



LUND UNIVERSITY

REPARATION AV BETONGKONSTRUKTIONER : Skador och reparationsmetoder från 1970-talet och framåt. Reparationsbehov, forskningsbehov, effektivitet - Bidrag till projekt Bygginnovationen

Hassanzadeh, Manouchehr

2014

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Hassanzadeh, M. (2014). *REPARATION AV BETONGKONSTRUKTIONER : Skador och reparationsmetoder från 1970-talet och framåt. Reparationsbehov, forskningsbehov, effektivitet - Bidrag till projekt Bygginnovationen.* (Rapport TVBM-3176). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

**REPARATION AV
BETONGKONSTRUKTIONER**

**Skador och reparationsmetoder från
1970-talet och framåt
Reparationsbehov, forskningsbehov,
effektivitet**

Bidrag till projekt Bygginnovationen

Manouchehr Hassanzadeh (Redaktör)

ISRN LUTVDG/TVBM--14/3176--SE(1-75)
ISSN 0348-7911 TVBM

Lunds tekniska högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
SE-221 00 Lund

Tel: 46-46-2227415
Fax:46-46-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Denna rapport skrevs 2010, men har aldrig publicerats utanför en begränsad krets inom projekt Bygginnovationen. Rapporten publiceras nu öppet eftersom den kan förväntas ha intresse för en större krets inom byggnäringen.

Lund 21 januari 2014

Göran Fagerlund

på uppdrag av Kyösti Tuutti och Manouchehr Hassanzadeh

FÖRORD

Projekt *Bygginnovationen* är ett flerårigt forsknings- och utvecklingsprogram som är inriktat mot förbättrad effektivitet inom byggnäringen, och som samfinansieras av Vinnova och svensk byggnäring. Projektet samverkar också med programmet Sveriges Bygguniversitet med målet att skapa stabila samarbetsformer mellan byggnäringen och akademien.

Projektet befinner sig i ett analyskede med uppgiften att utveckla en effektivitetsmodell som skall utgöra grund för framtida forskningssatsningar, genom att belysa på kunskapsbrister som har stor inverkan på byggnäringens effektivitet. I analyskedet studeras ett antal områden som skall ge underlag till det fortsatta utvecklingsarbetet. Dessa är:

- Anläggning
- Hus
- Reparation

Inom varje område har tillsatts en utredningsgrupp som har till uppgift att ta fram underlag för det fortsatta arbetet. Inom område reparation tillsattes våren 2009 följande utredningsgrupp:

Manouchehr Hassanzadeh	Vattenfall	Gruppledare
Göran Fagerlund	f.d. LTH	
Jonas Holmgren	KTH	
Rolf Hörnfeldt	f.d. NCC	
Lars Johansson	f.d. CBI	
Kyösti Tuutti	Skanska	
Bo Westerberg	f.d. Tyréns	

Jan Bröchner Chalmers har utarbetat det förslag till effektivitetsmått inom området reparation, vilket utgör kapitel 14 i rapporten.

Gruppen har i en första fas helt inriktat sig på området betongreparation. Hittills utfört arbete inom detta område presenteras i föreliggande rapport.

Stockholm februari 2010

Kyösti Tuutti

Styrelseordförande i Bygginnovationen

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	PRINCIPER FÖR VAL AV REPARATIONSÅTGÄRD	4
2	BETONGSKADOR - ÖVERSIKT	5
2.1	Skadetyper	5
2.2	Skadeorsaker och skada/skadeomfattning	5
2.3	Relation mellan skadetyper, skadeorsaker och skada	6
3	ALLMÄNNA KUNSKAPSLÄGET VID OLIKA TIDPUNKTER	9
3.1	Krav på kunskap	9
3.2	1970-talet	10
3.2.1	Konstruktionernas åldersfördelning	10
3.2.2	Kunskapsläget under 1970-talet	13
3.3	Kunskapsutveckling sedan 1970-talet	14
3.3.1	Kunskaper om nedbrytningsfenomen	14
3.3.2	Kunskapsnivån inom branschen och kunskapsspridning inom området betongbeständighet	16
3.3.3	Kunskap inom området reparationsteknik	16
3.3.4	Behov av kunskapsspridning inom området reparationsteknik	18
4	TILLSTÅNDSANALYS - ANALYS AV SKADEOMFATTNING	19
4.1	1970-tal	19
4.2	Utveckling sedan 1970-talet	19
4.3	Behov av nya analysmetoder	20
5	ANALYS AV REPARATIONSBEHOV FÖR EN KONSTRUKTION	21
5.1	Principer	21
5.2	1970-talet	21
5.3	Nuvarande situation	22
5.4	Behov av ny kunskap	23
6	REPARATIONSMETODER	24
6.1	Principer för val av reparationsmetod	24
6.2	1970-talet	25
6.3	Nuvarande situation	26
6.4	Behov av nya och förbättrade metoder	27
7	REPARATIONSMATERIAL	28
7.1	Allmänt om reparationsmaterial	28
7.2	1970-tal	29
7.3	Nuvarande situation	29
7.4	Vidareutveckling av material	29
8	EXEMPEL PÅ UTFÖRDA REPARATIONER	30
8.1	Exempel på äldre reparationer	30
8.1.1	Balkonger	30
8.1.2	Betongbroar	31
8.1.3	Dammkonstruktioner	33
8.2	Exempel på nyare reparationer	34
8.2.1	Parkeringsdäck	34
8.2.2	Elementfasader	34
8.2.3	Betongdamm	35
8.2.4	Energiomvandlarbassänger	36

9	FÖRSTÄRKNING	37
9.1	Förstärkning respektive reparation - Motiv till förstärkning	37
9.2	1970-talet	37
9.3	Nuvarande situation	38
9.4	Kunskapsbehov	39
9.4.1	Långtidsegenskaper	39
9.4.2	Frostbeständighet	39
9.4.3	Konstruktiv samverkan - Kvalitetskontroll	39
9.4.4	Sannolikhetsbaserad dimensionering av stabilitet på betongdammar	39
10	UPPHANDLING AV REPARATIONSARBETE	41
10.1	1970-talet	41
10.2	Nuvarande situation	41
11	SYSTEM FÖR UNDERHÅLL OCH REPARATION	43
11.1	Principiell uppbyggnad av ett underhållssystem	43
11.2	Existerande underhållssystem	46
12	KOMMANDE REPARATIONSBEHOV	47
12.1	Vägbroar	47
12.2	Järnvägsbroar	48
12.3	Vattenkraftanläggningar	48
12.4	Kärnkraftanläggningar	48
12.5	Parkeringsdäck	50
12.6	Fasader	50
12.7	Balkonger	50
12.8	VA-anläggningar	51
12.8.1	Avloppsledningar	51
12.8.2	Vattenledningar och vattentorn	51
12.8.3	Reningsverk	51
12.9	Simbassänger	52
12.10	Industrigolv	52
12.11	Lantbrukets byggnader - Spannmålssilor	52
12.11.1	Lantbruksbyggnader	52
12.12	Tunnlar	52

13	FORSKNINGSBEHOV INOM REPARATIONSOMRÅDET	54
13.1	Värde av ökad kunskap inom reparationsområdet	54
13.2	Tillståndsanalys - Analys av skadeomfattning	55
13.2.1	Armeringskorrosion	55
13.2.2	Allmän övervakning av en skadad konstruktion	55
13.2.3	Provbelastning	56
13.3	Analys av reparationsbehov	56
13.3.1	Prognostisering av fortsatt skadeutveckling	57
13.3.2	Samband mellan skada och bärförmåga/säkerhet	62
13.4	Reparationsmetoder och reparationsmaterial	63
13.4.1	Reparationsskikt/förstärkningsskikt av betong	63
13.4.2	Polymerbaserade ytreparationer	65
13.4.3	Förstärkning med fiberkomposit	67
13.4.4	Ytskydd	67
13.4.5	Elektrokemiska metoder	68
13.4.6	Inverkan av sprickor	69
13.4.7	Försegling av sprickor	69
13.4.8	Injekttering av urlakad betong	69
13.4.9	Rostfri armering	69
13.4.10	Reparation av avloppsledningar	70
13.4.11	Reparation och förstärkning av sprutbetong – utveckling av nya strategier och metoder	70
13.4.12	Utveckling av snabbare cementbundna reparationsmaterial	70
13.5	Förstärkning	71
13.6	Inventering av reparationsbehov	71
13.7	Utveckling av ”reparationsvänliga” betongkonstruktioner	71
13.8	Upphandlingsformer	71
14	EFFEKTIVITETSMÅTT REPARATION	72
14.1	Effektivitetsmåttens uppbyggnad	72
14.2	Outputmått	72
14.3	Inputmått	74
14.4	Effektivitetsmått för reparation	75

1 PRINCIPER FÖR VAL AV REPARATIONSÅTGÄRD

Mycket förenklat bör följande moment ingå vid val av reparationsåtgärd, se Figur 1:

En skada observeras. Den kan antingen bero på någon form av mekanisk överpåverkan eller bero på miljöpåverkan ("beständighetsskada").

Skadeomfattningen klarläggs genom mätningar på konstruktionen.

