20 Reparation

Af Jens Mejer Frederiksen

Figur 1. Reparation af bærende betonkonstruktioner udføres for at afhjælpe tidligt opståede fejl, for tidlig/hurtig nedbrydning og/eller for at genskabe konstruktionens bæreevne. Betonreparationer er meget dyrere pr. enhed end etableringen af betonkonstruktionen oprindeligt var. Derfor skal reparationsarbejde overvejes og udføres på det korrekte grundlag, med egnede metoder og med de rette materialer. Billedet viser et eksempel på en møjsommelig proces med at reparere dæklagsskader og installere katodisk beskyttelse på svært tilgængelige områder.

Reparation af betonkonstruktioner skal overvejes meget nøje og fortrinsvis anvendes, hvis årsagen til skadens opståen er klarlagt og bliver afhjulpet, samt at reparationen vil få en holdbarhed, der er sammenlignelig med den omgivende konstruktions resterende levetid.

Enhedsprisen for lokale reparationer på nyopførte betonkonstruktioner er mange gange højere end enhedsprisen for konstruktionerne som helhed, hvorfor fejl i udførelsesfasen ofte vil være bekostelige for den skadevoldende part. Ved omfattende reparationer på

eksisterende konstruktioner vil omkostningerne tilsvarende ofte kunne beløbe sig til en forholdsvis stor andel af genanskaffelsesværdien, men erfaringerne viser, at så længe reparationsomfanget er så begrænset, at prisen for reparationerne kun er cirka halvdelen af anskaffelsesprisen for en tilsvarende ny hel konstruktion eller konstruktionsdel, kan reparation betale sig.

En mislykket reparation eller en reparation, der ikke har lige så lang holdbarhed som den omgivende konstruktion, vil sjældent være rentabel i forhold til at reparere korrekt første gang. Derfor bør reparationer udføres korrekt, dvs. på det rette grundlag, på den rigtige måde og med egnede materialer.

Nærværende kapitel gennemgår en række grundprincipper for at udføre forebyggende og udbedrende vedligeholds- og reparationsarbejder, og der henvises til den fælleseuropæiske serie af standarder i DS/EN 1504-serien, der er udarbejdet som en følge af de ovenfor beskrevne problemstillinger.

20.1 Generelle principper

20.1.1 Teknisk begrundelse for reparation

Reparationsarbejder på betonkonstruktioner kan udføres med forskelligt formål:

- Udbedring af skader/støbefejl opstået i forbindelse med opførelse af konstruktionerne.
- I forbindelse med forebyggende vedligehold.
- I forbindelse med udbedrende vedligehold.
- I forbindelse med forstærkning af konstruktionen.

Reparationer, der udføres i udførelsesfasen eller i direkte tilslutning til denne, sker som regel ikke, fordi betonen har været udsat for nedbrydning, men fordi der er opstået en fejl, som betyder, at betonen (lokalt eller generelt) ikke har den konditionsmæssige kvalitet og/eller ikke har den konditionsmæssige styrke/stivhed.

Vederlagsskader relateret til konstruktionens deformationer som følge af SKT-påvirkninger (Svind, Krybning, Temperaturændringer) og lastvirkninger opdages ofte først efter, at konstruktionen er i normal drift, men før egentlige nedbrydningsprocesser er fremskredne. Sådanne skader skal analyseres statisk og afhjælpes korrekt, da de ellers kan være udgangspunkt for en senere skadesudvikling eller i alvorlige tilfælde svigt af konstruktionen.

Alle byggematerialer – herunder beton – nedbrydes med tiden. De nedbrydningsprocesser (undtagen brand), der kan finde sted i beton, er alle afhængige af tilstedeværelsen af fugt eller vand. Udsættes beton for frysning i vandmættet tilstand, er der risiko for frostskader, dvs. frostsprængninger, idet vand ved frysning udvider sig. Desuden spiller luftens CO_2-indhold og omgivelsernes saltindhold (fra tøsaltning og havvand) ofte afgørende ind.

For så vidt angår nedbrydningsprocesser, hvori indtrængning af chlorid, CO_2 og vand/fugt indgår, opdeles levetiden i en initieringsfase, hvor indtrængningen sker og en propageringsfase, hvor skader udvikles – se fx Betonhåndbogens kapitel 19.3.5.1. Reparation og overfladebeskyttelse skal spille sammen med denne stiliserede beskrivelse af levetiden.

Reparation eller overfladebeskyttelse udført pga. udførelsesfejl, dvs. *før* en egentlig nedbrydningsperiode har fundet sted, skal medvirke til at gøre initieringsfasen lang og gerne mindst lige så lang, som den ville have været, hvis ikke udførelsesfejlen var sket.

Overfladebeskyttelse kan også udføres på et senere tidspunkt mange år efter opførelsen - før skader opstår - for at forlænge initieringsfasen.

Når behov for reparation indtræder på en konstruktion, der har været eksponeret i en årrække, følger det af definitionen for initieringsfasen i Betonhåndbogens kapitel 19.3.5.1 Reparation og overfladebeskyttelse, at propageringsfasen er begyndt. Fra dette tidspunkt skifter vedligeholds-/reparationsstrategien fra at være *forebyggende* til at være *afhjælpende*.

