Projekt „Analýza a prezentace hodnot moderní architektury 60. a 70. let 20. století jako součásti národní a kulturní identity ČR“, DG16P02R007, je financován Ministerstvem kultury v rámci Programu aplikovaného výzkumu a vývoje.

Památkový postup

Stanovení materiálových charakteristik betonu ŽB konstrukcí na vzorcích odebraných z konstrukce

Brno 2020

Autoři: prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
doc. Ing Jiří Bydžovský, CSc.
Ing. Ondřej Anton, Ph.D.
Ing. Ámos Dufka, Ph.D.

Oponenti: doc. Ing. et Ing. František Kuda, CSc., FAST, VŠB-TU Ostrava
doc. Ing. Jaroslav Solař, Ph.D., FAST, VŠB-TU Ostrava

Památkový postup vznikl na základě výzkumu provedeného v rámci řešení projektu „Analýza a prezentace hodnot moderní architektury 60. a 70. let 20. století jako součásti národní a kulturní identity ČR“, DG16P02R007, je financován Ministerstvem kultury v rámci Programu aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity České republiky v letech 2016-2020.

Obsah 2
1. Cíl památkového postupu 3
2. Popis materiálových charakteristik betonu v ŽB konstrukcích 3
3. Určení optimálního počtu vzorků při minimálním poškození konstrukce 4
3.1. Plán pro výběr vzorků 4
3.2. Minimální počty vzorků 5
4. Odběr vzorků betonu z konstrukce (místo, velikost, způsob) 6
5. Stanovení objemové hmotnosti 7
6. Fenolftaleinová zkouška na vývrtu – hloubka karbonatace 7
7. Stanovení pevnosti v tlaku 8
8. Stanovení modulu pružnosti betonu v konstrukci 10
8.1. Dynamický modul pružnosti z ultrazvukového měření 10
8.2. Dynamický modul pružnosti z rezonančního měření 10
8.3. Statický modul pružnosti v tlaku 10
8.4. Vzájemné vztahy mezi výsledky dynamických a statických modulů pružnosti 11
9. Vyhodnocení mechanických charakteristik betonu 11
9.1. Vyhodnocení pevnosti betonu v konstrukci dle ČSN ISO 13822 [3] a ČSN 73 0038 [4] 12
9.2. Vyhodnocení pevnosti betonu v konstrukci dle ČSN EN 13791 [19] 12
10. Stanovení poměru pojiva a kameniva 13
11. Stanovení granulometrie kameniva 14
12. Petrografický rozbor kameniva (písek 0/4 mm a štěrk >4 mm) 15
13. Chemické a fyzikálně chemické analýzy 15
14. Chemická analýza 16
15. Rentgenová difrakční analýza (XRD) 16
16. Diferenční termická analýza 17
17. Zonální stanovení pH 18
18. Analýza mikrostruktury elektronovým mikroskopem 18
19. Vyhodnocení korozního napadení betonu 19
20. Karbonatace betonu 19
21. Kontaminace betonu chloridy 21
22. Vyhodnocení materiálových charakteristik a korozního napadení betonu 21
23. Použitá literatura 22

1. Cíl památkového postupu

Památkový postup se týká stanovení materiálových charakteristik betonu ŽB konstrukcí na vzorcích odebraných z konstrukce. Cílem památkového postupu je vytvoření metodického postupu pro odběr vzorků a pro následné zjištění požadovaných vlastností u historicky hodnotných železobetonových konstrukcí a uměleckých objektů, které budou charakterizovat vlastnosti betonu dané konstrukce na co možná nejnižším poštu odebraných vzorků. Počet vzorků, na nichž budou prováděny charakterizující zkoušky, musí splňovat požadavky na spolehlivost výsledků.
Předložený památkový postup obsahuje způsoby stanovení mechanických vlastností, zejména pevnosti betonu v tlaku a modulu pružnosti v tahu. Další uváděné metody jsou zaměřeny na stanovení materiálových charakteristik betonu a jeho kondici v souvislosti s možnými degradačními procesy, probíhajícími v průběhu životního cyklu betonu.

Materiálové charakteristiky zahrnují stanovení poměru pojiva ke kamenivu, granulometrie kameniva a petrografického složení kameniva. Degradace betonu je sledována stanovením pH betonu v profilu, chemickou, termickou a rentgenovou difrakční analýzou; tyto analýzy identifikují korozní poškození betonu a přítomnost látek vzniklých při korozních procesech.

Památkový postup respektuje historickou hodnotu materiálu betonových objektů, což je reflektováno v minimálním poškození betonu sledovaných objektů při způsobu odběru a počtu vzorků a získání optimálního obrazu o stavu betonu. Postup bude sloužit jako podklad pro návrh obnovy betonu betonových nebo železobetonových konstrukcí a objektů, jako jsou např. umělecká díla.

2. Popis materiálových charakteristik betonu v ŽB konstrukcích

V naprosté většině případů beton, resp. železobeton plní ve stavebních konstrukcích funkci konstrukčního materiálu, tedy materiálu, který je nosný a zajišťuje únosnost a stabilitu konstrukce. Z uvedeného vyplývá, že nároky na beton souvisí především s jeho mechanickými vlastnostmi, mezi které patří především:

- pevnost betonu v tlaku
- modul pružnosti
- pevnost betonu v tahu ohybem.

Podstatné jsou rovněž další parametry betonu, a to zejména:

- Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu (zpravidla se stanovuje „in situ“). Tento parametr má podstatný význam například při volbě technologie následné sanace, kdy jedním z klíčových parametrů je, zda bude možno opravný beton nanášet na adekvátně únosný podklad. Toto je z hlediska kvality a životnosti prováděné sanace zásadní.
- Vodotěsnost betonu – je podstatná u konstrukcí, které jsou vystaveny působení spodních vod, nebo se jedná o vodní stavby, tedy konstrukce vystavené vodě působící hydrostatickým tlakem na betonovou konstrukci.

Mechanické vlastnosti betonu jsou determinovány jeho složením a zpracováním. V tomto kontextu dominantní roli sehrává především dávka a druh použitého cementu, kvalita použitého kameniva (mechanické vlastnosti, granulometrie, míra eventuálního znečištění cizorodými částicemi apod.), podstatná je rovněž dávka záměsové vody a způsob ukládání betonu, a to především kvalita jeho hutnění.

Vlastnosti betonu jsou v průběhu životního cyklu stavby ovlivňovány, resp. zhoršovány působením vnějšího prostředí. Jedná se jednak o působení fyzikálních principů (především

synergické působení vlhkosti a mrazu u konstrukcí v exteriéru), ale též vlivů fyzikálně chemických, které zahrnují zejména působení chemicky agresivních látek pocházejících z vnějšího prostředí a podzemní vody (chloridy, sírany, dusičnany, apod.) a vlivů biologických. Vzhledem k zásaditému charakteru cementové matrice jsou vůči betonu agresívní zejména látky kyselinotvorné, a to plynné (především oxid uhličitý), nebo látky pocházející ze spodních vod (sírany, hořečnaté ionty apod.).

Z uvedeného je zřejmé, že pro relevantní hodnocení stavu a kvality betonu hodnocených konstrukcí je podstatné nejen vyšetření pevnostních parametrů, ale i mikrostrukturní analýzy. Této problematice je věnována pozornost v dalším textu.

3. Určení optimálního počtu vzorků při minimálním poškození konstrukce

Při stanovení materiálových charakteristik betonu je nutné provést zkoušky, které v zásadě dělíme na:

- nedestruktivní (neinvazivní) – bez odběru vzorků
- semidestruktivní (částečně invazivní) – s drobným zásahem do konstrukce nebo s odběrem malých vzorků
- destruktivní (invazivní) – s odběrem standardních vzorků.

Odběr standardních vzorků je vždy značným zásahem do konstrukce, který může mít značný vliv nejen na vzhled konstrukce, ale i na její statickou funkci. Proto je nutné předem zvážit, zda musíme vzorky vůbec odebrat, v jakém počtu, jaká bude jejich velikost (rozměry, hloubka) a v neposlední řadě určit lokalizaci odběrných míst s ohledem na statické působení konstrukce tak, abychom získali relevantní informace o vlastnostech betonu v rozhodujících průřezech a přitom neohrozili statickou funkci konstrukce. Zde má velký význam správný výběr vzorků. Podle toho jaké má vzorek vlastnosti, jak byl ze vzorkovaného celku získán, co reprezentuje, pro co je určen a zda obsahuje materiál v původním stavu či ne, pak rozeznáváme:

- reprezentativní vzorek, který je definován jako „taková část materiálu, kde podíly jednotlivých sledovaných složek materiálu a rozdělení hodnot sledovaného znaku (např. zrnění) odpovídají poměrům v posuzovaném celku nebo v posuzované části tohoto celku“,
- stranný vzorek je vzorek, který nesplňuje podmínky reprezentativního vzorku [1].

3.1. Plán pro výběr vzorků

Plán pro výběr vzorků by měl být připraven před zahájením vlastních odběrů vzorků a musí:

- definovat, pro jaký účel se vzorky odebírají
- specifikovat počet vzorků, jejich rozměry a hloubku
- definovat místa odběru vzorků.