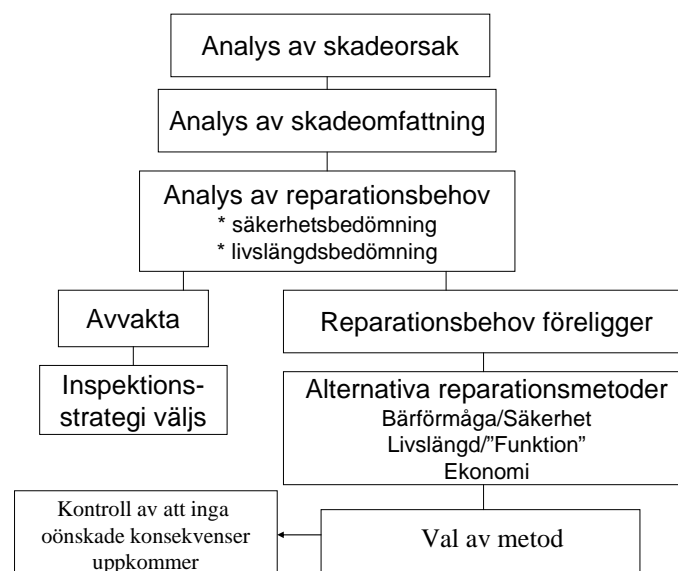
Genom statistiska beräkningar av resterande bärförmåga, och genom någon form av bedömning av fortsatt nedbrytningsförlopp avgörs om omedelbart reparationsbehov föreligger eller om man kan avvakta med reparation och i stället övervaka konstruktionen.

Om man beslutar att reparera finns ofta ett stort antal reparationsprinciper, metoder och material att välja mellan. Olika metoder ger olika säkerhet mot fortsatt skadeutveckling, dvs. olika förväntad livslängd.

Att välja reparationsmetod är en svår uppgift som kräver stor eftertanke och erfarenhet. Risken är stor att man väljer alltför enkla och billiga lösningar. Fortsättningsvis i denna rapport finns många praktiska exempel på detta.

När reparationsmetod väljs bör man överväga om nya problem kan uppkomma vilka beror på reparationen. I rapporten ges praktiska exempel på att så har skett.

Dessa allmänna, rätt logiska, principer har sällan tillämpats. Det gäller såväl för 40 år sedan som i dag. Svagheten gäller framförallt att konsekvensen av reparationen för konstruktionens fortsatta funktion och livslängd inte beaktas vid val av reparationsprincip och -material. Till viss del beror detta på att kunskapen om samverkan mellan den gamla reparerade betongen och reparationsmaterialet/reparationsåtgärden inte varit känd, och till dels fortfarande inte är tillräckligt känd.



Figur 1 Ingående moment vid val av reparationsåtgärd.

2 BETONGSKADOR - ÖVERSIKT

2.1 Skadetyper

Betongskador kan klassificeras i 11 olika typer (kategorier) efter utseende och orsak:

1. Armeringskorrosion
2. Yterosion
3. Expansion av betongens inre
4. Expansion av betongens yta
5. Urlakning
6. Sprickbildning av fuktrörelser och temperaturrörelser
7. Skador av olyckslast
8. Skador av överbelastning och felkonstruktion
9. ”Spontant sönderfall” (ostabil materialstruktur)
10. Estetisk skada
11. Brandskada

Åtta skadetyper beror på yttre miljöpåverkan medan tre beror på någon form av överpåverkan av mekanisk art eller brand. *Således är det främst betongens förmåga att motstå yttre miljöpåverkan som avgör dess livslängd och behovet av reparation.*

2.2 Skadeorsaker och skada/skadeomfattning

Varje *skadetyper* enligt ovan beror på en eller flera direkta *skadeorsaker*.

Exempel:

Armeringskorrosion kan orsakas antingen av kloridjoner eller av karbonatisering.

Exempel:

Expansion av betongkonstruktionen och därav följande sprickbildning kan t.ex. bero på såväl inre frostangrepp som skadliga ballastreaktioner eller sulfatangrepp.

Varje *skadeorsak* kan ge *olika sorters skador* och *olika omfattning av skadan*.

Exempel: Armeringskorrosion kan ge såväl avspjälkning av täcksiktet som sprickbildning hos detta.

Exempel: Urlakning kan ske såväl av ytan som av betongens inre eller i sprickväggar.

2.3 Relation mellan skadetyper, skadeorsaker och skada

Samspelet mellan en viss skadetyper, skadans orsak och uppkommen skada ges i tabeller nedan.

Tabell 1 Relation mellan skadetyper, skadeorsaker och skada.

1. ARMERINGSKORROSION	
Skadeorsak	Skada
Kloridinitiering	Korrosion pågår. Täcksiktavspjälkning med eller utan sprickbildning
	Korrosion pågår. Ingen täcksiktavspjälkning. Sprickbildning
	Korrosion pågår. Ingen täcksiktavspjälkning. Ingen sprickbildning
	Ingen korrosion pågår men kloridtröskelvärde nära armeringen
Karbonatiseringsinitiering	Korrosion pågår. Täcksiktavspjälkning med eller utan sprickbildning
	Korrosion pågår. Ingen täcksiktavspjälkning. Sprickbildning
	Korrosion pågår. Ingen avspjälkning. Ingen sprickbildning
	Ingen korrosion pågår men karbonatiseringsfronten nära armeringen
Dålig gjutning	Ofullständig omslutning av armering. Gjutsår
	Korrosion kommer att starta inom kort tid

2. YTEROSION	
Skadeorsak	Skada
	Generellt: Reducerat täcksikt. Minskat tvärsnitt
Saltfrostattack	Ytavskalning
Nötning av vatten eller mekanisk last. Kavitation	Jämnt eroderad yta
	Ojämnt eroderad yta. Lokal erosion
Surt angrepp	Kombinerad med mekanisk erosion
	Upplöst försvagad yta samt materialförlust
	Utan mekanisk erosion
	Upplöst försvagad yta

3. EXPANSION AV BETONGENS INRE	
Skadeorsak	Skada
Alkali-kiselsyrereaktion	Generell skada oavsett orsak Inre sprickbildning och ytsprickbildning Förlust av betongens hållfasthet och kohesion Konsekvens Alt 1: Otillräcklig bärförmåga och säkerhet Alt 2: Fortfarande tillräcklig bärförmåga och säkerhet
Inre frostangrepp orsakat av obeständig cementpasta	
Inre frostangrepp orsakat av obeständig ballast	
Sulfatangrepp	
Försenad ettringitbildning	
Alkali-dolomitreaktion	
Fuktsvällande ballast	

4. EXPANSION AV BETONGENS YTA	
Skadeorsak	Skada
Alkali-kiselsyrereaktion	”Pop-out”-kratrar orsakade av yttre fukt
	”Pop-out”-kratrar orsakade av instängd fukt under tät yta
Yttre aggressiva ämnen	Sprickbildning orsakad av expansiva kemiska reaktioner i betongens yta

5. URLAKNING	
Skadeorsak	Skada
Kalkurlakning orsakad av naturligt eller kemiskt rent vatten	Urlakning och därmed försvagning av ytan (eg. ett slags surt angrepp, se skadetyper 2 "Ytererosion")
	Urlakning av betongens inre
	Förlust av bärförmåga och säkerhet.
	Urlakning i genomgående sprickor Minskning av vattentäthet. Risk för armeringskorrosion

6. SPRICKBILDNING AV FUKTRÖRELSER OCH TEMPERATURRÖRELSER	
Skadeorsak	Skada
Uttorkningskrympning och självuttorkningskrympning	Ytsprickor (ofta in till armering)
	Genomgående sprickor
Termisk krympning under härdningen	Ytsprickor
	Genomgående sprickor

7. SKADOR AV OLYCKSLAST	
Skadeorsak	Skada
Yttre skador av påkörning eller annan olyckslast	Förlust av täcksikt. Exponerad armering
	Minskat bärande tvärsnitt
Överbelastning under byggfasen	Ytsprickbildning
	Genomgående sprickbildning

8. SKADOR AV ÖVERBELASTNING	
Skadeorsak	Skada
För hög böjpåkaning	Krossbrott i betongen. Sprickbildning
	Dragbrott (sträckgränsspänning) i armeringen
För hög förankringsspänning	Krossbrott och sprickbildning i förankringszon. Vidhäftningsbrott och glidning av armering
För hög skjuvpåkaning	Genomgående sprickor i skjuvzon
	Dragbrott i skjuvarmering
	Förlust av vidhäftning mellan betongkonstruktion och pågjutning
Utmattning	Utmattningsbrott i betong
	Utmattningsbrott i armering
	Utmattningsbrott i vidhäftning betongarmering
Lokal hög tryckspänning	Krossbrott i betongen

9. "SPONTANT SÖNDERFALL" (INSTABIL MATERIALSTRUKTUR)	
Skadeorsak	Skada
Strukturömvandling av aluminatcementpasta	Förlust av betongens kohesion, hållfasthet och styvhet
Sönderfall av kalcitballast orsakad av thaumasitbildning	Förlust av betongens kohesion, hållfasthet och styvhet
Försenad ettringitbildning p.g.a. för hög härdningstemperatur	Sprickbildning
	Förlust av betongens kohesion, hållfasthet och styvhet

10. ESTETISK SKADA	
Skadeorsak	Skada
Kalkutfällning	Missfärgning, framförallt av genomfärgad betong
Nedsmutsad yta orsakad av damm, trafik, nederbörd etc.	Missfärgning

11. BRANDSKADA	
Skadeorsak	Skada
Mycket hög temperatur	Betongsönderfall genom avgång av kemiskt bundet vatten Kvartsomvandling av ballast Hållfasthetsförlust. Sprickbildning
Snabb temperaturstegring	Täckskiktsspjälkning
Hög temperatur	Deformation av betongstomme och angränsande konstruktioner
Frigjorda aggressiva brandgaser (t.ex. klor från PVC)	Kemiskt angrepp på betong Armeringskorrosion

3 ALLMÄNNA KUNSKAPSLÄGET VID OLIKA TIDPUNKTER

3.1 Krav på kunskap

För att man skall kunna utföra en välfungerande reparation krävs att skadeorsaken är känd. Skadeöversikten ovan visar att i stort sett alla betongskador beror på *yttre miljöpåverkan*. En riktig analys av skadeorsaken förutsätter därför att man har kunskap om olika *nedbrytningsmekanismer* och om hur skador utvecklas i tiden efter det att reparationen är genomförd.

