

Památkový postup

Vizuální prohlídky a nedestruktivní metody stanovení materiálových charakteristik betonu ŽB konstrukcí

Brno 2020

Autoři: prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

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 byl vytvořen 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

1.	Cíl památkového postupu	3
2.	Charakteristika betonu a ocelové výztuže a jejich degradace	3
3.	Popis celkového vzhledu betonové konstrukce	8
4.	Četnost, délka, šířka a orientace trhlin	9
5.	Původ a projevy koroze na povrchu betonu	10
6.	Výkvěty a výluhy na povrchu betonu	12
7.	Oleje a ropné látky	15
8.	Působení biologických vlivů na železobetonové konstrukce	17
9.	Přítomnost a stav povrchových úprav betonu (omítky, nátěry, vymývaný povrch)	19
10.	Vizuální kontrola a akustické trasování	21
11.	Vodotěsnost povrchové úpravy	21
12.	Kontrola nátěru mřížkovou zkouškou	22
13.	Tloušťka nátěru	22
14.	Přidržnost povrchové úpravy a pevnost v tahu povrchových vrstev betonu	23
15.	Stanovení pevnosti betonu tvrdoměrnou metodou	24
16.	Zjišťování vlastností betonu pomocí ultrazvukové metody	25
17.	Nedestruktivní zkoušky polohy výztuže	28
17.1	Lokální sekané sondy	28
17.2	Metoda elektromagnetických indikátorů	28
17.3	Metoda georadaru	29
17.4	Radiografická metoda	31
18.	Fenolftaleinová zkouška	32
19.	Celkové zhodnocení stavu betonu	33
20.	Použitá a související literatura	34

1. Cíl památkového postupu

Památkový postup obsahuje problematiku vizuálního hodnocení a nedestruktivních metod používaných pro určení materiálových charakteristik historických betonových konstrukcí. Cílem památkového postupu je vytvoření metodického postupu pro zjišťování materiálových charakteristik historických betonových konstrukcí pomocí vizuální prohlídky a nedestruktivních metod. To z důvodu minimálního zásahu do těchto konstrukcí, resp. jejich minimálního poškození.

Památkový postup bude možno použít k hodnocení stavu betonu jak betonových a železobetonových konstrukcí, tak i uměleckých děl (sochy, plastiky) vyrobených z betonu. Předložený památkový postup zahrnuje tradiční i netradiční zkoušky, které popisují stav diagnostikovaného objektu.

Při obnově historických betonových staveb nelze použít všechny techniky, které byly vyvinuty pro moderní beton, protože vlastnosti historického betonu se mohou lišit od betonu moderního. Z pohledu památkové ochrany je nezbytné respektování historické hodnoty materiálu a hodnoty kulturního dědictví. Nekritická aplikace nových technologií oprav a nedostatek znalostí o historickém betonu mohou vést ke ztrátě historické autenticity materiálu.

Z tohoto pohledu je nezbytné věnovat velkou pozornost diagnostice betonu historických konstrukcí, která bude sloužit jako jeden z podkladů pro návrh šetrné obnovy těchto objektů. Památkový postup je zaměřen na diagnostiku stavu betonu objektů z 2. poloviny 20. století.

2. Charakteristika betonu a ocelové výztuže a jejich degradace

Původ použití betonu spadá již do Říše Římské, kdy byl tvořen kompozitní materiál z kameniva a pojiva na bázi vápna a pucolánově reagujících příměsí. Původ moderního betonu, používajícího jako pojivo portlandský a směsné cementy, spadá do 19. století. Rok 1824 je mezníkem v betonovém stavitelství, kdy byl udělen Josephu Aspdinovi patent na výrobu portlandského cementu [1]. Betonové stavby z 19. a první poloviny 20. století jsou považovány za historické, ale i mnohé betonové stavby druhé poloviny 20. století jsou již předmětem památkové ochrany. Technologie výroby, ukládání a ošetřování betonu byla až zhruba do 90. let 20. století odlišná od dnešní moderní technologie výroby betonu. U starých betonových konstrukcí obvykle chybí popis technologie, proto je nanejvýš důležité zachovat tyto materiály v co největší míře a šetrně je diagnostikovat bez výrazného poškození.

Základním pojivem betonů je portlandský cement, vyráběný pálením vápenců s obsahem jílu na teplotu okolo 1 500 °C, kdy dochází ke vzniku slídkových minerálů. Směs pro výrobu betonu obsahuje jako pojivo cement, který může být ve směsi s reaktivní příměsí (nejčastěji vysokopepční struskou) a kamenivo, tvořené pískem v granulometrii 0/4 mm a šterkem, který dosahuje velikosti zrn kameniva 32 mm, u starých betonů i větších rozměrů.

Pevná struktura betonu se tvoří spojením zrn kameniva a pojiva – cementu. Slídkové minerály, přítomné v cementu, reagují s vodou a vytvářejí tzv. cementový tmel. Cementový tmel vykazuje zásaditou reakci v důsledku vzniku hydroxidu vápenatého při hydrataci silikátových slídkových minerálů. Důležitým faktorem kvality betonu je jeho porozita, která se odvíjí od složení směsi pro jeho výrobu a zejména množství záměsové vody, vyjádřené v poměru k cementu jako tzv. vodní součinitel v/c . Čím je vyšší tato hodnota, tím je cementový tmel v betonu poréznější, pevnosti jsou nižší a beton je více náchylný k chemickému poškození. Významná je také granulometrická skladba kameniva.

Beton je kvazikřehký materiál, vyznačuje se vysokou pevností v tlaku, ale nízkou pevností v tahu, respektive i v tahu za ohybu. Z tohoto důvodu se konstrukce namáhané tahem či ohybem musí vyztužit ocelovými pruty. V zásaditém prostředí betonu je ocel chráněna před korozi. Dojde-li ke snížení zásaditosti cementového tmelu v betonu pod hodnotu, odpovídající $\text{pH} < 9,5$, jsou vytvořeny podmínky pro korozi výztuže.

Beton v průběhu životního cyklu betonové či železobetonové konstrukce podléhá degradaci (korozi) [2]. Ta může vést k chemickým změnám ve složení betonu bez mechanického porušení materiálu, nebo až k povrchovému nebo hloubkovému porušení hmoty betonu. Současně se změnou charakteru betonu dochází ke korozi ocelové výztuže.

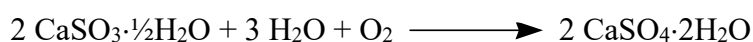
Zásadité prostředí, tedy obsah hydroxidu vápenatého v betonu, může být ovlivněno zejména působením látek kyselého charakteru, jako jsou kyselé plyny z ovzduší tvořící s vodou kyseliny. Mezi tyto plyny patří oxid uhličitý, který je součástí běžné atmosféry, oxid siřičitý, vznikající při spalování paliv s obsahem síry a oxidy dusíku, vznikající při spalovacích procesech v elektrárnách a ve vznětových motorech automobilů. Kromě kyselých plynů a následně vzniklých kyselin, snižuje obsah hydroxidu vápenatého reakce se sírany, hořečnatými a amonnými ionty.

Nejčastěji se lze setkat s působením oxidu uhličitého, který je obsažen v atmosféře v průměrné koncentraci 0,038 obj. %. Od charakteru pórového systému cementového tmelu v betonu se odvíjí průběh reakce s oxidem uhličitým (CO_2), zvaná karbonatace. Tato reakce je závislá rovněž na koncentraci CO_2 , okolní teplotě a relativní vlhkosti vzduchu. Zjednodušeně lze proces karbonatace popsat rovnicí



Spotřebováním přítomného hydroxidu vápenatého se snižuje koncentrace OH^- iontů až k hodnotě $\text{pH} = 8,3$. Tento proces vede k vytvoření podmínek pro korozi ocelové výztuže.

Oxid siřičitý způsobující tzv. sulfataci betonu rovněž snižuje koncentraci hydroxidu vápenatého. Reakcí v konečné fázi vznikne sádrovec, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, podle rovnic:



Sádrovec pak může vytvářet s hydratovanými složkami cementu další korozní produkty, zejména pak sekundární ettringit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) a monosulfát ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) s velkými jehlicovitými krystaly, které mohou způsobit až rozpad betonu.

Oxidy dusíku jsou často zastoupeny oxidem dusičitým, NO_2 , který tvoří s vodou kyselinu dusičnou, reagující s hydroxidem vápenatým dle rovnice



Kyselina dusičná může způsobit až úplný rozklad cementového tmelu v betonu.

Beton může být poškozen také kapalným prostředím, tj. vodou, roztoky solí, kyselin a hydroxidů. Voda s nízkým obsahem rozpuštěných látek (tzv. hladová) vyluhuje z betonu hydroxid vápenatý. Tím se snižuje jeho koncentrace, snižuje se hodnota pH a vytváří se prostředí příznivé pro vznik koroze u ocelové výztuže.

Beton poškozují roztoky kyselin (anorganických i organických), které neutralizují hydroxid vápenatý a vytvářejí při této reakci soli. Soli, podle svého charakteru, mohou způsobit mechanické porušení betonu vznikem krystalizačního tlaku, jsou-li k tomu vytvořeny

podmínky. Při koncentraci kyselin, odpovídající hodnotě $\text{pH} < 4$ dochází k rozkladu cementového tmelu a následně k rozpadu betonu.

Rovněž koncentrované roztoky NaOH a KOH rozpouštějí silikátové a aluminátové složky cementového tmelu, což v konečném důsledku vede až k rozpadu betonu. Také některé soli, hořečnaté a amonné, reagují s hydroxidem vápenatým, což vede ke snížení jeho obsahu a snížení hodnoty pH cementového tmelu.

Dalším typem koroze je působení síranů v roztoku (síranových vod), které vytvářejí objemné sloučeniny reakcí s hydroxidem vápenatým, a to sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) a posléze sekundární ettringit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) a monosulfát ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), podobně jako při sulfataci plynným oxidem siřičitým. Vznik těchto sloučenin může vést až k rozpadu betonu.

Beton může být narušen biologickými vlivy, a to mechanicky působením kořenů rostlin a chemicky, působením bakterií, lišejníků a řas. Bakterie při svých životních pochodech převádějí organické sloučeniny s obsahem dusíku a síry na anorganické kyseliny (dusičnou a sírovou), které způsobují až úplný rozklad cementového tmelu v betonu. Nižší rostliny produkují, mimo jiné, organické kyseliny, které se podílejí na porušení povrchu betonových objektů.

Působení vyšších rostlin – do této skupiny lze zařadit například porosty řas, mechů, lišejníků a nálety bylin či dřevin. V obecné rovině lze konstatovat, že tyto rostliny životnost konstrukcí ovlivňují sekundárně, a to především tím, že zadržují vodu, řasy a lišejníky navíc produkují organické kyseliny. Zvýšené množství vody pak způsobuje degradaci stavebních materiálů, a to zejména při synergickém působení mrazu. Negativním aspektem rovněž je, že kořenový systém rostlin může pronikat do trhlin a spár, a mechanicky tak konstrukci narušovat.

Principem bakteriální biokoroze je především redukce síranů obsažených ve vodě za vzniku sulfanu H_2S , který proniká na povrch stěn. Zde se sulfan rozpouští v kondenzované vodě, ve které je vlivem bakterií oxidujícími anorganické sírné látky (např. rod *Thiobacillus*) oxidován na kyselinu sírovou, která následně reaguje s cementovou maticí betonu. Sulfan může vznikat také při rozkladu bílkovin, zejména ve stokách.

K degradaci betonu může docházet také přítomností některých druhů kameniva. Jde zejména o přítomnost reaktivních amorfních forem oxidu křemičitého (opály, chalcedony, silicity apod.), které v přítomnosti alkálií a vody tvoří objemné alkalicko-silikátové gely, způsobující vznik významných trhlin až rozpad betonu.

Přítomnost zrn pyritu v písku nebo hrubém kamenivu vede v zásaditém prostředí betonu k jeho oxidaci vzdušným kyslíkem. V konečné fázi vzniká síran, který může vést ke vzniku sekundárního ettringitu a hydroxid železitý, projevující se rezavými skvrnami v povrchu betonu.