Výběr míst pro odběr vzorků je nutno volit tak, aby byl objektivně zjištěn stav betonu ve zkoumaném prostoru a zároveň tak, aby nedošlo k porušení nosné výztuže, či k jinému podstatnému zeslabení konstrukce. Tato místa mají být přednostně vybírána tam, kde nejsou spáry a hrany konstrukce a v místech s minimem výztuže. Plánem pro odběr vzorků by měla být určena délka odebíraného vzorku s ohledem na:

- rozměry vzorku
- možný způsob úpravy pro zkoušení
- účel zkoušky (pevnost v tlaku, modul pružnosti, jiné)

- zda bude prováděno srovnání s válcovou nebo krychelnou pevností.

Doporučuje se brát tak dlouhé vývrty (je-li to prakticky možné), aby z jednoho vývrtu bylo možno vyrobit alespoň 2 zkušební tělesa.

3.2. Minimální počty vzorků

Při stanovení minimálního počtu vzorků se vždy vychází z řady faktorů, které musí zohlednit konkrétní situaci dané konstrukce. Obecně se vychází zejména:

- z velikosti dané konstrukce (čím větší konstrukce, tím více vzorků, ale ne přímo úměrně rostoucímu objemu nebo ploše),
- z technologie výroby a s ní související velikostí jedné záměsi (dávky) betonu – čím menší záměs, tím více vzorků je nutné odebrat,
- z členitosti konstrukce – podle množství typologicky odlišných železobetonových prvků (u opakujících se prvků a liniových staveb je zapotřebí méně vzorků),
- ze známých informací o konstrukci – pokud jsou např. známy výsledky předchozích průzkumů, lze odběr vzorků omezit na ověřovací minimum,
- z provozních a technických podmínek – v užívaných stavbách, také u památkově chráněných objektů je často odběr vzorků výrazně omezen,
- jsou-li zkoušky na vzorcích vyhodnocovány samostatně, anebo slouží-li jako doplňkové k nedestruktivnímu měření (pokud se provádí nedestruktivní zkoušky podle ČSN 73 2011 [2] s upřesněním na vývrtech, lze destruktivní zkoušky zásadním způsobem omezit).

Právě poslední faktor je poměrně zásadní – pokud se provádějí nedestruktivní zkoušky podle ČSN 73 2011 [2], pak zkoušky na vzorcích jsou brány pouze pro upřesnění nebo jako doplňkové. Počet zkušebních těles je odvozen od účelu zkoušek, velikosti konstrukce a případně rovnoměrnosti betonu. Na upřesnění nedestruktivních zkoušek (zhotovení porovnávacích těles) se musí odebrat nejméně **9 vzorků**. V případě, že je odběr vzorků pro upřesnění proveden až po vyhodnocení nedestruktivních zkoušek na místech **s nejmenší, průměrnou a největší pevností v tlaku**, připouští norma ČSN 73 2011 odběr **pouze 3 kusů vývrtů**. To platí pro jednu zkušební oblast, kde byl předtím zjištěn homogenní beton.

Pokud se beton posuzuje pouze na základě zkoušek na vývrtech (např. podle ČSN ISO 13822 [3] a ČSN 73 0038 [4], pak teoreticky je možné odebrat rovněž minimálně 3 vzorky betonu, což však může mít za následek značné zkreslení výsledné pevnosti v tlaku a výrazné snížení pevnostní třídy. Proto se v případě pouze zkoušek na vývrtech doporučuje odebrat **minimálně 9 vzorků** betonu z každé zkušební oblasti.

Pro relativně novější konstrukce lze využít i normu ČSN EN 13791 [19], která je v souladu s normami [3] a [4]. Zde je jednoznačně řečeno, že v případě posuzování pevnosti v tlaku pouze na vývrtech je pro každou zkušební oblast zapotřebí minimálně **8 vzorků** jádrových vývrtů, pokud se jedná o vývrty o průměru ≥ 75 mm. V případě jádrových vývrtů o průměru 50 mm, které jsou přípustné pouze u betonů s velikostí zrn kameniva do 16 mm, je zapotřebí počet jádrových vývrtů zvýšit na 12, anebo postačí 8 vývrtů, pokud se z každého vyrobí 3 zkušební tělesa (tedy 8 vývrtů – 24 zkušebních těles).

Pro malou zkušební oblast obsahující jeden až tři prvky a celkový objem nepřesahující přibližně 10 m^3 se odeberou nejméně **3 jádra** o průměru ≥75 mm včetně nejméně jednoho jádra z každého prvku ve zkušební oblasti.

Vzorky ocelové výztuže se odebírají jen výjimečně, a to z míst, kde je ocel málo staticky namáhaná a kde se dá doplnit. Z každého druhu oceli se odebere nejméně 1 vzorek výztuže. Vzorky předpínací výztuže se zásadně neodebírají [2].

4. Odběr vzorků betonu z konstrukce (místo, velikost, způsob)

Pro korektní posouzení stavu betonu je třeba vhodným způsobem zvolit místa, ve kterých budou prováděny zkoušky „in situ“, a rovněž místa, ve kterých budou odebírány vzorky pro stanovení, resp. analýzy, které budou následně prováděny v laboratoři.

Pro stanovení mechanických vlastností betonu je ve většině případů prováděn odběr pomocí tzv. jádrových vývrtů. Zásadními kritérii při volbě průměru jádrového vývrtu jsou především maximální frakce kameniva použitého v betonu a charakter konstrukčního prvku, ze kterého je vývrt odebírán. Průměr vývrtu by měl být alespoň trojnásobkem maximálního zrna kameniva v betonu, jinak to může mít značný vliv na výsledky zkoušek. Pro stanovení mechanických vlastností betonu jsou nejčastěji používána zkušební tělesa připravená z jádrových vývrtů o průměru 100 mm, event. 75 mm. Ve výjimečných případech, kdy se jedná o mimořádně subtilní železobetonové prvky, lze použít vývrty o průměru 50 mm, vývrty tohoto průměru se používají při hodnocení jemnozrnných betonů, u nichž maximální velikost zrn kameniva nepřesahuje 16 mm. Ve výjimečných případech jsou odebírány vývrty o průměru 150 mm (např. pro stanovení vodotěsnosti betonu).

Dále lze vzorky z hodnocené konstrukce odebírat například ve formě fragmentů vyříznutých z konstrukce úhlovou bruskou, eventuálně ve formě prášku vynášeného vidiovým vrtákem z definované hloubky od líce konstrukce.

Jednoznačně je nutno zdůraznit, že odběr zkušebních těles, resp. vzorků musí být prováděn tak, aby nebylo ohroženo statické působení hodnocené konstrukce.

Při volbě míst odběru zkušebních vzorků je nutno zohlednit konstrukční uspořádání hodnoceného objektu, resp. jeho dispozici a zejména pak s ohledem na podmínky, kterým je konstrukce vystavena (působení agresívních vlivů vnějšího prostředí apod.). V obecné rovině lze rozsah odběru vzorků vztáhnout na hodnocenou plochu konstrukce, či na její objem. Jeden z přístupů ve vztahu k míře degradace betonu, který lze aplikovat pro volbu četnosti odběru vzorků je uveden v tabulce 1.

Tab. 1 Doporučený rozsah odběru vzorků pro laboratorní stanovení [5]

Sledovaný parametr	Doporučená četnost odběru vzorků
Stav resp. míra degradace betonu	Při objemu betonu konstrukce do 10 m^3 obvykle alespoň 3 vzorky odebrané v různé hloubce konstrukce, pro větší objem se určí individuálně. Jedním z podstatných aspektů je komparace míry degradace vzorků odebraných z různých vzdáleností („hloubek“) od povrchu hodnocených konstrukcí.
Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu – provádí se „in situ“	Při ploše povrchu celé konstrukce do 50 m^2 3 zkoušky, za každých dalších i započatých 100 m^2 další 1 zkouška.
Stanovení vodotěsnosti, příp. dalších parametrů	Volí se individuálně s ohledem na charakter konstrukce a podmínky exploatace

Popsaný způsob vytipování míst odběru vzorků s minimální četností je zaměřen především na získání odpovídajících informací o mechanických vlastnostech betonu v konstrukci. Tyto údaje jsou důležitou informací pro statické posouzení konstrukce, spolehlivost a vyhovění mezním stavům konstrukce. Proto je níže věnována pozornost stanovení mechanických

vlastností betonu, tj. pevnosti v tlaku a modulu pružnosti. Navíc, modul pružnosti je důležitý parametr při návrhu opravného betonu.

Odebrané vzorky lze po mechanických zkouškách s výhodou použít na stanovení materiálových charakteristik betonu. Vyberou se vzorky, které při vizuální prohlídce nejlépe charakterizují stav betonu v daném místě konstrukce a jeho poškození. Odběr vzorků z míst, která jeví výrazné porušení, až rozpad betonu není nutný, protože ve většině případů bude tento porušený beton nahrazen betonem opravným.

5. Stanovení objemové hmotnosti

Pro stanovení objemové hmotnosti betonu jsou obvykle využita zkušební tělesa válcového tvaru odebraná pomocí jádrových vývrtů (většinou jde o tělesa odebíraná současně pro stanovení pevnosti betonu v tlaku.