Genom att man känner nedbrytningsmekanismen kan man även bedöma om en reparation över huvud taget är nödvändig eller om man kan *avvakta med reparationen* utan att konstruktionen riskerar att haverera.

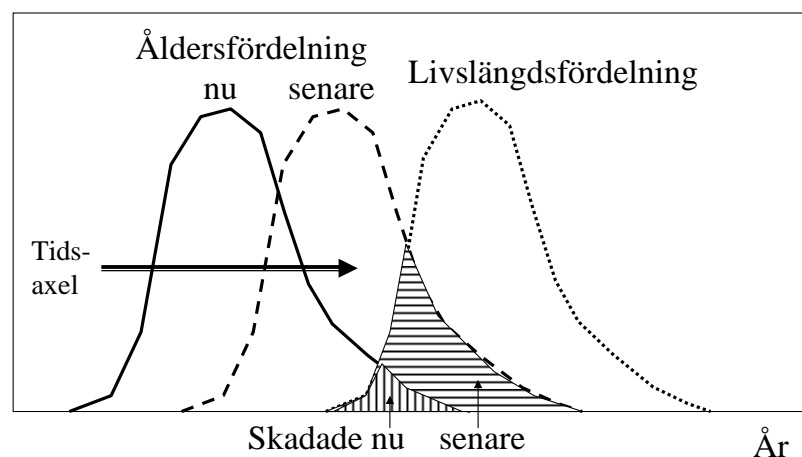
För en bra analys av skadeorsak och en vettig förutsägelse om fortsatt skadeutveckling *före och efter reparation* bör det finnas möjlighet att göra en *realistisk livslängdsanalys*.

Huvuddelen av alla skador, såväl 1970 som i dag, avser frostnedbrytning och armeringskorrosion. Båda dessa nedbrytningstyper sammanhänger med konstruktionens *fukttillstånd*. Därför är kunskap om *betongens fuktegenskaper* samt kunskaper om det *fuktmekaniska samspillet mellan betong och reparationsmaterial* fundamentala för en riktig analys av skadeorsak och funktion hos den reparerade konstruktionen.

Varje konstruktion har en viss förutbestämd livslängd när den byggs. Vilken livslängd den kommer att få beror på miljö och "kvalitet" hos material och utförande. Vid en viss tidpunkt t.ex. 1970 har populationen av alla konstruktioner av viss typ, t.ex. broar, en viss åldersfördelning, men därför också en viss livslängdsfördelning.

Vid en viss tidpunkt har en viss andel av konstruktionerna redan uppnått sin livslängd, dvs. de är skadade och behöver repareras. Tiden går och allt fler konstruktioner uppnår så småningom sin livslängd varför behovet av reparation gradvis ökar. Principen visas i Figur 2.

Antal konstruktioner



Figur 2 Exempel på principiell ålders- och livslängdsfördelning hos betongkonstruktioner.

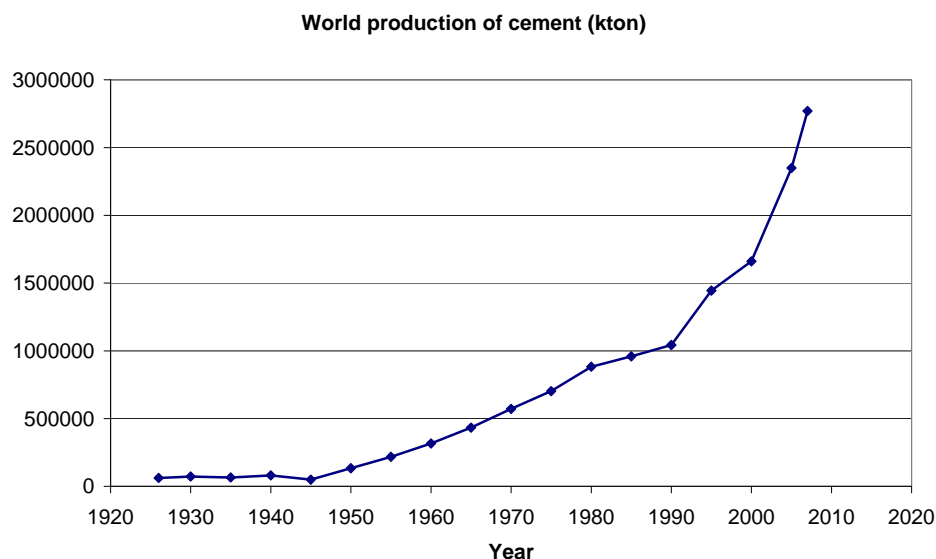
3.2 1970-talet

3.2.1 Konstruktionernas åldersfördelning

År 1970 var åldersfördelningen hos våra betongkonstruktioner sådan att tämligen få konstruktioner var mer än 30 år gamla, vilket visas av följande exempel.

Cementförbrukning som mått på åldersfördelning

Cementproduktionen är ett gott mått på mängden betongkonstruktioner. Huvuddelen av all cementproduktion har skett efter andra världskriget. Detta framgår av Figur 3 som visar den årliga världsproduktionen av cement.



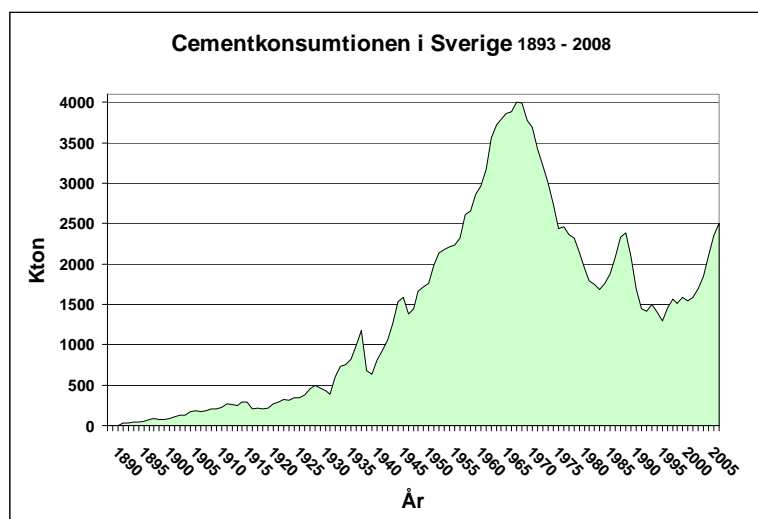
Figur 3 Utveckling av cementproduktion i världen.

Cementförbrukningen i Sverige visas i Figur 4. Den följer ungefär samma trend som världsproduktionen fram till 1970 då förbrukningen uppgick till ca 4 miljoner ton. Därefter minskade den snabbt i och med att miljonprogrammet avslutats för att under de senaste tio åren ligga något under 2 miljoner ton.

År 1970 var alltså i stort sett alla betongkonstruktioner yngre än 25 år och hälften yngre än 10 år.

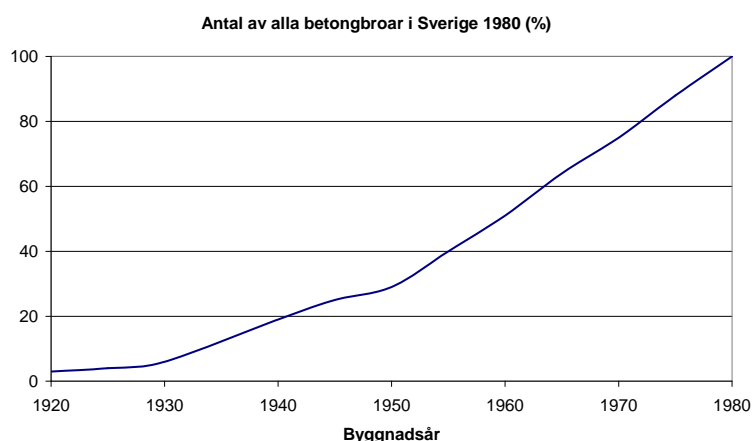
Bostäder: Fram till ca 1965 var det få hus som hade exponerade betongfasader. Betongen användes huvudsakligen som inomhusbjälklag. Först i och med miljonprogrammet 1965-1975 kom betong att användas allmänt även i fasader, balkongplattor och andra utomhusexponerade delar.

Det innebär att år 1970 hade bara en mindre andel av våra betonghus utsatts för väder och vind under längre tid. Följaktligen var erfarenheten av betongskador liten. Det tar nämligen normalt rätt lång tid innan beständighetsrelaterade skador hinner uppträda. Men redan ca 1975 upptäcktes omfattande frostsador och korrosionssador på betongbalkonger hos tämligen nya hus, dvs. livslängdsfördelningen för balkonger låg tidsmässigt nära åldersfördelningen. Betongfasader var däremot i stort sett helt oskadade trots att de exponerats lika länge som balkongerna. I vissa elementfasader fanns dock tendens till armeringskorrosion.