Je-li jako kamenivo v betonu použit vápenec nebo dolomit, působením dešťové vody, obsahující rozpuštěný oxid uhličitý, dochází ke vzniku rozpustných sloučenin, které se z betonu mohou vyloužit.

Vlastnosti cementů v 60. a 70. letech 20. století se lišily od požadavků na cementy v 21. století. V tomto předmětném období byly při realizaci železobetonových staveb používány především tyto typy cementů: cement portlandský, cement struskoportlandský a cement pucolánový, jak dokládá norma ČSN 722121 [3]. Od roku 1972 byly jednotlivé druhy cementů specifikovány ve zvláštních normách [4-8]. Cement byl charakterizován tzv. vazností, která se určovala pomocí stanovení pevností v tahu a tlaku na normové maltě za 3, 7 a 28 dnů. Podle druhu a kvality se rozlišovaly cementy – portlandský (PC 325, 400, 475), struskoportlandský

(SPC 250, 325, 400), vysokopecní (VPC 200, 250), silniční (SC 65, 70, 75) a síranovzdorný (SVPC 250, 325). Výrazná změna v třídách, označování a charakterizaci cementů nastala po roce 1990, kdy začala platit pro označování a charakterizaci cementů norma ČSN EN 197-1 [9].

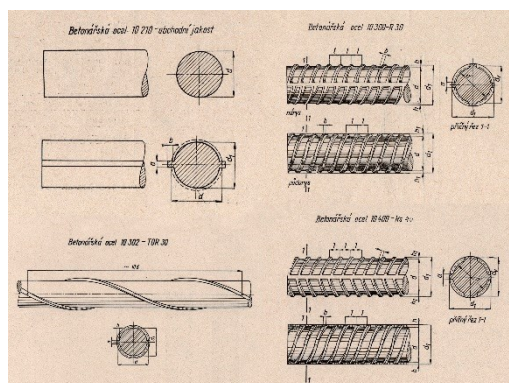
Z hlediska technického lze za nejpodstatnější rozdíly v jednotlivých druzích, resp. třídách cementů produkovaných v 60. a 70. letech a cementy současnými označit skutečnost, že v tomto období byly obecně používány cementy s relativně nižšími měrnými povrchy. Důsledkem větších zrn u dřívějších cementů pak je fakt, že hydratace cementu probíhá v dlouhodobém horizontu. Postupně vznikající produkty hydratace cementu mohly, resp. za určitých okolností stále mohou částečně vyplňovat trhliny, dochází k tzv. „samohojení“ betonu [10].

Výrazné rozdíly mezi betony z 2. poloviny 20. století a betony 21. století lze spatřovat především ve výrazném posunu kvality a druhů přísad používaných při jejich výrobě. Pro zajištění optimální zpracovatelnosti při co nejnižším vodním součiniteli byla v minulosti používána téměř výlučně plastifikační přísada na bázi ligninsulfonátu sodného, která snížila dávku záměsové vody při zachování stejné konzistence o cca 12 až 17 %. V současné době jsou při výrobě betonu používány plastifikační resp. superplastifikační přísady na bázi melaminsulfonátů, naftalenanů a především pak éterů polykarboxylových kyselin, snižující dávku záměsové vody o 15% až 30% (v některých případech až o 40%) [11].

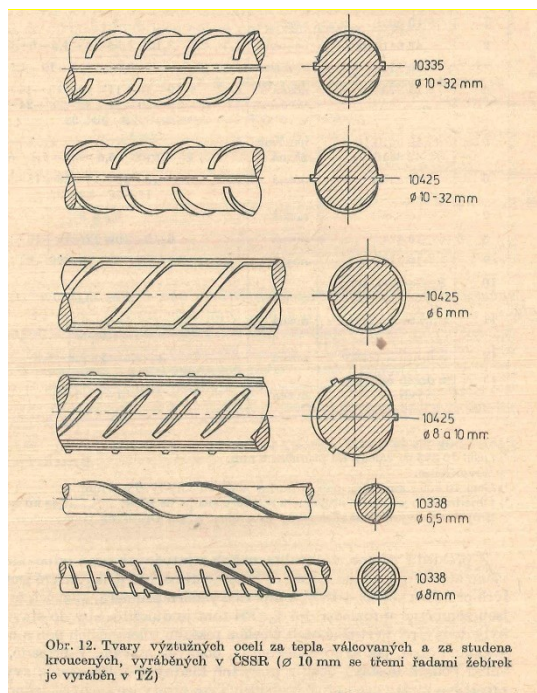
Pro urychlení tuhnutí cementu se používaly chloridové urychlující přísady, které, jak se později zjistilo, způsobovaly urychlení koroze výztuže. Dnes jsou nahrazeny přísadami neohrožujícími výztuž korozi.

Drobné a hrubé kamenivo je dominantní složkou betonu, která tvoří jeho kostru. V 60. a 70. letech minulého století byla pro výrobu používána jak kameniva přírodní, tak uměle vyráběná. Přírodní kameniva byla používána zpočátku těžená, později drcená. Optimalizace křivky zrnitosti byla zpravidla prováděna s využitím vztahu dle Fullera, eventuálně metodou EMPA a dalších [12].

Ocelová výztuž do betonu v období 60. a 70. let novým sortimentem výztužných ocelí, s důrazem na kvalitnější oceli s vyšší mezí kluzu, reprezentovaný výztužemi typu R 30, TOR 30, R 40, apod. Tyto výztuže byly charakteristické příčnými žebírky pod různými úhly, která měla zajistit dobrou soudržnost s betonem. Ukázka výztuží z 60. let 20. století je uvedena na obr. 1. Tyto nové druhy výztuže pod označené 10 216 E, 10 335 J, 10 425 V, 10 338 T (a později též 10 505 R) se používaly od roku 1970 až do 90. let [13]. Obr. 2 představuje výztuže užívané od roku 1970 v tehdejší ČSSR, za tepla válcované a za studena kroucené.



Obr. 1. Výztuže ze 60. let 20. století – 10210 hladká nebo s podélným výstupkem, 10302 (TOR 30) zkrucovaná za studena, 10300 (R 30) a 10400 (R 40) s příčnými žebírky [13].



Obr. 2. Výztuže užívané od roku 1970 v tehdejší ČSSR, za tepla válcované a za studena kroucené [13].

V souvislosti s odlišným značením cementů se označovaly odlišně od dnešního značení i třídy betonů. Převod druhů, značek a tříd betonů s ohledem na dřívější i aktuální technické předpisy je uveden v tabulce 1.

Tab. 1 Značení tříd betonů

Beton				
druh	značka	třída	třída	pevnostní třída
ČSN 1090 (1931) ČSN 1230 (1937)	ČSN 73 2001 (1956)	ČSN 73 1201 (1967)	ČSN 73 1201 (1986) ČSN 73 2400 (1989)	ČSN EN 206+A1 (2018)
a	60	I		(C 3/3,5)
b	80		B 5	(C 4/5)
c	105	0	B 7,5	(C 6/7,5)
d	135	I	B 10	C 8/10
			B 12,5	(C 9/12,5)
e	170	II		(C 10/13,5)
			B 15	C 12/15
f	250	III	B 20	C 16/20
			B 25	C 20/25
g	330	IV	B 28	(C 23/28)
			B 30	C 25/30
	400		B 35	(C 28/35)
				C 30/37
		V	B 40	(C 30/40)

Beton				
druh	značka	třída	třída	pevnostní třída
ČSN 1090 (1931) ČSN 1230 (1937)	ČSN 73 2001 (1956)	ČSN 73 1201 (1967)	ČSN 73 1201 (1986) ČSN 73 2400 (1989)	ČSN EN 206+A1 (2018)
	500		B 45	C 35/45
		VI	B 50	C 40/50
	600		B 55	C 45/55
			B 60	C 50/60
				C 55/67
				C 60/75
				C 70/85
				C 80/95
				C 90/105
				C 100/115

Pozn.: Pevnostní třídy uvedené v závorkách nejsou v příslušné normě zavedeny

3. Popis celkového vzhledu betonové konstrukce

Popis železobetonové konstrukce, by měl zahrnovat základní aspekty, charakterizující typ a provedení železobetonové konstrukce.

V první řadě je nezbytné určit, zda jde o konstrukci monolitickou, či montovanou z prefabrikovaných prvků, či o kombinaci, kdy některé prvky jsou monolitické, a některé prefabrikované

Pro charakterizaci objektu je třeba uvést údaje o počtu podlaží, nadzemních i podzemních, popsat konstrukční systém vodorovných a svislých nosných konstrukcí, uvést změny systému v jednotlivých podlažích, zjistit zda je konstrukce rozdělena do dilatačních celků a jaký je způsob provedení dilatací.

U jednotlivých částí konstrukce se uvedou rozměry jak celé konstrukce, tak jednotlivých konstrukčních prvků. Rozměry jednotlivých prvků jsou klíčové pro následný výpočet objemu betonu konstrukce v použitých konstrukčních prvcích, a rozhodnutí o počtu zkušebních míst pro některé nedestruktivní zkušební metody. Stejně tak je třeba odhadnout dataci konstrukce a způsob betonáže (dle archivních pramenů, projektové dokumentace, svědectví pamětníků, apod.) pro odhad tzv. minimální záměsi.

Minimální počet zkušebních míst je dán buď velikostí plochy, nebo objemu konstrukce podle ČSN 73 2011 – viz tabulka 2.

Tab. 2 Minimální počet zkušebních míst na konstrukci pro vybrané nedestruktivní zkoušky

Objem betonu konstrukce v m ³	Předpokládané velikosti záměsi směsi pro výrobu betonu v m ³					
	0,06	0,30	0,60	1,00	3,00	6,00
	Minimální počet zkušebních míst <i>n</i>					
1	16	16	16	16	16	16
2	24	16	16	16	16	16
5	39	16	16	16	16	16
10	52	24	16	16	16	16
20	64	35	24	16	16	16
50	72	52	39	31	16	16
100	72	64	52	44	24	16
200	72	70	64	53	35	24
500	72	72	72	68	53	39
700	72	72	72	71	58	45
1000	72	72	72	72	64	52
2000	72	72	72	72	70	64
4000 a více	72	72	72	72	72	70

Pozornost je třeba rovněž věnovat viditelným dřívějším zásahům do konstrukce, zde jde zejména o odstranění prvků, či jejich částí (např. výřezy v deskách), průvrty konstrukčními prvky či zavěšení dodatečných technologií a podobně.

V rámci popisu objektu je třeba charakterizovat i zjištěné vady a poruchy, a jejich rozsah, respektive četnost.

V případě poruch jde zejména o:

- trhliny, či jiná zásadní mechanická poškození betonu
- odpadlá krycí vrstva betonu související s korozí výztuže
- viditelné znečištění konstrukce (oleje a ropné látky ad.)
- výkvěty a výluhy na povrchu betonu a jejich původ.

Při popisu vzhledu konstrukce se popíše i přítomnost povrchových úprav betonu a jejich stav.

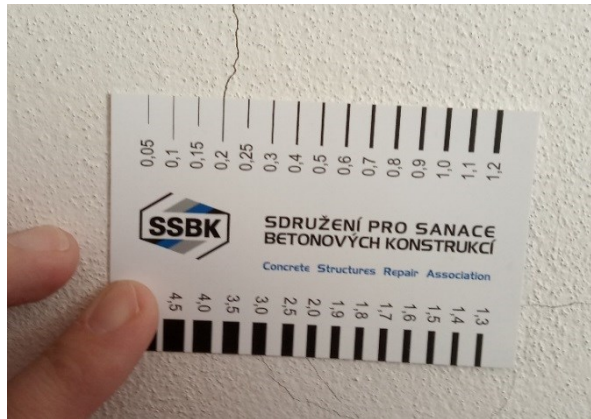
4. Četnost, délka, šířka a orientace trhlin

Základním typem poruchy vyskytujících se u prvků železobetonových konstrukcí jsou trhliny. Z jejich polohy na daném prvku, směru průběhu a rozvoje a v neposlední řadě šířky lze na základě patřičných znalostí odvodit příčinu, a případnou statickou závažnost.

Podstatným údajem je i opakování daného typu poruch na adekvátních prvcích konstrukce, svědčící např. o tom, že příčinou je systematická vada konstrukce, např. nedostatečné vyztužení, nízký modul pružnosti betonu a podobně.

