



**MECAMO
CONSULTING AS**
Gode og rimelige ingeniørgjenester

Dok.: F-001.03-MCAS-Kritiske Nedbrytningsprosesser i Betong

Av: Jarle E. Herstad (Siv.Ing)

08.11.2021	03	Korrigert og utgitt	JEH
03.01.2021	02	Utgitt	JEH
02.01.2021	01	Utgitt for gjennomlesning	JEH
<i>Dato utgitt</i>	<i>Rev.</i>	<i>Beskrivelse</i>	<i>Forfatter</i>

Innholdsfortegnelse

1	Kritiske nedbrytningsmekanismer	4
1.1	Mekaniske mekanismer	4
1.1.1	Mekanisk slitasje.....	4
1.1.2	Mekaniske støt	5
1.1.3	Utmatting, bevegelser og vibrasjoner.....	5
1.2	Kjemiske nedbrytningsmekanismer	6
1.2.1	Biologisk nedbrytning	6
1.2.2	Kloridifisering.....	6
1.2.3	Karbonatisering	7
1.2.4	Samtidig karbonatisering og kloridifisering.....	7
1.2.5	Syreangrep	7
1.2.6	Alkaliereaksjoner	8
1.3	Fysikalske mekanismer	8
1.3.1	Frost- og tinesykler	8
2	Fuktproblematikk.....	9
2.1	Mekanisk bundet vann i betong.....	9
2.2	Kjemisk bundet vann i betong.....	9
2.3	Fysisk bundet vann i betong	9
3	Korrosjon på armeringsjern.....	10
4	Delaminering	11
5	Symptomer	12
5.1	Riss - delaminering, bom og avskalling.....	12
5.2	Rustflekker	14
5.3	Utfellinger	14
6	Tilstandsundersøkelser som avslører kritiske komponenter.....	15
7	Gjenoppbygging av betongstrukturer	17
7.1	Tetting av dilatasjonsfuger.....	18
7.2	Gjenoppbygning av en skadet armert struktur etter kloridifisering / karbonatisering.....	19
7.2.1	Mekanisk reparasjon.....	19
8	Preventive tiltak.....	22
8.1	Preventivt tiltak – beskyttelse med gummikil i bunn av søyle mot underlag.....	22
8.2	Katodisk armeringsbeskyttelse	22
8.3	Bruk av anoder – passiv armeringsbeskyttelse.....	22
8.4	Coating og maling.....	22

9	Referanser / kilder	23
---	---------------------------	----

1 Kritiske nedbrytningsmekanismer

Betongrehabilitering er en utbedring av skadet betong. Betongkonstruksjoner bør ha et jevnlig vedlikehold og et kontinuerlig tilsyn i hele sin levetid og ikke minst for å være den beregnede levetiden. Betong, som de fleste andre materialer, utsettes for ulike mekaniske, kjemiske, fysikalske og fysiske angrep. Alle kan karakteriseres som nedbrytningsmekanismer. Idet en skal rehabilitere et betongbygg er det derfor viktig å ha god kompetanse og forståelse for hva en struktur har og er utsatt for slik at de riktige virkemidlene i.e. metoder og materialer, kan settes inn i rehabiliteringsarbeidet slik at rehabiliteringen blir varig. Tabellen under lister kategorisert de fleste typer nedbrytningsmekanismer som kan oppstå i / på betong.

Tabell 1 . Typer av nedbrytningsmekanismer

Mekaniske	Kjemiske	Fysikalske	Fysiske
Mekanisk slitasje	Biologisk nedbrytning	Fryse- og tinesykler	Brann
Støt	Salter / Klorider	Termiske sykler	
Utmatting	Karbonatisering	Krystallisering av salter	
Overlast	Klorider og CO ₂ i kombinasjon	Krymp	
Bevegelser	Sulfater	Siging	
Eksplasjon	Alkalier	Erosjon	
Vibrasjoner		Abrasjon (slitasje)	
Setninger			

I det videre er flere av de mest vanlige mekanismene som skaper armeringskorrosjon kort omtalt.

1.1 Mekaniske mekanismer

Konstruksjoner som brukonstruksjoner, ramper etc. som står plassert i områder med trafikk som bilkjøring etc. er spesielt utsatt for mekanisk slitasje eller støt.

1.1.1 Mekanisk slitasje

Ved brukonstruksjoner er spesielt veggene under ei bru svært utsatt for støt og oppskraping hvis det går trafikk under. Idet f.eks. en lastebil passer under brua kan fronten eller karnappet på bilen treffe vegg og skrape denne opp. For brua på bildet er dette særlig aktuelt vinterstid da det er glatt og smalt akkurat der. Ved oppskraping kommer armeringsjernet synlig frem i dagen. Armeringsjernet står nå helt åpent for vann, salt og oksygen og vil begynne å korrodere umiddelbart.



Bilde 1. Oppskraping og blottlegging av armeringsjern på bruvegg. (Foto: Mecamo Consulting AS)

1.1.2 Mekaniske støt

Ved brukonstruksjoner er også taket i brua svært utsatt for støt og oppskraping. Idet f.eks. en høy lastebil passer under ei bru kan karnappet på bilen nå helt opp til undersiden av brulegemet og der skrape av betongoverdekningen slik at armeringsjernet kommer synlig frem i dagen. Hvis ikke en slik skade repareres innen kort tid vil armeringsjernet nå stå helt åpent for omgivende påvirkning som vann, salt og oksygen. Armeringsjernet vil begynne å korrodere umiddelbart.



Bilde 2. Oppskraping og blottlegging av armeringsjern. (Foto: Mecamo Consulting AS)

1.1.3 Utmatting, bevegelser og vibrasjoner

Annen mekanisk påvirkning er f.eks. utmatting, bevegelser og vibrasjoner. Ei bru som kjøres over av et tungt tog vil stadig utsettes for rystelser og vibrasjoner i kortere perioder over lang tid. Hvis driften også endres over tid, f.eks. ved at det går tyngre godstrafikk over brua nå enn hva den ble dimensjonert for så er det også snakk om bevegelser. Etter en tid vil betongen sprekke opp og deretter ristes i biter. Biter kan falle av og skade personer og kjøretøy under det skadede området. Da betongen forsvinner vil det tidligere overdekkede armeringsjernet eksponeres for vann, salt og oksygen. Armeringsjernet vil begynne å korrodere umiddelbart. Å unngå nye skader av denne typen er vanskelig hvis ikke driftsforholdene endres til det bedre.



Bilde 3. Oppsprekking som resultat av utmatting av betong i togbru. (Foto: Mecamo Consulting AS)

1.2 Kjemiske nedbrytningsmekanismer

Som det ligger i begrepet «kjemiske nedbrytningsmekanismer» baserer denne type nedbrytningsmekanisme seg på at betongstrukturene eksponeres for kjemiske stoffer og bakterier, gjerne i samspill.