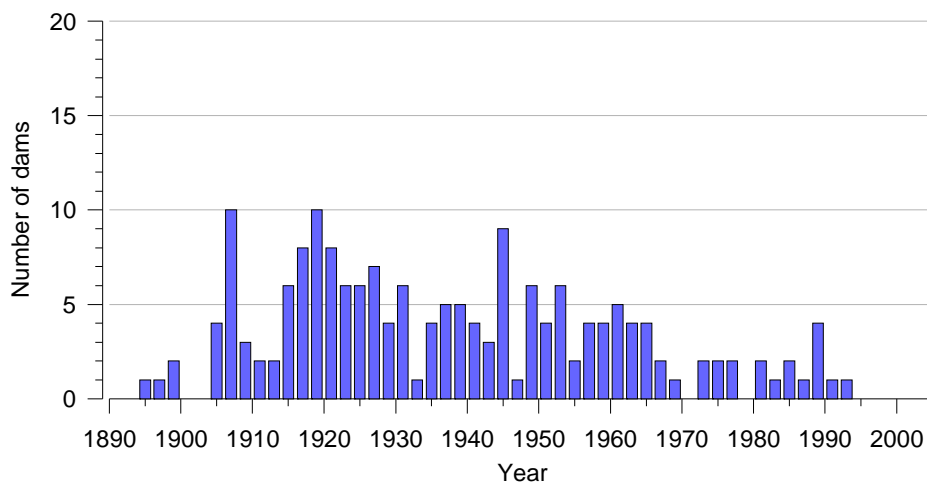
Figur 4 Cementförbrukningen i Sverige.

Broar: År 1970 var bara ca 25% av alla betongbroar äldre än 30 år, 40% var äldre än 20 år; se Figur 5. År 1970 hade ca 65% av då existerande broar byggts efter andra världskriget. Trots det började betongskador dyka upp redan i början av 1970-talet, framförallt *frostskador* på kantbalkar. Orsaken var den ökande användningen av tösalt. Några år senare drabbades även en stor andel av brobanaplattorna av omfattande frostskador under asfaltisoleringen. Flera stora broar drabbades; t.ex. Tranebergsbron, och Skurubron i Stockholmsområdet. Båda broarna var tämligen gamla år 1970, 35 resp. 55 år. Vid en stor inventering som Vägverket lät göra i början av 1980-talet, då 4500 broar undersöktes, visade sig 30% av alla brobanaplattor ha skador på asfaltisoleringen och ca 10% av alla plattor vara frostskadade. Totalt bedömer man att cirka 6700 broar har dessa skador.



Figur 5 Utveckling av antalet betongbroar i Sverige.

Vattenkraftskonstruktioner: Utbyggnaden av elproducerande vattenkraft har pågått under hela 1900-talet. Om man skiljer ut dammanläggningar, högre än 15 meter, där mer än 80% utgör betong så erhålls en åldersfördelning enligt Figur 6. Som framgår så pågick flesta utbyggnaderna av betongdammar under 1910-talet och 1920-talet. Medelåldern för betongkonstruktioner inom vattenkraften var 1970 således ca. 35 år.



Figur 6 Uppförandeår för dammar högre än 15m, i Sverige, med mer än 80% betong¹.

Den andra stora utbyggnadsperioden var under 1950-talet då många av de stora fyllningsdammarna uppfördes. Även om andelen betong i dammen är mindre, utgör dessa betongkonstruktioner en ansenlig volym. Själva kraftstationen och dess vattenvägar utgörs också huvudsakligen av betongkonstruktioner.

Då spridningen av betongkonstruktioner är över hela 1900-talet är det av stor vikt att känna till de olika betongepokerna² som grovt kan indelas i:

- 1910-talet: Stampbetong huvudsakligen i oarmerade konstruktioner. Cementhalter om 200-240 kg/m³. Ofta kombinerat med murverk av granitsten. Redan vid 1970-talet hade dessa konstruktioner reparerats flera gånger medelst injektering, eller pågjutning av ny betong på uppströmssidan.
- 1920-talet: Armering av konstruktionerna, blöt betong för god omslutning. Höga vct (1,0) och cementmängder kring 260 kg/m³. Även här stora problem med urlakning och sannolikt redan reparerade före 1970.
- 1930-talet: Cementhalter om ca 300 kg/m³ och vibrering för omslutning av armering. Tidiga anläggningar kan uppvisa frostsador. Vattenfall var dock tidiga med att ställa krav på lufttillsats i betong och har sedan 1937 ställt krav på detta. 1931 började det grovmalda LH-cementet att tillverkas vilket minskade problemen med temperaturrelaterad sprickbildning.
- 1940-talet: Användning av E-cement (70 % standardcement + 30 % ohydratiserade filler-material). Ojämn kvalitet på uppförda konstruktioner och ibland val av felaktig ballast.
- 1950-talet: God kunskap i branchen om vad som påverkar kvalitet och beständighet. Kvalitet prioriterades före kostnad och få problem med annat än ytskador från nötning och frostbelastning i vattenlinjen kunde ses vid 1970-talet och även senare.

Med ledning av betongepokerna ovan kan man också konstatera att de största problemen inom kraftindustrin varit urlakning av de tidiga konstruktionerna. Injektering med cementbruk av tämligen varierande sammansättning t.ex. när det gäller vct och typ av finballast har varit den primära åtgärden mot detta.

¹ Christian Bernstone; Dr. avhandling, Lund, 2006 "Automated performance monitoring of concrete dams".

² VAST; "Betong i vattenkraftanläggningar, 1994.

3.2.2 Kunskapsläget under 1970-talet

Eftersom konstruktionerna i allmänhet var tämligen unga under 1970-talet och det tar rätt lång tid innan betongskador uppträder var kunskapen om reparation, och erfarenheter av utförda reparationer, begränsad även hos dem som är experter inom betongtekniken. Det fanns få översikter och handböcker om reparation.

Grundläggande kunskap om olika nedbrytningsmekanismer fanns visserligen, men kunskapsluckorna var stora, särskilt när det gäller de viktigaste nedbrytningstyperna *saltfrostnedbrytning* och *armeringskorrosion*. Provningsmetoder relaterade till dessa båda skadetyper saknades till stor del.

Hur olika reparationsmetoder påverkar *fukttillståndet i konstruktionen* och därmed livslängden hos den reparerade konstruktionen var i stort sett helt okänt, vilket ledde till att felaktiga reparationsmetoder tillämpades.

När det gäller *frostnedbrytning* var den allmänna uppfattningen ända fram till början av 1980-talet att betongen var beständig även i salt miljö bara den innehöll ca 4.5% inblandad luft. Lufttillsats av denna nivå föreskrevs också i betongnormen B5 för saltfrostbelastad betong. Dessförinnan ställdes inga lufthaltskrav i normen. Redan i början av 1970-talet upptäckte Vägverket att saltfrostbelastade konstruktioner, t.ex. kantbalkar på broar, ofta frös sönder trots att betongen hade den föreskrivna lufthalten när den lämnade betongstationen.

En större undersökning vid CBI visade att man med de nya kombinerade luftporbildande och vattenreducerande tillsatsmedel, som blivit allmänt använda, eftersom man då undvek den av luften orsakade hållfasthetsförlusten, inte gav en stabil luftporstruktur i kombination med vanliga svensktillverkade cement. Påverkan på frostbeständigheten kunde inte avslöjas i förväg eftersom man inte föreskrev frysprovning av betong. Det fanns för övrigt ingen fungerande frysprovningssmetod.

Följden blev att man ofta använde reparationsbetong som visade sig inte vara fullständigt frostbeständig.

Det bör nämnas att Vattenfall långt före 1965 krävt luftinblandning för sina vattenbyggnads-konstruktioner samtidigt som man generellt använde det för frostbeständighet gynnsamma lågalkaliska Limhamns-cementet. Vattenfalls konstruktioner är inte heller utsatta för tösalt eller havsvatten, vilket tillsammans med luftinblandningen förklarar de relativt mindre frostproblemen i vattenbyggnadsbetong.

Först i mitten av 1980-talet kom man tillrätta med frostbeständighetsproblemet tack vare omfattande forskning om frostnedbrytning, och utveckling av en fungerande *frysprovningssmetod* med vilken obeständig betong kunde utvecklas och avslöjas. Den allmänna användningen av det nyutvecklade lågalkaliska *Anläggningscementet* kom att få stor betydelse för att lösa frostbeständighetsproblemet eftersom detta cement ger gynnsammare och stabilare luftporsystem.

När det gäller *armeringskorrosion* så var det en allmän uppfattning att betongen klarade sig med tämligen små täcksikt. En ledande svensk betongexpert hävdade t.ex. så sent som 1970 att armeringskorrosion inte kunde uppstå bara täcksiktet översteg 1 cm. Orsaken till denna missuppfattning var naturligtvis att det bara var en liten andel av våra konstruktioner som var äldre än ca 20 år, dvs. armeringskorrosion hade ännu inte hunnit avslöjas. Dessutom hade en mer omfattande användning av tösalt ännu inte påbörjats. Det tar minst ca 10 år innan pågående armeringskorrosion avslöjas visuellt genom skador på betongytan.

Metoder att klarlägga pågående korrosion, t.ex. potentialkartering existerade inte. Kunskap om vilken kloridhalt som var skadlig i olika typer av betong var bristfällig.

I Sverige hade man under lång tid godtagit *inblandning av kalciumklorid* i betongen. Tanken var att kloridjonerna skulle bindas kemiskt till hydrationsprodukterna och därmed oskadliggöras. Det visade sig emellertid så småningom att tidigare bundna kloridjoner frisattes på grund av betongens karbonatisering. Omfattande korrosionsskador uppträdde därför i många konstruktioner. Det var först i början av 1980-talet som kloridinblandning förbjöds.

Följden av all denna brist på kunskap om armeringskorrosion blev att man ofta utförde betongreparation med för små täcksikt, dvs. den reparerade konstruktionen fick för kort livslängd. Man använde också ofta betong med alltför högt vct som gav snabb inträngning av armeringsaggressiva ämnen som koldioxid och kloridjoner.

Risken var även att man gjorde kosmetiska reparationer av betong i vilka korrosion redan pågick utan att detta kunnat dokumenteras.

