

## Památkový postup

### Obnova poškozeného betonu ŽB konstrukcí

**Brno 2020**

**Autoři:** prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

Ing. Ámos Dufka, Ph.D.

Ing. Martin Sedlmajer, 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.	Historie výroby betonu a hlavní součásti jeho složení	3
3.	Úprava povrchu betonových objektů a konstrukcí	5
4.	Principy degradace betonu	6
5.	Diagnostika poškozeného betonu z hlediska mechanických vlastností	7
5.1.	Stanovení pevnosti betonu v tlaku, zařazení betonu do pevnostní třídy	8
5.2.	Stanovení modulu pružnosti	9
5.3.	Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu	9
6.	Posouzení stavu resp. míry degradace betonu	10
6.1.	Chemická analýza	10
6.2.	Rentgenová difrakční analýza	11
6.3.	Termická analýza	12
6.4.	Stanovení pH ve výluhu	12
7.	Stanovení vlastností a míry koroze výztuže	12
8.	Rozbor betonu pro účely jeho náhrady	13
9.	Stanovení poměru pojiva a kameniva	13
10.	Stanovení granulometrie kameniva	14
11.	Petrografický rozbor kameniva	15
12.	Zhodnocení možností obnovy povrchu	15
13.	Návrh směsi pro obnovu	18
14.	Postup aplikace opravné vrstvy	19
15.	Konečná úprava povrchu	20
16.	Nástroj pro úpravu povrchu betonu	21
17.	Použitá literatura	24

## 1. Cíl památkového postupu

Cílem památkového postupu je vytvoření metodického postupu obnovy povrchových vrstev poškozeného betonu betonových a železobetonových konstrukcí. Jedná se o provedení obnovy v souladu s principy památkové péče, tedy zachování původního materiálu v co největší míře a použití opravného materiálu a způsobu jeho aplikace tak, aby nebyla poškozena historická hodnota a narušen vzhled historického objektu. Tento památkový postup se nezabývá statikou hodnocených objektů a jejich dílčích konstrukčních prvků. Prováděné diagnostické postupy a jimi zjišťované technické parametry slouží pro návrh a optimalizaci složení hmot používaných pro obnovu předmětných konstrukcí a volbu způsobu aplikace těchto hmot, nikoli pro posouzení stability konstrukce.

## 2. Historie výroby betonu a hlavní součásti jeho složení

Beton je kompozitní materiál tvořený cementovým pojivem a kamenivem, může obsahovat další složky, např. reaktivní příměsi a vlákna. Trvanlivost betonu je závislá na jeho složení, důležitou roli hraje jak množství a druh pojiva, tak i granulometrická skladba a druh kameniva, neopomenutelnou důležitou složkou je množství záměsové vody použité při jeho výrobě. Významnou roli hraje také způsob zpracování směsi pro výrobu betonu.

Počátky kompozitních materiálů lze umístit do dávné minulosti, kdy se jako pojivo začala používat směs vápna a pucolánových příměsí, které vedly k pojivu odolnému působení vlhkosti i kapalné vody. Za mezník počátku výroby portlandského cementu lze považovat rok 1824, kdy byl Josephu Aspdinovi udělen patent na výrobu portlandského cementu [1].

O počátek betonového stavitelství, tak, jak ho známe dnes, se zasloužil I. Ch. Johnson, který v roce 1844 došel k poznatku nutnosti pálení surovinové směsi nad mez slinutí, tj. nad teplotu 1 470 °C [2]. Spolu s vývojem výroby cementu se rozvíjelo betonové stavitelství a rozšiřovalo se uplatnění betonu ve všech částech stavebních objektů. V průběhu let užívání betonu jako konstrukčního materiálu se měnily a zlepšovaly technologie jeho výroby a následného zpracování. Již v polovině 19. století se začaly vkládat do betonu ocelové pruty nebo sítě, z počátku se umísťovaly do osy vyztužovaných průřezů, později se přešlo na umístění do tažené zóny konstrukčních prvků. To mělo za následek umístění výztuže blíže k povrchu konstrukčního prvku, což vedlo snáze k její korozi. Později byla pozornost věnována kvalitě betonu, ovlivnění jeho propustnosti pro plyny a kapalnou fázi, aby se korozi výztuže co nejvíce zabránilo.

Pojivovou složkou betonu je portlandský cement, který ve směsných cementových pojivech je částečně nahrazen reaktivními složkami. Nejvíce používanou příměsí byla od počátku vysokopecní granulovaná struska, v druhé polovině 20. století se začal používat elektrárenský popílek a křemičité úlety (mikrosilika).

V 19. století se do Čech dovážel cement z Anglie a z Německa. V roce 1864 byla založena továrna na portlandský cement v Bohosudově, později byly vystavěny cementárny v Radotíně, Berouně, Králově Dvoře, Čížkovicích, na Moravě v Tlumačově, Olomouci-Hodolanech, Brně-Maloměřicích, Prachovicích, Hranicích a Štramberku. Z výčtu cementáren je zřejmé, že cementářství se již od svého počátku zdárně rozvíjelo a beton se tak stal velmi používaným stavebním materiálem [3].

Kvalita cementu se značně lišila v jednotlivých obdobích tak, jak se zdokonalovala jeho výroba. Cementy v 19. a na začátku 20. století se vyznačovaly nižší teplotou výpalu a hrubším mletím, což vedlo k nižším počátečním pevnostem. Pro zvýšení pevností byl zvýšen obsah oxidu vápenatého v surovinové směsi, zvedla se teplota výpalu a cementy se mlely na menší velikost zrn. Významný posun ve vlastnostech cementu nastal mezi dvacátými lety a rokem 1950, kdy se změnilo mineralogické složení portlandského slínku, a to vedlo ke zvýšení pevností 7denních o 80 % a 28denních o 40 %. Změny v technologii výroby ve 2. polovině 20. století pak byly zaměřeny zejména na intenzifikaci mletí cementů a výrobu směsných cementů, aby byly uspokojeny požadavky stavebního průmyslu.

V 60. a 70. letech 20. století se označovaly cementy podle příslušných norem. V tomto období byly při realizaci železobetonových staveb používány především tyto typy cementů: cement portlandský, cement struskoportlandský a cement pucolánový, jak dokládá norma ČSN 72 2121 [4]. Od roku 1972 byly jednotlivé druhy cementů specifikovány ve zvláštních normách [5-9]. Cement byl charakterizován tzv. vazností, která se určovala pomocí stanovení pevností v tahu za ohybu a v 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 v souladu s evropskými předpisy norma ČSN EN 197-1 [10].

Kamenivo do betonu tvoří písek ve velikosti zrn 0 – 4 mm a štěrk, který se v minulosti používal zejména těžžený se zaoblenými zrny. Teprve ve 20. století se začalo používat drcené kamenivo s ostrohrannými zrny. Velikosti zrn byly od 4 mm nejčastěji do 32 mm, výjimečně se použila i zrna větších rozměrů. V současné době se používá zrno kameniva do 22 mm.

Nezbytnou součástí čerstvého betonu je voda, která reaguje s cementem a vytváří tak pevný cementový tmel. Množství záměsové vody, tzv. vodní součinitel, tj. poměr hmotnosti vody k hmotnosti pojiva, je důležitým faktorem při přípravě čerstvého betonu. Vyšší množství vody zlepšuje zpracovatelnost betonu, ale na druhé straně přebytečná voda, která se nespoteřebuje na hydrataci cementu, vytváří v cementovém tmelu póry, které jsou příčinou nižších pevností a nižší odolnosti proti degradaci betonu.

V druhé polovině 20. století se začaly do betonu používat přísady, které zlepšovaly vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Významné z hlediska velikosti vodního součinitele jsou plastifikační přísady, které mají příznivý vliv na množství záměsové vody, jejich použití umožňuje při výhodných reologických vlastnostech čerstvého betonu zachovat jeho pevnosti.