Objemová hmotnost betonu se zjišťuje ve stavu vysušeném, nasyceném vodou nebo přirozeně vlhkém. Provádí se podle normy ČSN EN 12390-7 [6].

Objemová hmotnost se určí jako poměr hmotnosti daného množství ztvrdlého betonu k jeho objemu vyjádřený v kg/m^3. V případě pravidelných těles (válec) lze určit objem tělesa přímo výpočtem z jeho rozměrů. Objem vzorku se v případě nepravidelného tvaru (fragmenty betonu odsekané z konstrukce) určí hydrostatickým vážením.

Objemová hmotnost D v kg/m^3 dodaného vzorku se vypočte ze vztahu

$$D = \frac{m}{V} \tag{1}$$

kde D je objemová hmotnost betonu

m je hmotnost vzorku v kg

V je objem vzorku v m^3.

Dle objemové hmotnosti lze dle ČSN EN 206-1 [7] beton zařadit do kategorie:

- beton lehký s objemovou hmotností v rozmezí 800 – 2000 kg/m^3
- beton obyčejný s objemovou hmotností v rozmezí 2000 – 2600 kg/m^3
- beton těžký s objemovou hmotností od 2600 kg/m^3.

6. Fenolftaleinová zkouška na vývrtu – hloubka karbonatace

Zásaditost betonu je jedním z podstatných aspektů, který determinuje stav betonu, resp. míru jeho degradace působením agresivních vlivů z vnějšího prostředí. Zásaditost betonu je též podstatná z hlediska schopnosti jeho schopnosti pasivovat výztuž vůči korozi.

Jedním z prostředků, kterým lze orientačně stanovit zásaditost betonu, je aplikace acidobazického indikátoru fenolftalein, resp. jeho roztoku. Indikační roztok se připraví rozpuštěním 1 g fenolftaleinu v 70 ml etylalkoholu a zředěním destilovanou vodou do celkového objemu 100 ml [8].

Po odběru jádrového vývrtu je do řezné spáry i na vlastní jádrový vývrt aplikován roztok fenolftaleinu. Na základě změny barevného odstínu (přechod z bezbarvé na červenofialovou barvu) se pak pomocí měřítka určí hloubka karbonatace, která je určena jako část betonu bez barevné reakce indikátoru fenolftaleinu, s hodnotou pH betonu nižší než cca 9,6.

7. Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku se stanovuje na zkušebních tělesech, vytvořených z jádrových vývrtů odebraných z konstrukce. Zkušební tělesa se ze vzorků vrtných jader připravují řezáním na válce. Přednostní poměry délky vývrtu k průměru podle ČSN EN 12504-1 [9] jsou:

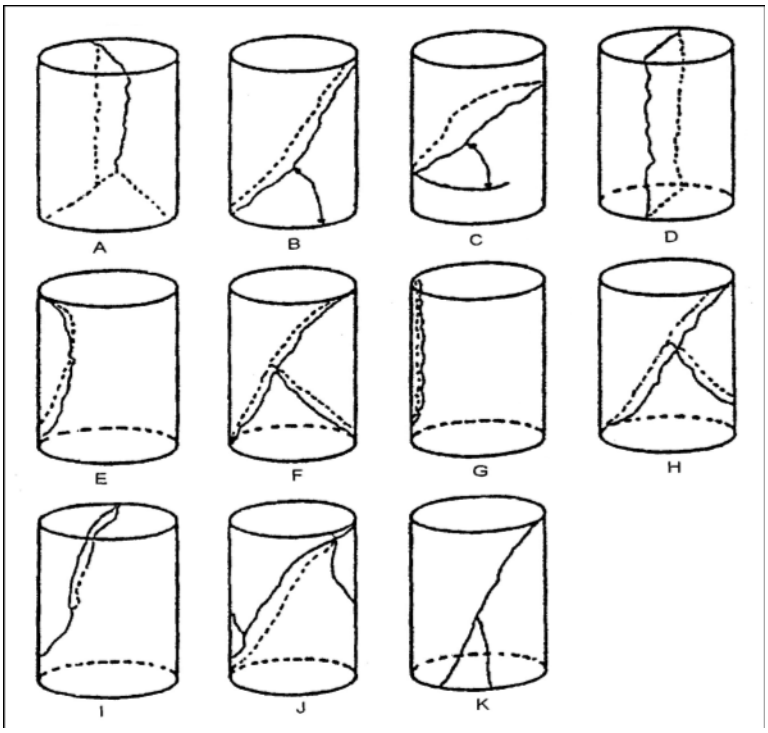
a) 2,0, jestliže se má pevnost porovnávat s válcovou pevností

b) 1,0, jestliže se má pevnost porovnávat s krychelnou pevností.

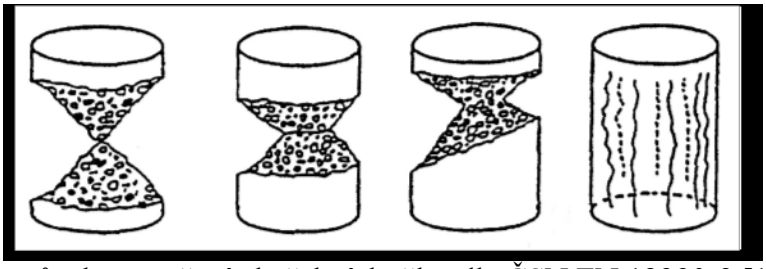
Zkoušení na tělesech s d ≠ 150 mm norma ČSN EN 12504-1 [9] řeší následovně: Výsledky na tělesech s průměrem d = 100 mm se nepřepočítávají, považují se za shodné s tělesy o průměru d = 150 mm. Pro zkoušení na tělesech o průměru menším než 100 mm by měly být provedeny kalibrace (pro každý typ betonu vlastní).

Zkušební tělesa se pečlivě zabrousí (nebo jinak zakoncují). Dále se stanoví pevnost v tlaku u každého zkušebního tělesa, a to dělením maximálního zatížení průřezovou plochou, vypočtenou ze středního průměru. Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa.

Při zkoušce je nezbytně nutné zkontrolovat plochy porušení zkušebních těles, viz obr. 1a 1b. Pokud porušení tělesa neodpovídá požadavkům dle ČSN 12390-3 [10], je třeba výsledek zkoušky vyřadit.



Obr. 1a Nevyhovující způsoby porušení zkušebních těles dle ČSN EN 12390-3 [10].



Obr. 1b Vyhovující způsoby porušení zkušebních těles dle ČSN EN 12390-3 [10].

Při diagnostice často narážíme na problém, že není možné odebrat vývrty základních normových rozměrů. Dosažená pevnost v tlaku musí pak být přepočítána např. podle zásad ČSN EN 12390-3 [10]. Pro přepočet pevností na válcovou (základní válec o průměru 150 mm a výšce 300 mm) použijeme součinitel štíhlosti $\kappa_{c,cyl}$ a součinitel příčného rozměru $\kappa_{c,cube}$. Pro přepočet válcové pevnosti na krychelnou opět použijeme součinitel $\kappa_{cyl,cube}$.

Pevnost betonu v tlaku na válcích $f_{c,cyl}$ v MPa se vypočítá ze vztahu

$$f_{c,cyl} = \kappa_{c,cub} \cdot \kappa_{c,cyl} \cdot \frac{F}{A_c} \tag{2}$$

kde F je nejvyšší dosažená síla při zkoušce v N

A je tlačná plocha zkušebního tělesa v mm^2

$\kappa_{c,cube}$ je opravný součinitel pro příčný rozměr tělesa různý od 150 mm. Lze ho získat buď experimentálně (min. 16 sad těles), anebo bereme jeho hodnotu $\kappa_{c,cube} = 0{,}95$ pro $d = 100$ mm, $\kappa_{c,cube} = 0{,}91$ pro d = 50 mm

$\kappa_{c,cyl}$ je opravný součinitel pro štíhlost válce $\lambda < 2{,}0$ (ale $\lambda \geq 1{,}0$), který platí pro pevnost $f_{c,cyl}$ v rozsahu od 16 do 60 MPa; určí se ze vtahu

$$\kappa_{c,cyl} = 0{,}80 + \sqrt{\frac{\lambda - 0{,}933}{26{,}667}} \tag{3}$$

Krychelná pevnost betonu $f_{c,cube}$ v MPa se určí ze vztahu

$$f_{c,cube} = \kappa_{cyl,cube} \cdot f_{c,cyl} \tag{4}$$

kde $\kappa_{cyl,cube}$ je součinitel pro přepočet válcové pevnosti na krychelnou, závislý na hodnotě válcové pevnosti v tlaku, tab. 2.

Tab. 2 Převodní součinitel při převodu pevnosti betonu zjištěné na válcích základních rozměrů na pevnost krychelnou [10]

$f_{c,cyl}$ (MPa)	8	12	16	20	25	30	35	40
$k_{cyl,cube}$	1,252	1,252	1,252	1,251	1,249	1,246	1,242	1,236
$f_{c,cyl}$ (MPa)	45	50	55	60	70	80	90	100
$k_{cyl,cube}$	1,230	1,223	1,215	1,206	1,195	1,184	1,172	1,159

8. Stanovení modulu pružnosti betonu v konstrukci

Modul pružnosti betonu je materiálová charakteristika, která je důležitá při výpočtech v rámci 2. mezního stavu (použitelnosti), tedy např. při stanovení průhybů, pootočení, apod. Zjištění hodnot modulu pružnosti není vždy nutné, je požadováno pouze u konstrukcí, u nichž

velikost deformací může mít zásadní vliv na funkční použitelnost konstrukce, např. u vodorovných stropních či střešních konstrukcí s větším rozpětím.