1.2.1 Biologisk nedbrytning

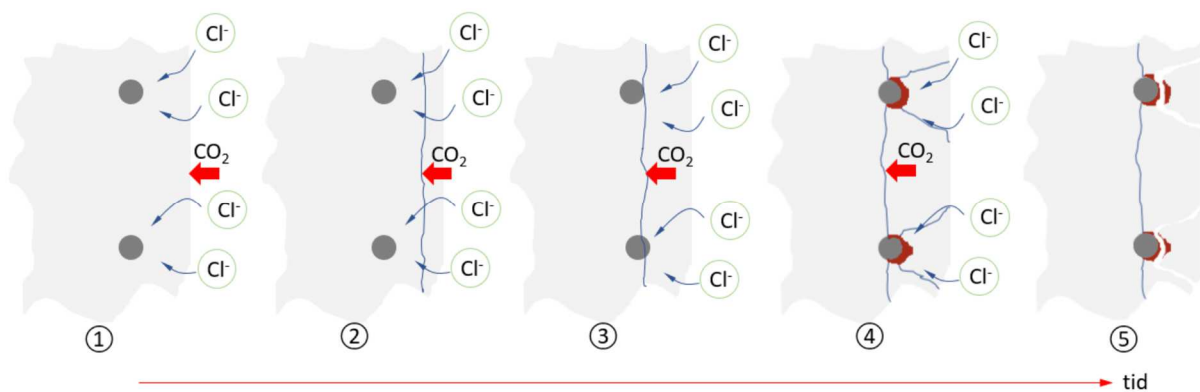
Biologisk nedbrytning er en del av en kjemisk eller en fysisk nedbrytningsmekanisme og skjer ved tilstedeværelse av levende organismer. Et biologisk angrep kan gå over i et kjemisk angrep over tid. Et sulfatangrep springer ut ifra et biologisk angrep og bryter ned betongstrukturer over tid. Kloakkrør og avløpsrør av betong er typiske og svært sårbare strukturer for slike angrep. Hydrogensulfid dannes i kloakkvann basert på sulfater og proteiner og omdannes til svovelsyre ved oksidasjon. Svovelsyre er en sterk syre og bryter ned betong forholdsvis raskt. Andre typer av biologiske mekanismer involverer bl.a. mose, alger, gress m.v. Begroing inneholder mye fuktighet og kan senere skape frostskafer vinterstid under de rette forhold og med temperaturer $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, se avsnitt 1.3.1

1.2.2 Kloridifisering

Det som gjerne er kildene til inntrengning av klorider i betongstrukturen i f.eks. et garasjeanlegg er veisalt. Under er det listet mulige kilder.

- Veisalt (NaCl)
- Klorider fra forurensning ved f.eks. produksjon
- Sjøvann
- Annen forurensning

Ved kloridinntrengning vil kloridioner (Cl^-) fra omgivelsene trenge inn i betongen ved diffusjon eller den nevnte hovedmekanismen, kapillærsuging ① og ②. Idet konsentrasjonen av kloridioner i nærheten av armeringsstålet når en kritisk verdi vil man få lokale ødeleggelser av passivfilmen og dermed lokale korrosjonsangrep som gropkorrosjon ③ og ④. Svært høye konsentrasjoner av klorider bryter passivfilm ned over et større område slik at armeringsjernet i tillegg angripes av generell korrosjon. Gropkorrosjon danner ikke korrosjonsprodukter slik karbonatisering gjør. Derfor vil en kloridinitiert korrosjon være mye vanskeligere å oppdage i en tidlig fase før voluminøse korrosjonsprodukter fra den generelle korrosjonen etter en tid presser på fra innsiden og bryter biter løs fra betongstrukturen ⑤. Da kan tverrsnittet i armeringsjernet allerede være svært redusert. En reduksjon i armeringsjernet tverrsnitt reduserer betongens bæreevne.



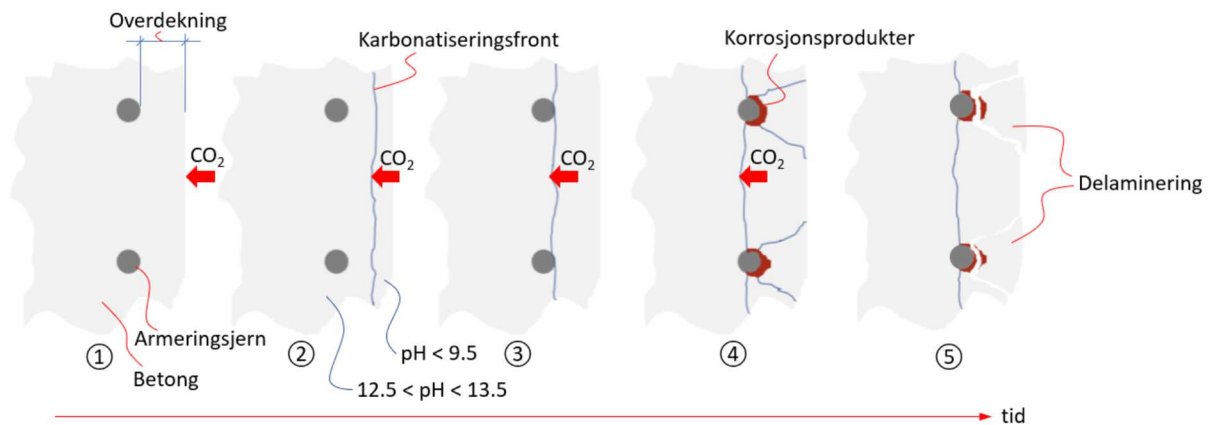
Bilde 4. Kloridifiseringsmekanisme vist i figur 1 – 5. (Illustrasjon: Mecamo Consulting AS)

1.2.3 Karbonatisering

Det som vil påvirke hvilken grad av karbonatisering betongen utsettes for er.

- Masseforhold (v/c -tall)
- Sementmengde og type sement
- Tilsetningsstoffer
- Relativ fuktighet i betongen
- Temperatur
- CO₂ -konsentrasjon i omgivelsene

En karbonatiseringsprosess er en naturlig kjemisk aldringsprosess i betong hvor den omgivende lufta diffunderer inn i betongen /13/. CO₂ løses fra luften vha. porevannet i betongen ①. Inne i betongen reagerer så CO₂ med Ca(OH)₂ (kalsiumhydroksid) som så omdannes til CaCO₃ (kalsiumkarbonat). Reaksjonen reduserer betongens pH til under 10 samt øker omfanget av porer i betongen ②. Selv om inntrengning av CO₂ fører til at betongens fasthet øker noe så vil økningen og da spesielt omfanget av porer bidra til å senke den alt i alt.