Při dokumentaci trhlin za účelem jejich případného dalšího posouzení, určení jejich původu či statické závažnosti je nezbytné postupovat od celku k detailu. To znamená, fotograficky dokumentovanou poruchu je třeba současně označit ve výkresové dokumentaci objektu (včetně směru průběhu) a naznačení polohy fotografa či úhlu pohledu. V popisu nesmí chybět počet, délka, šířka a orientace trhlin.

Pro základní údaj o orientační šířce trhliny je vhodné využít příložnou kartičku s čarami různých šířek, která se přikládá k trhlíně a vizuálním porovnáním se trhlíně přiřadí odpovídající šířka, obr. 3.



Obr. 3 Použití příložné kartičky pro orientační stanovení šířky trhliny.

V případě nutnosti sledování případného rozvoje trhlin (tam, kde lze předpokládat progresi rozvoje) je řešením osazení měřících základů a pravidelné měření jejich vzdálenosti, ať už ručně (např. Hollanův příložený deformmetr) či s užitím automatického měřícího zařízení.

Trhliny způsobené přetížením konstrukce lze podle oblasti výskytu rozdělit na:

1. Trhliny ve vodorovných nosných konstrukcích
 - ohybové
 - smykové
 - vrásnění (od působení tlaku)
2. Trhliny ve svislých nosných konstrukcích
 - ve stěnách – tahové, smykové, vrásnění (od působení tlaku)
 - ve sloupech – tahové, smykové, vrásnění (od působení tlaku).

Pro klasifikaci trhlin je zde možno použít tabulku, která je uvedena v ČSN 73 0040 Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva (1996). V popisu je vhodné přiřadit trhlíně označení závažnosti na stupnici 1 – 5:

1. Vlasová trhlina, staticky bezvýznamná.
2. Drobná trhlina do šířky 0,3 mm (obvyklá povolená šířka trhlin).
3. Výrazná trhlina (například smyková) bez výraznějšího vlivu na únosnost konstrukce
4. Závažná trhlina s vlivem na omezení únosnosti konstrukce.
5. Kritická trhlina – havarijný stav konstrukce.

Mimoto je třeba rozlišit trhliny, vzniklé jinými mechanismy, například korozi výztuže (rozpínání korozních produktů), trhliny v místě dilatací, či trhliny způsobené průhyby.

5. Původ a projevy koroze na povrchu betonu

Beton, resp. jeho cementová matrice patří mezi látky s relativně vysokým modulem pružnosti, čímž je determinována jeho relativně vysoká křehkost, resp. poměrně nízká schopnost přenášet tahová napětí. Z tohoto důvodu je pro zvýšení únosnosti konstrukčních prvků zabudována ocelová výztuž, jejímž účelem je přenášet tahová resp. smyková napětí.

Matrice betonu je tvořena hydratačními produkty cementu (tj. především portlanditem, hydratovanými křemičitany a hlinítky vápenatými), díky čemuž zdravý beton patří mezi materiály vysoce zásadité. Vysoký obsah hydroxidu vápenatého v betonu má z technického hlediska dva principiální důsledky, a to jednak skutečnost, že beton je citlivý vůči působení kyselých, resp. kyselinotvorných látek. Druhým z důsledků, který je z hlediska životnosti železobetonových konstrukcí pozitivní, je skutečnost, že vysoce zásadité prostředí je schopno účinně chránit (pasivovat) výztuž vůči korozi.

V důsledku působení vnějšího prostředí (především karbonatace, působení dalších kyselinotvorných látek, či jiných polutantů, působení vlhkosti a mrazu, resp. synergické působení těchto faktorů) pak dochází k postupnému poklesu zásaditosti betonu, a tím je snižována jeho schopnost pasivovat výztuž a chránit ji tak vůči korozi. Koroze výztuže je oxidačně-redukční proces, kdy atomární železo je kyslíkem a vlhkostí, které pronikají do struktury betonu, atakováno, přičemž produktem těchto reakcí jsou oxidy, resp. hydroxidy železnaté a zejména pak železité.

Z hlediska životnosti konstrukce je podstatný nejen fakt, že v důsledku koroze dochází k oslabování vlastního průřezu výztužného prutu, ale vznikající korozní produkty zvyšují objem původního výztužného prutu. Těmito objemovými změnami jsou ve struktuře betonu generovány expanzní tlaky, které přispívají k narušování krycích vrstev betonu resp. k jeho destrukci. Narušování krycí vrstvy betonu nad výztuží pak umožňuje dynamičtější přístup kyslíku a vlhkosti k výztuži, čímž je koroze výztuže dále urychlována.

Koroze výztuže může být dále akcelerována v případě, že do konstrukce pronikají další agresivní činitele jako například chloridy, sírany, negativně může působit rovněž výskyt bludných proudů.

Typické příklady koroze výztuže a poruch souvisejících s touto korozi jsou zachyceny na obr. 4 – 7.



Obr. 4 Pohled na spodní líc stropní desky, u které dochází k masivní korozi výztužných prutů. V tomto případě významnou roli sehrává nedostatečná tloušťka krycí vrstvy betonu nad výztuží.



Obr. 5 Pohled na masivně zkorodované výztužné pruty. Objemové změny souvisejí s jejich korozi, jsou příčinou destrukce krycí vrstvy betonu nad výztuží. Narušení krycí betonové vrstvy umožňuje dynamičtější působení kyslíku a vody na výztuž, což korozi výztuže výrazně urychluje.



Obr. 6 Pohled na lokalitu, ve které jsou výztužné pruty postiženy extrémní korozi, a masivně je degradován též beton tvořící krycí vrstvu nad výztuží. Na povrchu konstrukce jsou rovněž přítomny inkrustace (výluhy), které svědčí o dlouhodobém a intenzivním pronikání vody a agresivních látek stropní konstrukcí, což akceleruje korozi výztuže. Extrémní korozi je rovněž postiženo ocelové opláštění sloupu.



Obr. 7 V některých případech jsou na povrchu konstrukce patrné pouze stopy po pronikání oxidů resp. hydroxidů železitých. Za těchto okolností dosud nedochází k bezprostřednímu narušování krycí vrstvy, jednoznačně však probíhá koroze výztuže a z hlediska další životnosti konstrukce je vhodné přijmout adekvátní sanační opatření.

In situ se identifikují a popisují místa s projevem koroze. Vhodná je fotodokumentace těchto míst. Stav betonu, resp. míra degradace v kontextu jeho schopnosti účinně pasivovat výztuž vůči korozi je hodnocen provedením souborem fyzikálně chemických analýz (chemický rozbor, stanovení hodnoty pH betonu ve výluhu, event. jsou tato stanovení doplněna pomocí rentgenové difrakční analýzy) prováděných na vzorcích betonu odebraných z hodnocené konstrukce. Tato stanovení jsou předmětem Památkového postupu s názvem Stanovení materiálových charakteristik betonu ŽB konstrukcí na vzorcích odebraných z konstrukce. Vzorky mohou být odebírány například ve formě fragmentů vyřezávaných z hodnocené konstrukce úhlovou bruskou, jádrových vývrtů či ve formě prášku vynášeného při vrtání do konstrukce vidiovým vrtákem vhodného průměru. Vhodné je volit způsob odběru vzorků tak, aby bylo možno korektně stanovit stav betonu v závislosti na vzdálenosti od povrchu hodnoceného prvku. Hodnocen je jednak beton, který tvoří bezprostřední povrch konstrukce, ale především beton, který se nachází v těsné blízkosti výztuže. Podstatným aspektem, kterému je nutno věnovat pozornost, je též stanovení míry zasažení betonu chloridy, event. dalšími látkami, které mohou akcelarovat korozi výztuže.

Volba míst odběru vzorků a četnost jejich odběru by měly být v souladu s hodnotami, uvedenými v tabulce 2.

6. Výkvěty a výluhy na povrchu betonu

Jedním z typů poruchy, které se v některých případech vyskytují na povrchu železobetonových konstrukcí, je výskyt výkvětů solí. Nezbytnou podmínkou vzniku tohoto typu poruch je dlouhodobé pronikání vlhkosti konstrukcí.

Příčinou inkrustací na povrchu konstrukce pak může být například přítomnost rozpustných solí v okolní zemině, příp. v materiálech, které ke konstrukci přiléhají. Těmito rozpustnými solemi jsou nejčastěji sírany, chloridy, dusičnany apod. Pronikající vlhkostí jsou tyto soli rozpuštěny a ve formě roztoku v důsledku tepelně vlhkostního spádu jsou transportovány kapilárně pórovou strukturou betonu na povrch konstrukce, kde po odpaření vlhkosti dochází

k jejich opětovné krystalizaci. V případě, že ke vzniku těchto výkvětů dochází na povrchu konstrukce, má jejich vznik pouze estetický charakter. Za určitých podmínek ovšem dochází ke vzniku krystalických novotvarů přímo v kapilárně pórové struktuře vlastního betonu, eventuálně omítky, které tvoří povrchovou úpravu konstrukce. Dochází-li k masivní kumulaci krystalických novotvarů ve struktuře těchto materiálů, vznikají expanzní tlaky, které jsou příčinou porušování betonu, resp. jeho povrchové úpravy, obr. 8, 9.



Obr. 8 Pohled na lokalitu, ve které jsou pronikající vlhkostí na povrch stěny transportovány rozpustné soli, kde dochází k jejich krystalizaci.



Obr. 9 Krystalizace solí ve struktuře vnitřní hmoty betonu měla v tomto případě za následek destrukci povrchových vrstev stěny.

Další, a na základě empirických zkušeností lze konstatovat, že častější, jsou inkrusty na povrchu betonu. Tyto inkrusty vznikají postupným rozpouštěním a vymýváním rozpustné složky cementové matrice betonu pronikající vlhkostí, resp. vodou. Pronikající vlhkost z cementové matrice postupně rozpouští hydroxid vápenatý, který je ve formě roztoku transportován na povrch konstrukce, kde reaguje s oxidem uhličitým z atmosféry, přičemž produktem těchto reakcí je uhličitán vápenatý krystalizující ve formě kalcitu, event. vateritu či aragonitu. Vznikající inkrusty jsou tedy zcela dominantně tvořeny uhličitany vápenatými, případně mohou stopově obsahovat další látky (např. produkty koroze výztuže), což se projeví změnou jejich barevného odstínu. Nacházejí se ve formě velmi pevně lpících povlaků na povrchu svislých konstrukcí, obr. 10-13, na podhledech se vyskytují ve formě krápníků, obr. 14, 15.

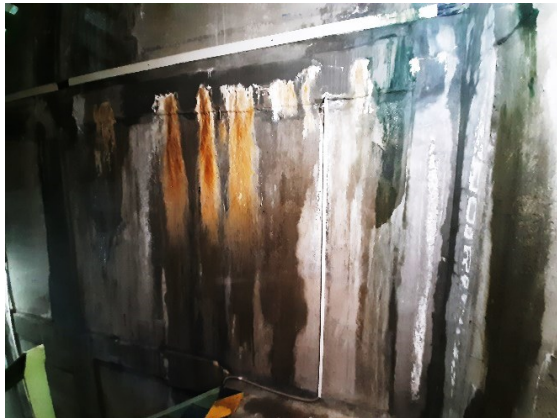
V obecné rovině lze konstatovat, že pokles mechanických vlastností v důsledku vymývání cementové matrice zpravidla není výrazný, tvorba inkrustací na povrchu ovšem svědčí o dlouhodobém pronikání vlhkosti konstrukcí, což je negativní zejména z hlediska koroze výztužné oceli a negativními důsledky s tím souvisejícími (úbytek průřezu, destrukce krycí vrstvy betonu atd.).



Obr. 10: Pohled na lokalitu, ve které v důsledku pronikání vody na spodním líci železobetonové stropní desky vznikají inkrustace uhličitanu vápenatého a dochází též k masivní korozi výztuže.



Obr. 11 Pohled na místa, ve kterých ve styku železobetonové stropní desky a stěny dochází k dlouhodobému pronikání vody, důsledkem čehož je intenzivní tvorba inkrustací uhličitanu vápenatého. V některých partiích jsou tyto inkrustace zbarveny oxidy železa.