Jiným druhem cementu, používaným pro výrobu betonu, je hlinitanový cement. Patent na jeho výrobu byl udělen v roce 1908 [11, 12]. Cement se vyznačoval odlišným složením od portlandského cementu, obsahoval více hlinitanových sloučenin a vykazoval po 6 až 12 hodinách pevnosti vyšší, než portlandský cement po 28 dnech. Hlinitanové cementy vyvíjejí značné množství hydratačního tepla, což umožňuje betonáž za teplot pod 0 °C. Nevýhodou je nestabilita hydratačních produktů hlinitanového cementu, která vede v důsledku postupného zmenšování jejich objemu až ke kolapsu konstrukcí. Od 50. let 20. století se hlinitanový cement pro konstrukční betony nepoužíval, v roce 1985 bylo jeho použití zakázáno [13].

### 3. Úprava povrchu betonových konstrukcí

Beton vyrobený z portlandského nebo směsných cementů, má obvykle šedou barvu. Je ukládán do bednění, reliéf povrchu tedy kopíruje materiál, ze kterého je bednění vyrobeno.

U historických technických konstrukcí se nejčastěji setkáváme s otiskem struktury dřeva, které se používalo jen v hrubě opracované formě. Ve druhé polovině 20. století se již začaly používat cíleně upravené povrchy bednění, a to jak speciální reliéfní, nebo naopak hladké; reliéfní bednění na povrchu betonu ztvárnila požadovaný obrazec. Na strukturu povrchu byla pozornost zaměřena v souvislosti s používáním tzv. pohledových betonů, kde povrch betonu splňoval určitý architektonický záměr.

Již v 80. letech minulého století se v některých případech používala bednění z plastových desek, zejména z tvrzeného PVC, které zaručovalo hladký povrch betonu. U tohoto bednění se často tvoří bublinky na styku betonu s bedněním, na výsledném povrchu pak po ztvrdnutí betonu vznikají malé prohlubně, které mohou být příčinou porušování povrchové vrstvy betonu.

U průmyslových objektů se obvykle vzhled povrchu neřešil, surový povrch nesl otisk dřevěného bednění. Na objektech vystavených korozním činitelům se povrch opatřil nátěrem, eventuálně vápenocementovou omítkou, a to buď hned po výstavbě, nebo po porušení povrchu.

Ve 2. polovině 20. století, kdy se rozvinula prefabrikace, byl čerstvý beton ukládán do ocelových forem, které byly hladké a vytvářely tak hladký povrch betonu. U prefabrikátů pro inženýrské stavby (např. mosty) byla zvláštní pozornost věnována skladbě směsi pro výrobu betonu a jeho zpracování i vzhledem k celistvému povrchu, což mělo kladný vliv na odolnost betonu vůči agresivním látkám okolního prostředí.

Při kladení důrazu na estetickou stránku povrchu betonového objektu se používaly technologie jako vymývání nebo kartáčování povrchu betonu. Tyto technologie jsou založeny na tom, že se opracovává ztuhlý, nikoliv až ztvrdlý beton. Opatrně se vymývá povrchová vrstvička cementového tmelu, aby se obnažila zrna kameniva (obvykle těžného), který se zaslouží o požadovaný vzhled betonu. V poslední době je vymývání nahrazováno pískováním, kterým podle druhu použitého písku a jeho tlaku lze vytvořit různě vypadající vzhled betonu. V jiném případě je možno ztuhlý povrch betonu kartáčovat a vytvářet tak soustavu rovnoběžných vrypů do povrchu betonu, které mohou tvořit určitou kresbu.

Pemrlovaný beton je úprava povrchu ztvrdlého jemnozrného betonu speciálním nářadím, zvaným pemrlice, které se vytváří v povrchu betonu malé prohlubně v pravidelném rastru. Okraje pemrlované plochy, zejména nároží, se obvykle opatřují vodorovnými drážkami, tzv. šalírováním.

Kletování je hlazení povrchu ocelovými hladítky po posypu cementem, kdy se vytváří velmi hladký povrch, často se dosáhne až lesklého vzhledu a povrch betonu se stává vodonepropustným.

Při obnově povrchu, doplnění jeho částí, je nutno zohlednit původní vzhled, k opravě použít původní technologie, přiblížit se složení původního betonu, a pokud je to možné, použít shodný druh kameniva, který byl použit v původním betonu. Kamenivo se významně podílí na vzhledu betonu.

## 4. Principy degradace betonu

Produkty hydratace cementu jsou náchylné k degradaci působením korozních činitelů z okolního prostředí. Degradaci betonu lze rozdělit na tři druhy procesů, které jsou ve většině případů vzájemně propojeny:

- **fyzikální** – mechanické vlivy, krystalizační tlaky solí, teplota
- **chemickou** – plynné agresivní látky z ovzduší, roztoky kyselin, zásad a solí, organické látky
- **biologickou** – mechanické působení kořenů rostlin, chemické působení produktů životních pochodů živočichů, působení mikroorganismů.

Do fyzikálního působení spadají mechanické vlivy, jako jsou nárazy, otěr, obrus, u vodních staveb také kavítace. V cementovém tmelu v betonu jsou umístěna zrna kameniva, která se po postupném odstranění cementového tmelu uvolní. Tím postupně dochází k porušování povrchu betonového objektu.

Mezi fyzikální působení je zařazeno také působení teploty. Při teplotě vyšší než 100 °C se začínají rozkládat hydratační produkty cementu, postupně se zhoršují pevnostní charakteristiky betonu, při teplotě 1000 °C se pevnost sníží až na cca 10 % 28denních pevností, v mnoha případech se betonu v závislosti na jeho složení může rozpadnout.

Krystalizační tlaky vznikají v důsledku změny skupenství kapalně vody v led, kdy může být vyvinut tlak na stěny pórů až 200 MPa, a dále v případě vzniku krystalických produktů při chemickém napadení betonu, které mají větší molární objem než původní složky. V těchto případech může dojít až k úplnému rozpadu betonu, a to do takové hloubky, do které došlo k transportu korozních činitelů.

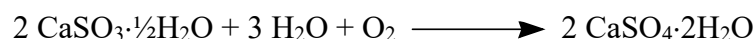
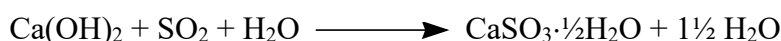
Korozní činitelé, působící chemicky na beton mohou být buď plynné (atmosférická koroze), nebo kapalné (koroze kapalným agresivním prostředím).

Atmosférická koroze je nejčastěji spojena s působením oxidu uhličitého (tzv. karbonatace), který je obsažen v atmosféře v průměrné koncentraci 0,038 obj. %. Průběh difúze oxidu uhličitého do struktury betonu a jeho reakce s hydroxidem vápenatým, resp. s hydratačními produkty cementu, závisí na pórové struktuře betonu, koncentraci oxidu uhličitého v okolním prostředí, na relativní vlhkosti vzduchu a na teplotě. Zjednodušeně lze proces karbonatace popsat rovnicí



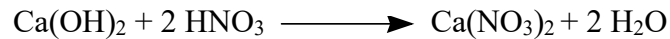
Spotřebováním přítomného hydroxidu vápenatého se snižuje koncentrace  $\text{OH}^-$  iontů až k hodnotě  $\text{pH} = 8,3$ . Tento proces vede k vytvoření podmínek pro korozi ocelové výztuže a k nestabilitě hydratovaných fází cementu, které jinak zabezpečují pevnou strukturu betonu.