Dvs. fra dette tidspunkt vil flere og flere skader opstå, indtil konstruktionen når den maksimalt, acceptable nedbrydningsgrad, hvilket er forskelligt fra konstruktion til konstruktion, men som er bestemt af forhold som følger:

- Tilliden til konstruktionens fortsatte funktionsevne.
- Risikoen for personskade ved ophold/færdsel på eller ved konstruktionen.
- Risikoen for tab af menneskeliv og betydelige værdier, hvis konstruktionen svigter.
- Omkostningerne til at drift og vedligehold kan holde konstruktionen i sikker stand.

Figur 2. Billedet viser en skade på en konsol ved et vederlag for et betonelement i et parkeringshus ét år efter ibrugtagning. Konstruktionens horisontale bevægelser (SKT-bevægelser) og den lokale geometri på oversiden af konsollen har hér medført en afskalning, der har reduceret vederlagsdybden med ca. 3 cm. Herved er dæklaget på armeringen i konsollen reduceret markant. Der skal findes en reparationsmetode, der både afhjælper det opståede problem (tab af vederlagsdybde og dæklag på armeringen) og (de mange) nabovederlags latente problemer af samme type.

Hvis alle steder på konstruktionen var eksponeret fuldstændig ens, udført med præcis samme betonkvalitet og præcis samme dæklag på armeringen, så ville skaderne finde sted indenfor et kort tidsinterval. Sådan forholder det sig kun sjældent i virkeligheden.

En undtagelse fra dette kan være, når beton er under omdannelse, fordi delmaterialerne ikke har været forenelige, hvilket ofte er sket i Danmark (før ca. 1986) i form af alkali-kiselreaktioner, dvs. reaktioner imellem reaktiv flint i tilslaget og alkali stammende fra cementen og/eller fra omgivelserne - se kapitel 19.1 Alkalireaktioner. Chlorid (Cl^-) kan også være skadevolder på armeringen – se kapitel 19.3 Chloridindtrængning, hvis der er tilsat for store mængder allerede ved betonfremstillingen. I sådanne tilfælde kan skader indtræde udbredt indenfor ganske kort tid.

Figur 3. Beton støbt i 1981 – foto optaget i 1986 – skadet som følge af alkalikiselreaktion i sandets overkorn. Dvs. partikler over 4 mm. Sandet var efter prøvning for alkalireaktivitet godkendt til brugen, men de reaktive overkorn i sandet var iht. den anvendte prøvningsmetode sorteret fra før prøvningen, og indgik således ikke i prøvningsresultatet.

Skader, der skyldes udefrakommende nedbrydningsprocesser eller, at salt er tilsat betonen ved støbningen, er ofte dæklagsskader, dvs. afskalninger af det dækkende betonlag, der skal beskytte armeringen, sikre konstruktionens brandsikkerhed og sikre armeringens samvirken med betonen.

Er indvirkningen af frost den mest betydende skadeårsag, kan der typisk være sket følgende:

- Betonen er frosset så tidligt, at dens tidlige hærdning er blevet forstyrret, hvorved styrken og stivheden af betonen er reduceret – se et eksempel på figur 4.
- Betonoverfladen har fået overfladeafskalninger som følge af, at den har været udsat for frysning i en så fugtig tilstand, at dens manglende frostbestandighed er blevet åbenlys.
- Betonmaterialet har fået indre ødelæggelser, hvilket typisk opleves som overfladeparallelle revner, der måske ses på overfladen som netrevner. På sideflader ses revner, der er parallelle med oversiden. Ødelæggelserne skyldes, at betonen ikke er frostbestandig, samtidig med, at den er udsat for kraftig vandpåvirkning.
- Betonen indeholder frostfarlige sten, der er blevet opfugtet og sidenhen er ekspanderet ved frysning, så såvel sten som betonen uden på denne er blevet

sprængt – ses på beton af ældre dato ofte samtidig med indre frostskader, jf. foregående punkt.