Bilde 5. Karbonatiseringsmekanisme vist i figur 1 – 5. (Illustrasjon: Mecamo Consulting AS)

Med stadig redusert pH i betongen inn mot armeringsjernet vil passivsjiktet som beskytter armeringsjernet i betongen gradvis reduseres og til slutt være redusert til ingenting ③. Hvis betongens pH < 9.5 inne ved armeringsjernene, så er s.k. «full karbonatisering» oppnådd. Armeringsjernet ligger da helt ubeskyttet og tilgjengelig for fuktighet og salter som kan trenge inn igjennom åpninger som nettopp porer og riss / sprekker i betongens ytre. Korrosjon oppstår og siden korrosjonsproduktene er voluminøse så vil trykket fra volumøkningen presse på betongen ④. Over sin strekkstyrke ($\sigma = 5 \text{ MPa}$) så vil betongen på strukturens strekkside delaminere og avskaling inntreffer ⑤.

1.2.4 Samtidig karbonatisering og kloridifisering

En samtidig karbonatisering og kloridinntrenging vil være en svært uheldig kombinasjon. Fordi karbonatisert betong binder klorider dårligere enn ny og frisk betong vil kloridene raskere diffundere gjennom et karbonatisert område og med det forefinnes i ekstra høye konsentrasjoner i front av karbonatiseringsprofilen.

1.2.5 Syreangrep

Flere ulike syrer kan bryte betongen ned ved at de løser opp bindestoffer i betongen. Bindestoffene omdannes så til ikke-bindende forbindelser som vaskes bort idet de utsettes / eksponeres for vann. Stadig tilførsel av syrer ved f.eks. kapillærsug gjennom betongstrukturens sitt poresystem vil spise seg innover i strukturen, se også avsnitt 1.2.1.

1.2.6 Alkaliereaksjoner

Alkaliereaksjoner oppstår ved at alkaliereaktivt tilslag som f.eks. silikaholdige bergarter reagerer med alkaliene i sementen. Reaksjonsproduktet sveller ved vannopptak og gir en kraftig volumøkning. Volumøkningen gir opprissing idet betongens strekkfasthet overskrides. Alkaliereaksjoner forutsetter tilgang på vann noe som finnes i tilstrekkelige mengder i de fleste betongstrukturer. Alkaliereaksjoner kan unngås ved å ha kontroll på det tilslag som benyttes samt velge sementtype basert på hvor reaktivt tilslaget er.



Bilde 6. Alkaliereaksjoner. Stalaktitter på undersiden av en betongstruktur. (Foto: Mecamo Consulting AS)

1.3 Fysikalske mekanismer

Det som vil påvirke hvilken grad av karbonatisering betongen utsettes for er.

- Fryse- og tinesykler
- Termiske sykler
- Krystallisering av salter
- Krymp
- Siging
- Erosjon
- Abrasjon

1.3.1 Frost- og tinesykler

Frost- og tinesykler kan føre til frostsprengning og avskalling av betongen. Som ved alkaliereaksjoner er det betongblandingen som er viktig for å unngå dette problemet. Bruk av lufttilførende midler har vist seg å øke motstandsdyktigheten mot frostsprengning. Porestrukturen gjør at betongstrukturen

kan fylles med vann fra nedbør. Når vannet fryser til is øker volumet med ca. 10 %. Volumutvidelsen vil skape strekkspenninger lokalt i betongen og er spenningen større enn betongens strekkfasthet oppstår riss og avskallinger.

2 Fuktproblematikk

Betong og da fersk betong er en flytende masse bestående av ca. 20 % vann, 15% sement, 15 % sand og resten stein. Idet en slik blanding størkner og herder vil ca. 20 % av den ferdige strukturen / betongen utgjøres av hulrom / porer. Hulrommene er da akkommodasjon for det største problemet med stående betongstrukturer nemlig fuktighet. Fuktighet er utgangspunktet for det som er den største faren for integriteten til en betongstruktur nemlig armeringskorrosjon. De mest vanlige måtene betong tar opp fuktighet på, er:

- Ved kapillært fuktoppsug i betongelementet
- Fukt etter opptørking av lekkasje/vann
- Kondenseringsproblematikk på overflaten av betongelementet
- Bruksfukt i f.eks. et rom bygget opp av betong. Skyldes produksjon av fukt gjennom opphold og aktiviteter i rommet
- Byggfukt

Kapillært fuktoppsug er den klart største bidragsyteren til fuktproblematikk i betong. Imidlertid må den kapillære mekanismen kontinuerlig tilføres vann og det f.eks. foregå ved nedbør, lekkasjer og / eller kondens slik at fukten transporteres inn i betongens poresystem. Bruksfukt eller byggfukt vil bidra på samme måte som beskrevet over ved bl.a. lekkasjer, men i langt mindre grad.

Vann i betong opptas altså ved at den eksponeres for fuktighet i damp eller væskeform. Betongen vil absorbere alt eller deler av mengden fukt den eksponeres for. Fukten i betong vil da komme fra innebygd eller ytre fuktighet. Ytre fuktighetskilder er typisk nedbør, lekkasjer og / eller grunnvann. Betongens fuktopptaksegenskaper vil avhenge av dets poresystem, dets egenskaper samt om betongstrukturen har blitt eksponert for vann ved tidligere anledninger.

Hulrommene i den ferdig herdede betongen danner altså et nettverk av hulrom et s.k. poresystem som til sammen utgjør et effektivt «selvsugende» fyllestgjørende transportsystem for vann (kapillærsystem). Fuktigheten tar seg dypt inn og bringer med seg forurensning, sur nedbør, klor og syrer inn i betongen. Stoffene bidrar til at betongens bestandighet, dens styrke og dens tetthet vil reduseres. I tillegg vil de nevnte stoffene også angripe armeringen i betongstrukturen.

2.1 Mekanisk bundet vann i betong

Med vann som er mekanisk bundet menes kapillært kondensert vann som ikke er under trykk. Kapillært kondensert vann er fremst vanndamp. Vanndampen har blitt transportert inn i poresystemet til betongen. Inne i betongen har vannet kondensert og blitt flytende inne i materialet. En mekanisk binding mellom vannmolekylet og betongen er svakere enn den kjemiske bindingen og vannet lar seg derfor lett transportere videre. Denne bindingen er svakere enn den fysikalske bindingsformen og vannet lar seg lett forflyttes / transportere. Mekanisk bundet vann i betongen er den svakeste bindingsformen mellom vann og betong.

2.2 Kjemisk bundet vann i betong

Med kjemisk binding menes molekulære bindinger mot betong. De kjemiske bindingene er sterke noe som gjør at vannmolekylene sitter godt fast til betongen. Kjemisk bundet vann har derfor liten betydning for fukttransport. Dette er den sterkeste bindingsformen mellom vann og betong.

2.3 Fysikalsk bundet vann i betong

Med fysikalsk bundet vann i betong menes fysikalske bindinger som oppstår mellom molekylene på overflaten til betongen. Vannmolekylene adsorberes til betongens overflate i.e. de legger seg lag på

lag på overflaten til betongen. Bindingens styrke er omvendt proporsjonal med avstanden mellom laget og overflaten. Dette er den nest sterkeste bindingsformen mellom vann og betong.