Obr. 12 a 13 Pohled na místa, ve kterých dochází k dlouhodobému pronikání vody, a to především pracovní spárou v monolitickém betonu stěny. Masivní inkrustace uhličitanu vápenatého jsou lokálně zbarveny oxidy železa, což indikuje probíhající korozi výztužných prutů ve hmotě stěny.



Obr. 14 Pohled na spáru mezi železobetonovými stropními prefabrikáty, kde se v důsledku pronikání vlhkosti tvoří uhličitán vápenatý, který svým habitem připomíná krápníky (tzv. brčka).



Obr. 15 Pohled na místa, ve kterých v důsledku pronikání vlhkosti dochází k tvorbě inkrustací uhličitanu vápenatého, jak na spodním líci stropní desky (brčka), tak na stěně.

Pro posouzení příčin tvorby inkrustací na povrchu konstrukce se standardně postupuje tak, že je stanoveno chemické a zpravidla i mineralogické složení materiálu, který tyto výkvěty či inkrustace vytváří. Provádí se chemický rozbor, který je doplněn rentgenovou difrakční analýzou. Na základě zjištěných výsledků jsou pak realizována další stanovení, jejichž cílem je jednoznačně identifikovat zdroj solí, které výkvěty a inkrustace vytvářejí. Součástí diagnostických postupů, jejichž cílem je identifikovat a zejména pak klasifikovat vznikající produkty z hlediska životnosti stavby, je též stanovení distribuce vlhkosti v hodnocené konstrukci.

7. Oleje a ropné látky

V některých případech, a to zejména u průmyslových staveb, mohou být jejich jednotlivé konstrukční prvky vystaveny dlouhodobému působení ropných látek a olejů. Typickým příkladem jsou objekty, ve kterých byla, resp. je provozována strojní výroba. V důsledku havárií, event. úkapů z technologií pak oleje a ropné látky pronikají do struktury betonu. Většinou jsou takto postiženy podlahy, resp. stropní konstrukce, v některých případech jsou takto zasaženy i konstrukce svislé. Za určitých provozních podmínek mohou tyto látky vytvářet též aerosol, a mohou tedy pronikat do různých partií objektu, ve kterých je s nimi manipulováno.

Ropné látky, resp. oleje, patří mezi tzv. nepolární extrahovatelné látky, jejich dominantní chemickou bází jsou uhlovodíky, které se liší délkou řetězce. V případě nafty a lehkých topných olejů se délka uhlovodíkového řetězce pohybuje v intervalu $C_{10} - C_{20}$, mazací oleje jsou pak charakterizovány délkou řetězce $C_{20} - C_{35}$, těžké topné oleje pak mají délku řetězce $C_{35} - C_{80}$. Dále ropné látky obsahují také stopové množství sloučenin síry, vyšších mastných kyselin a dalších látek.

Z uvedeného je zřejmé, že ropné látky a oleje díky svému složení vůči betonu příliš agresivní nejsou, cementovou matici jako takovou degradují pouze při dlouhodobém působení a v omezené míře.

Negativní ovšem je, že ropné látky, resp. oleje, díky svému povrchovému napětí a smáčecímu úhlu velmi dobře pronikají kapilárně pórovou strukturou betonu. Mechanické vlastnosti betonu mohou být tedy snižovány tím, že ropné látky, resp. oleje, které pronikají do kontaktní zóny mezi cementovou maticí a zrny kameniva, snižují soudržnost betonu. Dalším aspektem pak je fakt, že průnik těchto látek do konstrukce může snižovat soudržnost betonu s výztuží, což je obzvláště negativní zejména u předpínaných konstrukcí, a to především u těch konstrukcí, u kterých je přenos předpětí zajišťován soudržností mezi předepnutými lany a betonem.

V obecné rovině lze konstatovat, že pronikání ropných látek, resp. olejů, únosnost železobetonových konstrukcí významným způsobem snižuje pouze v extrémních případech. Kontaminace betonu těmito látkami je negativní z hygienického hlediska a z hlediska estetického, obr. 16-19.



Obr. 16 a 17 Pohled na lokality na spodním líci stropní desky, ve kterých jsou patrné výrazné skvrny svědčící o masivním pronikání ropných látek přes celou tloušťku stropní desky.



Obr. 18 Pohled na část stropní konstrukce, ve které je pronikáním ropných látek zasažena nejen stropní deska, ale i stropní trám.



Obr. 19 Pohled na sondu provedenou do stropního trámu. Patrné je, že ropnými látkami je intenzivně zasažen nejen povrch trámu, ale i beton v okolí výztuže.

Zasažení betonu konstrukce ropnými, resp. olejovými látkami, se hodnotí vizuálně. Popíše se rozsah zasažení a pořídí se fotodokumentace současného stavu.

V technické praxi je zasažení betonu ropnými látkami, resp. oleji, problematické též v případě provádění oprav (sanací) takto postižených konstrukcí. V případě, že je původní beton kontaminován ropnými látkami, má tato skutečnost negativní vliv na soudržnost mezi betonem a správkovou maltou. V rámci oprav je tedy nezbytné důsledně ověřit, zda při úpravě povrchu byl ropnými produkty kontaminovaný beton odstraněn, resp. zda beton, na který má být správková malta nanášena již takto zasažen není. Z hlediska kvality a trvanlivosti prováděné sanace je jedním z klíčových faktorů adekvátní a dostatečná soudržnost (adheze) mezi původním betonem a nově aplikovanou vrstvou opravného betonu.

V případě, že není možno kontaminovaný beton zcela odstranit (např. vzhledem k riziku podstatného oslabení únosnosti či stability konstrukce), je nutno skutečnost zohlednit v rámci technologického postupu prováděné sanace. Jedním z možných řešení je například zajistit adekvátní spolupůsobení původního betonu a nově nanášeného správkového materiálu mechanickým kotvením pomocí kari sítí apod.

8. Působení biologických vlivů na železobetonové konstrukce

V mnoha případech jsou stavební, resp. železobetonové konstrukce, vystaveny působení biologických vlivů. Jednat se může nejen o působení mikroorganismů (např. bakterie či plísně), dále pak o působení blízkých příbuzných vyšších rostlin – řas, dále mechů či lišejníků, ale také o působení vyšších rostlin. Z hlediska provozovatele objektu, resp. z hlediska účinku biologických vlivů na životnost stavební konstrukce, lze působení biologických vlivů rozdělit do těchto kategorií:

- působení mikroorganismů
- působení nižších rostlin
- působení vyšších rostlin.

Působení mikroorganismů – mikroorganismy se vyskytují v nejrůznějších prostředích, tzn. jejich působení, jsou vystaveny konstrukce jak v interiéru, tak exteriéru.

Jednat se může například o plísně, což jsou mikroskopické vláknité houby. Za podmínek, které jsou pro růst příznivé (především zvýšená vlhkost) mohou plísně na povrchu konstrukce vytvářet povlak, tzv. nárůst, který je tvořen myceliem. Nárůsty mohou mít různé barvy dle druhu plísně, např. bílou, krémovou, žlutou, černou apod. Nárůsty plísní vytváří tedy na povrchu konstrukce estetické závady, které na vlastní technický stav konstrukce nemají bezprostřední vliv. Negativní ovšem je, že spory plísní mohou u lidí vyvolávat alergické reakce, některé druhy plísní pak mohou dokonce produkovat mykotoxiny, tedy látky, které jsou pro člověka toxické. Výskyt plísní na stavebních konstrukcích je tedy z hlediska hygienického jednoznačně nepřijatelný, obr. 20-23.



Obr. 20 Pohled na lokalitu, ve které je na omítce přítomný výrazný nárůst plísní. Výskyt plísní v obytných prostorech je z hygienického hlediska nepřijatelný.



Obr. 21 Nárůsty plísní se vyskytují zejména tam, kde konstrukce vykazuje zvýšenou vlhkost. V důsledku zvýšené vlhkosti v takto postižených lokalitách často dochází k dalším poruchám, jako je např. narušování povrchových úprav apod.



Obr. 22 a 23 Typickými lokalitami, ve kterých se plísně vyskytují, jsou špatně větraná místa (např. kouty a rohy), eventuálně místa, ve kterých je vlhkost stěn zvyšována např. únikem vody z instalací ap.

Zatímco plísně jsou na povrchu betonu dobře viditelné, bakterie viditelné nejsou, lze pozorovat jen výsledek jejich působení. Výsledek jejich působení na beton se projevuje vznikem bílých krystalů sádrovice a sekundárního ettringitu, které lze mnohdy pozorovat okem. Při masivním působení bakterií a vysokém obsahu bílkovin v odpadní vodě pak v konečném důsledku může dojít až k rozpadu povrchových vrstev betonu, obr. 24 a 25.



Obr. 24 a 25 Pohled na lokality, ve kterých v důsledku působení agresivních látek vznikajících činností bakterií došlo k degradaci a narušení povrchových vrstev betonových skruží, které tvoří šachty kanalizačních stok. Typickým projevem biodegradace je rozklad cementové matrice a odhalování zrn hrubé frakce kameniva.

Působení vyšších rostlin – do této skupiny lze zařadit například porosty řas, mechů, lišejníků a nálety bylin či dřevin. V obecné rovině lze konstatovat, že tyto rostliny životnost konstrukcí ovlivňují sekundárně, a to především tím, že zadržují vlhkost, řasy a lišejníky navíc produkují organické kyseliny. Zvýšená vlhkost pak způsobuje degradaci stavebních materiálů, a to zejména při synergickém působení mrazu. Negativním aspektem rovněž je, že kořenový systém rostlin může pronikat do trhlin a spár, a mechanicky tak konstrukci narušovat, obr. 26 a 27.



Obr. 26 a 27 Pohled na železobetonovou konstrukci (jedná se o ochoz tahového komína chladicí věže), na jejímž dně je patrný masivní výskyt mechů. V porostu mechů je zadržována vlhkost, která následně v synergii s působením mrazu vyvolává destrukci betonu. Patrná je rovněž masivní koroze výztužných prutů, příčinou této skutečnosti je především nízká tloušťka krycí vrstvy betonu nad těmito pruty.

Jak již bylo uvedeno, v důsledku agresivních látek produkovaných bakteriemi je jednoduše cementová matrice rozkládána, eventuálně v mikrostruktuře betonu vznikají korozní novotvary, které generují expanzí tlaky, jejichž důsledkem je pokles soudržnosti betonu.

Stav betonu se popíše vizuálním hodnocením. V některých případech, zejména u plísní a řas, je vhodné provést identifikaci biologického porostu, která slouží k rozhodnutí o způsobu odstranění těchto rostlin.

Při odběru mikrobiologického materiálu s povrchu betonu je nutno použít sterilní odběrové nářadí (skalpel, stěrová tyčinka apod.), kterými se vzorek odebere a vloží se do sterilní nádoby. Nádoby se vzorkem se pak předávají do specializované mikrobiologické laboratoře, která vzorky kultivuje a určí druh napadení (řasy, plísně, bakterie).

Míra poškození betonu se pak provede souborem fyzikálně chemických analýz (především chemický rozbor, stanovení mineralogického složení rentgenovou difrakční analýzou, stanovení pH ve výluhu, event. další analýzy) prováděných na vzorcích betonu odebraných z hodnocené konstrukce, viz Památkový postup Stanovení materiálových charakteristik betonu ŽB konstrukcí na vzorcích odebraných z konstrukce.

9. Přítomnost a stav povrchových úprav betonu (omítky, nátěry, vymývaný povrch)

V mnoha případech je povrch železobetonových konstrukcí upravován (např. pemrlování, vymývání apod.), eventuálně je povrch konstrukcí opatřen povrchovou úpravou (omítka, nátěr, povlakové fólie, keramické obklady atd.). Z uvedeného je zřejmé, že výčet úprav povrchu, resp. povrchových úprav, které byly v období, které je předmětem řešení (tj. 60. a 70. léta 20. století), je rozsáhlý a zahrnuje celou řadu materiálů.

Účelem úpravy povrchu (pemrlování apod.) je zlepšení vzhledu konstrukce, event. úprava jeho některých vlastností, jako například zvýšení protiskluznosti u schodišťových stupňů apod.