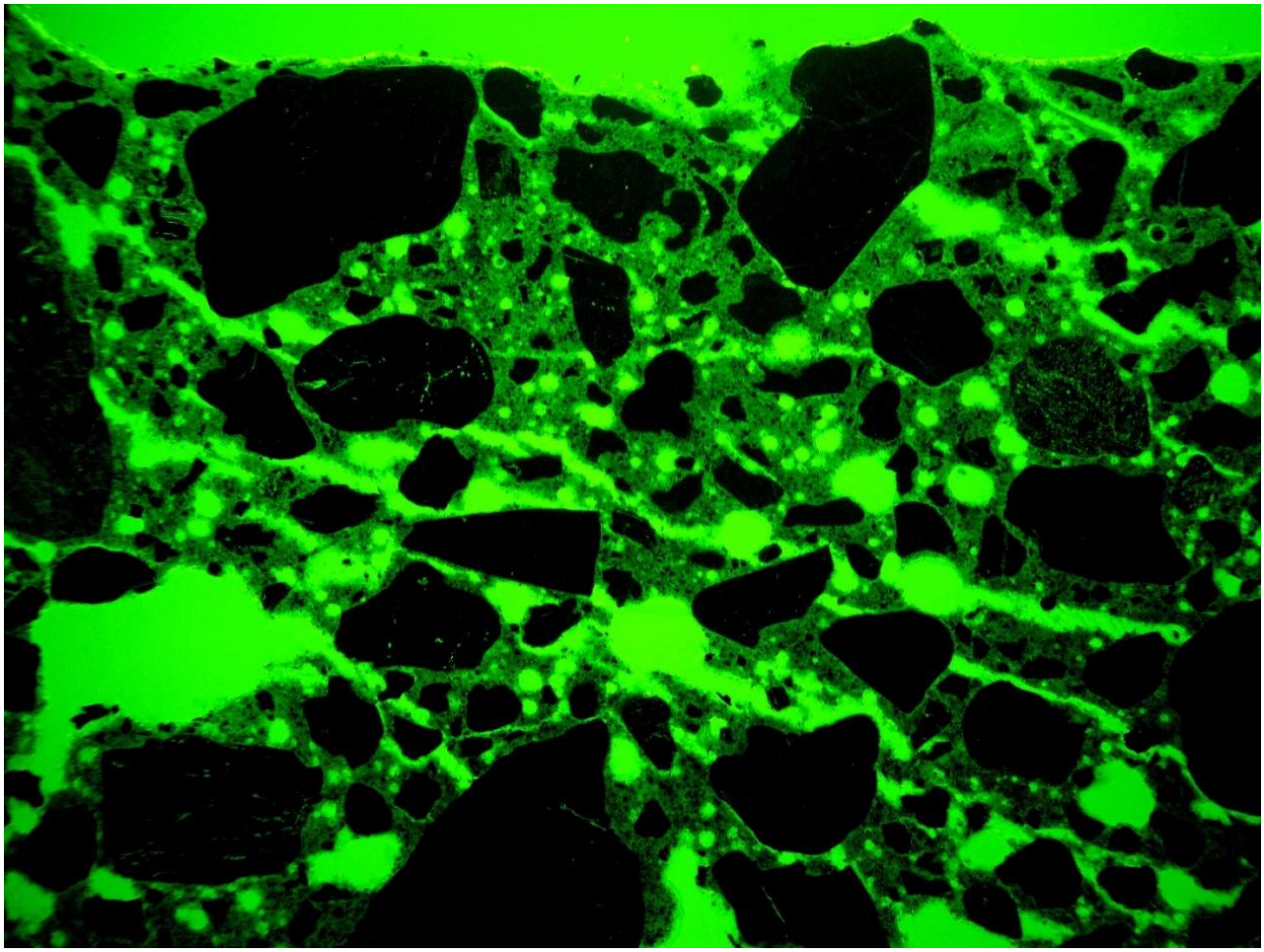
Skader, der skyldes alkalikiselreaktioner – se figur 3, betyder oftest, at betonmaterialet både har fået overfladerevner og indre revnedannelser. Ofte kan skadevirkningen ikke fjernes uden at fjerne betonen, men korrekt overfladebeskyttelse/fugtisolering kan hindre sekundære nedbrydningsprocessers betydning (fx frostødelæggelse og armeringskorrosion), jf. kapitel 20.2 Overfladebeskyttelse herom. I sjældnere tilfælde kan reaktionerne være forløbet så vidt, at betonens trykstyrke er blevet reduceret så meget, at reparation ikke kan betale sig, fordi konstruktionens bæreevne er blevet utilstrækkelig.

Ved forstærkning af konstruktioner gælder det om at ændre/justere på konstruktionens geometri og/eller opbygning på en sådan måde, at den bliver stærkere, men samtidig at den i samspil med den oprindelige konstruktion opnår en tilfredsstillende holdbarhed.

20.1.2 Teknisk-økonomiske overvejelser

I vedligeholdelsesstrategien bør altid overvejes forskellige muligheder. Herunder hører overvejelser om følgende, jf. [1]:

a) Gør intet andet end at overvåge indtil videre
b) Revurder konstruktionens bæreevne evt. for at nedgradere funktionen
c) Forebyg eller reducer yderligere nedbrydning
d) Forstærk eller reparer og beskyt hele eller dele af betonkonstruktionen
e) Genopfør eller erstat hele eller dele af betonkonstruktionen
f) Nedriv hele eller dele af betonkonstruktionen.



Figur 4. Beton skadet af tidlig frysning som følge af mangelfuld beskyttelse imod tidlig frysning, før betonens afbinding havde fundet sted. Billedet er optaget i UV-lys i mikroskop med betonoverfladen opad. Billedet viser et udsnit på 1,9 x 2,8 mm.

Følgende grupper af forhold skal indgå:

- Basale krav, fx:
  Den fremtidige brug, restlevetiden, krav til konstruktionen (fx vandtæthed, brandmodstandsevne), holdbarheden af reparationsarbejdet, antallet af og prisen for tilbagevendende reparationsarbejder, prisen for fremtidige eftersyn, den samlede investering set over hele konstruktionens levetid, udseendet.
- Konstruktive krav, fx:
  Lastoptagelsen før, under og efter reparationsarbejdet.
- Sikkerhed og sundhed, fx:
  Konsekvensen af svigt, sikkerheds- og sundhedskrav under reparationsarbejdet, miljøpåvirkninger på brugere og omgivelser
- Eksponeringsbetingelser, fx:
  Kan miljøet ændres? Kan hele eller dele af betonkonstruktionen beskyttes midlertidigt eller permanent?

En såkaldt 'nutidsværdiberegning' bør anvendes til at afgøre, hvilket reparationsalternativ, der er mest fordelagtigt. Desværre har denne metodik den svaghed, at det ofte er renteniveauet, der afgør om 'laden stå til', 'reparer nu' eller 'udskift nu' bliver den mest fordelagtige løsning.