3 Korrosjon på armeringsjern

Den kanskje viktigste og farligste nedbrytningsmekanismen til betongstrukturer er som nevnt armeringskorrosjon. Selv en liten reduksjon av tverrsnittet på armeringsstålet kan være kritisk for hardt utnyttete betongstrukturer.

Forutsetningen for at man skal få et problem med korrosjon på armeringsstålet i en betongstruktur, er at armeringsstålet har fått brutt ned passivfilm samt tilgang til oksygen og vann helt inn på overflaten av armeringsstålet. Nedbrytning av passivfilmen foregår gjennom de to nedenfor refererte hovedmekanismer.

Armeringsjernet korroderer med ulik hastighet. Faktorer som virker på korrosjonshastighet er temperatur, tilgang på oksygen, fuktighet og elektrisk ledningsevne. Høy temperatur og høyt fuktighetsnivå øker korrosjonshastigheten.

Forskjellen mellom korrosjon dannet av karbonatisering og kloridinitiert er at korrosjon ved karbonatisering angriper overflaten jevnt, mens korrosjon årsaket av klorid angriper lokalt som s.k. groptæring. Rent konstruksjonsmessig er kloridinitiert korrosjon farligst, fordi armeringstverrsnittet lokalt kan bli betydelig redusert ved et korrosjonsangrep uten at det er synlige tegn til skadene på betongoverflaten.



Bilde 7. Generell korrosjon på armeringsjern. (Foto: Mecamo Consulting AS)



Bilde 8. Kloridindusert korrosjon på armeringsjern. (Foto: /9/)

4 Delaminering

I og med at korrosjonsproduktene er voluminøse vil produktene presse betongen utover dens strekkfasthet i trykksonen slik at det vil oppstå riss og sprekker gjennom overdekningen. Derneft vil stykker av betongen løsne eller delaminere på utsiden av armeringsstålet gjennom overdekningen. Nedbrytningsmekanismens hastighet avhenger av transporthastigheten av reaktive komponenter i betongen. Hastigheten av reaktive komponenter er igjen beroende på betongkvaliteten. Gjennom riss og sprekker vil naturlig nok transporthastigheten av reaktive komponenter gå raskere, se avsnitt 3.

Armeringskorrosjon og generell nedbrytning av betong fører altså til at betongbiter skaller av og kan faller ned. Sikkerhetsmessig representerer dette en fare for skade både på personer og gjenstander. Avskalling og delaminering i trykksonen har sikkerhetsmessige konsekvenser som følge av redusert kapasitet i betongtverrsnittet. Betydelig reduksjon av armeringstverrsnittet som følge av armeringskorrosjon kan føre til redusert bæreevne med fare for sammenbrudd som ytterste konsekvens.



Bilde 9. Delaminering i søyle. Armeringsjernene og betongen i samspill har mistet sin integritet. (Foto: /10/)

5 Symptomer

Under listes ulike både skjulte og ikke-skjulte symptomer på ulike skader i betongstrukturen.

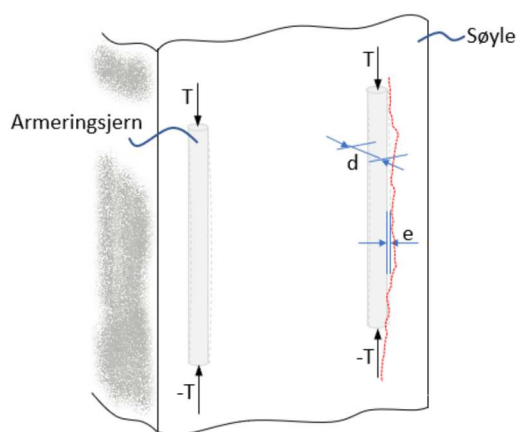
5.1 Riss - delaminering, bom og avskalling

Sprekker i betong er vanlig, men ofte misforstått. En sprekk eller et riss på en nystøpt struktur antas å være en indikasjon på at noe er galt. Imidlertid er ikke dette alltid tilfelle. Noen typer sprekker er uunngåelige selv om sprekken forsøkes kontrollert og av ikke farlig karakter. Andre sprekker indikerer farlige underliggende forhold som må utbedres eller sikres omgående. Det er derfor helt nødvendig å ha en god forståelse av hva en sprekk faktisk indikerer.

Tabell 2 . Riss – årsak og konsekvenser (Basert på Byggforskserien, blad 720.112 (/11/))

Type riss		Mulige årsaker	Mulige konsekvenser
1	Rissdannelse langs med armeringsjern.	Armeringsjernet slipper betongmatrisen og bøyer den svakeste veien i.e. utover og inn i overdekningen. Dette refereres til som «rebar buckling». Buckling mellom to bøyer (tverrarmring) kalles lokal buckling, Buckling over flere bøyer kalles global buckling,	Slike riss krever en nærmere og dypere undersøkelse. Ved bekreftelse med er det trolig at strukturen har fått en varig deformasjon. Den må stemmes opp slik at ikke ytterligere buckling inntreffer. Søylen bør deretter repareres og kanskje forsterkes.
2	Riss i betongoverflaten.	Armeringskorrosjon. Armeringen korroderer og sprenger bort betongen i overdekningen pga. karbonatisering eller et for høyt kloridinnhold i nivå med armeringen.	Armeringstverrsnittet kan være redusert. Heften mellom armeringen og betongen er redusert eller helt fraværende.
3	Rissdannelse. Nettverk av krakeleringer, fine riss synlig på jevne, lyse flater, spesielt i opptørkingsperioder	Svinnriss som følge av for dårlig etterbehandling.	Armeringen og området der skaden er funnet kan ha blitt vesentlig forringet mht. strukturens bæreevne. Videre opprissing kan forekomme. Konstruksjonen er IKKE vanntett.
		Alkalireaksjoner	Konstruksjonsdelens bestandighet er redusert. Bæreevnen kan være redusert.
		Betongens yttersjikt har trukket seg sammen på grunn av uttørking eller nedkjøling i sterkere grad enn elementets kjerne. Dette resulterer i strekkspenninger med resulterende opprissing av overflaten	Se under svinnriss og temperaturriss ovenfor. Langsom uttørking, lengre herdetid før avforming, spesielt ved lav utetemperatur.