Povrchové úpravy jsou kromě estetického hlediska schopny podstatným způsobem zvýšit životnost konstrukce tím, že omezují účinky vnějšího prostředí, a tak konstrukci chrání. V obecné rovině lze konstatovat, že z hlediska estetické a ochranné funkce povrchové úpravy jsou podstatné především tyto skutečnosti:

- Povrchová úprava je v ploše povrchu konstrukce kompaktní. V rámci šetření „in situ“ je v tomto kontextu sledována především přítomnost trhlin a jejich rozevření, výskyt puchýrků či jiných defektů atd.,
- Povrchová úprava je adekvátně soudržná s podkladem. V rámci šetření „in situ“ je soudržnost povrchové úpravy s podkladem hodnocena semidestruktivními, event. destruktivními zkouškami.

Při hodnocení stavu povrchových úprav jsou zkoušky na nich prováděné primárně zaměřeny na stanovení těchto parametrů. Metodické postupy, které jsou standardně používány v rámci hodnocení stavu povrchových úprav, jsou pak popsány v následujícím textu.

Působením vnějších vlivů jsou užité vlastnosti povrchových úprav pochopitelně snižovány a dochází k rozvoji defektů. V obecné rovině lze konstatovat, že dynamičtější jsou namáhány povrchové úpravy v exteriérech (působení klimatických podmínek, zejména pak synergické působení vlhkosti a mrazu, působení agresivních látek z atmosféry atd.), výjimkou pak jsou objekty, v jejichž interiéru se nachází technologie pracující s agresivními chemikáliemi apod.

S ohledem na časové období, které je tématem tohoto projektu (tj. 60. a 70. léta 20. století) lze konstatovat, že v tomto období byly používány především omítky s anorganickou matricí, tj. omítky vápenné, vápenocementové a omítky cementové. V případě omítek cementových byla v některých případech aplikována technologie tzv. „pálených“ omítek, kdy do povrchových vrstev omítky je při jejich finalizaci aplikován cement.

Nátěry, které jsou používány pro finalizaci povrchu a ochranu železobetonových konstrukcí lze dle jejich materiálové báze rozdělit na nátěry na anorganické (většinou silikátové) bázi a nátěry polymerní. Příklady narušených povrchových úprav jsou zachyceny na 28 a 29.



Obr. 28 Pohled na lokalitu, ve které je narušen nejen nátěr, ale dochází i postupné destrukci omítky. Dominantní příčinou destrukce materiálů je v tomto případě synergické působení vlhkosti a mrazu.



Obr. 29 Pohled na výrazně narušenou omítku. Příčinou narušení je v tomto případě dlouhodobé pronikání vlhkosti, cyklické působení mrazu a působení agresivních látek z vnějšího prostředí (karbonatace).

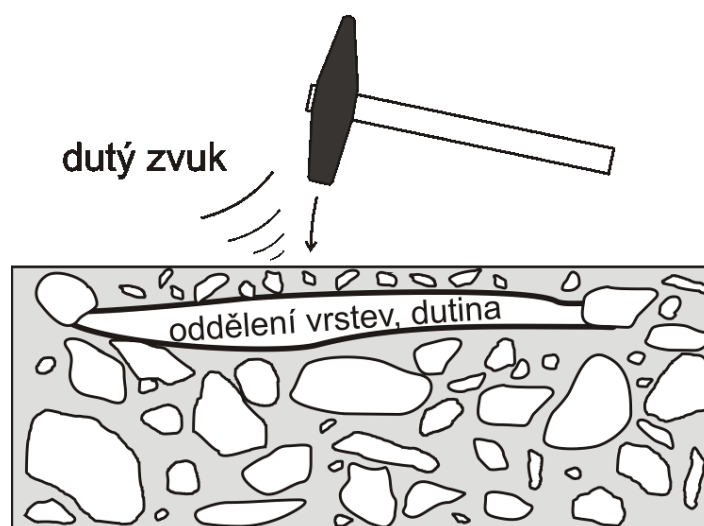
Pro ověření stavu omítek je vhodné provést vizuální posouzení doplněné akustickým trasováním, a stanovení jejich soudržnosti s podkladem, případně lze posoudit i vodotěsnost povrchové úpravy.

Pro nátěry je vhodné provedení vizuální prohlídky, stanovení tloušťky, kontrola nátěru mřížkovou zkouškou a stanovení soudržnosti s podkladem.

10. Vizuální kontrola a akustické trasování

Při vizuální prohlídce, doplněné akustickým trasováním, se celoplošně sleduje přítomnost vad a poruch, například narušení povrchových vrstev betonu a případné povrchové úpravy, zaznamená se i případný výskyt barevně odlišných míst, které mohou být způsobeny působením agresivních látek apod. U vyztužených konstrukcí se zaznamená i případný výskyt obnažené výztuže či projevu její koroze. Získané poznatky se dokumentují záznamem defektních míst do schématu a zaznamenají fotograficky [14, 15].

Podstata akustického trasování spočívá v posunu ocelové kuličky trasovače (lze využít i lehkého poklepu kladivem, obr. 30) po povrchu hodnocené konstrukce. V místě narušení materiálu konstrukce (narušená povrchová vrstva betonu, narušená povrchová úprava betonu apod.) je zvuk při trasování dutý. Samotný trasovač sestává z kovové tyče (může být i teleskopická pro možnost změny délky dle aktuální potřeby a pro snadnější transport) o délce cca 1,5 m, která je na konci osazena ocelovou kuličkou o průměru cca 30 mm.



Obr. 30 Princip zjištění podpovrchových dutin akustickým trasováním **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

11. Vodotěsnost povrchové úpravy

Toto stanovení je prováděno dle normy ČSN 73 2578 [16]. Podstatou zkoušky je změření množství vody, která prosákne povrchovou úpravou během stanovené doby. Pro zkoušku se na povrchové úpravě vybere místo o rozměrech alespoň 100 x 100 mm, které je rovné, bez větších výstupků a prohlubní, které by bránily dokonalému utěsnění zkušební nádobky na povrch zkoušené konstrukce a které neobsahuje dutiny a kaverny. Na toto místo se vhodným způsobem připevní zkušební nádobka (zvon) o průměru cca 60 mm tak, aby došlo k jejímu utěsnění na zkoušené konstrukci, obr. 31. Byreta je opatřena stupnicí o rozsahu 10 ml, s dělením po 0,1 ml, a je takové délky, aby počáteční hladina vody (tj. nulová značka na stupnici na byretě) pro měření byla ve výši 200 mm nad zkoušeným povrchem, obr. 31. Po utěsnění na zkoušeném povrchu se nádobka s byretou naplní vodou po značku 0 na byretě. Po naplnění se čeká 5 minut

a pak se voda znovu doplní po značce 0 na byretě. Tento okamžik je počátkem měření. Po 30 minutách se odečte hladina vody v byretě s přesností na 0,1 ml.

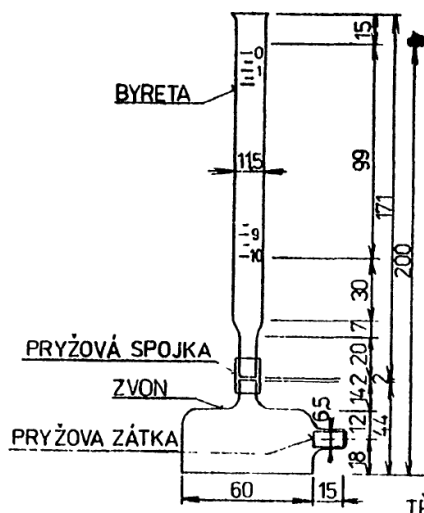
Vodotěsnost V_{30} povrchové vrstvy po 30 minutách se stanoví podle vztahu:

$$V_{30} = \frac{\Delta l}{A} \quad (1)$$

kde V_{30} je vodotěsnost po 30 minutách, v l/m^2

Δl je úbytek vody po 30 minutách, v litrech

A je smáčená plocha, v m^2



Obr. 31 Zařízení pro stanovení vodotěsnosti povrchové vrstvy **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

12. Kontrola nátěru mřížkovou zkouškou

Mřížková zkouška se provádí podle ČSN ISO 2409 [17]. Do nátěru se provede řezacím nástrojem pás šesti řezů, které jdou až na podklad, a v pravém úhlu se provede další pás šesti řezů, takže vznikne mřížka s 25 políčky (mřížkový řez).

Pozorováním mřížky a srovnáním s obrázkem a popisy vyhodnocovací tabulky 3 se stanoví klasifikace mřížkového řezu daného nátěru.

13. Tloušťka nátěru

Stanovení tloušťky nátěru (vrstvy) se provádí vhodným řezným přístrojem dle ČSN EN ISO 2808 [18] **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, např. přístrojem ERICHSEN P.I.G. 455. Principem měření tloušťky nátěru je zjištění šířky vodorovného průmětu šikmého řezu. Tloušťka nátěru D se vypočte ze vzorce:

$$D = S * tg(\alpha) \quad (2)$$

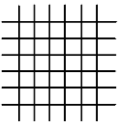
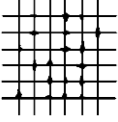
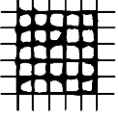
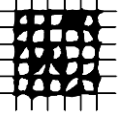
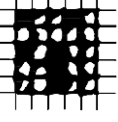
kde:

D – tloušťka nátěru, μm

S – měřená velikost vodorovného průmětu šikmého řezu, μm

α – úhel šikmého řezu vůči podkladu, úhlové stupně $^\circ$.

Tab. 3 Klasifikace zkušebních výsledků mřížkové zkoušky

Klasifikace	Popis	Vzhled
0	Řezy jsou zcela hladké, žádný čtverec mřížky není odloupen.	
1	Nepatrná poškození v místech, kde se řezy kříží. Poškozená plocha nesmí přesahovat 5 % plochy mřížky.	
2	Nátěr odloupen podél řezů a v místech jejich křížení. Zasažená plocha převyšuje 5 %, ale není větší než 15 % plochy mřížky.	
3	Nátěr je částečně nebo zcela odloupen ve velkých pásech podél hran řezů a/nebo částečně nebo zcela odloupen na různých částech čtverců. Poškození je větší než 15 %, ale není větší než 35 % plochy mřížky.	
4	Nátěr je odloupen ve velkých pásech podél hran řezů a/nebo se některé čtverce částečně nebo zcela odlouply. Poškození je větší než 35 %, ale není větší než 65 % plochy mřížky.	
5	Změny, které jsou větší než u stupně 4.	---

Úhel α je dán použitým řezným nástrojem, který se volí podle tloušťky nátěru. Tímto nástrojem je dán i měřicí rozsah a přesnost měření. Na nátěru se na vhodném místě (hladký podklad) kontrastní barvou vyznačí měřené místo. Řezným nástrojem se provede krátký řez tak, aby částečně zasahoval i do podkladu. Pomocí stupnice mikroskopu se odečte šířka vodorovného průmětu S a stanoví se tloušťka vrstvy nátěru D .

Skutečná hodnota tloušťky nátěru se získá vynásobením zjištěných dílků na stupnici mikroskopu koeficientem zohledňující úhel řezu nástroje. Tloušťka nátěru D se udává v μm .

14. Přídržnost povrchové úpravy a pevnost v tahu povrchových vrstev betonu

Přídržnost se stanovuje jako hodnota pevnosti v prostém tahu souvrství, namáhaného kolmo k ideální styčné spáře mezi podkladním betonem a zkoušenou povrchovou úpravou [19, 20].

Zkušební terče se lepí vhodným lepidlem, například lze použít epoxidovou nebo metylmetakrylátovou pryskyřici. Pro vlastní stanovení síly, nutné k porušení souvrství, se použije vhodný přístroj, například Dyna Z16.

Hodnota přídržnosti B se stanoví s přesností na $0,1 \text{ N/mm}^2$ dle vztahu:

$$B = \frac{F}{A} \quad (3)$$

kde B je přídržnost v N/mm²

F je zatížení vynaložené při porušení v N

A je zkušební plocha v mm².

V případě stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu se jedná prakticky o shodnou zkoušku s přídržností, pouze s tím rozdílem, že se zkouší pouze vlastní beton bez dalších souvrství. Zkouška se provádí zejména pro zjištění kvality podkladu v případě, že se má např. nanést nová sanační vrstva. Ukázka provedení zkoušky na jednom zkušebním místě (vždy osazeny 3 terče) je uvedena na obr. 32.