I Sverige, liksom över hela världen, drabbades man under 1970- och 1980-talen av omfattande korrosionsproblem i och med att konstruktionerna blev gradvis äldre. En intensiv forskningsverksamhet inom området armeringskorrosion startades därför överallt i världen. Mekanismerna bakom korrosion är därför nu tämligen välkända inte minst tack vare den forskning som utfördes vid CBI. Detta har lett till att man nu använder betydligt större täcksikt och betong med högre kvalitet. Metoder för livslängdsberäkning har dessutom utvecklats. Metoderna är emellertid fortfarande tämligen embryonala och bör därför utvecklas och förfinas.

Hur *fukttillståndet* förändras i den skadade betongen efter reparation var i stort sett helt okänt under 1970-talet. Följden var att man ofta använde täta polymerbeläggningar på frostskadad betong i den tron att man därmed skulle förhindra fortsatt frostangrepp och armeringskorrosion. Följden blev ofta att frostskadorna förvärrades eftersom fukt anrikades under den täta ytan. Efter en tämligen kort tid flagade beläggningen av.

En rätt omfattande experimentell undersökning av hur olika typer av reparationsskikt påverkade fukttillståndet i den reparerade betongen genomfördes vid CBI i slutet av 1970-talet. Resultaten visade att reparation bör utföras med betong utan användning av täta skikt.

När det gäller *kemisk nedbrytning*, t.ex. urlakning orsakad av genomströmmande vatten eller aggressiva kemikalier mot betongytan fanns redan 1970 omfattande kunskap, framförallt hämtad från utlandet. Man kände i stort sett nedbrytningsmekanismerna och kunde även i viss mån bedöma nedbrytningshastigheten.

3.3 Kunskapsutveckling sedan 1970-talet

3.3.1 Kunskaper om nedbrytningsfenomen

Genom den kraftiga ökning av antalet skadade konstruktioner som noterades under 1970-talet över så gott som hela världen blev det uppenbart att betong inte var det beständiga material man hade förutsatt när konstruktionerna planerades och byggdes. Följden blev att man på många håll startade intensiv forskning för att klarlägga hur en konstruktion bör utformas för att få den eftersökta livslängden. Under de senaste tre decennierna har forskning om betongens beständighet utgjort en dominerande del av all materialforskning inom betongområdet.

Det är framförallt *armeringskorrosion* som visat sig vara det största problemet i huvuddelen av alla länder, och som därför rönt det största intresset bland forskarna. Otaliga studier har gjorts av hur snabbt karbonatiseringsfronten och kloridjoner tränger in i betongen i olika miljöer.

Livslängdsmodeller med avseende på armeringskorrosion har utvecklats och har utnyttjats i samband med att täcksiktssnormer och normer för kvalitetskrav på betong fastställts. På grundval av sådana modeller har Beställaren kunnat ställa krav på att konstruktionerna skall ha viss förväntad livslängd, t.ex. 120 år. Sådana kvantifierade livslängdskrav ställs numera även i Bronnormen.

Livslängdskrav och livslängdsmodeller har även använts när kvalitetskrav fastställts för spektakulära byggnadsverk som Öresundsförbindelsen och Citytunneln i Malmö.

Med rätt stor sannolikhet har forskningsresultat lett till att vi i dag uppför betongkonstruktioner med betydligt större livslängd än vi gjorde före 1985.

Samtidigt har problematiken kring betongens *frostbeständighet* lett till rätt omfattande forskning, framförallt i Sverige och övriga nordiska länder. Även här har vissa livslängdsmodeller utvecklats baserade på hypoteser om nedbrytningsmekanismen. Dessa är dock osäkra och har ännu inte fått praktisk tillämpning.

Däremot har en direkt frysprovningmetod för *saltfrostangrepp* utvecklats ("Boråsmetoden"). Den har fått mycket stor betydelse. All brobetong måste sedan ca 20 år frysprovas innan den får användas. Detta har medfört att vi numera i stort sett är förskonade från frostavskalning på våra nya broar. En stor anledning till detta är även att en ny lågalkalisk cementtyp som ger säkrare och mindre varierande saltfrostbeständighet blivit i stort sett allena rådande i brobetong.

När det gäller att testa risken för *inre frostsador* saknas ännu i dag en rationell provningsmetod. Detta visade sig tydligt i samband med Öresundsförbindelsen. Den testmetod som föreskrevs var i och för sig rätt rimlig och baserades på den sannolika nedbrytningsmekanismen, men den krävde mer än ½ års provningstid.

Nästan alla nedbrytningsfenomen är kopplade till *betongens fuktnivå*. I flertalet fall ökar nedbrytningshastigheten med ökande fuktnivå. Det innebär att man måste kunna förutse det framtida fuktillståndet, både för nyproducerade konstruktioner och för reparerade konstruktioner, för att man skall kunna förutse konstruktionens livslängd.

När det gäller *armeringskorrosion* är det fuktförhållanden inom det s.k. hygroskopiska området (<100 % RF) som avgör. Här har vi genom forskning, som framförallt bedrivits i Sverige vid LTH och CTH, goda möjligheter att beräkna det framtida fuktillståndet, vilket är bakgrunden till att det finns någorlunda goda möjligheter att beräkna livslängden innan korrosion startar.

Frostnedbrytning av betongens inre uppträder vid extremt höga fuktnivåer överstigande det hygroskopiska området (RF=100%). Här saknar vi i stort sett helt möjligheter att räkna på fukt och fuktfixering, vilket är orsaken till att fungerande livslängdsmodeller saknas.

Samma brist på tillräcklig kunskap gäller fuktförhållanden i *reparerade konstruktioner*. Vi kan *kvalitativt* bedöma vad som händer t.ex. i gränsytan mellan betong och olika typer av reparationsskikt, men vi saknar möjligheter att *kvantitativt* beräkna fuktförhållandena i detalj.

När det gäller övriga nedbrytningsfenomen såsom vanliga *kemiska angrepp* så fanns i stort sett all kunskap redan för 30 år sedan. Små framsteg har därför gjorts.

Däremot har nya "kemiska problem" dykt upp som var okända för 30 år sedan. Det har t.ex. visat sig att felaktigt värmehärdad betong, eller grova konstruktioner som uppnår hög temperatur under härdningen, kan på sikt få s.k. försenad ettringitbildning i fuktig miljö. Konsekvensen är omfattande inre sprickbildning och hållfasthetsförlust. Problemet drabbade nyproducerade betongsliprar i Sverige. Fenomenet är nu klarlagt genom forskning framförallt i

Tyskland. Genom olika produktionstekniska metoder kan temperaturnivån hos den hårdnande betongen begränsas. Beräkningsmetoder för beräkning av förväntade temperaturnivåer i betong har utvecklats bl.a. vid LTU och LTH. De har blivit ett utmärkt verktyg för planering av gjutprocessen så att såväl höga temperaturer som alltför stora temperaturspänningar inte uppnås i den hårdnande betongen.

Självkompakterande betong har blivit alltmer använd under det senaste decenniet. Den vanligaste betongen innehåller stor mängd finmald kalksten. Denna betong kan under vissa förhållanden (sulfathaltig kall miljö, t.ex. havsvatten) brytas ned nästan fullständigt genom att mineralet thaumasit bildas.

3.3.2 Kunskapsnivån inom branschen och kunskapsspridning inom området betongbeständighet

Översikter och informationsskrifter om betongbeständighet togs fram i Sverige redan under 1980-talet. Informationen baserades på resultat av forskning. Samtidigt bedrevs informationsverksamhet genom seminarier riktade till branschen och vid olika betongkurser. Det gör att den allmänna kunskapsnivån inom beständighetsområdet, och medvetenheten om vikten att tänka även på konstruktionens livslängd i samband med materialval och konstruktionsutformning, är mycket högre i dag än vad den var för 30 år sedan.

Tyvärr finns det i dag tendenser att denna kunskap är på väg att gradvis eroderas, vilket visar av att nya betongstandarder godtar material som är tveksamma ur beständighetssynpunkt eller som är oprövade. Orsaken är troligen att standards i ökande utsträckning styrs av kommersiella intressen, vilket inte var fallet med tidigare statliga normer. Detta är en olycklig utveckling som kommer att leda till ett ökat framtida reparationsbehov.

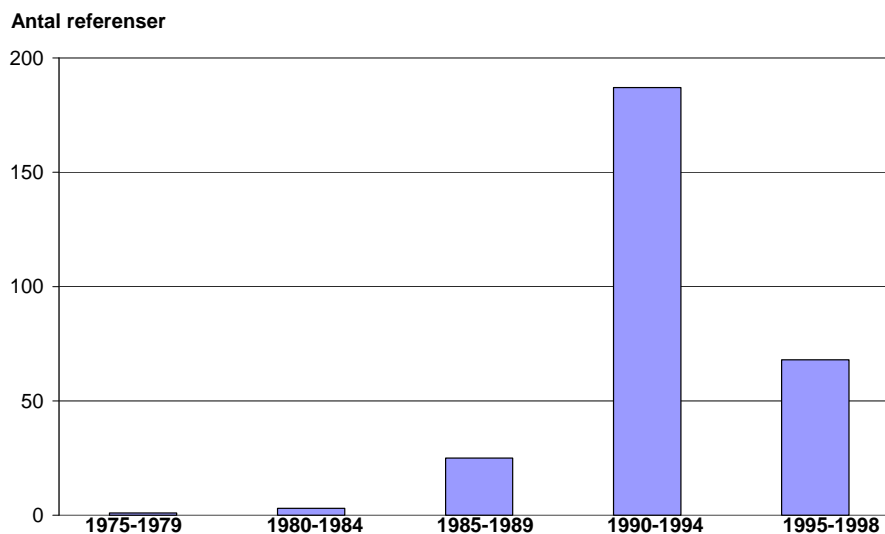
3.3.3 Kunskap inom området reparationsteknik

När skadefrekvensen ökade kraftigt under 1970- och 1980-talen uppstod en stark drivkraft för utveckling av reparationsteknik. Mycket information inom reparationsområdet publicerades i Sverige och utomlands. Som exempel kan nämnas att enligt en litteraturlista från i år (2009) utgiven av ACI i USA har inte mindre än ca 1080 artiklar och skrifter om betongreparation publicerats enbart av ACI, huvuddelen efter 1990.