4	Rissdannelse midt på vegg. $R < 0.3$ mm. Eventuelt kombinert med fukttransport.	Belastningsriss forårsaket av setninger eller overbelastning eller underdimensjonering.	Strukturen kan være underdimensjonert eller lastene er endret (blitt større) i forhold til opprinnelig beregning. Konstruksjonen er IKKE vanntett.
		Støpeskjøter og kaldskjøter fra utstøpning.	Riss i støpeskjøten. Mulig angrepspunkt for frostnedbrytning.
5	Sprekker og riss synlig etter 1–2 timer, ikke dype, regelmessig mønster	Setninger i betongen etter støpingen	Reduser vannseparasjonen. Støpeopphold på 2 timer ved tverrsnittsendring. Ettervibrering
6	Plastiske svinnsprekker Tørkesprekker, går gjerne i alle retninger. Ofte både brede og dype.	Stor fordampning	Hindre sterk vannavgang. Påfør vann, dekk med plastfolie eller membranherder
7	Svinnriss fra uttørking	Konstruksjonens sammentrekning er hindret av indre eller ytre fastholding	Reduser vanninnhold i betongen. Øk steininnhold, bruk av ekstra grovt tilslag. Senk temperaturen i den ferske betongen.
8	Temperaturriss	Høy herdetemperatur pga. hydrasjonsvarme kan gi temperaturforskjeller over tverrsnittet som resulterer i overflateriss (intern fastholding). Temperaturdifferanser mot tilstøtende støpeavsnitt e.l. kan gi gjennomgående riss (ekstern fastholding)	Reduser temperaturdifferansen mellom betongen og omgivelsene vha. sement med lav varmeutvikling, redusert sementinnhold, kjøling av tilslag eller innstøpte kjølerør. Bruk flyveaske. Reduser temperaturbevegelser i betongen ved hensiktsmessige støpetapper. Styr sprekkene til bevegelsesfuger



Bilde 10. Eksempel på riss (type 1) . Buckling av armeringsjern pga. overlast. (Illustrasjon: Mecamo Consulting AS)

5.2 Rustflekker

Rustflekker indikerer at armeringsjernet innenfor er korrodert.

Tabell 3 . Misfarging - rustflekker

Symptom		Mulige årsaker	Mulige konsekvenser
1	Misfarging / rustflekker på betongvegg.	Armeringsjernet er korrodert. Korrosjonen er forårsaket av karbonatisering.	Armeringsjernet korroderer og vil få redusert tverrsnitt. Redusert tverrsnitt gir redusert bæreevne. Betong rundt bør fjernes. Armeringsjernet bør skiftes ut hvis svært korrodert. Hele området må repareres.



Bilde 11. Misfarging / rustflekker på veggen mot gulvet. Dette skyldes armeringskorrosjon (som er synlig).

5.3 Utfellinger

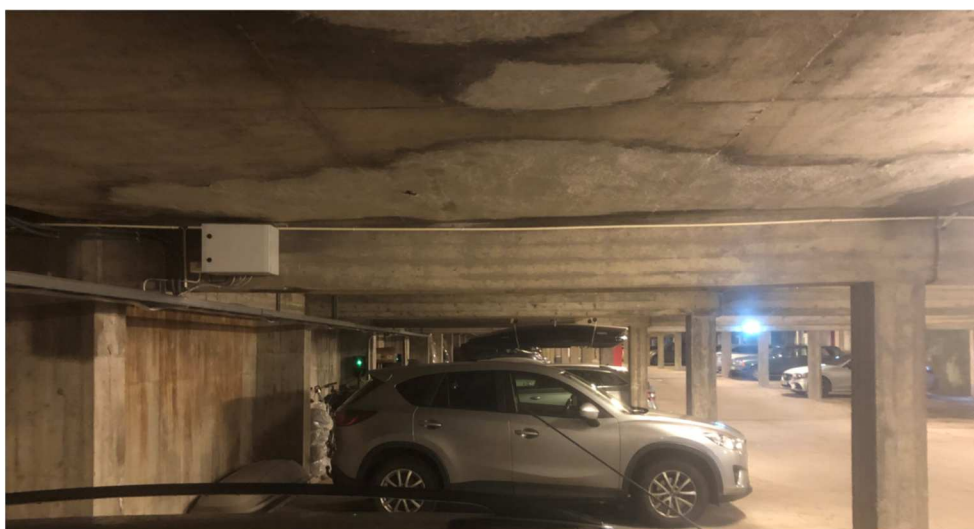
Tidligere tiltak var å prøve å fjerne årsaken til fukten. Dette kan ofte være vanskelig da grunnen strukturen står på kan være fuktig eller av stein / fjell. /12/ En vegg f.eks. i et garasjehus kan ha masser liggende helt inntil uten å være skilt fra veggen med f.eks. knastplast. I slike tilfeller tar fukt seg etter hvert igjennom veggen og med på lasset blir salter o.a. med. Slikt fører til at innvendige armeringsjern vil korrodere. På innsiden av veggen sees fukt samt korrosjonsflekker.

Tabell 4 . Saltutslag

Symptom		Mulige årsaker	Mulige konsekvenser
1	Saltutfellinger på veggflaten i.e. på veggens innside. Kommer igjennom små eller større sprekker.	Fukt transporterer vannløselige saltmineraler til betongoverflaten. Vannet fordamper. Mineralene blir liggende igjen på overflaten. Dårlig kvalitet på betongen.	I saltutslag som står over lengre tid vil fukten trenge gjennom eksisterende saltavsetninger og det dannes nye utenpå de eksisterende. Det fører til at mineraler bygger seg lengre ut fra overflaten, gjerne mange millimeter.

2	Kalkutfellinger på veggflaten. i.e. på veggens innside. Kommer igjennom små eller større sprekker.	Fukt transporteres gjennom betongen. Dette medfører utfelling av kalsiumhydroksid. Vannet fordamper fra veggflatene og mineralene blir liggende igjen på overflaten. Dårlig kvalitet på betongen.	I kalkutfellinger som står over lengre tid vil fukten trenge gjennom eksisterende kalkavsetninger og det dannes nye utenpå de eksisterende. Det fører til at mineraler bygger seg lengre ut fra overflaten, gjerne mange millimeter.
---	--	--	--

3	Alkaliske utfellinger gjennom riss. Kommer gjerne fra innsiden av betongen. Sprekkmønsteret er et typisk krakeleringsmønster.	Betongstrukturen er redusert mht. styrke. Som en sekundær konsekvens vil denne strukturen lettere være utsatt for delaminering fra frost.	
---	---	---	--



Bilde 12. Saltutslag i taket i en parkeringsgarasje. (Foto: Mecamo Consulting AS)

6 Tilstandsundersøkelser som avslører kritiske komponenter

Det finnes en rekke metoder for å avdekke en betongstrukturens tilstand. Vanlige inspeksjonsmetoder omfatter destruktive, ikke-destruktive, elektriske, elektrokjemiske, visuelle og overvåkende metoder.

Valg av inspeksjonsmetode vil være en naturlig del av etableringen av et inspeksjonsprogram. Det bør benyttes en risikobasert tilnærming ved slike inspeksjonsoppdrag på lik linje med inspeksjon av for eksempel stålstrukturer, statisk utstyr og rørledninger. En risikobasert tilnærming innebærer at kritikalitet og sannsynlighet for svikt legges til grunn for en vurdering av betongstrukturen.