Do atmosférické koroze patří také působení oxidu siřičitého, který reaguje s hydroxidem vápenatým a vede tzv. sulfataci betonu. V konečné fázi tohoto procesu vzniká 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<sub>2</sub>, který tvoří s vodou kyselinu dusičnou, způsobující až úplný rozklad cementového tmelu v betonu



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 pH < 4 dochází k rozkladu cementového tmelu a následně k rozpadu betonu.

Hořčnaté a amonné ionty v kapalném prostředí ve styku s betonem reagují s hydroxidem vápenatým za vzniku nevazebných sloučenin. Zhoršují se tím mechanické vlastnosti betonu.

Další chemické poškození betonu může nastat působením síranů, které mohou být součástí vod ve styku s betonem. Jejich působením se vytvářejí objemné sloučeniny reakcí s hydroxidem vápenatým, a to sádrovec a posléze sekundární ettringit, resp. monosulfát (viz výše), podobně jako při sulfataci plynným oxidem siřičitým. Vznik těchto sloučenin může vést k porušení nebo až rozpadu betonu.

U vodopropustných betonů může dojít působením vody s nízkým obsahem rozpuštěných látek (tzv. hladové) k vyluhování hydroxidu vápenatého. Tím se zvýší porozita betonu, což může mít vliv na mechanické vlastnosti. Nejvýznamnější důsledek je vytvoření podmínek pro korozi výztuže.

Z hlediska poškození kameniva může nastat tzv. alkáliové rozpínání kameniva, a to v případě přítomnosti amorfních forem oxidu křemičitého. Podmínkou pro tuto reakci je přítomnost sodných iontů a vody.

Přítomnost zrn pyritu v písku nebo hrubém kamenivu vede v zásaditém prostředí betonu k jeho oxidaci vzdušným kyslíkem. V konečné fázi vzniká síran železitý, ze kterého hydrolyzou vzniká hydroxid železitý projevující se rezavými skvrnami v povrchu betonu a kyselina sírová, jejíž síranové ionty mohou vést ke vzniku sekundárního ettringitu.

Vápencové nebo dolomitické kamenivo se může postupně rozpouštět vodami s obsahem agresivního oxidu uhličitého, kdy vzniká rozpustný hydrogenuhličitan, který může být z betonu vyluhován, a tím se zhoršují mechanické a transportní vlastnosti 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.

Uvedené degradační procesy jsou příčinou porušení betonu, které ve většině případů postupuje od líce do hmoty betonu. To se pak projeví na postupném nechtěném odstraňování povrchových vrstev betonové konstrukce.

## **5. Diagnostika poškozeného betonu z hlediska mechanických vlastností**

Jedním z klíčových bodů, který je nezbytný pro provedení kvalitní, adekvátně trvanlivé a esteticky vyhovující opravy poškozeného, resp. degradovaného povrchu betonové nebo

železobetonové konstrukce, je korektní zhodnocení stavu betonu, u kterého má být oprava do původního tvaru (průřezu) prováděna.

Tato problematika vyžaduje komplexní přístup, kdy je nezbytné hodnotit nejen mechanické (především pevnostní) charakteristiky betonu, ale též míru korozního narušení betonu působením chemicky agresivních látek z vnějšího prostředí, event. zhodnotit míru jeho kontaminace cizorodými látkami.

V obecné rovině lze postup hodnocení stavu předmětného železobetonového prvku formulovat v následujících krocích:

- Vizualní prohlídka doplněná akustickým trasováním. Při vizualní prohlídce je primárně hodnocen stav, resp. rozsah narušení (plocha, hloubka zasažení) povrchu hodnocených konstrukčních prvků. Celoplošně se sleduje přítomnost vad a poruch, například narušení povrchových vrstev betonu a případné povrchové úpravy, zaznamená se i případný výskyt barevně odlišných míst, která mohou být způsobena agresivními látkami apod. U vyztužených konstrukcí se zaznamená i případný výskyt obnažené výztuže či projevů její koroze. Získané poznatky se dokumentují záznamem defektních míst do schématu a fotograficky. Vizualní prohlídku je vhodné doplnit tzv. akustickým trasováním. Při této metodě je po hodnoceném povrchu smýkána ocelová koule akustického trasovače. V místech, kde je narušena soudržnost povrchových vrstev vydává akustický trasovač charakteristický „dutý zvuk“. Takto lze identifikovat například lokality, ve kterých vizualně není povrch betonu defektní, ale působením vnějších vlivů (např. synergické působení vody a mrazu) došlo k narušení jeho kompaktnosti ve vnitřní struktuře atd. Součástí vizualní prohlídky je též zhodnocení polohy výztuže, a především pak jejího stavu a míry koroze, projevující se v povrchu viditelnými rezavými skvrnami. V některých případech je nutné doplnit určení polohy výztuže pomocí dalších diagnostických metod (nedestruktivních).
- Stanovení pevnostních parametrů betonu. Zpravidla je podstatné stanovení pevnosti betonu v tlaku a jeho modulu pružnosti. Tyto charakteristiky jsou podstatné především z hlediska návrhu složení materiálu, který bude použit pro obnovu (reprofilaci) původního průřezu konstrukce. Je nanejvýš vhodné, aby opravný materiál, použitý při obnově poškozeného povrchu, svými vlastnostmi, složením a způsobem zpracování co nejvíce korespondoval s parametry stávajícího betonu. Tímto je pak zajištěno adekvátní spolupůsobení původního a nově nanášeného materiálu, což je jeden ze základních atributů kvality a trvanlivosti prováděné opravy. Dalším aspektem pak je vzhled prováděné opravy, kdy je žádoucí, aby u opravovaných ploch v maximální míře vzhledem odpovídal původnímu povrchu (viz níže).

Přehledně je výčet zkoušek, resp. diagnostických postupů, standardně prováděných při hodnocení stavu betonu v následujícím textu.

## **5. 1. Stanovení pevnosti betonu v tlaku. Zařazení betonu do pevnostní třídy**

Stanovení pevnosti betonu v tlaku se zjišťuje jednak na konstrukci nedestruktivně (nejčastěji pomocí Schmidtova tvrdoměru), a dále pak na zkušebních tělesech připravených z jádrových vývrtů odebraných z hodnocených konstrukčních prvků. Kombinace destruktivních a nedestruktivních metod je v rámci hodnocení stavu konstrukce maximálně efektivní, aby byla konstrukce co nejméně poškozena

Pevnost v tlaku betonu nedestruktivně se zjišťuje nejčastěji Schmidtovým tvrdoměrem typu N podle ČSN 73 1373 [15]. Zkušební místa jsou vybírána a připravována v souladu s ustanovením čl. 6.1.3 ČSN 73 1373, tj. jsou volena tam, kde je beton stejnoměrný, bez



šterkových shluků. Před zkouškou je povrch betonu na zkušebním místě za sucha obroušena jeho jasně patrnou strukturu.

Pro upřesnění pevnosti betonu z výsledků nedestruktivního zkoušení jsou z hodnocené konstrukce odebírány jádrové vývrty (nejčastěji o průměru 100 mm, u historických staveb s chráněnou památkovou hodnotou lze použít i průměr 75 mm), a následně jsou z nich připravována válcová zkušební tělesa postupem dle ČSN EN 12504-1 [16]. Rozměry válcových zkušebních těles jsou v souladu s ustanovením ČSN EN 12390-1 [17] a ČSN EN 13791 [18]. Na válcových zkušebních tělesech se zjišťuje pevnost v tlaku postupem dle ČSN EN 12504-1 [16] a ČSN EN 12390-3 [19]. Zjištěná válcová pevnost je pak přepočítána na krychelnou s využitím převodních součinitelů z ČSN EN 12390-1 [17] a s využitím převodního součinitele z [20]. Na základě těchto údajů je pak možno provést zařazení betonu do pevnostní třídy.

Na odebraných vzorcích betonu se stanovuje objemová hmotnost podle ČSN EN 12390-7 [27].