Pro stanovení modulu pružnosti betonu existuje celá řada metod, z nichž celkem čtyři jsou podrobně popsány v platných českých normách. Jedná se o dvě metody dynamické (ultrazvukovou a rezonanční) a dvě metody statické – stanovení modulu pružnosti ze zatěžování tlakem a ze zkoušky ohybem. Obě nedestruktivní dynamické metody jsou využitelné při laboratorních zkouškách na vzorcích betonu, statický modul je téměř výhradně stanoven statickou zkouškou v tlaku.

8.1. Dynamický modul pružnosti z ultrazvukového měření

Pro zjištění dynamického modulu pružnosti se používá ultrazvuková impulsová průchodová metoda. Metoda popsaná v ČSN 73 1371 [11] je založena na opakovaném vysílání UZ impulsů do zkoušeného materiálu a zjištění doby průchodu UZ impulsu.

Stanovení dynamického modulu pružnosti z ultrazvukového měření je poměrně snadné, neboť stačí zjistit objemovou hmotnost betonu a změřit dobu průchodu ultrazvuku po známé dráze. Metoda je použitelná na libovolném betonovém zkušebním tělese s délkou od 100 mm a lze měřit i přímo na konstrukci.

8.2. Dynamický modul pružnosti z rezonančního měření

Každý předmět z tuhého materiálu se po mechanickém impulsu rozkmitá. Pokud známe tvar, rozměry a objemovou hmotnost tělesa, stačí pro výpočet modulu pružnosti podle ČSN 73 1372 [12] změřit vlastní (rezonanční) frekvence podélného nebo příčného kmitání. Základní rezonanční frekvence se určují pomocí dvou metod závislých na kmitání zkušebního tělesa, které jsou založeny na:

- nepřerušovaném (spojitém) kmitání
- přerušovaném (impulsním) kmitání.

Díky novým přístrojům založeným na snímání impulsního kmitání se rezonanční metoda stala výrazně jednodušší a objevila se v evropských normách pro zkoušení betonu a kamene.

8.3. Statický modul pružnosti v tlaku

Statický modul pružnosti v tlaku se podle normy ČSN EN 12390-13 [13] zjišťuje z deformací, které nastávají při známém zatížení. Úroveň horního napětí se volí jako 1/3 pevnosti v tlaku srovnávacích těles, dolní napětí je 0,5 MPa. Zkušebními tělesy mohou být hranoly nebo válce se štíhlostí L/d v rozmezí 2 až 4. V případě zkoušek na tělesech vyrobených z jádrových vývrtů jsou přípustné průměry těles stejné jako v případě zkoušky pevnost i v tlaku, tedy v rozmezí od 50 mm do 150 mm, převážně však 75 mm nebo 100 mm. Štíhlostní poměr je stejný jako pro stanovení válcové pevnosti v tlaku, tedy délka tělesa $l = 2d$ (dvojnásobek průměru).

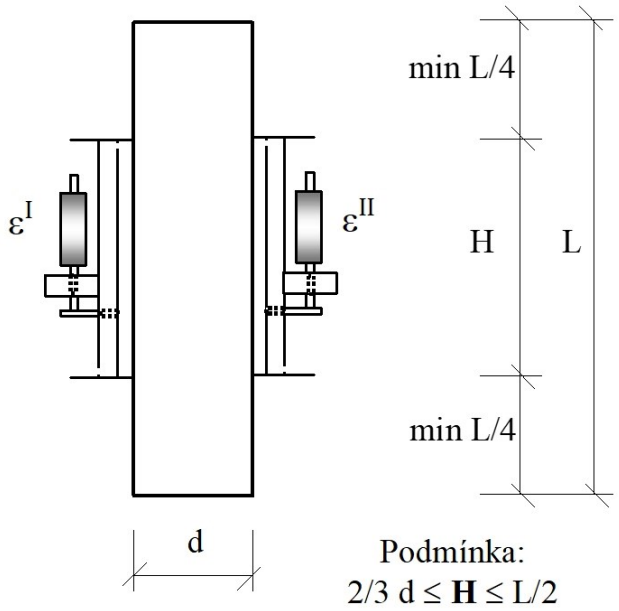
Statický modul pružnosti v tlaku E_c v MPa se vypočte ze vztahu

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\Delta\varepsilon} \qquad (5)$$

kde σ_a je horní zatěžovací napětí v MPa

σ_b je základní zatěžovací napětí v MPa

$\Delta\varepsilon$ je průměrná změna poměrného přetvoření mezi zatěžovacími napětími.



Obr. 2 Uspořádání zkoušky pro stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku.

8.4. Vzájemné vztahy mezi výsledky dynamických a statických modulů pružnosti

Hodnoty statických modulů pružnosti vycházejí vždy nižší než hodnoty modulů dynamických. Při znalosti vzájemného poměru mezi hodnotami dynamických a statických modulů pružnosti bychom v daleko větší míře mohli využívat právě nedestruktivních dynamických metod. Zmenšovací součinitele lze získat porovnáním hodnot statického a dynamického modulu, anebo lze použít hodnoty z normy ČSN 73 2011 [2], viz tab. 3.

Tab. 3 Hodnoty zmenšovacích součinitelů pro přepočet dynamických modulů ultrazvukových (x_u) a rezonančních (x_r) na moduly statické podle ČSN 73 2011 [2].

Zmenšovací součinitel	Pevnostní třída betonu							
	C 8/10	C 12/15	C 16/20	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55
x_u	0,62	0,71	0,76	0,81	0,83	0,86	0,88	0,90
x_r	0,81	0,86	0,88	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95

Je však zapotřebí si uvědomit, že uvedená tabulka byla zpracována před více než 30 lety pro betony vyráběné odlišným způsobem. Skutečné hodnoty zmenšovacích součinitelů mohou vycházet nižší, ovšem není problém je pro konkrétní beton stanovit [14].

9. Vyhodnocení mechanických charakteristik betonu

Charakteristickou pevnost betonu v konstrukci ze zkoušek na vývrtech lze v současné době stanovit podle ČSN ISO 13822 [3] a ČSN 73 0038 [4], kde je uveden obecný postup po všechny druhy materiálů, anebo podle ČSN EN 13791 [19], která je určena výhradně pro betonové konstrukce.

9.1. Vyhodnocení pevnosti betonu v konstrukci dle ČSN ISO 13822 [3] a ČSN 73 0038 [4]

Normy [3] a [4] doporučují provést pro „známé“ betonové konstrukce nejméně 3 až 6 zkoušek. Pokud o sledované konstrukci nemáme spolehlivé informace (např. při průzkumu staré konstrukce), je konstrukce brána jako neznámá, počet vzorků by měl být výrazně vyšší.

Z výsledků n zkoušek x_1, x_2, …, x_n materiálové vlastnosti **X** (pevnost v tlaku jednotlivých zkušebních těles) se stanoví průměr m_x, směrodatná odchylka s_x, a variační součinitel V_x, podle vztahů

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} \tag{6}$$

$$s_x^2 = \frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1} \tag{7}$$

$$V_x = \frac{s_x}{m_x} \tag{8}$$

Za předpokladu normálního rozdělení materiálové vlastnosti X se pak charakteristická hodnota X_k (dolní 5% kvantil) stanoví ze vztahu:

$$X_k = m_x(1 - k_n V_x) = m_x - m_x k_n V_x = m_x - m_x k_n \frac{s_x}{m_x} = m_x - k_n s_x \tag{9}$$

kde k_n je součinitel pro stanovení 5% kvantilu, který je uveden v tab 4.

Tab. 4 Součinitele $k_{n,x}$ pro stanovení 5% kvantilu (charakteristické hodnoty) [4].

Počet n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
$k_{n,x}$ pro V_x neznámý	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Variační součinitel V_x lze považovat za známý, jestliže to ukazují dlouhodobé zkušenosti získané za stejných podmínek. Přestože tab. 4 naznačuje v tomto případě možnost využití jedné zkoušky, doporučuje se provést minimálně 3 až 6 zkoušek. V případě diagnostiky neznámé konstrukce nelze nižší počet zkoušek než 6 vůbec doporučit, spíše je vhodné počet zvýšit.

9.2. Vyhodnocení pevnosti betonu v konstrukci dle ČSN EN 13791 [19]

Norma ČSN EN 13791 [19] je zaměřena přímo na stanovení pevnosti betonu v konstrukci. Nové vydání této normy je založeno na teorii malých oblastí, které lze popsat jednou pevnostní třídou betonu. K stanovení charakteristické pevnosti betonu v tlaku v konstrukci by se s ohledem na zabezpečení potřebné spolehlivosti mělo vyzkoušet co největší množství vývrtů, přičemž minimální počet z jedné zkušební oblasti je 8 vývrtů.