Obr. 32 Provádění zkoušky pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu pomocí přístroje DYNA DY-216.

15. Stanovení pevnosti betonu tvrdoměrnou metodou

Tvrdoměrné zkoušení betonu je zřejmě nejpoužívanější nedestruktivní metodou pro stanovení pevnosti v tlaku betonu v konstrukci. V současnosti se používá téměř výhradně metoda odrazových tvrdoměrů typu Schmidt N, L – viz obr. 33, vyhodnocení se provádí podle normy ČSN 73 1373 [21]. Metoda je však výhodná spíše u nových konstrukcí, u nichž není nutné brousit povrch betonu.

V případě historických konstrukcí libovolného stáří však má tato metoda omezení, která mírně mění její nedestruktivní charakter, a to především:

- Je zapotřebí odstranit povrchové vrstvy – např. omítku.
- Je nutné vybrousit povrch betonu tak, aby byla viditelná jeho struktura (kamenivo, tmel).
- Pokud se na vybroušené ploše zjistí karbonatce betonu, pak je nutné obrousit větší vrstvu, což je však efektivní maximálně do hloubky 10 mm. Při zkoušení na zkarbonatovaném betonu jsou dosažené výsledky pouze hrubě informativní.

- Pro upřesnění výsledků zkoušek je zapotřebí odebrat alespoň minimální počet jádrových vývrtů, tedy 9 vzorků betonu, při menším objemu konstrukce stačí odebrat 3 nebo 6 vývrtů.



Obr. 33 Stanovení pevnosti v tlaku betonu odrazovým tvrdoměrem Schmidt N. Povrch betonu je nutné obrousit, aby byla viditelná struktura betonu. Fialová barva je způsobena reakcí fenolftaleinu (test karbonatace).

Z uvedených podmínek je zřejmé, že tvrdoměrné zkoušení betonu není vhodné provádět samostatně v rámci prvotního nedestruktivního ohledání konstrukce, neboť chyba stanovení pevnosti v tlaku může být příliš velká (u starších konstrukcí obvykle silně nadhodnocuje pevnosti v tlaku). Tato metoda je vhodná až v rámci podrobného průzkumu spolu s jádrovými vývrti, s vyhodnocením podle normy ČSN 73 2011 [22]. Pro předběžný odhad pevnosti v tlaku je tak u historických konstrukcí vhodnější metoda ultrazvuková, zejména pro svůj zcela nedestruktivní charakter a také pro svoji schopnost odhalit poruchy uvnitř struktury betonu.

16. Zjišťování vlastností betonu pomocí ultrazvukové metody

Ve stavebnictví se používá ultrazvukové (UZ) impulzová metoda založená na opakovaném vysílání ultrazvukových impulzů (obvykle s frekvencí v rozmezí od 20 kHz do 500 kHz) do zkoušeného materiálu a zjištění rychlosti šíření impulzů ultrazvukového vlnění. Tato rychlost je liší podle druhu materiálu a jeho kvality – např. u kvalitního betonu je impulzová rychlost UZ vlnění vyšší než u betonu méně kvalitního. Zjištění rychlosti impulsu se může využít pro stanovení:

- Rovnoměrnosti betonu.
- Fyzikálně mechanických vlastností (modul pružnosti, pevnost v tlaku).
- změn vlastností v čase (např. vlivem degradace, vlivem zatížení)
- Přítomnosti trhlin, delaminací, kaveren, apod.

Vyhodnocení ultrazvukového měření se provádí podle ČSN 73 1371 [23]. U historických betonových konstrukcí je metoda zvláště vhodná díky svému čistě nedestruktivnímu charakteru. Díky prozvučení celého profilu betonového prvku lze získat lepší obraz o rovnoměrnosti či vrstevnatosti betonu a rovněž odhalit kritická místa konstrukce. Základní veličinou je rychlost šíření impulsu UZ vlnění, vypočtená ze vztahu:

$$v_i = \frac{L_i}{T_i - T_o} \quad (4)$$

kde v_i je rychlost šíření ultrazvuku v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

L_i je délka měřicí základny (bere se patřičný rozměr) v m

T_i je doba průchodu měřená přístrojem v s

T_o je mrtvý čas v s

i je číslo základny (1, 2, 3).

Tato rychlost se stanoví na každém měřicím místě. Moderní přístroje jako např. Pundit PL 200, obr. 34, mají možnost korekce mrtvého času a určují tak rychlost šíření UZ vlnění přímo, s možností plošného skenování konstrukce nebo prvku, obr. 35.



Obr. 34 Ultrazvukové měření (přímé prozvučování) na železobetonovém sloupu v budově nádraží Ostrava - Vítkovice.



Obr. 35 Zobrazení mapy rychlostí šíření UZ impulzů v celé ploše zkoušeného železobetonového sloupu.

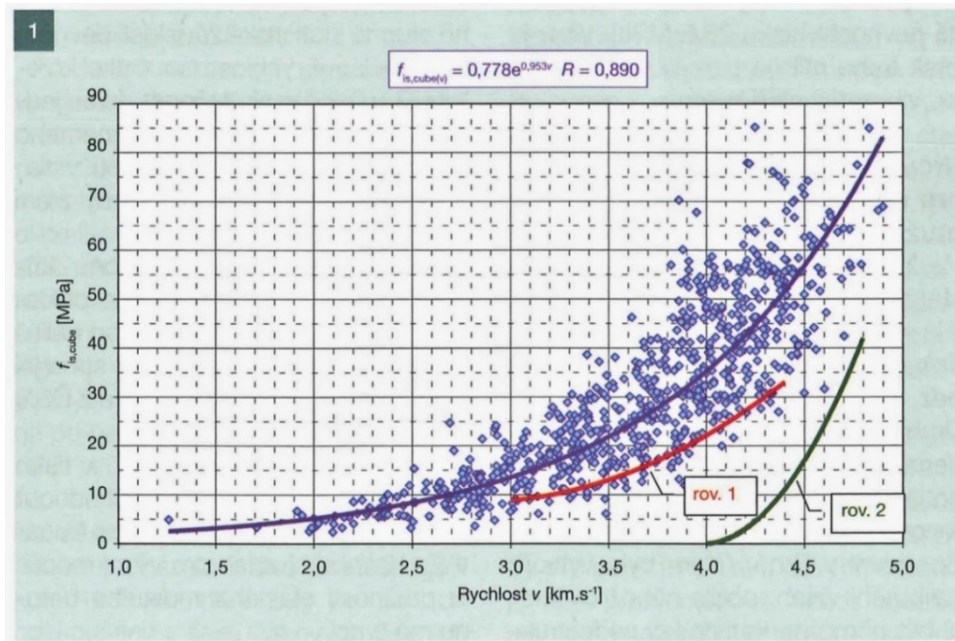
Vztahy mezi rychlostí šíření impulsu a pevností v tlaku se mohou lišit podle konkrétního složení betonu, a proto se u neznámého betonu jedná pouze o odhad pevnosti v tlaku. Přesto lze pevnost v tlaku z rychlosti šíření ultrazvuku stanovit, např. podle směrného vztahu uvedeného v [24] – viz obr. 36. Pro upřesnění tohoto směrného vztahu je však nutné provést jeho upřesnění alespoň na minimálním počtu jádrových vývrtů podle ČSN 73 2011 [22].

Ultrazvukovou metodu lze úspěšně využít i pro identifikaci poruch uvnitř struktury betonu. Mikrotrhliny způsobené přetížením betonu způsobují zpomalení šíření impulzů UZ vlnění, což se projeví jednak na nižší naměřené rychlosti, jednak na výrazném snížení amplitudy přicházejícího signálu.

Jako příklad využití ultrazvukové metody pro diagnostiku poruch lze uvést měření prováděné na sloupech památkově chráněného objektu z let 1960-61, kdy při nadstavbě garáží došlo k poškození jednoho ze sloupů od přetížení. Ostatní sloupy byly prozvučovány ultrazvukem přímým způsobem v deseti výškových úrovních (obr. 37, 38). O ultrazvukovém měření lze říci, že s rostoucí kvalitou betonu roste i rychlost šíření ultrazvukových impulzů. U kvalitních betonů se rychlost většinou pohybuje od 4000 m/s do 4500 m/s, u horších nebo porušených betonů klesá. Pokud klesne pod 3000 m/s, pak se jedná o beton horší než špatný, tedy velmi špatný, s orientační pevností v tlaku nižší než 10 MPa [25].

Graficky zpracované výsledky ultrazvukového měření na vybraném sloupu jsou uvedeny na obr. 5. Povrchový graf je vyladěn do odstínů dvou barev – modré pro rychlost šíření vyšší než 3000 m/s (beton přibližně odpovídající původní deklaraci B 170) a červené pro rychlost šíření nižší než 3000 m/s (beton velmi špatné kvality a/nebo výrazně porušený mikrotrhlinami až

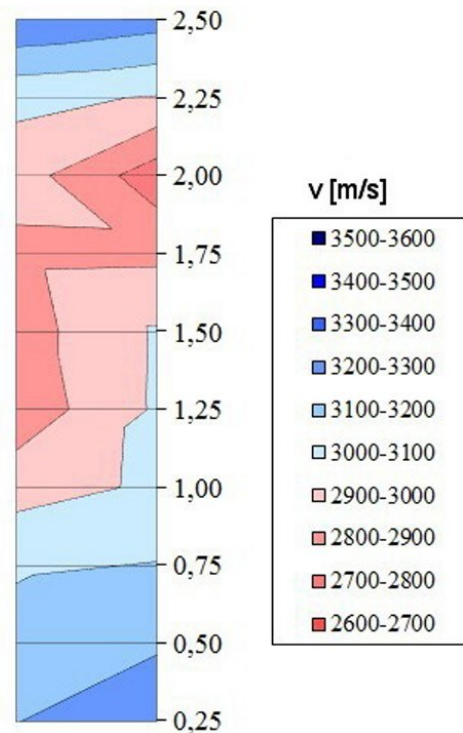
trhlinami). Po důkladné prohlídce byly v místě poklesu rychlosti UZ vlnění objeveny svislé trhliny i na povrchu betonu.



Obr. 36 Vztah pro pevnost v tlaku in situ z rychlosti šíření ultrazvukového vlnění [24]



Obr. 37 Sloup v suterénu památkově chráněného objektu z let 1960-61, na první pohled nejsou patrné žádné poruchy.



Obr. 38 Výsledky ultrazvukových měření na sloupu z foto 31, ultrazvuk odhalil v horní části sloupu porušení betonu od přetížení [25].

17. Nedestruktivní zkoušky polohy výztuže

Nedílnou součástí stanovení materiálových charakteristik železobetonové konstrukce je i stanovení vyztužení jednotlivých klíčových částí železobetonové konstrukce. Stanovení vyztužení slouží primárně jako podklad pro statické posouzení konstrukce, jejích částí či jednotlivých prvků, současně je nezbytným podkladem pro provádění dalších zkoušek, například volby místa a průměru jádrových vývrtů pro odběr vzorků pro stanovení pevnosti betonu v tlaku.

Výsledkem stanovení vyztužení je pak v konkrétním průřezu železobetonového prvku stanovení počtu výztužných prutů, jejich přesné polohy, průměry jednotlivých prutů, koroze výztuže a v neposlední řadě určení typu výztuže – třídy oceli (vzhledem k faktu, že železobetonové stavitelství pracovalo v daném historickém období s celou řadou typů výztuže, výrazně se lišících mechanickými vlastnostmi, zejména mezi kluzu a pevností v tahu).

Principiálně existují 4 metody pro stanovení požadovaných aspektů vyztužení:

- lokální sekané sondy
- metoda elektromagnetických indikátorů
- metoda georadaru
- radiografie.

Každá z výše uvedených metod má jistá omezení, daná užitým fyzikálním principem a lokálními podmínkami v daném místě konstrukce.