Kombinert med tidligere inspeksjonshistorikk kan fokuset for en inspeksjon rettes mot de kritiske områdene, hva som er fornuftig inspeksjonsintervall og hvilke inspeksjonsmetoder som bør benyttes.

Typiske kartleggingsmetoder for å avgjøre tilstanden til en betongstruktur er:

1. Visuell inspeksjon går i korthet ut på visuelt å kartlegge betongstrukturen og merke på plasser hvor det finnes aktive degenereringsmekanismer og hvilke de er.
2. BOM eller akustisk sondering utføres ved at det benyttes f.eks. en plasthammer og hamrer lett på betongoverflatene i.e. vegg eller annen bærende struktur. Lyden som oppstår fra hamringen i et delaminert område er hul og skiller seg fra den samme hamring på ikke-delaminerte områder der lyden er fast. Brukes helst ved pussbelagt betongstruktur.
3. Potensialmålinger utføres på armeringen for å måle hvor langt korrosjonen på armeringsjernet har kommet i.e. f.eks. gropkorrosjon. Potensialelet vil endre seg som funksjon av endrede tverrsnitt.
4. Karbonatiseringsprøver måler inntrengningsdybde av CO₂. Det lages et hakk som en kile på 100 x 50 mm hvor profilen er trekantet. Karbonatiseringsdybden fremkommer idet en svak fenoltaleinblanding sprayeres inn i hakket. Ikke-karbonatisert betong blir svakt rødfarget mens fullt karbonatisert betong ikke farges. Karbonatiseringshastigheten er forskjellig fra betongkvalitet til betongkvalitet, men en tommelfingerregel er ca. 0.7 mm / år i inntrengningsdybde. Dybden måles vba. tommestokk.
5. Kloridifiseringsprøver utføres ved at det bores ut støv fra det aktuelle område i forskjellige dybder. Støvprøvene måles kjemisk og mengden klorider funnet sees i forhold til en gitt grense. Er mengden høyere enn kritisk grense er armeringsjernet innenfor å betrakte som svært utsatt for korrosjon.
6. Fasthetsmålinger gjøres på stedet f.eks. vba. en Schmidthammer. Et stempel skytes inn i vegg og avhengig av betongens hardhet rekylerer stemplet tilbake. Verdien kan leses av direkte i f.eks. MPa. Denne metoden gir omtrentlige verdier. Hvis det er ønskelig med mer nøyaktige verdier bør det utføres kjerneboringer (minimum 3 stk.), se pkt. 7.
7. Kjerneboring er en destruktiv prøve som benyttes der en vil ha flere svar en ikke-destruktive og kun utvendige prøver kan gi, les prøvene omtalt 1 – 6. Vha. sylindren som tas ut kan det, foruten å etablere betongens fasthet, også studeres korrosjon på armering, saltinntrengning og karbonatisering.
8. Måling av heftstyrke skjer ved bruk av s.k. «dollies». Disse limes på vegg i det området det søkes heftstyrke. Dollien kobles så til en pneumatisk operert avtrektermekanisme hvor kraften økes inntil dollien faller av. Heftstyrke måles i MPa og kan leses direkte av avtrekksmekanismen.
9. Elektrisk armeringskontinuitet måles ved f.eks. et ohmmeter. Ohmmeteret kobles til armeringsjernene to steder innen strukturen. En lav motstand som f.eks. $R = 0 \Omega$ indikerer at de to armeringsjernene som ohmmeteret er koblet opp mot henger sammen eller har

elektrisk kontinuitet. Tilsvarene er de dårlig elektrisk koblet sammen eller har ingen sammenkobling hvis $R \rightarrow \infty \Omega$.

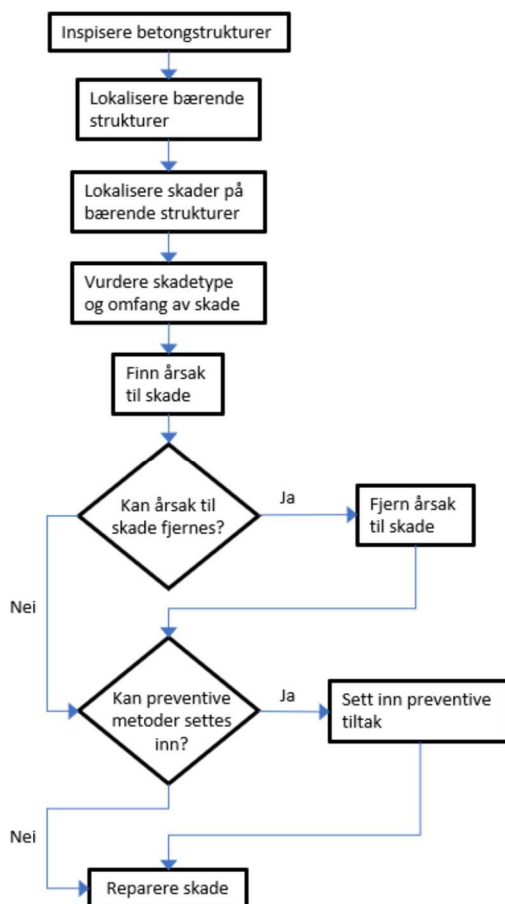
10. For en fullstendig kartlegging av betongstrukturen og armeringen kan også overdekningen eller armeringsoverdekningen måles (mm) sammen med avstanden mellom armeringsjernene.

Et viktig prinsipp ved en risikobasert tilnærming er at de nyeste inspeksjonsresultatene vurderes opp de forrige. Hvorvidt inspeksjonsprogrammet bør endres eller ikke fremkommer ut fra endringer. Av den grunn alene er god loggføring av funn og observasjoner svært viktig i denne sammenheng.

7 Gjenoppbygging av betongstrukturer

Den kanskje aller viktigste del av en reparasjon er å finne årsaken til at skadene har oppstått. Idet det hevdes at det er armeringskorrosjon som er den farligste form for nedbrytning av en armert betongstruktur så er det viktig å forstå hvordan den oppstår. Det er fem viktige ingredienser som inngår i en korrosjonsmekanisme:

1. Armeringsjern låst inn i en struktur (matrise) av betong
2. Oksygen
3. Fuktighet
4. Klorider
5. CO_2



Bilde 13. Alternativt forløp av skadeforebygging, skadebegrensning og reparasjon av skade.

I f.eks. et «åpent» garasjeanlegg så er alle fem faktorer til stede. Det er ikke mulig å gjøre noe med faktorene 1, 2 og 5. Faktor nummer 4 er også vanskelig vinterstid. Faktor nummer 3 derimot, fuktighet i.e. damp / kondens / vann er mulig å gjøre noe med i en viss grad hvis det er snakk om f.eks. lekkasjer eller andre ytre vannkilder. Med referanse til avsnitt 0 er lekkasjer av vann i et f.eks. et garasjehus er den mest vanlige formen for tilgang på fuktighet. I så tilfelle er første oppgave i et rehabiliteringsarbeide å lokalisere samt stoppe lekkasjen. Bilde 13 viser et alternativt forløp vedr. skadeforebygging, skadebegrensning og reparasjon av skade.