Beregningen udføres ved først at foretage en overslagsmæssig prissætning af hver af de mulige reparationsalternativer (fx svarende til listen a) til f) ovenfor). Derefter placeres de enkelte handlinger på det tidspunkt, hvor de forventes at forekomme. Her kommer 'holdbarheden' af reparationen/tiltaget til at spille en rolle. Fx vil holdbarheden af en overfladebeskyttelse med maling typisk skulle eftergås og genbehandles/udskiftes helt eller delvist hyppigere end en udført forstærkning.

Figur 5. Konsolbjælke med omfattende skader udviklet pga. indtrængning af vand, der undertiden indeholdt salt (chlorid). Betonens evne til at beskytte armeringsstålet imod korrosion er herefter udtømt, hvilket har ført til ekspanderende korrosion af armeringen og revner i betonen.

Udgiften af en given type, x til en given tid, t benævnes $S_{x,t}$. Diskonteringsrenten benævnes r. Der ses bort fra inflation – dvs. der regnes med faste priser. Den oprindelige investering (anskaffelsesprisen for konstruktionen) indgår ikke i beregningen, men den aktuelle værdi skal medregnes, hvis alle scenarier skal dækkes. Hvis man på et givent betragtningstidspunkt i et bygværks levetid herefter overvejer mulighederne for reparation/vedligehold, skal man føre en udgift tilbage betragtningstidspunktet for at få udgiftens nutidsværdi vha. følgende udtryk:

(20.1) $$S_{NU} = S_{x,t} \cdot (1 - r)^t$$

Uanset renteniveau – så bestemmes det optimale 'reparationstidspunkt' (altså hvornår man skal iværksætte arbejdet) ofte af sekundære omkostninger, som påføres pga. nedbrydningens konsekvens, fx restriktioner i brugen af et parkeringshus eller byggetiden, der kræves til reparationen pga. omfanget.

Med hensyn til optimalt valg af reparationsstrategi, så er det værd at studere dette yderligere i [2] (afsnit 2.8.2) – se link i litteraturlisten).

Tabel 1. Eksempel: En konstruktion har en levetid på 50 år og en aktuel værdi på 100.000 kr. efter 25 år. Der er udført en overslagsmæssig prissætning af hver af de mulige reparationsalternativer (svarende til listen a) til f) i teksten ovenfor). Restværdien ved levetidens ophør (om 25 år) modregnes i nutidsværdien. Ved alternativ a) skal bygværket nedrives og opføres på ny om 15 år. Diskonteringsrentesatsen er 4 % p.a. Det ses af beregningen, at alternativ d) er det mest fordelagtige. Havde renten i stedet været 7 %, ville alternativ c) have været mest fordelagtigt. Ved en rente på 12 % bliver alternativ a) det mest fordelagtige.

Diskonteringsrente	4%	p.a.				
Levetidsscenarium/ reparationsalternativ	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Afskrivning, nu		50.000				100.000
År fra nu						
0			10.000	20.000	100.000	15.000
5			5.000			
10			5.000	5.000		
15	115.000		5.000			
20			5.000	5.000		
25			5.000			
Restværdi	(80.000)	-	(20.000)	(40.000)	(60.000)	-
Nutidsværdi	**33.508**	**50.000**	**16.916**	**11.118**	**78.376**	**115.000**

20.1.3 Tilstand af betonkonstruktioner og bygværker

Konstruktioner bør som udgangspunkt være konstrueret af materialer, der er holdbare i det miljø konstruktionen befinder sig i, eller være beskyttet mod miljøet på en sådan måde, at hastig nedbrydning ikke finder sted. Mange forhold kan influere på udgangssituationen, og derfor skal der holdes et regelmæssigt opsyn med konstruktionen. Eftersyn er betegnelsen for dette specialiserede opsyn, og tager sigte på at observere om konstruktionen under brug fungerer efter hensigten, og om holdbarheden er uanfægtet.

Funktionen af afvandingssystemer og afvandingsforhold, tegn på utilsigtede gennemsivninger, tegn på opfugtning, deformationer, udvikling af revnedannelser, erosion, forvitring mv., er forhold, som eftersynet skal have fokus på. Der henvises til kapitel 18 Betonkonstruktioners tilstand for en mere detaljeret indføring i emnet.

Det er vigtigt, at, når der er konstateret et muligt reparationsbehov i forbindelse med et eftersyn, der udføres en nærmere undersøgelse for at afklare følgende:

- Problemets karakter
- Problemets betydning
- Problemets omfang
- Problemets afhjælpning
- Økonomien forbundet hermed
- Omkostninger til drift og vedligehold.

Hos den erfarne sker der ofte det, at en del af listen ovenfor gennemgås, imens løsningen udtænkes, og der indgås aftale med en entreprenør om afhjælpningen. I akutte

tilfælde er det både forståeligt og acceptabelt, men akut afhjælpning er uøkonomisk, og ofte får man ikke omkostninger til drift og vedligehold medregnet.

Figur 6. Figuren viser et (specielt) eksempel på en skjult støbefejl i en underjordisk ferskvandstank (ikke til drikkevand). Tv. ses en del af rodnettet fra et træ. Rødderne har fundet vej igennem betonvæggen til vandet i tanken. Th. ses, efter udboring af en prøve, hulrum i betonen. Disse hulrum har via små huller i væggen skabt forbindelse til jorden uden for tanken og vandet i den. Indsat øverst th. ses stumper af armering med tydeligt reduceret tværsnit efter flere års korrosion af stålet efter påvirkning af ferskvandets strømning.