## 5.2. Stanovení modulu pružnosti

Dalším z podstatných hledisek je stanovení modulu pružnosti hodnoceného betonu. Tento parametr lze stanovit například metodou založenou na základě stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, a to například metodou tzv. přímého prozvučování, kdy jsou sondy ultrazvukového přístroje umístěny proti sobě na vyšetřovaném vývrtnu. Postup měření je pak kodifikován normou ČSN EN 12504-4 [21].

Na každém vývrtnu jsou obvykle provedena 3 měření. Z doby průchodu ultrazvukového impulsu  $T$  a známé délky měřicí základny  $L$  je vypočítána rychlost  $V$  km/s ultrazvukového impulsu dle vztahu (1) uvedeného v ČSN EN 12504-4:

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

Z průměrné rychlosti šíření ultrazvukového impulsu na válcovém zkušebním tělese a objemové hmotnosti betonu je ze vztahu (2) postupem dle ČSN 731371 [22] vypočítán dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a tahu  $E_{cu}$ :

$$E_{cu} = V^2 D \frac{1}{k^2} \quad (2)$$

kde  $D$  je objemová hmotnost betonu, v  $\text{kg/m}^3$  a  $k$  je koeficient rozměrnosti prostředí, bez rozměru.

Pro stanovení modulu pružnosti betonu v tlaku a tahu  $E_c$  se dynamický modul pružnosti přepočítá postupem dle čl. 7.5.2. ČSN 73 2011 [23] dle vztahu (3):

$$E_c = \frac{\sum_1^n E_{cu,i}}{n} \kappa_u \quad (3)$$

kde  $E_{cu,i}$  je dynamický modul pružnosti,  $n$  je počet zkušebních těles a  $\kappa_u$  je zmenšovací součinitel pro dynamický modul pružnosti ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou, závisející od pevnosti betonu.

## 5.3. Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu

Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu je zjišťována přímo na konstrukci postupem, který vychází z ustanovení normy ČSN 73 1318 [24]. Pro toto stanovení se využívá zařízení určené pro tuto zkoušku, které je v podstatě ručním hydraulickým zařízením, které vyvozuje tah (např. přístroj DYNA typ Z 16 apod.). Při zkoušce je kovový terč o průměru 50 mm vhodným typem lepidla (např. epoxid, metakrylát apod.) nalepen na testovaný povrch. Pro vymezení zatěžované plochy se po obvodu terče provedou řezy (úhlovou bruskou, jádrovým

vrtákem adekvátního průměru apod.), hloubka řezů je odvozena od maximální frakce kameniva v betonu. Poté se připevní zkušební přístroj k terči a vyvodí se tahová síla až do porušení. Je nutno zaznamenat sílu, při které došlo k porušení, a dále místo (vrstvu), kde došlo k odtržení, tj. v betonu, v lepidle, pokud se odtrh uskuteční těsně pod lepidlem, jedná se pravděpodobně o zkarbonatovanou vrstvu, tu je nutno před měřením odstranit.

## 6. Posouzení stavu a míry degradace betonu

Nedílnou součástí hodnocení stavu předmětné betonové nebo železobetonové konstrukce je stanovení chemického a mineralogického složení betonu. Cílem těchto stanovení je podrobně analyzovat mikrostrukturu betonu, a posoudit míru jeho degradace působením agresivních látek z vnějšího prostředí.

Hodnocen je nejen stav povrchových vrstev, které jsou vystaveny bezprostřednímu působení agresivních látek z vnějšího prostředí, ale též betonu, který tvoří „vnitřní“ hmotu konstrukce. Porovnání stavu vzorků odebraných z různých vzdáleností od povrchu konstrukce pak umožňuje relevantním způsobem zhodnotit míru korozního napadení betonu konstrukce a predikovat její další životnost.

Koncepce těchto analýz je vždy modifikována s ohledem na konkrétní podmínky korozního napadení betonu hodnocené konstrukce. Většina stavebních konstrukcí je například vystavena působení atmosféry, kdy oxid uhličitý způsobuje tzv. karbonataci betonu. Primární rolí prováděných analýz u tohoto typu konstrukcí pak je stanovit právě míru karbonatace betonu. V některých případech se může jednat o konstrukce, které jsou vystaveny působení agresivních vod či roztoků (například podzemní vody obsahující sírany, chloridy apod.). Specifickou oblastí jsou pak silniční stavby, u kterých je životnost ovlivňována solemi, používanými při jejich zimní údržbě.

Z uvedeného je zřejmé, že metodiku odběru vzorků (tzn. lokalita odběru, četnost), stejně jako konkrétní fyzikálně chemické analýzy, je nutno modifikovat s ohledem na konkrétní podmínky korozního napadení stavby a její individuální charakter. Obvykle jsou v rámci hodnocení míry degradace betonu realizována tato stanovení:

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

Soubor těchto stanovení je v některých případech vhodné doplnit například detailní analýzou struktury pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu, v některých případech je vhodné použít infračervenou absorpční spektroskopii, event. metodu vysokotlaké rtuťové porozimetrie hodnotící distribuci vzduchových pórů. Podrobný postup těchto stanovení je prováděn podle ustanovení příslušných norem, či metodických postupů, princip jednotlivých metod lze shrnout v následující:

### 6.1. Chemická analýza

Stanovení chemického složení je prováděno v souladu s ustanoveními normy ČSN EN 196-2 [25]. Chemickou analýzu lze provést také pomocí rentgenové fluorescenční analýzy.

V návaznosti na charakter stavby a korozní prostředí, kterému je konstrukce vystavena, jsou pak voleny konkrétní složky, které jsou v hodnoceném vzorku stanovovány. Jednotlivé prvky jsou vyjadřovány formou oxidů. Obvykle se jedná zejména o stanovení těchto složek:

- oxid vápenatý, CaO
- oxid hlinitý, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- oxid železitý, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- oxid křemičitý, SiO<sub>2</sub>
- sírany, SO<sub>3</sub>
- chloridy, Cl<sup>-</sup>
- oxid manganatý, MnO.

Při analýze podle normy [25] se vzorek rozpouští v kyselině chlorovodíkové a analyzuje se rozpustný podíl. Nerozpustný zbytek pak indikuje množství kameniva v betonu, a to v případě, je-li kamenivo v kyselině nerozpustné. Z analýzy lze současně získat také poměr pojiva ke kamenivu. V případě, že kamenivo je v kyselině rozpustné, se tento poměr stanovuje metodou analýzy obrazu.

Při použití rentgenové fluorescenční analýzy se získá celkový obsah jednotlivých oxidů ve vzorku, tedy jako suma v pojivu a kamenivu. Kvalitativní analýzou lze odhalit přítomnost některých prvků, které nejsou typické pro portlandský cement. Na základě těchto informací lze pak usuzovat na přítomnost různých příměsí, např. popílku, vysokopecní strusky apod.

## 6.2. Rentgenová difrakční analýza

Analýza mineralogického složení je jednou ze zásadních skutečností při hodnocení stavu, resp. míry degradace betonu [26].