Charakteristická pevnost v tlaku in situ $f_{ck,is}$ se odhadne jako menší hodnota z

$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n s \tag{10}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M \tag{11}$$

kde

$f_{ck,is}$ je charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci (válcová), v MPa

$f_{c,m(n),is}$ je průměrná pevnost betonu v tlaku stanovená na n počtu vývrtů (válcová), v MPa

$f_{c,is,lowest}$ je nejmenší pevnost zjištěná na vývrtech (válcová), v MPa

s je směrodatná odchylka pevností vývrtů nebo hodnota směrodatné odchylky odpovídající variačnímu koeficientu 8 % (bere se vyšší z obou hodnot);
k_n je součinitel závislý na počtu vývrtů n (totožný s hodnotami v tab. 4)
M je hodnota založená na hodnotě $f_{c,is,lowest}$ (tab. 5), v MPa

Pro malou zkušební oblast obsahující jeden až tři prvky a celkový objem nepřesahující přibližně 10 m^3 se odeberou nejméně **3 jádra** o průměru ≥75 mm včetně nejméně jednoho jádra z každého prvku ve zkušební oblasti a vypočte se pevnost v tlaku in situ ($f_{c,is}$). Pokud rozmístění jader reprezentuje beton oblasti, pak se vezme nejnižší hodnota z minimálně 3 jader (za předpokladu, že rozdíl výsledků zkoušek nepřesahuje 15 % střední hodnoty) jako pevnost v tlaku $f_{ck,is}$ pro účely posouzení konstrukce. Platí tedy vztah:

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} \quad (12)$$

Pokud je však rozpětí výsledků větší než 15 % od střední hodnoty, znamená to, že je třeba získat více informací o testované oblasti (v podstatě zvýšit počet zkoušek).

Tab. 5 Hodnota součinitele *M [19]*

Hodnota $f_{c,is,lowest}$ (MPa)	M (MPa)
≥ 20	4
≥ 16 < 20	3
≥ 12 < 16	2
< 12	1

ČSN EN 13791 [19] požaduje pro splnění požadavku na projektovanou pevnost betonu dosažení v konstrukci pouze 85 % charakteristické pevnosti na normových tělesech ($f_{ck,spec}$).

$$f_{ck,is} \geq 0{,}85 \cdot f_{ck,spec} \quad (13)$$

Kde $f_{ck,spec}$, je hodnota válcové charakteristické pevnosti v tlaku podle normy ČSN EN 206 [7], například pro pevnostní třídu C 30/37 je $f_{ck,spec}$ = 30 MPa. Ostatní hodnoty jsou uvedeny v ČSN EN 206 [7].

Poznámka: Pevnost v tlaku in situ může být vyjádřena i jako $f_{c,is,core1:1}$ (krychelná), pokud ke zkoušení došlo na válcích s poměrem výšky k průměru 1:1. Poté se za hodnotu $f_{ck,spec}$ uvažuje hodnota charakteristické krychelné pevnosti podle ČSN EN 206 [7], např. pro pevnostní třídu C 30/37 je $f_{ck,spec}$ = 37 MPa.

10. Stanovení poměru pojiva a kameniva

Stanovení poměru kameniva a pojiva lze spolehlivě provést v případě, že kamenivo je v kyselině nerozpustné. Je-li v některých případech kamenivo převážně na bázi vápence či dolomitu, pak tento poměr nelze stanovit chemicky, ale je nutno použít jinou metodu, např. analýzu obrazu.

Ve většině případů se do betonu používají druhy kameniva, které jsou v kyselině nerozpustné, nebo mají jen zanedbatelný obsah rozpustného podílu. Přesto je ale vhodnější uvádět vztah mezi obsahem kameniva a pojiva (cementu, resp. cementu s příměsmi) jako poměr rozpustného a nerozpustného podílu v kyselině chlorovodíkové.

Beton o hmotnosti cca 3 až 5 kg se roztluče kladivem na částice o velikosti cca 2 cm a křížovým dělením se oddělí cca 1100 g betonu. Pokud má být kamenivo použito pro granulometrickou analýzu, je nutno rozmělnění betonu provádět opatrně, aby nedošlo k porušení zrn kameniva. Stanovení nerozpustného podílu se provádí tak, že navážka betonu o hmotnosti cca 1000 g navážená s přesností na 0,1 g se opatrně rozmělní na kusy cca 25 mm tak, aby nedošlo k poškození zrn kameniva (kamenivo se použije pro stanovení jeho granulometrie) a vloží se do nádoby, kde se přelije roztokem kyseliny chlorovodíkové, zředěné vodou v poměru 1 : 3. Obsahem se občas zamíchá. Po rozpuštění veškerého pojiva se roztok dekantuje, následně se kamenivo přemístí do nálevky s filtrem a promývá se destilovanou vodou do vymizení reakce na chloridy.

Kamenivo z filtru se vloží do skleněné nádoby, filtr se opláchne a přidá se 100 ml 5% roztoku uhličitanu sodného a 5 minut se povaří. Vyloučená kyselina křemičitá z pojiva se rozpustí. Kamenivo se zfiltruje a promyje vodou. Po vysušení do konstantní hmotnosti při teplotě 105 °C se kamenivo zváží a vypočítá se nerozpustný podíl v betonu v procentech.

$$w_{n.p.} = \frac{m_{n.p.}}{m_b} \cdot 100 \tag{14}$$

kde $w_{\text{n.p.}}$ je nerozpustný podíl v procentech, $m_{\text{n.p.}}$ je nerozpustný podíl v gramech a m_{b} je navážka vzorku v gramech. Obsah rozpustného podílu v kyselině chlorovodíkové $w_{\text{r.p.}}$ se vypočítá ze vztahu

$$w_{r.p.} = \frac{m_b - m_{n.p.}}{m_b} \cdot 100 \tag{15}$$

kde $w_{\text{r.p. je}}$ rozpustný podíl v kyselině chlorovodíkové v procentech.

Za předpokladu, že je kamenivo nerozpustné v kyselině chlorovodíkové, lze poměr nerozpustného a rozpustného podílu v betonu považovat za poměr kameniva k pojivu (hydratovaný cement).

$$\frac{kamenivo}{pojivo} = \frac{w_{n.p.}}{w_{r.p.}} \tag{16}$$

Pro výpočet poměru cementu ke kamenivu v původní směsi pro výrobu betonu je nutné stanovit ztrátu žíháním betonu. Stanovení se provádí tak, že navážka 100 g vzorku, získaného křížovým dělením (viz výše), se vysuší do konstantní hmotnosti a pomele se na velikost zrn pod 0,125 mm. Z takto upraveného vzorku betonu se naváží 2 g do předem vyžíhaného a zváženého platinového kelímku, a v elektrické peci se žíhá 1 h při 1 000 °C. Po ochlazení na laboratorní teplotu v exsikátoru se vzorek zváží a vyjádří se ztráta žíháním v procentech.

Obsah cementu ve směsi pro výrobu betonu lze vypočítat odečtením ztráty žíháním od rozpustného podílu: $w_{\text{r.p.}} - ztr.\check{z}.$

Předpokládá se, že kamenné součásti mají cca 3 % přirozené vlhkosti, pak celkové množství kamenných součástí se zvýší o 3 %: $w_{\text{n.p.}}+3$. Z uvedeného vyplývá, že poměr míšení směsi pro výrobu betonu v hmotnostních dílech kameniva k cementu je

$$\frac{kamenivo}{cement} = \frac{w_{n.p.} + 3}{w_{r.p.} - ztr.\check{z}.} \tag{17}$$

Objemové díly se vypočítají z hmotnosti kameniva a cementu dělené jejich sypnými hmotnostmi [20].

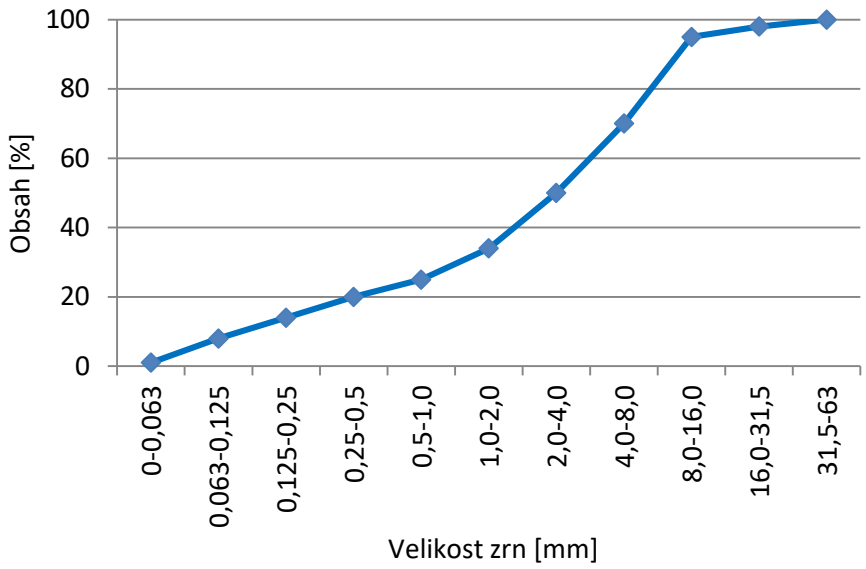
11. Stanovení granulometrie kameniva

Granulometrie kameniva se provádí podle ČSN EN 933-1 [15] na obnažených zrnech, získaných rozpuštěním pojiva ve zředěné kyselině chlorovodíkové. S výhodou lze použít kamenivo získané při stanovení poměru nerozpustného a rozpustného podílu v kyselině chlorovodíkové, viz kapitola 9.