Der bør altså først skabes et overblik over konstruktionens holdbarhedsmæssige tilstand, så der derefter kan planlægges de nødvendige reparations- og beskyttelsesarbejder. Disse kan herefter udbydes i priskonkurrence, hvorved der skabes sund konkurrence om arbejdets udførelse efter specifikationer, der fastlægger den ønskede kvalitet af arbejdet. Herved opnår man en forbedret konstruktion, der har mere forudsigelige omkostninger til drift og vedligehold.

20.1.4 Skadesårsager

I Danmark er der fire dominerende årsager til, at beton i udendørs eller på anden måde aggressive miljøer udvikler fysisk eller kemisk betingede skader (se punkt 1-4 i nedenstående liste). Desuden udsættes konstruktioner undertiden for så stor overbelastning, at skader opstår. Og forholdsvis ofte fører udførelsesforholdene eller udførelsesmetoderne til skader eller behov for afhjælpning af mangler.

En ikke-udtømmende liste er som følger:

1. *Alkalikiselreaktioner* (AKR) imellem reaktiv porøs flint i visse danske grus- og stenforekomster, fugt, alkali (natrium og kalium) fra cementen og evt. med tilskud af udefrakommende alkali fra tøsalt eller havvand – se kapitel 18.
2. *Kloridindtrængning* i betonen, hvilket kan føre til, at armeringen ruster, svækkes og afskaller betondæklaget – se kapitel 18.2.
3. *Karbonatisering* af betondæklaget ved indtrængning af CO_2 (kulsyre), hvilket vil fjerne/reducere betonens pH og dermed betonens ellers naturlige evne til at beskytte armeringen mod rustdannelse – se kapitel 18.3.

Figur 7. Træuldbeton – der hyppigst omtales med handelsnavnet Troldtekt – blev før i tiden ofte udlagt i formen før betonens udstøbning for at opnå en vis varmeisolering (for modvirkning af kondens). Fastholdelsen skete med 5 mm trådbindere og er derfor forholdsvis god i store områder. Betondæk støbt med træuldbetonplader i bunden af formen lider ofte af den skavank, at en del af cementpastaen og cementmørtelen fra betonen er løbet ned i træuldbetonens grove porestruktur, hvorved den nederste del af betonen (hvor armeringen er placeret) kan blive drænet for mørtel og armeringens omstøbning med kompakt beton kan blive spoleret. Om dette er sket udbredt eller stedvis og i kritisk omfang, kræver en fuldstændig fjernelse af træuldbetonen fra undersiden, hvilket er besværligt og dyrt, men nødvendigt, hvis tilstanden skal bedømmes korrekt. Selv alvorlige skader kan skjules af de porøse og fastsiddende plader.

4. *Frostødelæggelse* af betonen som følge af kraftig opfugtning i kombination med manglende frostbestandighed af betonens kitmasse og/eller af betonens stentilslag (sten af porøs flint og/eller kalk).
5. *Brandskader* på betonkonstruktioner, hvor betonen kan miste noget af sin styrke eller afskalle eksplosivt, og hvor især armeringsstålets styrke kan reduceres så meget, at forstærkning eller udskiftning af en eller flere konstruktionsdele er nødvendig.

6. *Belastningsskader*, hvor en eller flere konstruktionsdele har fået lokale skader (fx vederlagsskader) eller globale skader (fx overbelastningsskader), hvor en brudmekanisme evt. er udviklet.
7. *Mekaniske skader*, hvor en konstruktionsdel har fået et mindre slag, så hele eller en del af dæklaget uden på armeringen er slået af lokalt, men hvor konstruktionen som helhed ikke har lidt skade.
8. *Udførelsesbetingede skader*, hvor en konstruktion- eller konstruktionsdel er fejlagtigt udført eller blevet udsat for en behandling, forhold eller påvirkninger, så der er opstået skader, der kræver afhjælpning.

Hvilken skadesårsag, der er den dominerende, er ofte helt afgørende for, hvilken reparationsmetode man kan anvende med godt resultat. Flere skadesårsager kan være på spil samtidig (og den første kan forårsage den næste). Men det er som regel den, der kom først (den primære skade), der skal fokuseres på, for hvis den ikke var opstået, ville den sekundære skade (måske) ikke være opstået.

Eksempel 1 (fra praksis). Søjler med langsgående revner undersøges for korrosionsaktivitet. Man finder frem til, at armeringen ruster. Man etablerer katodisk beskyttelse for at standse korrosionsaktiviteten. Efter arbejdets færdiggørelse revner søjlerne på ny. Der udbores kerner, der laboratorieundersøges og det fremgår derefter, at betonen er revnet som følge af alkalikiselreaktioner.

Eksempel 2 (fra praksis). Betonautoværn med store afskalninger og rusten armering udskiftes til nye autoværn med rustfast armering. På en lignende nærliggende vejstrækning med samme bygherre opsættes samme type nye betonautoværn, men med almindelig armering. Valg af dyr rustfast armering til strækningen med de skadede betonautoværn var næppe sket, hvis man havde undersøgt betonen, idet disse få år efter etableringen udviklede omfattende revnedannelser som følge af alkalikiselreaktioner.