17.1 Lokální sondy

Metoda sekaných sond je založena na odstranění krycí vrstvy betonu a následně na vizuálním posouzení obnažených výztužných vložek. Velkým omezením uvedené metody je destruktivní stránka – porušení povrchové vrstvy betonu až na úroveň polohy výztuže, a v důsledku velké riziko chyby v podobě neodhalení veškeré výztuže v daném průřezu (v případech několika vrstev výztuže či velkého krytí). Proto je možné doporučit metodu jen jako nezbytný doplněk sofistikovanějších metod, v podobě cílené lokální sondy ke konkrétním prutům výztuže stanoveným jinými metodami, s cílem ověření průměru, třídy oceli a koroze výztuže.

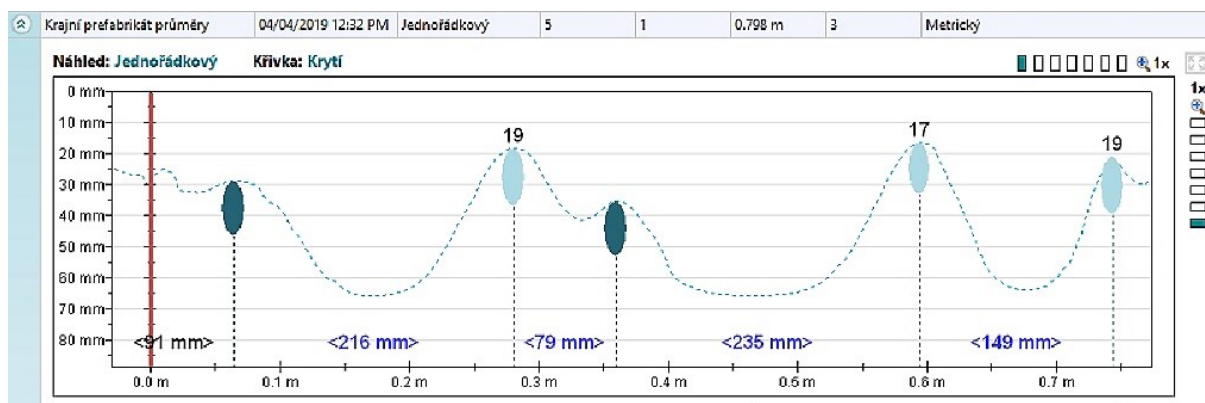
17.2 Metoda elektromagnetických indikátorů

Jednou z nedestruktivních metod používaných ve stavební praxi je metoda elektromagnetických indikátorů výztuže, popsána v ČSN 73 2011 [22].

Elektromagnetické indikátory jsou obecně založeny, jak napovídá název, na elektromagnetickém principu. Sonda přístroje obsahuje jednu, nebo několik cívek, buzených časově proměnným elektrickým proudem. Tyto cívky generují elektromagnetické pole, které proniká ke kovovému (hledanému) cíli. Primární pole je hledaným cílem deformováno, a vytváří tak sekundární elektromagnetické pole, které působí na přijímací cívku sondy a indukuje v ní elektrické napětí, které je dále zpracováno a vyhodnoceno. Tato metoda se neustále poměrně dynamicky vyvíjí, a sortiment a úroveň nabízených přístrojů se zvyšuje. V současnosti nabízené přístroje se liší úrovní získaných dat a rozdílnými možnostmi na úrovni hloubkového dosahu, rozlišitelnosti jednotlivých výztuží v závislosti na hloubce a vzájemné vzdálenosti. Pouze nejvyšší třída zařízení, zejména přístroje poslední generace umožňuje i stanovení průměru výztuže, ovšem za optimálních podmínek, daných vzájemnou polohou sousedních výztuží. [26].

Starší typy přístrojů dokázaly identifikovat magnetické kovy do hloubky přibližně 60 mm (v závislosti na velikosti prvku). U novějších přístrojů, se značně zvětšil dosah, běžně lze nalézt ocelovou výztuž ve výjimečných případech až v hloubce 220 mm. Poslední generace zařízení

nabízí i grafický výstup se záznamem jednotlivých detekovaných výztuží, jejich roztečí a hloubkou (krytím). Příklad výstupu přístroje poslední generace je uveden na obr. 39. Měření zaznamenalo na spodním líci průvlaku uprostřed rozpětí 5 výztuží, u výztuží blíže povrchu bylo možné určit jejich průměr (skutečný průměr je 18 mm – odchylky jsou dány natočením žebírek jednotlivých prutů), sonda zaznamenala i rozteče a krytí jednotlivých výztuží.



Obr. 39 Příklad výstupu měření přístroje poslední generace elektromagnetických indikátorů (Proceq PM-630).

Metoda indikátorů výztuže má jistá omezení. Lze ji s různou mírou úspěšnosti použít pro zjištění následujících skutečností:

- Stanovení, zda se jedná o beton prostý nebo vyztužený.
- Stanovení přesné polohy výztuže, tj. zjištění přesného rozmístění výztužných vložek v železobetonovém prvku. V případě větší vrstvy překrytí výztuže betonem nejsou schopny některé přístroje rozeznat počet prutů.
- Stanovení krytí výztužné vložky. U starších přístrojů, pokud je znám průměr výztuže a přesné rozmístění jednotlivých vložek, lze pomocí korekcí zjištěných měření na modelu konstrukce určit krytí výztuže velmi přesně (± 1 mm až do hloubky 50 mm). Poslední generace přístrojů podobnou podpurnou korekci nepotřebují.
- Stanovení průměru výztužné vložky. Moderní přístroje jsou schopny za podmínek stanovených výrobcem zjistit poměrně přesně průměr výztuže zcela nedestruktivním způsobem. Úspěšnost stoupá s klesajícím krytím a zvětšující se vzdáleností mezi jednotlivými pruty. Je třeba dodržet minimální vzdálenost prutů v podélném i příčném směru, což je ovšem v praxi obtížné. Pokud je vzdálenost prutů menší než předepsaná, pak sice přístroj změří průměr, ovšem s určitým zkreslením (při malé vzdálenosti prutů nelze průměr změřit vůbec).

Postup měření na konstrukci spočívá nejčastěji v provedení řady liniových pojezdů sondou po povrchu konstrukce a zaznamenání polohy výztuží v jednotlivých liniích. Linie jsou voleny na základě odhadu průběhu vyztužení, na základě obecného principu vyztužování jednotlivých prvků železobetonové konstrukce.

17.3 Metoda georadaru

Georadar (v anglofonní oblasti GPR – ground penetrating radar) je metoda založená na principu vysílání vysokofrekvenčních elektromagnetických pulzů (frekvence řádově stovky MHz až jednotky GHz) do zkoumaného prostředí a na následné registraci jejich odrazů od překážek. Dosah georadaru dle prostředí a volby vysílací frekvence činí až 15 (20) m. Obecně platí, že vyšší frekvence umožňují stanovit polohu menších cílů, ale jen v omezené hloubce. Metoda je

dnes již standardně využívaná k lokalizaci nehomogenit v zemním prostředí (archeologické průzkumy, vyhledávání polohy potrubí apod.), dále k lokalizaci dutin za stěnami a ostěním tunelů, chodeb a stok [27].

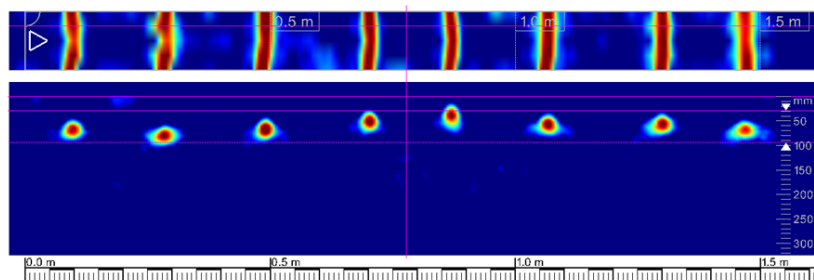
Teprve v posledních letech se tato progresivní metoda rozšířila v oblasti nedestruktivních průzkumů železobetonových konstrukcí, v souvislosti se zavedením sond, které jsou volbou pracovní frekvence a díky přiloženému software přímo určeny pro diagnostiku železobetonu.

Pohybem koleček vozíku sondy je detekován a zaznamenáván její pohyb po povrchu konstrukce. Připojený software poté přímo vytváří na monitoru jak sondy, tak později v počítači nebo dodaném monitoru, přímo vykreslení polohy zachycených objektů, a to buď jako 2D zobrazení (půdorys skenované plochy + řezy ve dvou, na sebe kolmých rovinách), nebo přímo 3D zobrazení skladby zjištěných objektů ve zkoumané části konstrukce).

V současnosti dostupné sondy umožňují provádět stanovení polohy výztuže do hloubky 300 mm (u multifrekvenční sondy Proceq do 700 mm), a to v liniovém režimu měření, podobně jako u elektromagnetických indikátorů, nebo v plošném režimu měření, která spočívá v provedení řady liniových pojezdů ve dvou na sebe kolmých směrech dle přednastaveného rastru. Výsledkem je liniové, plošné, či 3D zobrazení polohy výztuží.

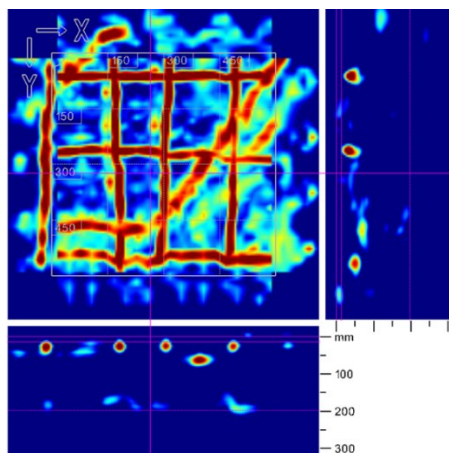
Je potřeba mít na paměti, že přesnost hloubkového měření je závislá na relativní permitivitě betonu – může se měnit např. s vlhkostí. Demonstrační příklady výstupů jsou uvedeny na obr. 40 až 42.

Příklad liniového skenu provedeného po obvodu kruhového sloupu je znázorněn na obr. 40. Na radarogramu jsou patrné hlavní nosné výztuže; u všech výztuží je možno přesně určit krytí.



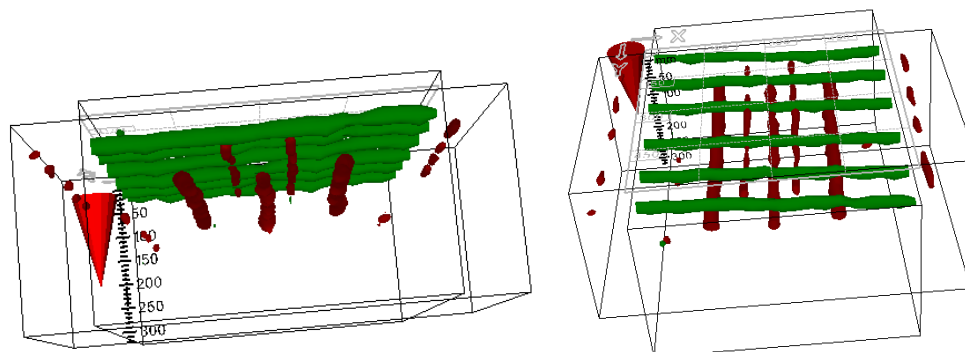
Obr. 40 Příklad liniového skenu (sonda Hilti PS1000)

Na obr. 41 je příklad plošného skenu provedeného z bočního líce železobetonového trámu. Na radarogramu jsou patrné hlavní nosné výztuže i jejich smykové ohyby, dále třmínky i konstrukční výztuž; u všech výztuží je možno přesně určení krytí.



Obr. 41 Příklad plošného skenu (sonda Hilti PS1000)

Jiný příklad plošného skenu provedeného ze spodního líce nosníku, obr. 42, je v tomto v provedení v řadě případů názornější, pro posouzení polohy výztuží.