I Sverige insåg man rätt tidigt att det fanns ett behov om information om reparation, till stor del beroende på att så mycket av tidigare reparationsinsatser som misslyckats. Därför togs en handbok fram 1987: *Betonghandbok. Reparation*. Därvid anlätades den tidens ledande experter inom praktisk reparationsteknik. Rekommendationer för materialval och reparationsteknik ges i boken, liksom en översikt över betongbeständighet.

En stor svensk genomgång av litteratur inom reparationsområdet publicerades år 1998³. Inte mindre än ca 290 litteraturreferenser studerades. De omfattade hela spektret från skadediagnos till reparationsmaterial, reparationsteknik och reparationsstandards. Det är intressant att se hur olika publikationer som refererades fördelades tidsmässigt; se Figur 7. Som synes ”exploderade” intresset för reparation i början av 1990-talet. Tiden före 1985 publicerades i stort sett inga rapporter om betongreparation.

³ Westerberg, Bo: *Reparation av betongkonstruktioner. Litteraturstudie*. Stockholm 1998.



Figur 7 Tidsmässig fördelning olika refererade publikationer.

Under de senaste decennierna har det även tagits fram *handböcker om reparation*. Ofta utarbetades dessa av nationella organisationer eller inom internationella kommittéer. Exempel på arbeten där svenska forskare deltog är följande (alla dessa publikationer är åtkomliga på nätet och i pappersversion):

- År 1997: EU-projekt, *BRITE/EURAM "The Residual Service Life of Concrete Structures"*. Där presenteras beräkningsmetoder för bedömning av den framtida skadeutvecklingen i en skadad konstruktion om ingen reparation görs. Avsikten är ge underlag för bedömning av behovet av reparation av en viss konstruktion, samt att ge underlag till prioritering mellan ett kollektiv av skadade konstruktioner.
- År 2001: EU-projekt, *CONTECVET. A Validated Users Manual for Assessing the Residual Service Life of Concrete Structures*. Tillämpning av metoder beskrivna i rapporten gjordes på verkliga konstruktioner i Sverige, Spanien och UK.
- År 2004: EU-projekt, *REHABCON. Strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures*. Rapporten är en tämligen fullständig manual inom reparationsområdet. Den beskriver reparationsmaterial och reparationsmetoder. Rekommendationer ges för val av reparationsprincip och reparationsmaterial för olika skadetyper. Principer för övervakning av konstruktioner ges liksom metoder för ekonomiska överväganden kopplade till reparation och underhåll.
- År 2004: Nordforsksprojekt, *NORECON. Network on Repair and Maintenance of Concrete Structures*. Olika reparationsmetoder beskrivs. Standards inom reparationsområdet presenteras.

En mycket omfattande *manual* inom reparationsområdet har publicerats i USA genom medverkan av flertalet amerikanska forskningsinstitutioner och organisationer.

- Concrete Repair Manual - 3rd Edition. Utgiven av ACI och ICRL
(*International Concrete Repair Institute*)

Under de senaste åren har en *standard* för betongreparation tagits fram inom EU:

- EN 1504: Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Standarden är uppdelad i 10 olika delar.

För närvarande utarbetas i Sverige en *nätbaserad reparationshandbok* av Vattenfall i samverkan med Vägverket med flera.

I Sverige bildades år 2001, på initiativ av CBI, ett nätverk *Rebet* för företag och personer som är aktiva inom reparationsområdet,

Under det senaste decenniet har även ett antal *internationella konferenser* om betongreparation organiserats.

Trots all denna informationsverksamhet finns det kvarvarande oklarheter om reparation. Dit hör t.ex. kunskap om det fuktmekaniska samspelet mellan skadad betong och reparationsmaterial. De livslängdsmodeller som tagits fram för skadad och reparerad betong är fortfarande mycket osäkra och är därför inte praktiskt tillämpbara.

3.3.4 Behov av kunskapsspridning inom området reparationsteknik

Kunskapsspridning inom reparationsområdet till byggbranschen är bristfällig. Det saknas översiktlig information riktad till entreprenörer och ägare. Behovet av utbildning är därför stort.

4 TILLSTÅNDSANALYS - ANALYS AV SKADEOMFATTNING

4.1 1970-tal

Flera av de viktigaste analysmetoderna existerade under 1970-talet. Vanliga metoder som användes för att klarlägga tillståndet hos konstruktionen är följande:

- Resterande hållfasthet och styvhet genom utborrade kärnor
- Inre kohesion genom ultraljud
- Sprickvidd genom sprickmikroskop
- Karbonatiseringsdjup genom pH-indikatorvätska
- Kloridhalt genom kemisk analys av uttaget prov
- Täcksiktstjocklek genom täcksiktstjäkmätare
- Urlakning genom analys av resterande kalkhalt
- Kemisk påverkan genom mineralanalys (kemisk och spektroskopisk)
- Alkali-kiselsyraangrepp genom mikroskopering
- Fuktnivå genom torkning av utborrade prov eller med RF-sensorer instuckna i betongen

Dessutom fanns flera laboriemetoder för att bestämma betongens potentiella beständighet. Exempel är provningsmetoder för:

- frostbeständighet. Vissa (dock osäkra eller oprövade) metoder existerade både för inre och yttre frostbeständighet. Beprövade svenska metoder saknades.
- alkali-kiselsyreresistens
- sulfatresistens
- karbonatiseringshastighet

Vid de stora reparationsinsatser som gjordes på balkonger och broar användes flera av dessa diagnosmetoder, framförallt hållfasthetsmätningar och mätningar kopplade till armeringskorrosion (kloridhalt, karbonatiseringsdjup, täcksikt). Däremot gjordes t.ex. inte kontroll av frostbeständighet genom frysprovning av uttagna prover.

Diagnos av skadeorsak och bedömning av reparationsinsatser gjordes ofta av den entreprenör som valdes att utföra reparationsarbetet. Vid större reparationer anlätades specialister. Dessa kunde vara fristående eller anställda vid CBI eller annan organisation.

4.2 Utveckling sedan 1970-talet

Metoder som listas ovan är även de viktigaste i dag. Det har dock tillkommit ett antal metoder som i några fall har blivit rutinmetoder. Vidareutveckling av de gamla metoderna har också skett. Exempel på nya metoder är:

- Potentialkartering för kontroll av pågående armeringskorrosion
- Mätning av korrosionshastighet

- Fältnässig snabbmetod för mätning av kloridprofil
- Tunnslipsteknik för bedömning av vct
- Impact Eco för detektering av inre sprickbildning och inre defekter (dock osäker metod)
- Fiberoptik för mätning av fortgående deformationer
- Modanalys av konstruktionens svängningsmönster vid snabbt påförd belastning.
- Brottmekaniska analysmetoder av risk för fortskridande sprickbildning och brott.

Det har även tagits fram viktiga laboratoriemetoder för mätning av potentiell beständighet hos betongkonstruktionen. Exempel är:

- Provningsmetod för betongens salt-frostbeständighet
- Bildbehandlingssystem för mätning av betongens luftporsystem
- Mikroskopmetod för bestämning av betongens vct

Vissa av dessa metoder har fått rätt omfattande praktisk tillämpning under de senaste decennierna. Dit hör potentialkartering för detektering av områden med misstänkt armeringskorrosion, samt mätning av korrosionshastighet.

Vägverket publicerade 1994 en handbok för broinspektion. I denna ges riktlinjer för hur inspektion skall genomföras. Metoder för identifiering av skadeläget anges.

Även om dagens kunskapsläge ger möjlighet till avsevärt bättre analyser och diagnoser är alltjämt osäkerheten stor och exakt skadeomfång svårt att fastställa. Därför spelar alltjämt de observationer som kan göras när reparationsarbetet startat en viktig roll i utformningen av reparationsinsatsen.

4.3 Behov av nya analysmetoder

Några viktiga analysmetoder saknas fortfarande. En beskrivning av dessa görs i kapitel 13, avsnitt 13.2 "Tillståndsanalys. Analys av skadeomfattning".

5 ANALYS AV REPARATIONSBEHOV FÖR EN KONSTRUKTION

5.1 Principer

Innan man påbörjar en reparation bör man naturligtvis undersöka om reparationen verkligen är akut eller om den kan skjutas upp. På grundval av resultat från en analys av skadeomfattningen kan man normalt göra en bedömning av konstruktionens bärförmåga och säkerhet genom tillämpning av sedvanliga konstruktionsberäkningsmetoder. Resultatet av denna bedömning visar om akut reparation är nödvändig eller inte. En svårighet när konstruktionen är korrosionsskadad kan vara att korrosionsgraden hos all armering kan vara svår att klargöra genom inspektion. Man tvingas förlita sig på enstaka observationer vilka av säkerhetsskäl inte alltid kan utföras i känsliga snitt.

Skulle det visa sig att konstruktionen är säker bör man ändå i princip göra en bedömning av skadeutvecklingen för att se när reparation blir nödvändig. Detta gäller de fall där skadan är miljöbetingad (beständighetsskada). Alltså bör man göra en så tillförlitlig livslängdsanalys som möjligt av den skadade konstruktionen.