Vysušené kamenivo se dělí na sadě sít. Nejprve se oddělí jemné podíly kameniva do 4 mm, které odpovídají granulometrii písku. Tento podíl se pak rozdělí na sadě sít, pokud je to vyžadováno, 0,063; 0,125; 0,25; 0,5, 1; 2; 4 mm, v některých případech stačí stanovení celkového podílu zrn 0 – 4 mm.

Granulometrie zrn větších než 4 mm se dělí na sítech 8, 16, 31,5 a 63 mm. U současných betonů se používá velikost kameniva do 22 mm, je tedy vhodné zařadit také síto o velikosti zrn 22 mm, v minulosti bylo používáno kamenivo o větších rozměrech zrn, zejména v případě kameniva těženého.

Po rozdělení kameniva podle velikosti zrn se podíly zváží a vypočítá se jejich procentní zastoupení, resp. z výsledků se sestrojí granulometrická křivka. Příklad křivky zrnitosti je uveden na obr. 3 (stanovení provedeno na FAST VUT v Brně).



Obr. 3 Příklad granulometrické křivky kameniva v betonu (FAST VUT v Brně)

Znalost granulometrie kameniva v betonu je důležitá při návrhu směsi pro opravné betony. Skladba velikosti zrn kameniva má vliv jednak na mechanické vlastnosti opravného betonu, ale také na vzhled betonu.

12. Petrografický rozbor kameniva (písek 0-4 mm a štěrk >4 mm)

Petrografie kameniva, spolu s granulometrií, jsou významné pro dosažení vzhledu blízkého původnímu betonu. Petrografickou analýzu provádí zkušený petrograf, který je schopen nejen určit jednotlivé minerály, nacházející se v kamenivu, resp. písku, ale také lokalitu, ze které bylo kamenivo do betonu použito.

Problémy spojené s použitím původního kameniva se odvozují od skutečnosti, že mnohé dříve využívané lokality pro těžbu kameniva jsou již uzavřeny. V mnoha případech jsou tyto lokality využívány pro rekreační účely, takže ani výjimku pro vytěžení potřebného množství kameniva na opravy nelze povolit. Proto je nutno hledat těžební lokalitu s podobným petrografickým složením, kde je předpoklad, že vzhledově si budou kameniva podobná.

13. Chemické a fyzikálně chemické analýzy

Pro korektní posouzení stavu betonu, eventuálně pro predikci další životnosti konstrukce je nezbytné poznatky získané stanovením mechanických parametrů betonu doplnit též souborem fyzikálně chemických analýz. Cílem těchto analýz je komplexně analyzovat stav a eventuální degradaci hodnoceného betonu.

V obecné rovině lze konstatovat, že podstatné je stanovit složení hodnoceného betonu, a to chemické i mineralogické. Beton je kompozitní materiál, jehož hodnocení vyžaduje komplexní přístup, přičemž jsou obvykle používána tato stanovení:

- chemický rozbor
- rentgenová difrakční analýza (XRD)
- diferenční termická analýza (DTA)
- stanovení pH betonu ve výluhu.

Soubor těchto analýz je v některých případech vhodné doplnit například detailní analýzou mikrostruktury pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu, v některých případech je vhodné zmíněné analýzy doplnit infračervenou absorpční spektroskopií a metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie, kterou se hodnotí distribuce vzduchových pórů.

Podrobný postup těchto analýz byl proveden podle ustanovení příslušných norem a metodiky dle Matouška a Drochytky, uvedené v publikaci [16], která podává přehled o mikrostruktuře daného materiálu.

Vzorky pro fyzikálně chemické analýzy mohou být připravovány například z jádrových vývrtů, event. fragmentů odebíraných z hodnocené konstrukce vyříznutím úhlovou bruskou apod. Zpravidla je hodnocen nejen stav povrchových vrstev konstrukce, tedy betonu, který je vystaven bezprostřednímu působení vnějšího prostředí, ale též jsou analyzovány vzorky z větších vzdáleností („hloubek“) od líce konstrukce. Z hlediska posouzení stavu konstrukce je vhodné porovnat stav, resp. míru degradace betonu v závislosti na vzdálenosti od povrchu konstrukce. Tento komparativní přístup rovněž umožňuje predikovat životnost konstrukce.

14. Chemická analýza

Stanovení chemického složení betonu je prováděno v souladu s ustanoveními normy ČSN EN 196-2 [17], nebo pomocí rentgenové fluorescenční analýzy.

V návaznosti na charakter konstrukce a korozní podmínky jsou pak voleny konkrétní složky, které jsou v hodnoceném vzorku stanovovány. Chemickou analýzou stanovené obsahy jednotlivých prvků se vyjadřují ve formě příslušných oxidů. Obvykle se jedná zejména o stanovení těchto složek:

- oxid vápenatý, CaO
- oxid hlinitý, Al_2O_3
- oxid železitý, Fe_2O_3
- oxid křemičitý, SiO_2

- sírany, SO_3
- chloridy, Cl^-
- oxid manganatý. MnO.

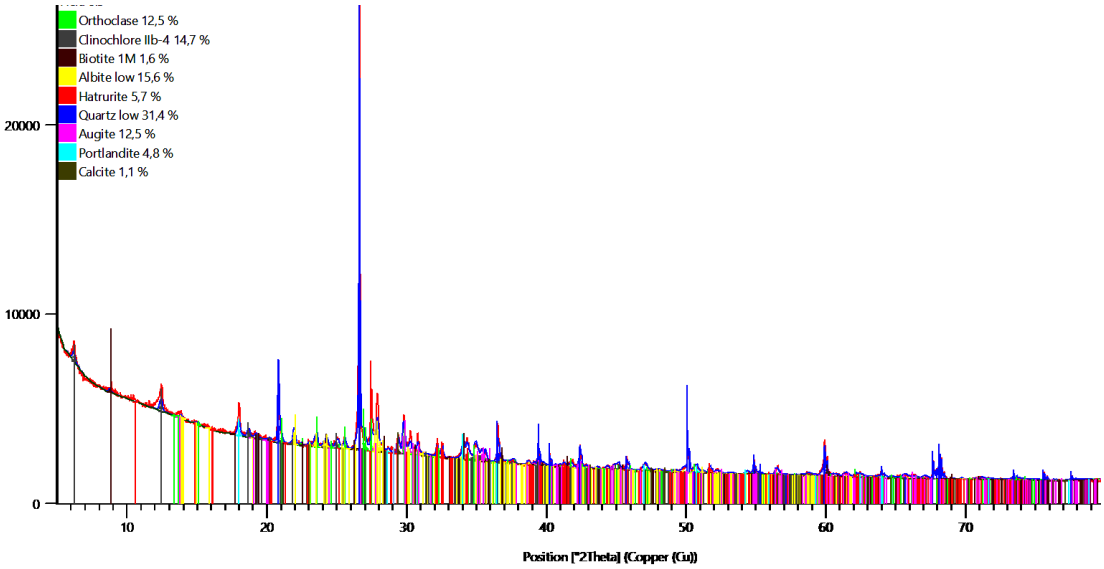
15. Rentgenová difrakční analýza (XRD)

Analýza mineralogického složení je zásadních při hodnocení stavu, resp. míry degradace betonu.

Difrakční metody strukturní analýzy jsou založeny na interferenci (zesílení) rentgenova záření na krystalické mřížce minerálů obsažených ve vzorku. Vycházejí z toho, že se v krystalické látce nacházejí vzájemně rovnoběžné roviny, které jsou od sebe vzdáleny o tzv. mezimřížkovou vzdálenost. Právě na těchto rovinách za určitých podmínek dochází k interferenci rentgenova záření. Každá krystalická látka je charakterizována souborem rovin v různých mezimřížkových vzdálenostech. Identifikace minerálů obsažených ve vzorku se provádí porovnáním naměřených hodnot s hodnotami uvedenými v knihovnách (databázích) jednotlivých minerálů [18].

Z hlediska mineralogického je beton tvořen fázemi cementové matrice (portlandit, hydratované křemičitany a hlinitany vápenaté), minerály vznikajícími jejich následnou karbonatací (kalcit či vaterit), dále jsou ve struktuře betonu přítomny minerály pocházející z kameniva (β–křemen, živce, slídy). V případě, že je beton vystaven působení agresívních látek, vznikají v jeho struktuře korozní novotvary jako například sekundární ettringit, sádrovec apod.

Stanovení kombinace rovin a jejich mezimřížkových vzdáleností charakteristických pro hledaný minerál se provádí pomocí přístroje pro rentgenovou difrakční analýzu (XRD difraktograf). Měření probíhá na práškových vzorcích upravených na doporučenou granulometrii 25 µm. Úprava granulometrie má být provedena na mikronizačním zařízení, které nepoškozuje vnitřní strukturu vzorku, typicky mikronizátor McCrone. Měření probíhá na přístroji typicky v Bragg – Brentano parafokusační geometrii. Moderní přístroje využívají polovodičové pozičně citlivé liniové detektory.