Hvis man ikke får identificeret den primære skadesårsag eller ikke har fyldestgørende oplysninger om konstruktionens historik, risikerer man enten at udføre en uholdbar og forkert reparation, eller man risikerer at udføre en for dyr reparation/udskiftning – og begge dele er uøkonomisk.

20.1.5 Undersøgelsesprogram

Undersøgelsesmetoderne i undersøgelsesprogrammet skal udvælges, så man får svar på de spørgsmål 'man ikke kan ræsonnere sig til' ud fra forhåndskendskabet til konstruktionen (fx byggeperiode, tegninger, fremstillingsmetode og historik).

Desuden bør undersøgelserne være 'fremadskuende' af natur. Det vil sige, at fastlæggelse af de parametre, der er bestemmende for at kunne 'skue fremad' (fx om den reparerede konstruktions restlevetid), er mere vigtigt end at udføre repeterede undersøgelser i skadede områder.

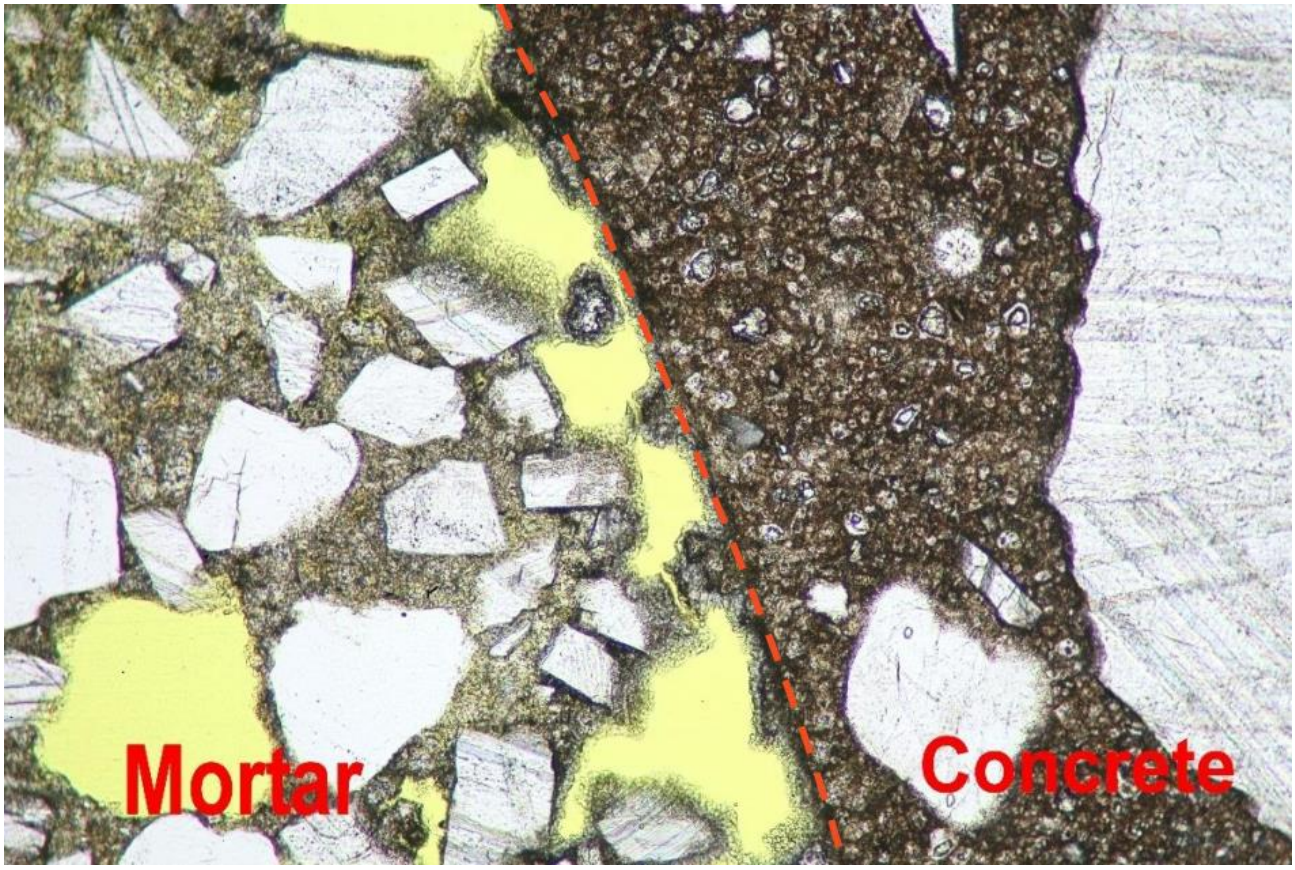
Vejen til at finde frem til den primære skadesårsag er følgende:

Figur 8. Prøveudtagning fra en brandskadet konstruktion kan være særligt udfordrende, da selve årsagen til skaden, branden, har misfarvet overfladen. Heldigvis er formålet med undersøgelsen som regel begrænset til at fastslå, hvor høj temperaturen har været ved armeringen, så det vha. temperaturbetingede omdannelser i betonen, kan afgøres om armeringen har lidt et styrketab på et eller flere for konstruktionen kritiske steder. Dette afgøres af konstruktionens udformning og virkemåde, hvorfor man alene skal vurdere hvor branden kan have haft en skadelig virkning.