Det är emellertid inte enbart rent tekniska aspekter, t.ex. bärförmåga, som avgör reparationsbehovet. Ibland tvingas man reparera även när detta inte är nödvändigt av enbart tekniska skäl. Detta gäller t.ex. när konstruktionen rent estetiskt är i ett sådant förfall att reparation blir nödvändig.

Ett annat fall är när påtryckningar från allmänheten tvingar fram reparation. Allmänheten kan nämligen genom artiklar i lokalpress, eller på annat sätt, ha fått för sig att konstruktionen är farlig trots att den enligt beräkningar är säker. Detta gäller i viss mån reparationen av Ölandsbrons pelare. Den lokala pressen hade ifrågasatt brons säkerhet eftersom synliga skador hade noterats på pelarna, vilket alarmerade allmänheten. Trots dessa skador var brons säkerhet aldrig äventyrad.

I kraftindustrin kan valet av tidpunkt för reparation ibland helt vara styrt av möjligheten till access. Betongreparationer i t.ex. vattenvägar måste vanligen genomföras i samband med andra planerade stopp för revisioner av de kraftgenererande enheterna. Kostnaden för produktionsbortfallet blir annars ofta en alltför stor kostnad jämfört med att göra en något större betongreparation senare. Scenariot är giltigt så länge inte ett haveri på betongkonstruktionerna i sig äventyrar säkerhet eller produktionsförmåga.

5.2 1970-talet

Konstruktionsberäkningsmetoder var väl utvecklade redan långt före 1970-talet, och kunde även tillämpas på skadade konstruktioner genom användning av observerade hållfasthetsdata och deformationsdata. På så sätt kunde man avgöra om skadorna var så stora att reparation var omedelbart nödvändig.

Däremot fanns i stort sett inga metoder för beräkning av konstruktionens livslängd. Det var först i slutet av 1970-talet som man började ifrågasätta det kvalitativa begreppet ”beständighet” och anse att det borde ersättas med det kvantitativa begreppet ”livslängd”. Det fanns idéer för hur framtida armeringskorrosion skulle kunna prognostiseras. Det fanns även idéer om hur surt angrepp och inre frostangrepp skulle kunna hanteras i en livslängdsberäkning. Men några välutvecklade metoder för beräkning av livslängd fanns knappast.

Brist på kunskap inom området livslängdsberäkning ledde därför till att man nästan alltid reparerade beständighets-skador omedelbart när de hade observerats.

5.3 Nuvarande situation

En stor del av den beständighetsforskning som genomförts under de senaste decennierna har haft som syfte att ta fram underlag till livslängdsbedömningar. Beräkningsmetoder, såväl deterministiska som stokastiska, av förväntad livslängd har utvecklats. Exempel på stokastiska metoder är:

- EU-projektet DURACRETE, ”General Guidelines for Durability Design and Redesign”, Cowi, 2000
- ”Vägledning för livslängdsdimensionering av Betongkonstruktioner. Svenska Betongföreningen, Rapport nr 12, 2006. Den däri angivna metoden är i stort sett en översättning av metod som anges i DURACRETE.

Dessa metoder avser dock i huvudsak enbart *armeringskorrosion*. Metoderna kan användas för att mycket approximativt förutse återstående tid *innan korrosion startar*.

I en skadad konstruktion är emellertid korrosion ofta i full gång. Beräkningsmetoderna ovan kan då inte tillämpas eftersom de avser förväntad livslängd hos en konstruktion som skall byggas. Frågeställningen för en redan skadad konstruktion är hur omfattande korrosionsangrepp som kan accepteras innan alltför allvarliga skador hos täckskiktet uppstår, och hur snabbt korrosionen och tvärsnittsreduktionen sker. Även sambandet mellan korrosionsgrad hos armeringen och reduktion av bärförmåga måste vara känd för att man skall kunna bedöma återstående livslängd.

När det gäller andra viktiga skadetyper, t.ex. frostnedbrytning och Alkali-kiselsyrareaktion (AKR), finns förslag till hur livslängdsberäkningar skall kunna göras, men de har ännu inte fått praktisk användning.

Vissa möjliga beräkningsmetoder för bedömning av fortsatt reduktion av bärförmåga hos en konstruktion som är skadad av armeringskorrosion, frost eller AKR beskrivs i rapporter från följande EU-projekt:

- BRITE/EURAM, ”The Residual Service Life of Concrete Structures”.

Beräkningsmetoder som ges där ger viss vägledning inför beslut om reparation. Metoderna är emellertid inte tillräckligt verifierade.

I princip råder därför ungefär samma situation som på 1970-talet; man kan inte bedöma framtida nedbrytningsförlopp med tillräcklig hög precision. Alltså reparerar man (eller river) konstruktioner med pågående nedbrytning även om detta egentligen inte är nödvändigt. I andra fall leder brist på kunskap att man föreskriver reparationsmetoder som leder till alltför kort livslängd.

Det kan nämnas att livslängdsberäkningar har använts i samband med det i förhållande till reparation enklare fallet nybyggnation. Så t.ex. tillämpades en beräkningsmetod för armeringskorrosion vid utformningen av Svensk Standard för täckskikt. Den har även tillämpats vid utarbetningen av betongspecifikationen för Öresundsförbindelsen och Citytunneln i Malmö.

Provbekastning är en metod som i vissa fall har användas för bedömning av reparations- och förstärkningsbehov. Det visar sig nämligen att konstruktionen ofta har betydligt högre bär-

förmåga än vad man kan förvänta sig baserat på enbart en okulär besiktning. Orsaken till detta är normalt att den fortsatta cementshydratationen gett hållfasthetsökning till en nivå långt överstigande den hållfasthet som användes i konstruktionsberäkningarna.

5.4 Behov av ny kunskap

Metoder att förhandsberäkna det fortsatta skadeförloppet, liksom metoder att bedöma inverkan av en skada på konstruktionens bärförmåga måste vidareutvecklas innan man kan få fram säkra bedömningsmetoder för hur länge man kan avvakta med att reparera. Väsentliga kunskapsluckor beskrivs i kapitel 13, avsnitt 13.3 ”Analys av reparationsbehov”.

6 REPARATIONSMETODER

6.1 Principer för val av reparationsmetod

För varje *skadety*, *skadeorsak* och *skada* finns ett antal lämpliga reparationsmetoder. Valet av metod kan baseras på en analys enligt följande schema, se Figur 8.

- Skadety, skadeorsak och skadeomfattning måste vara kända genom undersökningar av den skadade konstruktionen.
- Funktionskrav på konstruktionen efter reparation måste fastställas. Vissa krav är tvingande. Dit hör samhällets krav på bärförmåga/säkerhet och påverkan på människors hälsa. Andra krav är öppna för fria val. Dit hör t.ex. ägarens önskemål när det gäller livslängd och underhållskostnad.
- Beroende på skadans typ och omfattning finns ofta ett antal alternativa reparationsmetoder.
- Varje tänkbar metod värderas med avseende på uppställda funktionskrav. Risker med olika metoder värderas.
- Metod väljs.

Man måste tyvärr konstatera att detta sätt att angripa ett reparationsproblem sällan tillämpats i det förflutna och fortfarande inte alltid tillämpas. Ofta överlåter nämligen ägaren till en entreprenör att välja reparationsmetod. Dennes val är inte alltid optimalt. Stora ägare, t.ex. Vägverket, anlitar dock numera regelmässigt kompetenta konsulter och deltar aktivt i valet av reparationsmetod.



Figur 8 Schema för val av reparationsmetod.

6.2 1970-talet

Det fanns två stora företag som var specialiserade på betongreparation:

- Stabilator
- Besab

Andra större företag var:

- Byggs Sprutbetong
- Nya Asfalt

Dessutom fanns flera mindre företag som utförde enklare reparationer såsom beläggning av balkongplattor med polymer.

Informationen nedan baseras på intervjuer med två personer vid Stabilator och Besab vilka deltog i reparationsprojekt under 1970-talet⁴.

Ofta var det entreprenören som valde reparationsmetod. Det gäller särskilt mindre företag som arbetade med rehabilitering av fastigheter och som riktade sig till enskilda fastighetsägare.

De stora reparationsföretagen gjorde ibland egna skadeutredningar. Konsulter var sällan inkopplade i skadeanalysen.

Reparationsföretagen valde reparationsmetod som såldes in till och accepterades av ägaren. Man arbetade alltså i dessa fall som totalentreprenör. Bygghandlingar förekom sällan. Större ägare som Vägverket, Vattenfall och andra ägare av viktiga byggnadsverk utarbetade dock normalt egna handlingar för reparation varvid entreprenören arbetade som generalentreprenör. Vissa konsultföretag och enskilda personer som var specialiserade på skadeanalys och reparation anlätades i dessa fall av ägaren för val av reparationsmetod.

Något explicit krav på livslängd hos den utförda reparationen ställdes aldrig. Normal garanti-tid var 2 år.

Den vanligaste reparationsmetoden bestod av följande moment:

- Avverkning av skadad betong med *mekaniska metoder* (handhållen bilhammare). Borttagning av betong bakom armering endast i undantagsfall.
- *Pågjutning* med konventionell betong ibland med epoxilimning till gamla betongen. Vanligt std-cement användes. Polymermodifierad betong användes sällsynt. I något fall med misslyckat resultat.
- *Sprutbetong* var en vanlig reparationsmetod. Stålfiberarmerad och ibland även polypropenfiberarmerad sprutbetong förekom, men då enbart som torrsprutning. Betongsprutning gjordes ofta av ”grovarbetare” (”omskolade skogsarbetare”).
- *Injektering*. Ofta cementbaserad injektering som användes för att uppgradera betongkonstruktioner från 1910-1930 som hade stora urlakningsproblem p.g.a. höga vattencementtal och låga cementmängder⁵

Andra metoder var följande:

⁴ Jonas Holmgren: Intervjuer med PH Nilsson tidigare Stabilator, B Edvinsson tidigare Besab.