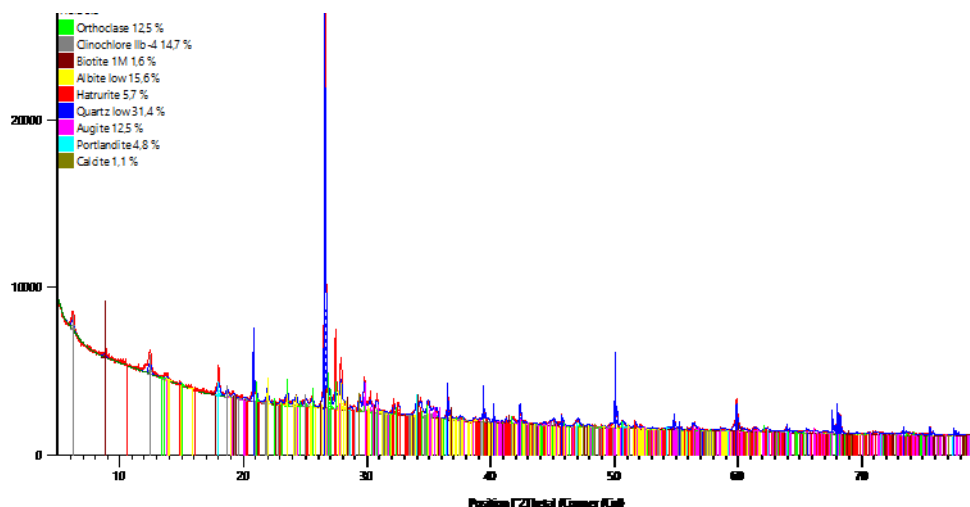
Difrakční metody strukturní analýzy jsou založeny na interferenci (zesílení) rentgenova záření na krystalické mřížce minerálů obsažených ve vzorku. Vycházejí z toho, že se v krystalické látce nacházejí vzájemně rovnoběžné roviny, které jsou od sebe vzdáleny o tzv. mezimřížkovou vzdálenost. Právě na těchto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

Z hlediska mineralogického je beton tvořen fázemi cementové matrice (portlandit, kalciumhydrosilikát, dále minerály vznikající jejich následnou karbonací (kalcit či vaterit), dále jsou ve struktuře betonu přítomny minerály pocházející z kameniva ( $\beta$ - křemen, živce, slídy apod.). V případě, že je beton vystaven působení agresivních látek, vznikají v jeho struktuře korozní novotvary jako například sekundární ettringit, sádrovec, kalcit, vaterit a další.

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  $\mu$ m. Úprava granulometrie má být provedena na mikronizačním zařízení, které nepoškozuje vnitřní strukturu vzorku, typicky mikronizátor McCrone. Měření probíhá na přístroji typicky v Bragg – Brentano parafokusální geometrii. Moderní přístroje využívají polovodičové pozičně citlivé liniové detektory.

Při známé vlnové délce rentgenova záření ( $\lambda$ ), která je daná volbou anody XRD zdroje, lze určit podle úhlu dopadu záření na vzorek ( $\Theta$ ) 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 elektronovým mikroskopem MIRA3 XMU, PECTIER EDx BRUKER (Centrum AdMaS, VUT v Brně).



Obr. 4 Záznam XRD analýzy krystalických fází betonu

XRD analýza se využívá také při identifikaci druhu pojiva v betonu. V hydratovaném portlandském cementu lze najít touto analýzou portlandit, ettringit, monosulfát, hydratované hlinitany vápenaté, eventuálně zbytky nehydratovaných silikátových slínkových minerálů.

Touto analýzou lze identifikovat také přítomnost typických krystalických složek různých přísad, např. popílku, strusky, vápence apod.

### 6.3. Termická analýza

Termická analýza je analytická metoda, zahrnující diferenční termickou analýzu (DTA), založenou na měření rozdílů teplot mezi zkoušeným materiálem a inertním standardem (u moderních přístrojů je tento standard virtuální) současně zahřívány v peci. Vývin nebo absorpce tepla, ke kterému ve vzorku při zahřívání dochází, se projeví maximy (exotermní děj) a minimy endotermní děj. Současně je sledována změna hmotnosti (termogravimetrie, TG) doprovázející jednotlivé procesy. Výstupem analýzy je pak stanovení obsahu jednotlivých složek ze změn hmotnosti, projevující se tepelnou změnou v hodnoceném betonu. DTA se tedy zpravidla využívá jako doplněk rentgenové difrakční analýzy právě pro přesnější kvantifikaci obsahu jednotlivých složek cementové matrice. Zásadní význam mají poznatky získané z termické analýzy při hodnocení míry karbonatce betonu, při specifikaci míry degradace betonu apod.

### 6.4. Stanovení pH ve výluhu

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

Výluh, ve kterém je stanovován obsah hydroxidových iontů prostřednictvím hodnoty 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.

## 7. Stanovení vlastností a míry koroze výztuže

U železobetonových staveb je nutno věnovat pozornost také ocelové výztuži. Rezavé skvrny na povrchu by měly být pečlivě prozkoumány a analyzovány, aby se zjistilo, zda jsou důsledkem koroze výztuže, kdy korozní produkty pronikly na povrch konstrukce, nebo je jejich příčina v obsahu zrn pyritu v kamenivu, který v zásaditém prostředí hydrolyzuje a v konečné fázi tvoří rezavý hydroxid železitý.

U železobetonových konstrukcí se určí druh výztuže, a to podle tvaru jejího průřezu, resp. podle profilace povrchu, zda je povrch hladký či profilovaný s žebírky. U výztuže s žebírky se určí typ žebírek. Tvarem průřezu, resp. profilaci povrchu výztuže je dána třída použité oceli. Na základě třídy oceli a třídy betonu se z normativních předpisů platných v době výstavby konstrukce určí pevnost výztuže v tahu a v tlaku. Dobu výstavby konstrukce je nutno zohlednit z důvodu odlišnosti pevností betonářské výztuže v různých obdobích. Dále se zjistí velikosti profilů výztuže a vzdálenosti jednotlivých prutů.

## 8. Rozbor betonu pro účely jeho náhrady

Beton je kompozitní materiál (je tvořen cementovou matricí a plnivem), čímž je určena jeho značná složitost. Pro detailní rozbor konkrétního betonu se používají následující kroky:

- stanovení druhu pojiva – tj. zda se jedná o portlandský cement, či směsný cement, event. reaktivní příměsí,
- stanovení dávky, resp. množství, pojiva (cementu) v betonu a jeho poměr ke kamenivu,
- stanovení granulometrie a petrografie použitého kameniva. Podstatné je rovněž stanovení, zda se jedná o kamenivo těžené či drcené, zpracování popisu habitu pro typická zrna hrubé frakce kameniva.

Pro stanovení těchto parametrů je třeba vzorky betonu podrobit komplexu fyzikálně chemických analýz umožňujících detailně zhodnotit složení betonu a jeho mikrostrukturu. Podstatné je stanovit jednak chemické složení, tzn. z jakých složek (oxidů) je hodnocený beton tvořen a v jakém podílu jsou zastoupeny, a dále pak jakým způsobem jsou látky v jeho mikrostruktuře vázány, tzn. stanovit mineralogické složení (provádí se XRD, DTA a TG analýzou). Popis těchto metod je uveden v kapitole 6.

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. Pro posouzení charakteru kameniva lze efektivně využít též optickou mikroskopii, event. mikroskopii polarizační.

## 9. Stanovení poměru pojiva a kameniva

Stanovení poměru kameniva a pojiva lze spolehlivě provést v případě, že kamenivo je v kyselině nerozpustné. Je-li kamenivo částečně nebo zcela rozpustné v kyselině, pak tento poměr nelze stanovit chemickou analýzou, ale je nutno použít jiné metody, 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. Pro stanovení poměru pojiva ke kamenivu lze s výhodou použít vzorky po stanovení pevnosti.

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.

$$w_{n.p.} = \frac{m_{n.p.}}{m_b} \cdot 100 \quad (4)$$

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

$$w_{r.p.} = \frac{m_b - m_{n.p.}}{m_b} \cdot 100 \quad (5)$$

kde  $w_{r.p.}$  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).

$$\frac{\text{kamenivo}}{\text{pojivo}} = \frac{w_{n.p.}}{w_{r.p.}} \quad (6)$$

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 žihá 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:  $w_{r.p.} - ztr. \text{ž.}$

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

$$\frac{\text{kamenivo}}{\text{cement}} = \frac{w_{n.p.} + 3}{w_{r.p.} - ztr. \text{ž.}} \quad (7)$$

Objemové díly se vypočítají z hmotnosti kameniva a cementu dělené jejich sypanými hmotnostmi [28].