I tilfelle av en lokalisert lekkasje bør det vurderes hvorvidt den er mulig å fjerne. Hvis kilden til fuktighet fjernes og skaden repareres er det mer sannsynlig at nye skader unngås og at reparasjonen holder i lang tid fremover. Hvis årsaken ikke fjernes vil syklusen kun «nulles», men begynne på nytt. Etter en viss tid er skaden tilbake og ny reparasjon må igangsettes. Det siste alternativet er det dyreste – i lengden.

Etter at skaden er kartlagt / avklart og / eller nedbrytningsmekanismer som er involvert er identifisert, så bør de ulike skadene matches opp mot alternative reparasjonsmetoder.

Definisjon: En reparasjon er et tiltak som skal gjenopprette til nytt / opprinnelig konstruksjonens egenskaper vedr. bestandighet, stivhet og bæreevne. En reparasjon har som målsetning å øke strukturens levetid som prosjektert.

Definisjon: En forsterkning er et tiltak som øker den aktuelle strukturen sin stivhet og bæreevne i forhold til nytt / opprinnelig.

I det videre fokuseres på reparasjon av bærende strukturer der avskaling / delaminering er begynt. Det sees på hvordan en saltskadet eller karbonatiseringsskadet armert betongstruktur kan repareres.

7.1 Tetting av dilatasjonsfuger

Dilatasjonsfuger eller også kalt ekspansjonsfuger er kutt i betongplater eller skjøter mellom vegger og betongplater. En dilatasjonsfuge går helt gjennom betongstrukturen slik at den blir to minst to halvdeler. Hensikten med en ekspansjonsfuge er å tillatebetongstrukturen å utvide seg og så trekke seg sammen som funksjon av temperaturendringer uten at strukturen sprekker opp.

Før en reparasjon / tetting av en eksisterende «gammel» fuge kan tettes må gammelt fugemateriale fjernes fullstendig. Fugen må deretter rengjøres og tørkes slik at den nye fugen som skal legges får et så godt utgangspunkt som mulig.



Bilde 14. Forsegling av ekspansjonsfuger.

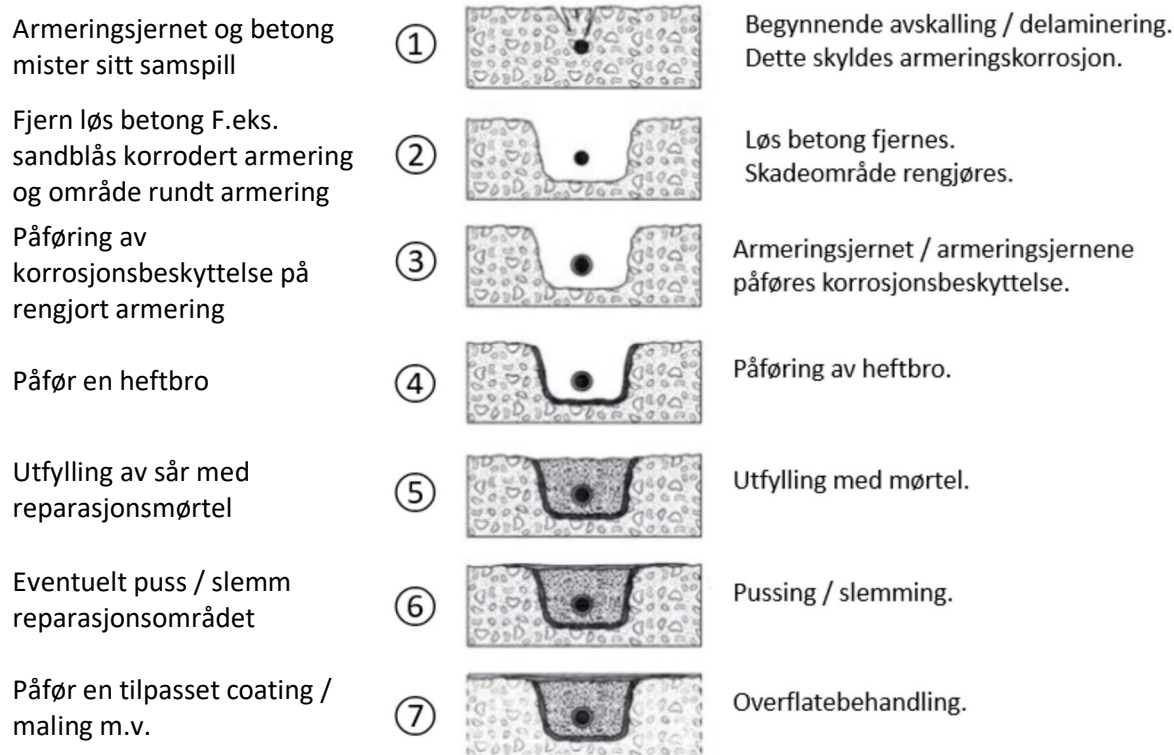
En ekspansjonsfuge må forsegles med et fleksibelt selvnivellerende tetningsmiddel /7/. P.t. benyttes det flere typer av polyuretaner som tetningsmiddel. Disse finnes stort sett i flytende tilstand på tube. En ekspansjonsfuge kan også tettes vba. en ekspansjonsfugelist. En slik list kan legges inn i en skjøt mellom to elementer i samme struktur f.eks. idet konstruksjonen settes opp eller det blir rom for en fugelist ved en reparasjon. Hensikten med en tetting, enten den er påført senere eller last inn under tilvirkning av en struktur, er å forhindre at vann trenger seg inn i skjøten og kommer til dere det ikke skal være vann. Reparasjon og forsegling av horisontale og vertikale ekspansjonsfuger kan utføres godt vba. riktig verktøy, riktige materialer og riktig overflatebehandling.

7.2 Gjenoppbygning av en skadet armert struktur etter kloridifisering / karbonatisering
Skadene krever en mekanisk reparasjon. En korrosjonsskade behandles likt inntil såret er rengjort og armeringsjernet kanskje erstattet uavhengig av hva som har forårsaket skaden. Det er først idet tilbakeføringen starter at det kan skille på årsak.

7.2.1 Mekanisk reparasjon

Mekanisk reparasjon er den vanligste metoden for reparasjon av betongskader deri også skader på armert betong /8/. Skader som typisk kan repareres er riss, bom og avskallinger som skyldes fra korrosjon på armeringsjern s.k. rustsprengning. Andre forhold, ikke nødvendigvis skader – kanskje kun dårlig arbeid, som steinreir og støpesår vil kunne utbedres på samme måte.

Mekanisk reparasjon utføres alltid uavhengig av utbedringsmetode enten alene som metode eller i kombinasjon med andre reparasjonsmetoder. Skal det benyttes elektrokjemiske utbedringsmetoder så utføres kun en forenklet mekanisk reparasjon, men i kombinasjon med den elektrokjemiske /8/.