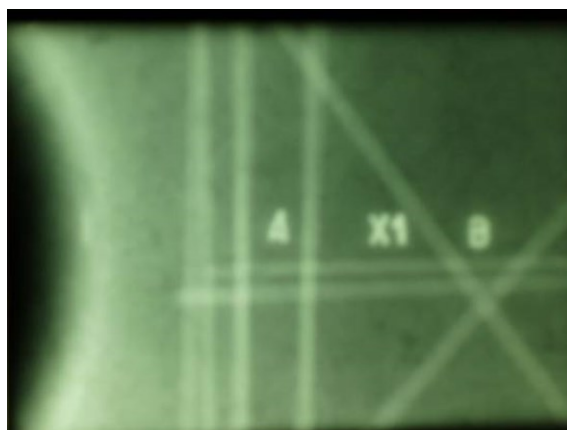


Obr. 42 Příklad provedení plošného skenu (sonda Hilti PS1000) jiným způsobem

Výsledkem radarového měření je pouze poloha výztuží, ostatní aspekty je třeba stanovit jinými metodami. U vyztužených betonů běžné vlhkosti měří přístroje v základním nastavení poměrně přesně i krytí. V případě nevyztužených, či vlhkých betonů je vhodné pomocí sekané sondy či elektromagnetického indikátoru zpřesnit krytí, a následně v radarové sondě změnit nastavení (dokalibrovat) – příčinou je závislost měření krytí na relativní permitivitě betonu.

17. 4 Radiografická metoda

Radiografická metoda je založena na specifických vlastnostech záření gama, které je absorbováno a rozptýlováno prostředím, kterým prochází. Míra zeslabení při stejné energii záření je závislá na prozařované tloušťce a na objemové hmotnosti materiálu. V technické praxi jde tedy o metodu, která umožňuje zobrazení vnitřních nehomogenit v materiálech a prvcích konstrukcí zcela bez porušení. V případě železobetonu je záření zeslabováno výrazněji ocelovou výztuží, nežli betonem. Míra zeslabení je zachycována na radiografickém filmu, nebo alternativním elektronickém záznamovém zařízení (např. tzv. paměťová folie), na kterém je následně zobrazena vnitřní struktura prozářené části. U železobetonu se rozložení výztuže projevuje světlejšími stopami nižšího zčernání, jako důsledek průmětu výztuže na záznamové zařízení. Jako zdroj záření pro radiografii železobetonu se užívá prakticky výhradně gamazářič Co60 o vhodné aktivitě (kolem 1 TBq) [26]. Radiografický záznam vyztuženého betonu je uveden na obr. 43. Na obrázku jsou dobře patrné jednotlivé výztuže, i olověné značky umístěné na povrch konstrukce pro pozdější vyhodnocení.



Obr. 43 Příklad radiogramu vyztužení železobetonového vazníku v blízkosti kruhového otvoru.

Při využití tzv. stereometrického prozařování, kdy tentýž prvek je prozařován ze dvou, či více různých ohnisek, je následně možné stanovit zcela přesně i průměr výztuže, v některých případech i tvar povrchových úprav, a tím i třídu oceli, a to zcela nedestruktivním způsobem.

Zásadní problém metody spočívá v tom, že využívá významný zdroj ionizujícího záření, což je, zejména v městských aglomeracích velmi obtížné, či neproveditelné, v závislosti na zpříšňujících se bezpečnostních předpisech pro práci s významnými zdroji ionizujícího záření. Z těchto důvodů, je v současnosti radiografie masivních železobetonových konstrukcí v České republice momentálně nedostupná. Tento stav se může v budoucnu pochopitelně změnit.

Náhradou může být radiografie, kde jako zdroj záření se použije technický rentgen. Tato metoda je ale využitelná jen u tenkostěnných železobetonových prvků (do tloušťky cca 150 mm), a tudíž využitelná jen v některých případech.

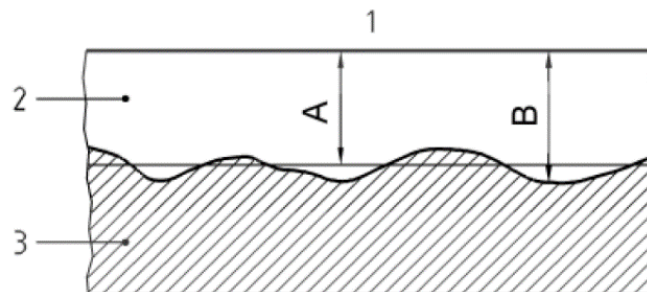
Závěrem lze konstatovat, že pro stanovení polohy, průměru a typu výztuže, případně možnosti zjištění jejího korozního stavu je ideální použít kombinaci výše uvedených metod v následujícím pořadí a rozsahu:

1. Stanovení rozložení výztuže v prvku pomocí **georadaru**, zjištění případných anomálií ve vyztužení, nepravidelností a podobně.
2. Následně ve vhodných vytipovaných místech užít k určení průměru a zpřesnění krytí výztuží **elektromagnetický indikátor**.
3. V poslední fázi, je-li to možné cílenou **lokální sekanou sondou** stanovit třídu oceli, zpřesnit průměr či stanovit přítomnost koroze.
4. V odůvodněném případě je možné všechny předchozí body nahradit provedením radiografie (pokud je k dispozici), která poskytne prakticky všechny požadované aspekty, s výjimkou detekce koroze.

18. Fenolftaleinová zkouška

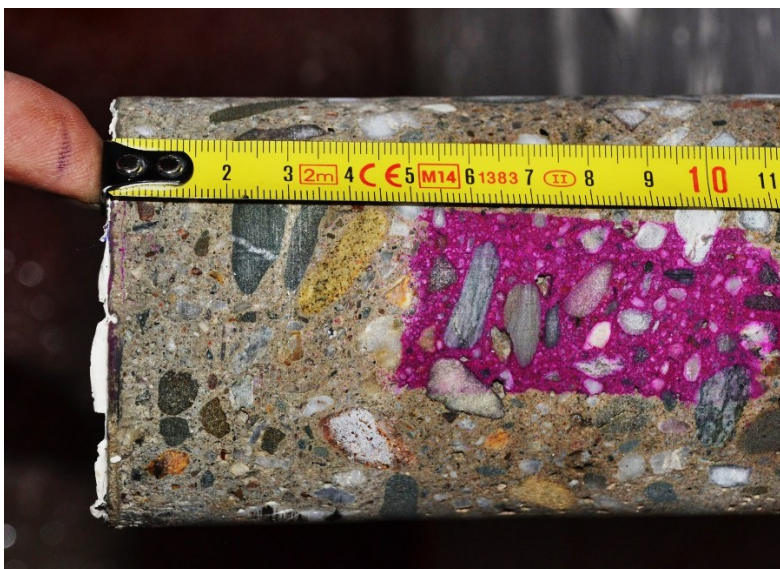
Hloubka karbonatice betonu se může zjišťovat jednak na místech pro destruktivní stanovení pevnosti v tlaku betonu, tj. v místech odběru jádrových vývrtů, a rovněž v sondách obdélníkového tvaru, ve kterých je beton odlomen do hloubky cca 30 mm. Na čerstvý boční lom se nanese roztok fenolftaleinu a pomocí hloubkoměru s přesností 1 mm se určí hloubka karbonatice [28].

Indikační roztok se připraví rozpuštěním 1 g fenolftaleinu v 70 ml etylalkoholu a zředěním destilovanou vodou do celkového objemu 100 ml.



Obr. 44 Měření hloubky zasažení karbonatací: 1 – vnější povrch, 2 – zkarbonátovaný beton bez barevné změny, 3 – nezkarbonátovaný beton – červenofialové zbarvení, A – průměr hloubky karbonatice, B – maximální hloubka karbonatice **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Hloubka zasažení karbonatací vyjadřuje vzdálenost od vnějšího povrchu betonu k okraji červeno-fialově zabarvené oblasti. Vzhledem k tomu, že čelo karbonatice obvykle není přímé, zjistí se průměrná hloubka karbonatice a hloubka karbonatice maximální dle obr. 44, praktická ukázka měření hloubky karbonatice betonu na vývrtnu je uvedena na obr. 45.



Obr. 45 Fenolftaleinový test hloubky karbonatice betonu na vývrtnu

19. Celkové zhodnocení stavu betonu

Nedestruktivním zhodnocením stavu betonu si lze utvořit názor na potřebu opravy betonové konstrukce či objektu. Prohlídka stavu konstrukce upozorní na šířku a četnost trhlin, projevy koroze výztuže ve formě rezavých skvrn na povrchu betonu, znečištění oleji a ropnými látkami, porosty rostlinami, nalezeny mohou být i výluhy, které jsou na povrchu betonu ve formě pevně lpících produktů, na podhledech se vyskytují ve formě krápníků. Tyto vizuální projevy svědčí o poškození betonu, resp. výztuže vyšetřované konstrukce. Je tedy nutné se stavem betonu hlouběji zabývat.

Na konstrukci “in situ“ je vhodné provést nedestruktivní zkoušky, které zhodnotí mechanické vlastnosti povrchových vrstev betonu, karbonatice a polohu výztuže. Tyto zkoušky buď vůbec, nebo jen nepatrně poruší povrchovou vrstvu na vybraných zkušebních místech, např. obroušením povrchu betonu. Lokálně je vhodné provést malé sekané sondy v místech projevů koroze ocelové výztuže, které zároveň poslouží ke zjištění hloubky karbonatice betonu.

Vizuální prohlídka a jednoduché zkoušky na konstrukci kvalitativně zmapují stav betonu konstrukce a umožní pak stanovit optimální (z hlediska památky minimálně nutný) počet vzorků pro destruktivní zkoušení.

20. Použitá literatura

- [1] Aspdin, J. An Improvement in the Mode of Producing an Artificial Stone. British Patent BP 5022, 1824.
- [2] Rovnaníková, P. Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí. *Beton TKS*, č. 2, 2017, s. 3-8. ISSN 1213- 3116.
- [3] ČSN 72121 Cement portlandský, struskoportlandský a pucolánový. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1956, zrušena 1972.
- [4] ČSN 72 2121 Portlandský cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [5] ČSN 722122 Struskoportlandský cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [6] ČSN 722123 Vysokopeční cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [7] ČSN 722124 Silniční cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [8] ČSN 722125 Síranovzdorný cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [9] ČSN EN 197-1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria cementů pro obecné použití. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Platnost od dubna 2012.
- [10] Suleiman, A. R., Nehdi, M. L. Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 111, No. 8, 2018, p. 197-208.
- [11] Aictin, P. C. Vysokohodnotný beton. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005, 320 stran. ISBN 80-86769-39-9.
- [12] Stork J. *Technologia betónu*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislavě, 1954.
- [13] Bažant, B. a kol. *Železobetonové konstrukce a nové výztužné materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 254 stran.
- [14] ČSN EN 13018 Nedestruktivní zkoušení - Vizuální kontrola - Všeobecné zásady
- [15] Drochytka, R., Dohnálek, J., Bydžovský, J., Pumpr, V., Dufka, A., Dohnálek, P. *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III*. 1. vydání. Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, Brno 2012. ISBN 978-80-260-2210-7.
- [16] ČSN 73 2578 Zkouška vodotěsnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí
- [17] ČSN ISO 2409 Nátěrové hmoty - Mřížková zkouška
- [18] ČSN EN ISO 2808 Nátěrové hmoty - Stanovení tloušťky nátěru
- [19] ČSN EN 1542 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody - Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou
- [20] ČSN 73 2577 Zkouška přídržnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí k podkladu
- [21] ČSN 73 1373 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu

- [22] ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí
- [23] ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu
- [24] Cikrle, P.; Kocáb, D.; Pospíchal, O. Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. *Beton TKS*, 2013, č. 3, s. 74 - 79. ISSN 1213-3116.
- [25] Cikrle, P. Význam nedestruktivních diagnostických metod pro hodnocení železobetonových konstrukcí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2017. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Habilitační a inaugurační spisy. ISBN 978-80-214-5464-4.
- [26] Cikrle, P.; Anton, O.; Daněk, P.; Kucharczyková, B.; Misák, P. NDT Zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu ČŽV. NDT zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu ČŽV. Brno: Ústav stavebního zkušebnictví, VUT v Brně FAST, 2010. s. 1-133. ISBN: 978-80-214-4198-9.
- [27] Anton, O.; Štainbruch, J.; Kordina, T. Rozvoj a použití georadaru při diagnostice železobetonových konstrukcí. *Beton TKS*, 2011, č. 3, s. 66-70. ISSN 1213-3116.
- [28] ČSN EN 14630 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení hloubky zasažení karbonatů v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody.
- [29] ČSN 73 0040 Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva