kolem trhliny [17]

Obr. 2.12.1 – Hloubka karbonatace, zdrojem je internetová stránka:

<https://mosstroylab.ru/carbonization>

Obr.2.12.2 – Oblast konstrukce bez zbarvení, zdrojem je internetová stránka:

<https://mosstroylab.ru/carbonization>

Obr.2.12.3 – Pronikání CO₂ do výztuže, zdrojem je internetová stránka:

<https://mosstroylab.ru/carbonization>

Obr.2.12.4 - Roztok fenolftalienu, zdrojem je internetová stránka: <https://mosstroylab.ru/carbonization>

Obr.2.12.5 - Roztok fenolftalienu, archiv autora práce

Obr.5.2.9.a – Půdorys 1 NP. vily v Maškové ulici v Klatovech, archiv vlastníka objektu

Obr. 5.2.9.b – Pohled na sondu č.1, archiv autora práce

Obr. 5.2.9.c – Pohled na sondu č.2, archiv autora práce

Obr.5.2.9.d – Sonda č.2 – porušení překladu, archiv autora práce

Obr.5.2.9.e – Sonda č.1 – porušení překladu, archiv autora práce

Obr.5.2.9.f – Sonda č.2 – Aplikace fenolftalienu- pohled zboku, archiv autora práce

Obr.5.2.9.g a 5.2.9.h – Sonda č.2 – Aplikace fenolftalienu- pohled zespodu, archiv autora práce

Obr.5.2.9.i – Aplikace fenolftalienu – beton se nezabarvil, archiv autora práce

Obr.5.2.10.a – Zkoušeny vzorek – pohled zboku, archiv autora práce

Obr.5.2.10.b – Aplikace roztoku Fenolftalienu zboku, archiv autora práce

Obr.5.2.10.c – Aplikace roztoku Fenolftalienu shora, archiv autora práce

Obr.5.2.10.d – Lehce zbarvení v 20 mm od kraje vzorků-pohled shora, archiv autora práce

Obr.5.2.10.e – Lehce zbarvení v 20 mm od kraje vzorků-pohled shora, archiv autora práce

Obr.5.2.10.f a 5.2.10.g – Beton se nezabarvil – pohled z boku, archiv autora práce

Obr. 5.2.10.h a 5.2.10.i – beton se nezabarvil v místě bývalé výztuže, archiv autora práce

Obr.7.4.1.a – Oprava betonu od firmy SanaX [25]

Obr.7.4.1.b – Protikarbonatační výrobky od firmy Sika [27]

Obr. 7.4.1.c - Zapracování první vrstvy MasterSeal 6100 FX do podkladu pomocí štětce [29]

Obr.7.4.1.d - Aplikace MasterSeal 6100 FX nástřikem [29]

Obr.7.4.1.e – Soubor obrázků 1 až 7, který ukazuje postup opravy poškozené železobetonové konstrukce, zdrojem je internetová stránka: <https://www.paulin.cz/24783-sanace>

9.3 Seznam tabulek a grafů

Tab. 2.3.1 - Minimální krycí vrstva výztuže z hlediska podmínek prostředí $C_{min,dur}$

Tab.2.3.2-Minimální krycí vrstva výztuže z hlediska podmínek prostředí $C_{nom} = C_{min,dur} + \delta C_{dev}$

Tab.2.5 Postup karbonatace – účinky a etapy

Tab.2.8 – Třídy betonů podle různých norm

Tab. 2.9.1 - množství cementu betonu na jeden metr kubický podle ČSN z roku 1935

Tab.2.9.2 - kvalita cementu, která byla stanovena od roku 1950

Tab.2.9.3 - povolené množství cementu od roku 1950

Tab.2.9.4 - Množství cementu podle stupni vlivu prostředí

Tab.2.10.1 - Závislost cementového kamene na vodním součiniteli

Tab. 2.11.1 - Závislost rozvoje koroze a šířky trhliny

Tab.3.1.1 – Parametr provedení

Tab.3.1.2. – Lineární hodnoty $R^{-1}_{ACC,0,k}$

Tab. 6.1- Průmyslové objekty - vnitřní prostor, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.

Tab.6.2- Správní a občanské stavby - vnitřní prostor, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D. a doplněno autorem práce

Tab.6.3 - Vnější prostor, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.

Tab.6.4 - Vnější prostor - mosty, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.

Graf.6.1 - Měření hloubky karbonatace různých tříd betonů, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D. a doplněno autorem práce

Graf 6.2 – Zobrazení hloubky karbonatace pro betony nižších tříd, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D. a doplněno autorem práce

- Graf 6.3 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 8/10, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Graf 6.4 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 12/15 a její redukce, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Graf 6.5 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 12/15 a její redukce krajních hodnot, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D. a doplněno autorem práce*
- Graf 6.6 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 16/20, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Graf 6.7 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 16/20 a C 20/25 vnitřního prostředí, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D. a doplněno autorem práce*
- Graf 6.8 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 16/20 a její redukce, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Graf 6.9 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 16/20 a redukce krajních hodnot, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Graf 6.10 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 16/20 redukce krajních hodnot a vnějšího prostředí do května 2020, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D. a doplněno autorem práce*
- Graf 6.11 – zobrazení hloubky karbonatice betonů C 12/15 až C25/30, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D. a doplněno autorem práce*
- Graf 6.12 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 20/25, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Graf 6.13 – Redukovaný rozsah betonu C 20/25, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Graf 6.14 – zobrazení hloubky karbonatice betonu C 25/30, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Graf 6.15 – Redukovaný rozsah betonu C 25/30, převzato od Ing.Lud'ka Vejvary,Ph.D.*
- Tab.7.1 – průměrná hloubka karbonatice v mm*
- Tab.7.2.1 – koeficient karbonatice*
- Tab.7.2.2 – koeficient karbonatice, přepočít v sekundách*
- Tab.7.3.1. hloubky karbonatice vnitřních prostorů v mm*
- Tab. 7.3.2 – Odolnost betonu proti karbonatice*
- Graf. 7.3.1 – Stanovení hloubky karbonatice v čase t, v závislosti na odolnosti betonu proti karbonatice a vlhkosti okolního prostředí*
- Tab. 7.3.3 – Vypočtena hloubka karbonatice podle Kloknerova ústavu.*
- Graf. 7.3.2 – Stanovení hloubky karbonatice v čase t, v závislosti na odolnosti betonu proti karbonatice a vlhkosti okolního prostředí podle Kloknerova ústavu pro beton C16/20*
- Graf. 7.3.3 – Stanovení hloubky karbonatice v čase t, v závislosti na odolnosti betonu proti karbonatice a vlhkosti okolního prostředí podle Kloknerova ústavu pro beton C25/30*

Příloha č. 1



Technologická agentura
České republiky



Optimalizace bezpečnosti a životnosti existujících mostů

Stanovení hloubky karbonatace v čase t

1. Zadání

Předložený výpočetní produkt je aplikací teoretických postupů popsané v navrhované certifikované metodice.

Karbonatace je chemický proces, jehož důsledkem je koroze výztuže v betonu. Při tomto procesu dochází k reakci složek v betonu s CO_2 obsaženým ve vzduchu. Důsledek tohoto jevu je snižování PH „ochranné“ vrstvy výztuže, až dojde k její neutralizaci ($\text{PH} < 9$), tj. k depasivaci, a může nastat koroze. Pro stanovení hloubky karbonatace d_c v čase t je nutné znát relativní vlhkost vzduchu v místě konstrukce RH_{real} , dobu ošetřování betonu t_0 , typ použitého cementu, ekvivalentní vodní součinitel w/c_{eqv} , pravděpodobnost rozdělení směru větru za deště p_{SR} a počet dní v roce, kdy je úhrn srážek vyšší než 2.5 mm.

Pozn.: Výsledky jsou značeny oranžově a modře jsou hodnoty, které lze měnit.

2. Analýza

Hodnocení trvanlivosti je založeno na porovnání krycí vrstvy výztuže c a hloubky karbonatace $d_c(t)$. Tento vztah vyjadřuje rovnice mezního stavu pro depasivaci výztuže:

$$c_{\text{min}} - d_c(t) \geq 0 \quad (1)$$

3. Hloubka karbonatace

Hloubka karbonatace $d_c(t)$ se stanoví ze vztahu:

$$d_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c^2 \cdot [\gamma_R \cdot (k_t R_{\text{ACC},0}^{-1} + \varepsilon_t)] \cdot C_{\text{CO}_2,\text{S}} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (2)$$

Hloubka karbonatace $d_c(t)$ je závislá na funkci vlhkosti prostředí k_e , ošetřování betonu k_c , odolnosti betonu proti karbonataci $R_{\text{ACC},0}^{-1}$, odchylce odolnosti ε_t , koncentraci CO_2 v okolním prostředí $C_{\text{CO}_2,\text{S}}$, čase t a lokálním klimatickým podmínkám $W(t)$. γ_R je dílčí součinitel pro odolnost betonu.

3.1. Koeficient vlhkosti prostředí k_{ed}

Koeficient vlhkosti prostředí značí poměr mezi relativní vlhkostí vzduchu v místě konstrukce RH_{real} (lze zjistit z údajů nejbližší meteorologické stanice) a referenční relativní vlhkostí RH_{ref} (laboratorně zjištěná hodnota 65 % při teplotě 20 °C).

$$k_{ed} = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100 \cdot \gamma_{RH}} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad k_{ed} = 0.942 \quad (3)$$

Koeficienty f_e a g_e jsou empiricky získané konstanty a γ_{RH} je dílčí součinitel pro relativní vlhkost

$$RH_{real} = 60 \%$$

$$RH_{ref} = 65 \%$$

$$g_e = 2.5$$

$$g_{RH} = 1.3$$

$$f_e = 5$$

3.2. Koeficient ošetřování betonu k_c

Koeficient ošetřování betonu k_c vyjadřuje vliv délky ošetřování povrchu konstrukce t_0 před vystavením účinkům okolního prostředí. Dále je závislý na regresním koeficientu (náhodné veličině) b_c , který je ve výpočtu uvážen průměrnou hodnotou.

$$k_c = \left(\frac{t_0}{7} \right)^{b_c} \quad k_c = 3.014 \quad (4)$$

$$t_0 = 1 \text{ den}$$

$$b_c = -0.567$$

3.3. Dílčí součinitel pro odolnost betonu g_R

$$g_R = 1.5$$

3.4. Regresní parametr k_t

$$k_t = 1.25$$

3.5. Odolnost betonu proti karbonataci $R_{ACC,0}^{-1}$

V laboratorních podmínkách ($T_{ref} = 20 \text{ °C}$, $RH_{ref} = 65 \%$) byly pro jednotlivé druhy cementů a různé vodní součinitele stanoveny hodnoty odolnosti betonu proti karbonataci $R_{ACC,0}^{-1}$ [(mm²/rok)/(kg/m³)], které jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1. Odolnost betonu proti karbonataci $R_{ACC,0}^{-1}$ [(mm²/rok)/(kg/m³)]

Druh cementu	Průměrné hodnoty $R_{ACC,0}^{-1}$ v (mm ² /rok) / (kg/m ³)					
	w/c_{eqv}^1					
	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
CEM I 42,5 R	– ²	978	1640	2145	3091	4226
CEM I 42,5 R + FA ($k = 0,5$)	– ²	95	599	757	2050	2618
CEM I 42,5 R + SF ($k = 2,0$)	1104	1735	– ²	– ²	5203	– ²
CEM III/B 42,5	– ²	2618	5330	8389	13970	25229

¹ Ekvivalentní vodní součinitel s uvažováním vlivu popílku (FA) a křemičitého prachu součiniteli k . Uvažované objemy: FA – 22 % váhy cementu, SF – 5 % váhy cementu.

² data nejsou k dispozici.

Pozn.: pro další výpočet je nutné zvolit správnou hodnotu z tabulky 1. $R_{ACC,0}^{-1} = 4226$

3.6. Možná odchylka od laboratorních hodnot e_t

$$e_t = 315.5 \text{ (mm}^2\text{/rok)/(kg/m}^3\text{)}$$

3.7. Koncentrace CO₂ v okolním prostředí $C_{CO_2,S}$

$$C_{CO_2,S} = 0.00082 \text{ kg/m}^3$$

3.8. Čas t

Čas mezi počátkem provozu konstrukce ($t = 0$) a požadovanou dobou, pro kterou je nutné zjistit karbonataci.

Pozn.: čas se zadává v rocích.

$$t = 30 \text{ roků}$$

3.9. Parametr popisující lokální klimatické podmínky $W(t)$

Parametr $W(t)$ je závislý na poměru referenčního času t_1 a času t , pro který se zjišťuje hloubka karbonatace. Dále závisí na pravděpodobnosti rozdělení směru větru za deště p_{SR} , deštivých dnech ToW a exponentu regrese b_w .

$$W(t) = \left(\frac{t_1}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} \quad W(t) = 0.746 \quad (5)$$

3.9.1. Referenční čas - konstanta.

$$t_1 = 0.0767 \text{ roku} = 28 \text{ dnů}$$

3.9.2. Čas t , pro který se zjišťuje hloubka karbonatace (stejný jako v bodě 2.8).

$$t = 30 \text{ roků}$$

3.9.3. V případě, že se konstrukce nachází v interiéru (nepřijde do kontaktu s vodou) je pravděpodobnost rozdělení směru větru za deště $p_{SR} = 0$ a pro vododorovné konstrukce v exteriéru je $p_{SR} = 1$. Pro všechny ostatní případy se musí p_{SR} zjistit z dat nejbližší meteorologické stanice.