1. *Visuel besigtigelse på stedet.* Fotografering af geometri, optegning af revnebilleder, bedømmelse af fugtpåvirkning, vurdering af afvandingsforhold, placering af skader, skønsmæssigt omfang af skader, muligheder for prøveudtagning (herunder trafikale forhold).
2. *Opstilling af en foreløbig skadeshypotese.* Det er mest økonomisk at gætte kvalificeret på hvilke skadesmekanismer, der er på spil, og så planlægge og prissætte de nødvendige undersøgelser på dette grundlag. Man vil ofte finde ud af, at der kun kan udføres en lille delmængde af de undersøgelser, man faktisk kunne tænke sig, da økonomien hertil er stærkt begrænset.
3. *Udtagning af prøver.* Et lille antal borekerner udtaget fra repræsentativt eksponerede områder af konstruktionen kan give mere brugbar information, end mange borekerner udtaget fra tilfældige (og dermed mindre repræsentative) områder.

   Med andre ord: Man skal udvælge prøvestederne omhyggeligt og hellere have få gode prøver, end mange mindre gode (dvs. mindre repræsentative), men man bør altid overveje brugen af statistisk forsøgsplanlægning, når der er tale om

større konstruktioner – se [2], afsnit 2.3. Der gælder en række almindelige forholdsregler om prøveudtagning, hvoraf kun én skal nævnes her: Konstruktionens fortsatte anvendelighed (dvs. fx bevarelse af styrke, stivhed og vandtæthed).



Figur 9. Billedet viser et 1,2 x 1,8 mm stort udsnit af støbeskellet (rød stiplet kurve) i en betonreparation, der oprindeligt var blevet udført på et betonelement kort efter afformningen. Forståelsen af årsagen til reparationen var central i forståelsen af årsagen til, at der var sket en uvarslet afskalning af et stykke beton fra facaden 8 m over et offentligt befærdet areal, 40 år efter bygningens opførelse, hvor prøven blev udtaget. Betonen havde ikke nogen nævneværdig karbonatisering generelt, ikke noget kritisk chloridindhold og dæklaget på armeringen var som foreskrevet. Dvs. der var ikke nogen indlysende årsag til skadens opståen. Ved at sammenholde produktionstegningerne, de udtagne prøvers overflader og fundet af det regelmæssige forløb af støbeskellet, kunne det slås fast, at dele af elementernes bagsider var støbt imod overforskalling. Herved var der opstået luftblærer, så man ved afformningen kunne konstatere, at områder af armeringen ikke var blevet omstøbt. Derfor var der blevet udført kosmetiske betonreparationer med en mørtel (ses tv. for den stiplede kurve) fremstillet af så den lignede facadebetonen (ses th. for den stiplede kurve), men uden sten, med mere sand og med et højere v/c-forhold. Fordi støbeskellet ikke blev godt tilstøbt og reparationsbetonen havde et for højt v/c-forhold var holdbarheden af det fejludstøbte, reparerede område på elementet mindre holdbart end resten af elementet, hvorfor armeringen kunne ruste lokalt, hvilket 40 år efter opførelsen førte til en farlig dæklagsafskalning.

4. *Undersøgelser på stedet.* Det er oftest relevant at have et indblik og overblik over armeringens dæklag forskellige steder på konstruktionen – især stor forekomst af afvigende dæklag enten for små (holdbarhed) eller for store (styrke/stivhed/revnestyring) kan være afgørende for valg af reparationsmetode.

   Af andre undersøgelser kan nævnes simpel bankning med hammer for at finde større afskallede områder. Endelig bør der udføres opmålinger således, at hovedmængderne er kendt. I første omgang behøves ikke yderligere undersøgelser på stedet. Disse undersøgelser kan typisk med fordel udføres samtidigt med, at prøveudtagningen foregår.

5. *Undersøgelser i laboratoriet.* Den mest afgørende parameter for betons holdbarhed er betonens vand/cement-forhold. Desuden er frostbestandigheden og tilbøjeligheden til at udvikle alkalikiselreaktioner væsentlige. Disse parametre undersøges let ved tyndslibsanalyser.

   Af kvantitative undersøgelser er indholdet og fordelingen af chlorid samt dybden af karbonatiseringen uundværlige. Chloridindholdet bør måles i flere dybder, men som minimum lige foran karbonatiseringsfronten samt ved armeringen.

   Karbonatiseringsdybden måles på planslib eller på borekernen. Måles der direkte på konstruktionen skal man være opmærksom på risikoen for fejlbedømmelse af karbonatiseringsdybden (forurening af brudfladen/snitfladen) samt sundhedsrisikoen ved phenolphtalein.

   Desuden kan det undertiden være værdifuldt at kende til den potentielle restreaktivitet af alkalireaktive tilslagsmaterialer.

6. *Sammenfattende rapportering.* Forståelse af sammenhængen imellem gjorte observationer på stedet og observationer fra laboratoriet sker gradvist, men falder ofte første helt på plads, når man sammenfatter alle undersøgelserne under ét.

   Den sammenfattende rapportering af eftersynet bør føres så langt, at det er påvist, hvad den primære skadesårsag er: Konstruktiv udformning, dæklagstykkelsen, AKR, frost, chlorid, CO_2, kombinationer heraf eller anden skadesårsag. Det har fx tidligere været opfattelsen, at AKR kun forekom på broer sammen med frostskader, hvilket imidlertid ikke er korrekt.