## 10. Stanovení granulometrie kameniva

Granulometrie kameniva se stanovuje na 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 sítěch 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 těžného.

Po rozdělení kameniva podle velikosti zrn se podíly zváží a vypočítá se jejich procentní zastoupení, resp. z výsledků se sestrojí granulometrická křivka.

## 11. Petrografický rozbor kameniva

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.

Použití původního kameniva je někdy problematické, protože 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.

## 12. Zhodnocení možností obnovy povrchu

Posouzení možností a způsobu opravy a obnovy povrchu se provede na základě souboru zkoušek mechanických (tj. především pevnostních parametrů) betonu, zhodnocení míry jeho degradace a posouzení stavu resp. míry koroze výztužné oceli.

**Je nutno zdůraznit, že tento text se zabývá pouze problematikou obnovy povrchu železobetonových konstrukcí a uměleckých objektů, nikoli však otázkami, souvisejícími s jejich statikou a stabilitou. Tyto aspekty oprav železobetonových konstrukcí musí být zhodnoceny na základě zjištěných parametrů betonu a výztužné oceli statickým výpočtem.**

Z hlediska kvality a adekvátní životnosti prováděné obnovy povrchu patří mezi klíčové parametry především soudržnost nově nanášeného materiálu s podkladním betonem. V tomto kontextu je kvalita původního betonu po provedení předúpravy jeho povrchu (tj. po odstranění nesoudržných a degradovaných povrchových vrstev betonu) charakterizována zejména pevností v tahu povrchových vrstev, která je hodnocena jednak vizuální prohlídkou a akustickým trasováním, ale především pak stanovením pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu; popis stanovení viz kapitola 5.3.

Principiálně lze uvedené shrnout v konstatování, že v rámci oprav železobetonových konstrukcí mohou nastat dvě alternativy:

- Běžnými technologickými postupy úpravy povrchu lze zajistit adekvátně kompaktní a únosný podklad, na který bude možno následně aplikovat opravný materiál (či materiálový systém), přičemž trvanlivost prováděné opravy bude zajišťována adhezí mezi nově nanášeným materiálem a dostatečně únosným podkladem,
- Mechanické parametry původního betonu jsou natolik nízké, že běžnými technologickými postupy úpravy povrchu betonu není možno zajistit dostatečně únosný podklad. Za těchto okolností je nutno spolupůsobení původního podkladu a nově nanášeného opravného betonu zajistit jiným způsobem, např. mechanickým kotvením apod.

Dalším aspektem je zhodnocení míry degradace původního betonu působením agresivních látek z vnějšího prostředí, a především pak eventuální míru kontaminace betonu látkami, které by mohly negativním způsobem ovlivňovat spolupůsobení původního betonu a nově nanášené správkové hmoty (typickým příkladem může být zasažení původního betonu ropnými látkami a oleji u průmyslových staveb apod.).

Kritéria pro hodnocení únosnosti betonu z hlediska stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu  $R_t$  jsou uvedena v tabulce 1. Doporučený rozsah zkoušek je alespoň 5 zkoušek na každých 100 m<sup>2</sup> povrchu. Podkladní beton s těmito parametry dle tabulky 1 lze považovat za dostatečně únosný pro aplikaci opravných hmot.

Tab. 1 Kritéria pro hodnocení betonu z hlediska stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu

<b>Pevnostní třída betonu</b>	<b>Požadované hodnoty <math>R_t</math> (MPa)</b>	
<b>C12/15 B15</b>	Min. 70 % hodnot $\geq 1,1$	Zbývající hodnoty $\geq 0,5$
<b>C16/20 B20</b>	Min. 70 % hodnot $\geq 1,4$	Zbývající hodnoty $\geq 0,7$
<b>C20/25 B25</b>	Min. 70 % hodnot $\geq 1,6$	Zbývající hodnoty $\geq 0,9$
<b>C25/30 B30</b>	Min. 70 % hodnot $\geq 1,8$	Zbývající hodnoty $\geq 1,0$
<b>C30/37 B35 a vyšší</b>	Min. 70 % hodnot $\geq 1,9$	Zbývající hodnoty $\geq 1,1$

Ukázka stanovení pevnosti povrchových vrstev betonu je dokumentována na následujících obrázcích. Beton výrazně degradován, obr. 5, fenolftaleinový test ukazuje, že pouze na některých místech je pH betonu nad hodnotou 9,6, nezbarvená místa mají pH nižší, výztuž je částečně obnažena a zkorodovaná, v okolí výztuže je  $pH < 9,6$ , obr. 6. Nejprve musí být odstraněny nesoudržné části povrchu betonu za použití vrtacího kladiva, obr. 7 a následně se povrch očistí tlakovou vodou od uvolněných zbytků betonu a prachu, obr. 8.



Zkušební terč je na upravený povrch nalepen vhodným typem lepidla, přičemž po jeho obvodu je provedena řezná spára tak, aby při zkoušce byla jasně vymezena zatěžovaná plocha. Při provádění zkoušky je, vyjma naměřené hodnoty síly při porušení materiálu, zaznamenáno i místo porušení, obr. 9.



Obr. 5 Degradovaný beton. V důsledku synergického působení vlhkosti a mrazu došlo k narušení povrchových vrstev betonu – jsou odhalena zrna hrubé frakce kameniva. Dalším negativním fenoménem je pak působení oxidu uhličitého – karbonatace.



Obr. 6 Fenolftaleinový test.



Obr. 7 Použití příklepového kladiva k odstranění nesoudržných povrchových vrstev degradovaného betonu



Obr. 8 K finálnímu dočištění povrchu je možno využít vysokotlaký vodní paprsek, přičemž pracovní tlak je třeba korigovat s ohledem na pevnostní charakteristiky obnovovaného (soudžnost) betonu.



Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu byla v případě hodnoceného betonu velmi nízká (cca 0,1 MPa), obr. 10, přičemž při zkouškách docházelo k porušení ve vlastní masě betonu. Tato skutečnost, spolu s ostatními nízkými pevnostními charakteristikami betonu, mírou zasažení výztuže extrémní korozí apod. indikuje nezbytnost náhrady prvku v celém jeho průřezu.



Obr. 9 Nalepený a ořezaný terč



Obr. 10 Spodní strana terče po odtržení

### 13. Návrh směsi pro obnovu

Návrh betonu pro obnovu poškozených částí povrchu by měl respektovat původní návrh betonu, který byl použit při výrobě konstrukce či její betonové části, kde je potřeba nahradit poškozenou část. Je však nezbytné zvážit možnosti obnovy povrchu a míry poškození betonu, především vrstvy degradovaného betonu a rozlišit poškozenou část betonu a beton, který ještě plní požadovanou funkci a má zachovány požadované vlastnosti, které byly uvažovány v době návrhu a výroby tohoto betonu.