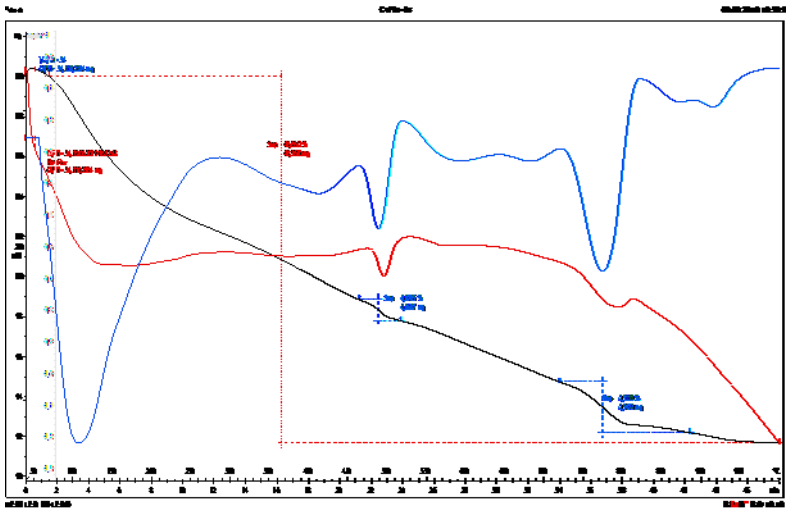


Obr. 4 Záznam rentgenové difrakční analýzy vzorku betonu

Při známé vlnové délce rentgenova záření (λ), která je daná volbou anody XRD zdroje, lze určit podle úhlu dopadu záření na vzorek (Θ) hodnotu mezimřížkové vzdálenosti (d). Typický záznam měření uvádí úhlové pozice maximálních reflexí pro dané roviny v sledovaném minerálu, obr. 4. Pro vyhodnocení záznamu lze využít příslušný software a databáze krystalografických dat. Záznam na obr. 4 byl pořízen na přístroji XRD Empyrean, který využívá ovládací software Data Collector (Centrum AdMaS, VUT v Brně).

16. Termická analýza

Termická analýza je analytická metoda založená na měření rozdílů teplot mezi zkoušeným materiálem a inertním standardem (u moderních přístrojů je tento standard virtuální) současně zahřívanými v peci (DTA. Tepelné zabarvení reakcí, ke kterým ve vzorku při zahřívaní dochází, se projeví maximy a minimy v exotermní a endotermní oblasti, obr. 5. Současně je sledována změna hmotnosti doprovázející jednotlivé reakce (TG). Výstupem analýzy je pak stanovení obsahu jednotlivých složek v hodnoceném betonu. Termická analýza se zpravidla využívá jako doplněk rentgenové difrakční analýzy právě pro přesnější kvantifikaci obsahu jednotlivých složek cementové matrice. Zásadní význam mají poznatky získané analýzy například při hodnocení míry karbonatace betonu, při specifikaci míry degradace betonu atd. Záznam termické analýzy betonu, obr. 5, byl pořízen přístrojem pro termickou analýzu Mettler Toledo TGA/DSC 1 (Centrum AdMaS, VUT v Brně).



Obr. 5 Záznam diferenční termické analýzy vzorku betonu

17. Zonální stanovení pH

Obsah hydroxidových iontů v betonu je jedním z velmi citlivých parametrů, který vyjadřuje jeho stav resp. míru jeho degradace. Analogickým způsobem jako v předchozích u předchozích analýz jsou i v tomto případě vzorky připravovány z různých vzdáleností („hloubek“) od povrchu hodnoceného prvku.

Výluh, ve kterém je stanovována hodnota pH je připravován tak, že standardně určené množství vzorku (2 g) je vyluhováno v alikvotním množství destilované vody (50 ml) ponecháno po dobu 24 h hodin. Následně pak je stanovována hodnota pH.

18. Analýza mikrostruktury elektronovým mikroskopem

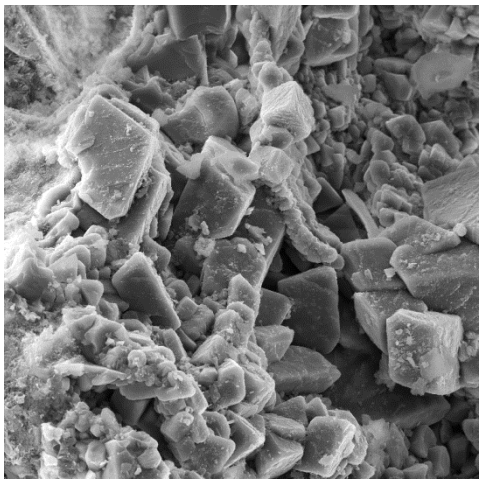
V některých případech je nezbytné soubor prováděných stanovení doplnit detailní analýzou mikrostruktury pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu.

Elektronová mikroskopie umožňuje sledovat mikrostrukturu analyzovaných materiálů při zvětšení a rozlišení, jež se vymyká možnostem optického mikroskopu. Elektronová mikroskopie, jak již z názvu vyplývá, pracuje na odlišném principu, než mikroskopie optická. Principiálně lze rozlišit dvě koncepce elektronové mikroskopie, které se vzájemně liší konstrukčním uspořádáním přístrojů, částečně též přípravou vzorků atd. Konkrétně se jedná o:

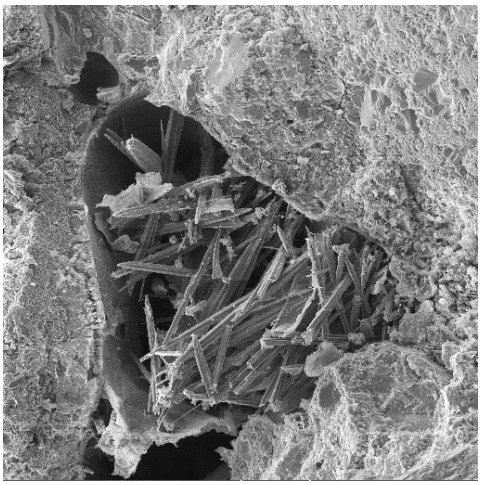
- elektronovou transmisní mikroskopii (TEM)
- elektronovou rastrovací (skenovací) mikroskopii (REM, SEM).

V oblasti analýz silikátových je zpravidla aplikována rastrovací elektronová mikroskopie, kdy obraz vzniká snímáním složitých fyzikálních jevů (snímány jsou tzv. sekundární elektrony, Augerovy elektrony, rentgenovo záření a řada dalších). Tyto jevy jsou detekovány a vytváří pak výsledný obraz. Lze pracovat se zvětšeními až 100 000krát, při analýze stavebních materiálů jsou používána zpravidla zvětšení nižší, a to v rozmezí 2000 až 7000krát. Velmi pozitivní rovněž je, že touto analýzou lze stanovit nejen habitus hodnocených fází, ale též jejich chemické složení.

Ukázka korozních produktů v betonu je uvedena na obr. 6, kde jsou krystaly kalcitu ve zkarbonátovaném betonu a sekundární ettringit jako výsledek síranové koroze, obr. 7. Snímky byly pořízeny elektronovým mikroskopem MIRA3 XMU, PECTIER EDx BRUKER (Centrum AdMaS, VUT v Brně).



Obr. 6 Pohled na krystaly kalcitu, které vznikají v mikrostruktuře betonu karbonatací. Zvětšeno 2000krát. Foto P. Bayer.



Obr. 7 Pohled na krystalické novotvary ettringitu v póru, které vznikají v mikrostruktuře betonu degradovaného působením síranů. Zvětšeno 1000krát. Foto P. Bayer.

19. Vyhodnocení korozního napadení betonu

Posouzení stavu, resp. míry degradace betonu působením agresívních vlivů z vnějšího prostředí, je prováděno na základě komplexního posouzení jak mechanických (tj. především pevnostních) parametrů betonu, tak hodnocení výsledků souboru fyzikálně chemických analýz.

Hodnocení stavu betonu je komplexní proces, při kterém je nutno zohledňovat podmínky, v nichž probíhá životní cyklus konstrukce. Explicitně definovat obecně platný algoritmus pro hodnocení stavu, resp. míry degradace konstrukčního betonu je tedy velmi obtížné.

V některých případech je možno stav betonu kvantifikovat konkrétními způsoby, zejména se jedná o karbonatace betonu a napadení chloridy.

20. Karbonatace betonu

Většina železobetonových konstrukcí je vystavena vlivu atmosféry, která obsahuje v průměru 0,038 obj. % oxidu uhličitého. Jeho působením na beton dochází k tzv. karbonataci. Proces karbonatace lze u betonů na bázi portlandského cementu dle metodiky [16] rozdělit do čtyř navazujících etap, konkrétně tedy:

V první etapě karbonatace je oxidem uhličitým atakován především hydroxid vápenatý, popř. jeho roztok v mezizrnečném prostoru za vzniku nerozpustného uhličitanu vápenatého, který krystalizuje převážně ve formě kalcitu. Vznikajícími krystalky jsou přitom částečně zaplňovány póry v materiálu. V důsledku těchto procesů dochází ke zvyšování hutnosti matrice, což může mít za následek přechodné zlepšení některých vlastností betonu.

Ve druhé etapě karbonatace dochází zejména k interakcím mezi oxidem uhličitým a hydratovanými křemičitany a hlinitany vápenatými, přičemž produktem těchto reakcí jsou různé modifikace uhličitanu vápenatého (kalcit, aragonit, vaterit), které vznikají společně s amorfním gelem kyseliny křemičité, resp. gibbsit a zůstávají přitom v pseudomorfózách po hydratačních produktech maltovin, příp. jako velmi jemnozrnné krystalické novotvary uhličitanu vápenatého. Vlastnosti betonu se příliš nemění, mechanické vlastnosti kolísají kolem původních hodnot.

Ve třetí etapě karbonatace dochází k překrystalování dříve vzniklých uhličitanových novotvarů, a to z mezizrnečného roztoku. Přitom vznikají velmi početné a poměrně velmi rozměrné, proti dřívějším útvarům až desetkrát větší krystaly kalcitu a aragonitu. Současně mohou přitom méně stálé modifikace $CaCO_3$ vlivem vlhkosti a déle trvající karbonatace přecházet na modifikace stálejší. Mechanické vlastnosti betonu se postupně zhoršují.

Čtvrtá etapa karbonatace je charakterizována téměř stoprocentním stupněm karbonatace, při němž hrubé krystaly aragonitu a zejména kalcitu prostupují celou strukturu cementového tmelu, což je v krajním případě spojeno se ztrátou jeho pevnosti a v konečné fázi i soudržnosti.

Zařazení betonu do etapy karbonatace se realizuje dle výpočtu stupně karbonatace, výpočtu stupně modifikační přeměny, a stanovení pH betonu.

Stupeň karbonatace ^0K se určí výpočtem z obsahu oxidu vápenatého zjištěného chemickým rozborem a z obsahu oxidu vápenatého vázaného na jemnozrnný a hrubozrnný uhličitan vápenatý stanovený pomocí diferenční termické analýzy. Množství uhličitanu vápenatého se vypočítá ze zjištěných úbytků hmotnosti na TG křivce, které odpovídají oxidu uhličitému, vzniklému z rozkladu uhličitanu vápenatého. Na TG křivce jsou zřetelné dvě oddělené části, odpovídající rozkladu jemnozrnného a hrubozrnného uhličitanu vápenatého.

Obsah zkarbonatovaného CaO_{karb} se vypočítá ze vztahu:

$$CaO_{karb} = 1{,}273 \cdot (CO_{2j} + CO_{2h}) \quad (17)$$

kde CaO_{karb} je obsah zkarbonatovaného oxidu vápenatého, v %

CO_{2j} je obsah oxidu uhličitého vázaného na jemnozrnný uhličitan vápenatý, v %

CO_{2h} je obsah oxidu uhličitého vázaného na hrubozrnný uhličitan vápenatý, v %

Stupeň karbonatace se vypočítá ze vztahu:

$$°K = \frac{CaO_{karb}}{CaO} \cdot 100 \quad (18)$$

kde CaO je obsah oxidu vápenatého zjištěný chemickou analýzou, v %.

Stupeň modifikační přeměny ^{0}MP (-) se určí výpočtem z obsahu oxidu uhličitého vázaného na jemnozrnný a hrubozrnný uhličitan vápenatý dle vztahu:

$$°MP = \frac{CO_{2h}}{CO_{2j}} \quad (19)$$

Hodnoty jednotlivých parametrů pro zařazení betonu do etapy karbonatace jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6: Parametry pro zařazení betonu do etapy karbonatace [16]

Etapa karbonatace	**Stupeň karbonatace ^{0}K (%)**	**Stupeň modifikační přeměny ^{0}MP (-)**	**pH (-)**
I.	méně než 55	více než 0,5	12,6 – 10,8
II.	55 – 73	0,5 – 0,4	10,8 – 9,6
III.	73 – 85	0,4 – 0,8	9,6 – 8,0
IV.	více než 85	více než 0,8	méně než 8,0

21. Kontaminace betonu chloridy

Další z parametrů, který lze stanovit a deterministickým přístupem hodnotit stav betonu je stanovení míry kontaminace betonu chloridy. Typickým příkladem takto exponovaných konstrukcí jsou například silniční mosty a objekty v blízkosti komunikací, na kterých se provádí zimní údržba posypem solí.

Interakce chloridových iontů s cementovou matricí má z hlediska poklesu mechanických vlastností betonu poměrně nízký význam, z hlediska životnosti konstrukce je ovšem podstatné, že přítomnost chloridových iontů výrazným způsobem snižuje schopnost chránit výztuž vůči korozi, resp. jsou vytvářeny podmínky pro její intenzivní korozi.

Ustanovením, které v tomto případě stanoví limitní hodnoty je norma ČSN EN 206+A1 [18], kdy pro železobetonové konstrukce vystavené běžným podmínkám, je stanoven maximální přípustný obsah 0,4 % chloridů z hmotnosti cementu.

Nezbytné je tedy beton podrobit analýzám, které umožňují stanovit dávku cementu v betonu, viz kap. 9, a stanovit obsah chloridů v betonu.

Pro posouzení škodlivosti chloridů je rozhodující obsah chloridů ve vodě rozpustných. Obsah chloridů se tedy stanovuje ve vodním výluhu z betonu, a to buď titračními metodami, nebo potenciometricky.

22. Hodnocení materiálových charakteristik a korozního napadení betonu

Materiálové charakteristiky betonu zahrnují zejména jeho složení. Výše popsanými metodami lze stanovit chemické a mineralogické složení a mikrostrukturu. Stanovuje-li se

složení betonu pro účely návrhu opravné směsi pro jeho výrobu, je nezbytné vzít v úvahu, že zkoušený beton se nachází v určité fázi životního cyklu a může obsahovat i různé cizorodé látky a produkty korozního napadení. To se projeví na výsledcích stanovení jako odchylky od standardního složení.

Stav betonu, resp. míru jeho degradace agresivními vlivy lze orientačně stanovit „in situ“ (např. fenolftaleinový test), pro komplexní hodnocení mikrostruktury hodnoceného betonu je ovšem nezbytné použít soubor fyzikálně chemických analýz, mezi které patří zejména stanovení chemického složení, termická analýza, rentgenová strukturní analýza, skenovací elektronová mikroskopie, event. další metody.

Od materiálového složení a mikrostruktury se odvíjejí fyzikální (včetně mechanických) a chemické vlastnosti betonu, a také možnost korozního napadení. Uvedené lze shrnout v konstatování, že stanovené parametry betonu jsou na sobě vzájemně závislé a z toho důvodu je nutno ve většině případů beton hodnotit komplexně s ohledem na konkrétní složení hodnoceného betonu a podmínky vystavení agresivnímu prostředí.

23. Použitá literatura

[1] VYMAZAL, T., MISÁK, P., KUCHARCZYKOVÁ, B., Zajištění způsobilosti zkušební laboratoře a statistické hodnocení výsledků. Brno: FAST VUT v Brně, 2009.

[2] ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí. Platnost od června 2012.

[3] ČSN ISO 13822 Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí. Platnost od ledna 2015

[4] ČSN 73 0038 Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí - Doplňující ustanovení. Platnost od ledna 2015.

[5] DROCHYTKA Rostislav, Jiří DOHNÁLEK, Jiří BYDŽOVSKÝ, Václav PUMPR, Amos DUFKA a Pavel DOHNÁLEK: *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III*, Reprocentrum, a.s. ISBN 978-80-260-2210-7.

[6] ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Platnost od října 2019.

[7] ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Platnost od dubna 2018.

[8] ČSN EN 14630 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení hloubky zasažení karbonatací v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody. Platnost od června 2008

[9] ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku. Platnost od října 2019.

[10] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Platnost od října 2019.

[11] ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Platnost od října 2011.

[12] ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. Platnost od června 2012.

[13] ČSN EN 12390-13 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku. Platnost od února 2014.

[14] CIKRLE, P. *Význam nedestruktivních diagnostických metod pro hodnocení železobetonových konstrukcí*. Brno: VUT, VUTIUM, 2017. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Habilitační a inaugurační spisy. ISBN 978-80-214-5464-4.

[15] ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. Platnost od června 2012.

[16] MATOUŠEK, Milan a Rostislav DROCHYTKA. Atmosférická koroze betonů. Praha: IKAS, 1998. ISBN 80-902558-0-9.

[17] ČSN EN 196-2 (72 0100) Metody zkoušení cementu – Část 2: Chemický rozbor cementu. Platnost od června 2013.

[18] ČSN EN 13925-2 Nedestruktivní zkoušení - Rentgenová difrakce polykrystalických a amorfních materiálů - Část 2: Postupy. Platnost od srpna 2003.

[19] ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích. Platnost od března 2020.

[20] JAMBOR Jaromír. *Chemické rozbory v stavebníctve*. Bratislava: SAV, 1953, 445 stran.