Bilde 15. Illustrasjon av skade og gjenoppbygging av skadet område /8/.

Der tverrsnittsendringen er betydelig eller kritisk for strukturens bæreevne så er et alternativ å skifte ut det «gamle» armeringsjernet og erstatte det med nytt, se Bilde 16.

Betongen skal fjernes med den mest hensiktsmessige metoden / verktøyet. Området rundt, under og bak armeringsjernet kan pigges, meisles eller sandblåses slik at armeringsjernet frilegges. Det som er viktig er at all løs kloridifisert eller karbonatisert betong med synlige skader fjernes.

Armeringsjernet kan ha skader som groptæring eller annet. Da skal det erstattes for ikke å bidra til redusert bæreevne.

Kloridbremsende impregnering påføres området for å redusere kloridinntrengningen før det påføres en riktig reparasjonsmørtel i oppbygningen av ny overdekning.

Det kan vurderes katodisk beskyttelse. Montering av fjernstyrt, digital overvåking. Anlegget må være i drift i resten av konstruksjonens levetid.

Det skal gjennomføres en kontroll av armeringskontinuitet. Manglende armeringskontinuitet må utbedres/ opprettes.

Det kan vurderes en passiv form for beskyttelse ved montering av anoder.

Opplæring og FDV-dokumentasjon leveres før overlevering.



Bilde 16. Armeringsjern fullstendig gjennomrustet. (Foto: Mecamo Consulting AS)

Bilde 16 viser armeringsjern som er fullstendig gjennomrustet. En alternativ reparasjon er å pigge området til friskt armeringsjern kommer frem, både på over- og undersiden av den delen av

gjennomrustede delen av armeringsjernet. Deretter må området sandblåses før det sveises inn et nytt armeringsjern og en heftbro påføres for ny sement slik at overdekningen føres tilbake til opprinnelig tilstand. Til sist kan området pusses og males.

Der det er skader på f.eks. søyler i et garasjeanlegg så kan de repareres som beskrevet over. Imidlertid er det helt vesentlig at årsaksforhold er fjernet eller i det minste redusert. En søyle kan gis en tetning av gummi mot gulvet / dekket / underlaget. Videre kan en søyle beskyttes mot vann- og saltsprut fra biler i vintersesongen. Imidlertid må en beskyttelse påføres slik at ikke vann med salter kommer imellom beskyttelsen og søylen fra toppen og slik blir liggende og degenerere på nytt. Beskyttelsen må settes opp slik at den hindrer inntrengning av vann og salt og slik at den kan overvåkes fra utsiden.



Bilde 17. Bjelke i et parkeringshus. Kloridifisert betong pigges av. (Foto: /3/)

8 Preventive tiltak

Ved armeringskorrosjon som er den nedbrytningsmekanisme som er i fokus her bør det også vurderes preventive tiltak som f.eks. katodisk beskyttelse.

8.1 Preventivt tiltak – beskyttelse med gummikil i bunn av søyle mot underlag



Bilde 18. Søyle i et parkeringshus. Reparert og gitt en gummitetning ned mot underlaget. (Foto: Mecamo Consulting AS)

8.2 Katodisk armeringsbeskyttelse

Katodisk korrosjonsbeskyttelse av armeringsjernene i betong er et system der armeringskorrosjon forhindres ved at armeringen i betongen gjøre til en i stedet for å være katodisk / anodisk eller kun anodisk. For å gjøre armeringsjernet om til en katode kobles armeringsjernet til en likespenning i.e. et batteri, slik at den blir en pol i kretsen. I den «andre enden» kobles systemet mot en anode eller metaller som har en lavere egenspenning enn jern. Disse blir da anodene i kretsen og det hele blir en strømkrets. Anodene er gjerne s.k. «Mixed Metal Oxides» (MMO). De er belagte titanbånd eller nett og støpes inn i betongen. Alt styres automatisert gjennom et styringssystem der spenning og strøm automatisk leser av innstøpte referanseelektroder. De innstøpte referanseelektroder fungerer som sensorer for armeringsjernet slik at dette hele tiden forblir katodisk. Spenning: $1 \text{ VDC} < U < 5 \text{ VDC}$. Strøm: $10 \text{ A} < I < 20 \text{ A}$ under drift. Forventet levetid, $t > 50$ år. Alt settes opp i hht. NS-EN 12696:2012, Katodisk beskyttelse av stål i betong.

Et typisk prosjekt starter alltid med en tilstandskontroll, hvor målet er å fremskaffe mest mulig pålitelig informasjon om skadeårsak og skadeomfang. Neste fase er valg av løsning/ system og utarbeidelse av reparasjonsstrategi (gjelder spesielt på store og komplekse konstruksjoner).

8.3 Bruk av anoder – passiv armeringsbeskyttelse

Bruk av anoder som passiv beskyttelse er en mye enklere beskyttelse enn den katodiske beskyttelsen. Det benyttes en ren sinkanode som monteres direkte til armeringsjernet med en kontaktpasta laget for formålet. Systemet anbefales brukt der det skal monteres forebyggende katodisk beskyttelse av armeringen. Systemet benyttes spesielt på strukturer som eksponeres for klorider.

8.4 Coating og maling

Behandling av betong med jernarmering krever malingssystemer som bremser karbondioksid (CO_2) fra å trenge inn i betongen.

9 Referanser / kilder

Ref. Referanse / kilde

- /1/ <https://fuktstopper.no/fukt-i-kjeller/arsaker-til-fukt/>
- /2/ <https://no.wikipedia.org/wiki/Fukttransport>
- /3/ <https://norentreprenor.no/rehabilitering-av-betongbygg/>
- /4/ <https://www.maintech.no/fagartikler/inspeksjon/inspeksjon-av-betongstrukturer/>
- /5/ Fukttransport i mineralske bygningsmaterialer – materialegenskaper. Forf. Berit Time, Tore Kvande, Kjell Terjesen og Øyvind Sæter
- /6/ 720.112 Skader på betongkonstruksjoner. Skadesymptomer, tilstandsgrader og utbedringsmåter – Byggforskserien
- /7/ <https://www.youtube.com/watch?v=wngw2KvjRJY>
- /8/ https://ra.brage.unit.no/ra-xmlui/bitstream/handle/11250/176897/karbonisert_betong_veileder.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- /9/ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817316641>
- /10/ https://betong.net/wp-content/uploads/2017_10_03-Reparasjoner-av-betongskader-1.pdf
- /11/ Skader på betongkonstruksjoner. Skadesymptomer, tilstandsgrader og utbedringsmåter. Byggforskserien 720.112
- /12/ <https://eps-fuktsikring.no/saltutslag-kjeller/>
- /13/ <https://betong.net/wp-content/uploads/6-NBweb-Betong-og-milj%C3%B8-%E2%80%93-karbonisering.pdf>