Při návrhu směsi, která má být použita pro obnovu povrchu betonu, je nezbytné zohlednit některé skutečnosti, přičemž mezi stěžejní patří především:

- Zajistit dostupnou dokumentaci – např. dodací listy předmětného betonu, údaje o dosavadním způsobu užívání stavby, údaje o údržbě stavby a eventuálních opravách.
- Zjistit složení betonu, který má být nahrazován. Je třeba stanovit druh a dávku použitého pojiva. Je-li to možné, pak je vhodné určit eventuální příměsi či přísady použité při výrobě betonu. Zejména stanovení přísad v betonu je obtížné, vzhledem k jejich téměř stopové přítomnosti v betonu, častěji je jejich aplikace v betonu zjišťována nepřímou, tedy z dostupných podkladů,
- Stanovit množství, granulometrii a petrografii použitého kameniva. Podstatné je rovněž stanovit, zda se jedná o kamenivo těžené či drcené a zpracovat popis habitu pro typická zrna hrubé frakce kameniva. Uvedené skutečnosti jsou zjišťovány výše popsaným komplexem fyzikálně chemických stanovení. Pokud je dostupné kamenivo z lokalit, které byly využity při výrobě původního betonu, měly by být tyto varianty upřednostněny,
- Těmito údaji jsou pak určeny pevnosti betonu, který má být doplňován (obnoven). Je vhodné, aby se opravná hmota svými pevnostními parametry co nejvíce blížila původnímu betonu. Podstatné je například, aby modul pružnosti opravné hmoty co nejvíce odpovídal

tomuto parametru původního betonu, event. byl u opravné hmoty mírně nižší. Toto je jeden z podstatných aspektů pro adekvátní spolupůsobení opravné hmoty a původního betonu,

- V mnoha případech není možné plně respektovat granulometrii kameniva v původním betonu, a to z důvodu toho, že vrstva nanášené opravné hmoty může být s hledem na konkrétní situaci relativně tenká (jednotky či dolní desítky milimetrů) a použití hrubé frakce kameniva (velikost zrn 16, resp. 22 mm) by nebylo adekvátní prováděné tloušťce. Rozměr maximálního zrna kameniva v opravné hmotě by neměl být větší než přibližně jedna třetina tloušťky nanášené vrstvy. Použití adekvátní granulometrie plniva rovněž umožní dosáhnout požadovaný vzhled finálního povrchu opravné hmoty,
- Zásadní je zajistit dostatečné spolupůsobení (adhezi) opravné hmoty a podkladu (neporušené části původního betonu). Z tohoto důvodu je nezbytné opravnou hmotu modifikovat vhodným typem polymerní disperze, nebo je možné aplikovat adhezní můstek na bázi cementu, modifikovaného polymerní disperzí,
- Zhodnotit a zdokumentovat vzhled a strukturu povrchu původního betonu. Posoudit, zda byla prováděna úprava finálního povrchu (např. pemrlováním, vymýváním, kletováním apod.), v případě monolitických konstrukcí pak může být do struktury betonu obtištěn reliéf bednicích prvků apod. Jednou z možností, jak zachytit strukturu resp. reliéf povrchu původního betonu je například zhotovení obtisku do vhodného typu hmoty (např. kaučuk, latex), tedy systémem negativ – pozitiv.
- V mnoha případech je vhodné barevný odstín nově nanášené opravné hmoty upravit pomocí anorganických pigmentů tak, aby v co nejvyšší míře odpovídal vzhledu původního betonu.

## 14. Postup aplikace opravné vrstvy

Postup aplikace opravné vrstvy je určen řadou okolností, přičemž z hlediska technologie vlastního provádění mezi klíčové patří především:

- Podklad pod opravnou hmotou musí být dostatečně únosný (pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu musí vyhovovat hodnotám uvedeným v tabulce 1), aby spolupůsobení původního betonu a opravné hmoty bylo adekvátně zajišťováno adhezními schopnostmi právě opravné hmoty, resp. prostřednictvím adhezního můstku. V případě, že toho není možno dosáhnout, je třeba použít mechanické kotvení, např. pomocí kari sítí apod.
- Rozsah (plocha) opravovaného povrchu a především hloubka narušení betonu jsou parametry, od kterých se odvíjí tloušťka nanášené vrstvy. Jak již bylo zmíněno, tloušťka nanášené vrstvy je zásadním faktorem, který určuje složení (zejména maximální velikost zrna kameniva) opravné hmoty. V případě, že se nanáší tenká několikamilimetrová vrstva, musí se použít jemnozrnné materiály s relativně vysokou dávkou pojiva, což je příčinou zvýšení objemových změn (smršťování) v průběhu zrání hmoty, vedoucích ke vzniku trhlin. Tento negativní jev lze omezit například použitím rozptýlené výztuže ve formě polypropylénových vláken.
- Vyjma rozsahu narušení (plocha, hloubka) je při volbě technologie aplikace opravné hmoty nutno zohlednit též charakter opravované konstrukce, resp. jejích jednotlivých konstrukčních prvků, a dále pak konkrétní podmínky vystavení objektu agresivním látkám z okolí. Principiálně lze opravné hmoty nanášet buď zednickým způsobem, což je u historických objektů upřednostňováno, další možností je technologie stříkání (torkretáž). Zednický způsob se používá pro nanášení opravné hmoty u omezených ploch

s poměrně malou hloubkou narušení, u členitých konstrukcí a složitějších reliéfů apod. Technologie stříkání je výhodná u větších rozsahů obnovovaného povrchu, má relativně větší efektivitu, a také výhodu, že hmoty nanášené stříkáním jsou kompaktnější, hutnější a mají tedy lepší mechanické vlastnosti.

- V některých případech je nezbytné odstraňovat poměrně výrazný objem narušeného betonu (tj. odstranění betonu do značné hloubky). Za těchto okolností je možno realizovat doplnění konstrukce tak, že se provádí betonáž do bednění. Nově použité bednění by mělo korespondovat s typem bednění, které bylo využito při původní výstavbě, především v případech, kdy jsou otištěny reliéfy bednění do struktury betonu či jsou viditelné nechtěné spáry vzniklé na rozhraní spojů bednicích prvků. V tomto případě tedy nelze hovořit o opravě či obnově bezprostředního povrchu. Zejména u tohoto typu opravných zákroků je nutno zdůraznit, že je nezbytné zajistit, aby prováděné práce neměly nepříznivý vliv na statiku objektu jak v průběhu provádění oprav, tak i po jejich ukončení, tj. v době dalšího užívání objektu.

Ukázka obnovy povrchu betonové konstrukce je uveden na následujících snímcích. Nejprve je nutno nanést kontaktní můstek, připravený ze směsi cementu, akrylátové nebo polyvinylacetátové disperze a vody, obr. 11. Na zavadlou vrstvu se nanáší opravný beton, obr. 12 a 13. Vzhled opravného betonu po 6 měsících je na obr. 14.



Obr. 11 Kontaktní můstek



Obr. 12 Opravný beton

Struktura opravného betonu přesně nekopíruje strukturu původního, ale jeho přibližné zbarvení. V tomto případě nebylo možno použít kamenivo do velikosti 32 mm, které je v původním betonu, ale pouze 0/4 mm vzhledem k tloušťce opravného betonu.

Povrch původního betonu získal vzhled vymývaného betonu 50letým působením povětrnosti a agresivních látek z kouřových plynů elektráren. Původní povrch byl hladký s otiskem dřevěného bednění. Je předpoklad, že vzhled povrchu opravného betonu se postupem času přiblíží vzhledu původního betonu.





Obr. 13 opravný beton - detail



Obr. 14 Opravný beton po 6 měsících

## 15. Konečná úprava povrchu

Cílem konečné úpravy povrchu je zajistit, aby nově nanášený opravný materiál co nejvíce odpovídal povrchu původní konstrukce, a to jak barevným odstínem, tak strukturou.

V obecné rovině lze konstatovat, že z hlediska vzhledu železobetonové konstrukce obvykle nastávají tyto možnosti:

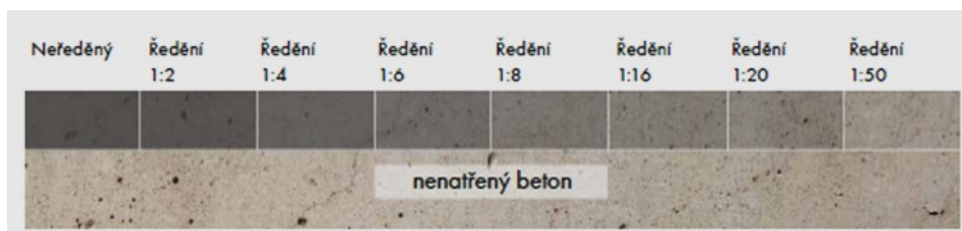
- Povrch původního betonu nebyl nijak upravován. U monolitických konstrukcí může být v povrchových vrstvách otištěna struktura bednicích prvků (reliéf dřeva apod.), prefabrikované prvky mají povrch většinou hladký.
- Povrch betonu byl upravován (pemrlováním, vymýváním, kletováním, apod.).