   Derimod skal man være opmærksom på, at karbonatisering vil flytte indblandet klorid indad i betonen (se mere herom i kapitel 19.2 Karbonatisering og 19.3 Chloridindtrængning). Der kendes ikke til fortilfælde af kraftig korrosion, der er forårsaget af denne uheldige kombinationsvirkning i Danmark, men mindre dæklagsskader kan udvikles som følge heraf, hvorfor man skal være opmærksom på det.

Når man således har fastslået, hvad der var den oprindelige skadesårsag, kan reparationsprincippet vælges.

20.1.6 Valg af reparationsprincip efter DS/EN 1504-9

Siden 2009 har byggevaredirektivet foreskrevet, at der til reparation af betonkonstruktioner skal anvendes CE-mærkede reparationsprodukter. Dette blev implementeret i dansk lovgivning via bygningsreglementet. Den 1. juli 2013 blev byggevare*direktivet* afløst af byggevare*forordningen*, der derved indførte reglerne direkte i alle EU's medlemsstater m.fl. uden behov for implementering i landene.

Standarden DS/EN 1504-9, [1], redegør for grundlaget og metoderne for korrekt anvendelse af produkter, der er CE-mærket efter de harmoniserede produktstandarder (DS/EN 1504-2 til DS/EN 1504-7). DS/EN 1504-9 forudsætter, at årsagen til reparationsbehovets opståen er kendt. Det betyder, at man skal undersøge konstruktionen og betonen og vurdere hvilke indgreb, der er relevante – svarende til gennemgangen i de foregående afsnit.

Intentionerne bag DS/EN 1504-serien er at sikre en god metodik i hele reparationsprocessen. Hvis behov for reparation eller vedligehold viser sig, vælges reparationsprincip(er), -metode(r) og -produkt(er) med udgangspunkt i DS/EN 1504-9.

DS/EN 1504-9 anvender således (naturligvis) den samme metodik som beskrevet i de foregående afsnit ('find først skadesårsagen'). Herefter er der nogle standardiserede principper og reparationsmetoder, som skal følges. Dette gennemgås kort nedenfor.

I anneks A til DS/EN 1504-9 er der en udførlig vejledning og baggrundoplysninger til hele processen i et reparationsprojekt og faserne fremgår af figur A.1. I afsnit A.6 i DS/EN 1504-9 gennemgås formålet med hvert enkelt af de i alt 11 reparationsprincipper. Det vil føre for vidt at gengive disse hér, men principperne er opdelt i to grupper:

- Seks principper til reparation af defekter i beton.
- Fem principper vedrørende armeringskorrosion.

Det er tanken bag dette system at sikre en høj kvalitet af reparation af beton og at sikre, at reparationsprodukter opfylder visse minimumsstandarder og er egnede til formålet. Dette bevises ved produkternes CE-mærkning, deklaration af ydeevnen (DoP; Declaration of Performance) og brugerens vurdering af egnetheden. Særligt vurdering af egnetheden er afgørende for et godt resultat.

Ideen er, at reparationsprincippet fører frem til reparationsmetoden, hvorefter man kan finde frem til det/de reparationsprodukter, der er egnet til anvendelse ved netop denne/disse metode(r).

20.1.7 Funktionskrav til reparationer

De normalt forekommende generelle funktionskrav til reparationer er:

- Skal kunne udføres og fungere på den eksisterende konstruktion.

- Holdbarhed i det aktuelle miljø.

Er der tale om skader opstået under konstruktionens opførelse – dvs. udførelsesfejl, skal reparationen i princippet være af en sådan kvalitet, at den reparerede konstruktion er lige så god som, hvis udførelsesfejlen ikke var opstået. I dette tilfælde vil anvendelse af et reparationsprincip, der involverer en overfladebeskyttelse isoleret set næppe være attraktivt, idet der hermed indføres et øget behov for vedligehold i hele konstruktionens levetid.

I de tilfælde, hvor en konstruktion skal repareres, fordi betonens kvalitet var utilstrækkelig, eller fordi miljøpåvirkningen var værre end forudsat, skal reparationen som regel også forsynes med en ekstra beskyttelse – fx overfladebeskyttelse (se kapitel 20.2 Overfladebeskyttelse) eller katodisk beskyttelse.

20.1.8 Betydning af CE-mærkning

CE-mærkning er indført for at skabe fri konkurrence på EU's indre marked ved at sikre varernes frie bevægelse imellem landene. CE-mærket er beviset for at et produkt opfylder de minimumskrav, der gælder iht. den pågældende standard. Når et produkt er CE-mærket, kan det bringes på markedet i EU.

Reparationsprodukter til betonkonstruktioner CE-mærkes efter en af de seks produktstandarder i EN 1504-serien.

Som hovedregel skal CE-mærkningen af produkter og systemer til reparation og beskyttelse af betonkonstruktioner være underlagt en ekstern kontrol ved tredjepart (AVCP-system 2+), da de derved også kan anvendes på konstruktioner, der ikke kun har lave ydeevnekrav.

20.1.9 Litteraturliste

[1] DS/EN 1504-9. Produkter og systemer til beskyttelse og reparation af betonkonstruktioner – Definitioner, krav, kvalitetskontrol og overensstemmelsesvurdering – Del 9: Generelle principper for brugen af produkter og systemer, 2010.

[2] Håndbog, Eftersyn Af Bygværker, Drift, august 2019.