$$p_{SR} = 0.1$$

3.9.4. ToW - počet dní za rok, kdy přesáhnou denní srážky 2.5 mm.

$$ToW = \frac{\text{počet dní se srážkami } h_{Nd} \geq 2.5 \text{ mm za rok}}{365} \quad (6)$$

$$\text{počet dní s } h_{Nd} \geq 2.5 \text{ mm} = 20 \text{ dní} \quad ToW = 0.055 \text{ roku}$$

3.9.5. Exponent regrese b_w je náhodná veličina s normálním rozdělením, průměrem 0.446 a směrodatnou odchylkou 0.163. Pro zjednodušení výpočtu bude nadále uvažován pouze její průměr 0.446.

$$b_{w,d} = 0.446$$

3.10. Hloubka karbonatace $d_c(t)$

Již by měly být navrženy všechny potřebné parametry a podle vzorce (2) je hloubka = 25.6 mm.

4. Depasivace

K depasivaci dojde, nebude-li splněna podmínka z rovnice (1), kde c_{min} závisí na navržené tloušťce krytí c_{nom} a možné odchylce tloušťky krytí Dc_{dev} .

$$c_{min} = c_{nom} - \Delta c_{dev} \quad (7)$$

$$c_{nom} = 40 \text{ mm} \quad Dc_{dev} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{min} = 30 \text{ mm}$$

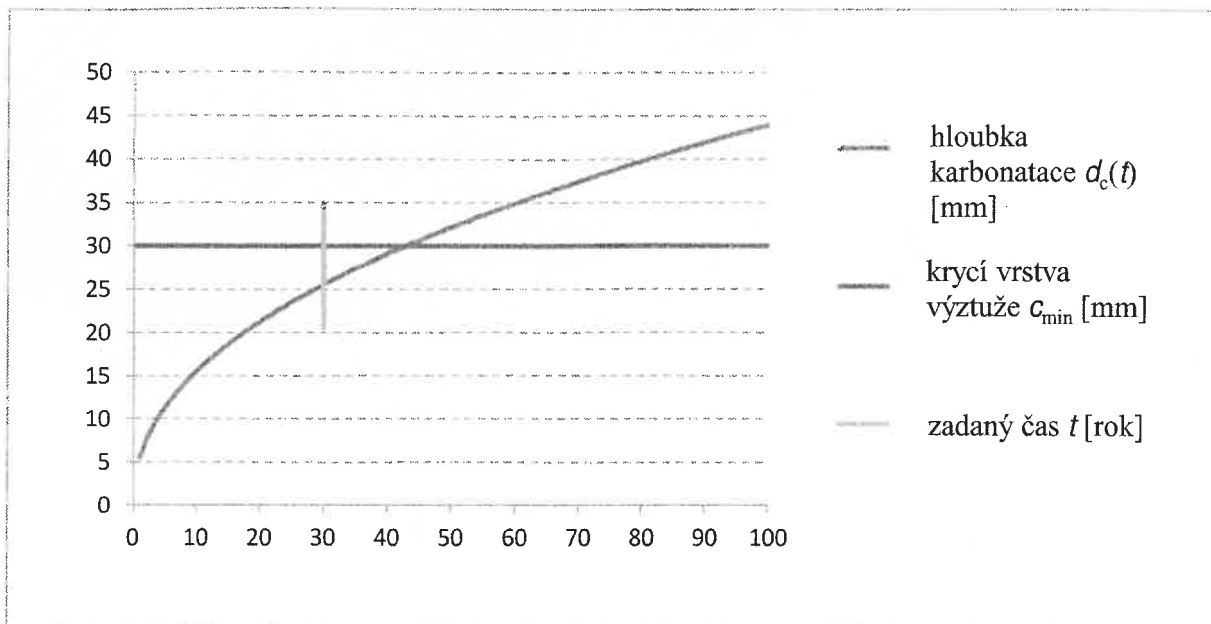
4.1. Mezní stav depasivace

$$c_{min} - d_c(t) \geq 0 \quad (8)$$

$$c_{min} = 30 \text{ mm} \quad d_c(t) = 25.56 \text{ mm.}$$

$$c_{min} - d_c(t) = 4.4 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Graf 1. Závislost hloubky karbonatace $d_c(t)$ a tloušťky krytí c_{min} na čase t



5. Závěr

$t =$ 30 roků vychází hloubka karbonatace $d_c(t)$ 25.6 mm. Pro tloušťku krycí vrstvy betonu c_{min} 30 mm

VYHOVUJE