V případě, že je na povrchu betonu přítomná struktura, resp. reliéf, lze jeho repliku do povrchu nově nanášené opravné hmoty zhotovit tak, že struktura povrchových vrstev původního betonu je nejprve sejmuta otiskem do vhodného materiálu (kaučuk, silikon apod.). Takto vytvořená matrice je pak systémem negativ – pozitiv vtlačena do povrchu zavadlé opravné hmoty.

Byl-li původní povrch betonu upravován vymýváním, či pemrlováním, lze tyto techniky úpravy povrchu uplatnit též na povrchu nově nanášené opravné hmoty. Způsob úpravy povrchu je nutno zohlednit již při návrhu složení opravné hmoty (např. volba vhodného kameniva, tak aby bylo maximálně podobné kamenivu v původním betonu – toto je významné zejména u vymývaného betonu, kdy jsou odhalována zrna kameniva).

Vyjma struktury (reliéfu) opravné hmoty je nutno též zohlednit barevný odstín původního betonu a správkové hmoty. Ten lze dosáhnout použitím shodného druhu kameniva, tedy ze stejné lokality. V mnohých případech nejsou již původní zdroje kameniva k dispozici, je tedy nutno hledat kamenivo podobného tvaru zrn a barevnosti. Barevný odstín opravné hmoty lze také v poměrně širokém intervalu modifikovat pomocí anorganických pigmentů aplikovaných přímo do směsi, a tím její barvu co nejvíce přizpůsobit původnímu betonu.

Další možností přizpůsobení vzhledu původního a opravného betonu je použití lazurních nátěrů na silikátové bázi. Nátěr je obvykle dvousložkový, jedna složka představuje vodní sklo modifikované pigmentem, druhá složka je ředidlo, kterou se řídí transparentnost nátěru. Vliv řešení na vzhled nátěru je uveden na obr. 15.



Obr. 15 Ukázka vzhledu lazurního nátěru v závislosti na ředění

Úpravu, či sjednocení barevnosti povrchu, lze provést natíráním speciální lazurní štětkou, nebo tupováním. Lazurním nátěrem lze provádět i retuše opravených částí.

Při vlastním provádění oprav povrchu je nutno jejich vzhled hodnotit při adekvátních světelných podmínkách. Podstatné rovněž je hodnotit barevný odstín až po řádném vyžrání hmot. Před celkovým zahájením oprav je vhodné ověřit vhodnost jednotlivých hmot na tzv. referenčních plochách.

## 16. Nástroj pro úpravu povrchu betonu – reliéf povrchu dřeva

Při obnově poškozených částí betonové konstrukce může vyvstat požadavek na obnovení původního reliéfu povrchu betonu. Podoba povrchu betonové monolitické konstrukce závisí obvykle na druhu použitého bednění, vcelku běžné bylo užití hrubě řezaných smrkových latí či prken, na kterých je patrná hrubá struktura dřeva, včetně suků a letokruhů.

Jednou z možností obnovení reliéfu je sejmutí reliéfu na adekvátní části nepoškozené betonové konstrukce, nebo na adekvátním vzorku dřevěného přířezu a následně jeho otištění do povrchu správkové hmoty. Pro sejmutí reliéfu a vytvoření otisku je vhodné použít silikonový kaučuk, jehož výhodou je adekvátní pružnost a chemická odolnost. Pro odolnost vytvořené otiskové raznice je vhodné použít kaučuk s vyšší pevností v tahu, což zabrání trhání při používání a čištění. Pro snadnější čištění raznice je možné ošetřit povrch silikonovým olejem. Výroba silikonové raznice je následně uvedena formou fotoreportáže:



Obr. 16 Pro sejmutí reliéfu nehoblovaného dřeva byl použit trám průřezu 100 x 100 mm.



Obr. 17 Připravený trám byl otištěn do plastelínového lože, pro dokonalejší sejmutí struktury dřeva bylo plastelínové lože změkčeno zahřátím horkovzdušnou pistolí.





Obr. 18 Na plastelínové lože byl nasazen dřevěný formovací rám pro vymezení plochy silikonového kaučuku.



Obr. 19 Dřevěný trám zanechal v plastelínovém loži dokonalý otisk struktury povrchu dřeva.



Obr. 20 Do čerstvě nalitého silikonového kaučuku byl ponořen pruh gázy, pro zvýšení tahové pevnosti a odolnosti odlitku.



Obr. 21 Po 24 h byl z formy vyjmut pruh silikonového kaučuku – základ budoucí raznice. Povrch raznice je totožný s povrchem dřevěného trámu.



Obr. 22 Sestavený celek nanášecího válce.



Obr. 23 Finální podoba raznicového válce, umožňující vytváření nekonečného pásu reliéfu otisku dřevěného bednění na povrchu betonu.

## 17. Použitá literatura

- [1] ASPDIN Joseph. An Improvement in the Mode of Producing an Artificial Stone. British Patent BP 5022, 1824.
- [2] SEIDLEROVÁ Irena a Jiří DOHNÁLEK. *Dějiny betonového stavitelství*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 1999, 328 stran.
- [3] BÁRTA Rudolf. *Chemie a technologie cementu*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961, 1108 stran.
- [4] ČSN 72121 Cement portlandský, struskoportlandský a pucolánový. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1956, zrušena 1972.
- [5] ČSN 72 2121 Portlandský cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [6] ČSN 72 2122 Struskoportlandský cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [7] ČSN 72 2123 Vysokopecní cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [8] ČSN 72 2124 Silniční cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [9] ČSN 72 2125 Síranovzdorný cement. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Platnost od 1972, zrušena 1994.
- [10] 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.
- [11] Bárta, R. Nové cementy. *Stavivo* 2, č. 13, 1922, s. 213.
- [12] Soc. J. et A Pavin de Lafarge, fre. Pat. 390.280, 1908.
- [13] Usnesení vlády ČSFR č. 163/85 k řešení problémů železobetonových konstrukcí, 1985.
- [14] Rovnaníková Pavla. Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí. *Beton TKS*, č. 2, 2017, s. 3-8.
- [15] ČSN 73 1373 Nedestruktivní zkoušení betonu - Tvrdoměrné metody zkoušení betonu. Platnost od září 2011.
- [16] ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku. Platnost od září 2019.
- [17] ČSN EN 12390-1 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy. Platnost od února 2013.
- [18] ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích. Platnost od února 2020.
- [19] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Platnost od dubna 2020.
- [20] RYBICKI Rudolf. *Schäden und Mängelen an Baukonstruktionen*. Düsseldorf: Werner Verlag, 1976.
- [21] ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Platnost od března 2005.



- [22] ČSN 731371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Platnost od září 2011.
- [23] ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí. Platnost od května 2012.
- [24] ČSN 73 1318 Stanovení pevnosti betonu v tahu. Platnost od června 1986.
- [25] ČSN EN 196-2 Metody zkoušení cementu – Část 2: Chemický rozbor cementu. Platnost od června 2013.
- [26] ČSN EN 13925-2 Nedestruktivní zkoušení - Rentgenová difrakce polykrystalických a amorfních materiálů - Část 2: Postupy. Platnost od srpna 2003.
- [27] ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Platnost od září 2019.
- [28] JAMBOR Jaromír. *Chemické rozbory v stavebníctve*. Bratislava: SAV, 1953, 445 stran.