⁵ Erik Nordström: Intervju med Lars Lindström, tidigare Vattenfall.

- Polymerbeläggning (epoxi).
- Injekteringsbetong vid krav på låg krympning.
- Lappning av ytskador.Utfördes av murare.

Kontroll av resultatet gjordes ibland genom provning av tryckhållfasthet hos reparationsbetongen och vidhäftningshållfasthet mellan reparation och gammal betong. Vid lagning med sprutbetong förprovades betongen ibland genom sprutning av provlåda.

Exempel på reparationer från 1970- och 1980-talen ges i avsnitt 8.1.

6.3 Nuvarande situation

I en intervjuundersökning hävdas att den reparationsmetod, som oftast användes under 1970-talet av seriösa entreprenörer, dvs. borttagning av skadad betong och pågjutning av ny betong, är den vanligaste även i dag⁶. Följande utveckling har dock skett:

- Det finns fler större entreprenörer inom reparationsområdet (Stabilator har dock försvunnit)
- Det är vanligare med bygghandlingar som beskriver krav på reparationsarbete. Detta är dock ovanligt ”ute i landet”, bortsett från stora beställare, t.ex. Vägverket och Banverket. Vissa beställare vänder sig dock direkt till entreprenören, som väljer reparationsmetod.
- Vattenbilningstekniken har utvecklats starkt och används nu till 90% för att avlägsna skadad betong. Även betong innanför armering kan lätt tas bort med denna teknik.
- Övervägande teknik är att den rensade betongen beläggs med ny betong, antingen genom pågjutning eller med sprutbetong. Stålfiberinblandning används ibland där stora krav ställs på slitstyrka, t.ex. när betongen används som slitbeläggning på en bro.
- Vid sprutbetong används numera vana yrkesmän.
- Sprutning av provlåda görs ofta som dokumentation av arbetet.
- Polymermodifierad färdigblandad betong är vanlig, särskilt när Vägverket är beställare.
- Oftast appliceras någon form av ”ytskydd” på reparationsbetongen eftersom detta antas öka livslängden. Att silanimpregnering har positiv effekt har noterats i praktiken genom direkt jämförelse mellan obehandlad och behandlad del av samma bro⁷.
- Stora beställare, t.ex. Vägverket, ställer krav på vidhäftningshållfasthet, tryckhållfasthet och saltfrostbeständighet.
- Krav ställs ofta på viss ytjämnhet och kulör.
- Injekteringsområdet har utvecklats mycket sedan 70-talet. Framförallt kunskapsnivån gällande valet och kontrollen av materialsammansättningar för cementbaserad injektering använd för uppgradering av betong. Även tillsatsmedlens utveckling har ökat möjligheterna till lyckade injekteringsresultat.

⁶ Jonas Holmgren: Intervju med Pär Fjellström, Besab och Tommy Ellison, Besab

⁷ Rolf Hörnfeldt: Intervju med Kenth Jansson, projektledare brunderhåll, Vägverket, Region Stockholm.

- Polymerbeläggningar används sällan för avancerade konstruktioner. Många beställare är starkt negativa p.g.a. dålig erfarenhet av metoden. Ibland används dock polymerbeläggningar på balkonger, parkeringsdäck, garage.
- Undervattensgjutningar har blivit vanligare i reparationssammanhang. Framst beroende på utvecklingen av tillsatsmedel som gett ökade möjligheter till att nå högre kvalitet.

Flera alternativa metoder att reparera betong har tagits fram. Exempel på nya metoder är:

- Realkalisering av karbonatiserad eller kloridinfekterad betong.
- Kloridutdrivning ur täckskiktet.
- Applicering av katodiskt skydd.
- Användning av korrosionsinhibitorer

Osäkerheten kring dessa metoder är dock stor. Metoderna har därför inte fått någon större användning i Sverige. De nämns inte heller i ovan refererade intervju.

En metod som tycks användas alltmer är applicering av ytskydd (t.ex. tätande membran) på betong som är karbonatiserad in till armeringen. Genom ytskyddet sänks ibland fuktnivån i betongen till så låg nivå att den fortsatta korrosionshastigheten blir ”försumbar”. Detta hävdas åtminstone av materialleverantörer. Beständigheten hos produkterna är mycket oklar.

Detta sätt att skydda en redan skadad konstruktion skall inte förväxlas med de hydrofoberande produkter som sedan flera decennier används regelmässigt på nyproducerad betong med syfte att sänka fuktnivån så att karbonatisering och kloridinträngning försvåras och därmed livslängden ökas.

En nygamal teknik som för närvarande används för att reparera valven på gamla Årstabron är s.k. *prepaktbetong*. En ballastbädd med lämplig gradering, även innehållande mycket grova stenar, packas tätt. Därefter injekteras hålrummen mellan ballastpartiklarna med ett lättflytande bruk. På detta sätt undviks yttre krympning av betongen. All krympning tas i cementbruket vilket troligen leder till viss sprickbildning i detta. Frostbeständighet och täthet hos produkten är inte helt kända.

Exempel på utförda reparationer under de senaste decennierna ges i avsnitt 8.2.

6.4 Behov av nya och förbättrade metoder

En genomgång av forskningsbehovet görs i kapitel 13, avsnitt 13.4 ”Reparationsmetoder och reparationsmaterial”.

7 REPARATIONSMATERIAL

7.1 Allmänt om reparationsmaterial

Flertalet reparationer görs genom att nytt material appliceras på konstruktionen efter det att denna rensats från defekt material. Det är viktigt att det nya materialet är kompatibelt med den skadade konstruktionen. Materialet får t.ex. inte medföra att skador uppkommer på nytt, eller att den tidigare uppkomna skadan vidareutvecklas. Materialet skall alltså skydda den gamla konstruktionen under lång tid samtidigt som bärförmåga och säkerhet återställs under lång tid.

Många reparationsmaterial marknadsförs oseriöst som ”mirakelprodukter” som skyddar konstruktionen mot allt ont. Dit hör t.ex. olika produkter som skall appliceras på korroderad armering för att göra denna immun mot fortsatt korrosion. Andra produkter marknadsförs som koldioxidabsorberande eller kloridabsorberande och därmed korrosionsbromsande utan att de rimligen har den effekt som hävdas. Det finns många fler exempel på oseriös marknadsföring av reparationsprodukter.

Ägarens svårighet att bedöma värdet av olika reparationsmaterial har medfört att även olämpliga produkter blivit använda. Man har ofta överlåtit till entreprenören att välja material och metod i förlitan på att denne har tillräcklig kunskap, vilket inte alltid är fallet.

Det har gradvis kommit fram allt flera provningsmetoder för reparationsmaterials egenskaper i olika avseenden, vilket ökat möjligheten att välja rätt. Numera är många av dessa metoder internationellt standardiserade. En EU-standard som behandlar reparation är:

- EN 1504 ”Products and systems for the production and repair of concrete structures”. Publicerad 2004/2005.

I denna standard hänvisas till ett stort antal standardiserade provningsmetoder för reparationsmaterial:

- Surface protection systems for concrete: 54 olika provningsmetoder.
- Structural and non-structural repair: 30 olika provningsmetoder.
- Structural bonding: 21 olika provningsmetoder.
- Concrete injection: 34 olika provningsmetoder
- Anchoring of reinforcement bars: 17 olika provningsmetoder.
- Reinforcement corrosion protection. 15 olika provningsmetoder.

Dessa standardiserade metoder kan användas av tillverkare av reparationsmaterial för att de skall kunna dokumentera egenskaperna hos producerade material. Kunden kan alltså jämföra olika material med varandra, t.ex. jämföra klorid- och vattenpermeabiliteten mellan olika material.

Tyvär saknas dock fortfarande i stor utsträckning metoder att bedöma hur reparationsmaterialet *samverkar* med sitt underlag, den skadade konstruktionen. Principer för hur sådan kontroll av samverkan skulle kunna göras finns i det nyligen avslutade EU-projektet *REHABCON. Strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures*. Mycket återstår dock att göra.

7.2 1970-tal

Som framgår av avsnitt 6.2 användes i stort sett bara två huvudtyper av reparationsmaterial:

- Cementbaserad betong och cementbruk (gjuten, sprutad eller injekterad på plats)
- Polymerbeläggningar (epoxi eller polyester)

När det gäller cementbaserade produkter ställdes normalt inga särskilda krav på materialegenskaper. Ibland ställdes dock krav på minsta tryckhållfasthet. Krav på högsta vct var mycket sällsynt. Krav på högsta kloridpermeabilitet eller krav på resultat av frysprovning förekom inte.

7.3 Nuvarande situation

Av avsnitt 6.3 framgår att huvudsakligen samma material fortfarande används som 1970. Kraven på cementbunden reparationsbetong är dock högre i dag. Det ställs t.ex. normalt krav på följande egenskaper:

- Högsta vct (ofta 0,40)
- Krav på hög saltfrostbeständighet påvisad genom frysprovning
- Krav på cementsort (normalt lågalkaliskt cement med begränsad värmeutveckling (LA/BV))
- Krav på goda reologiska egenskaper för injekteringsbruk

Det förefaller dessutom som att vissa hydrofoberande ytskydd blivit allt vanligare som alternativ till rensning av gammal betong och gjutning av nytt täckskikt. Metoden kan enbart användas på betong som inte i sig är skadad, t.ex. av frost, men i viken karbonatiseringsinitierad korrosion har startat. Tanken är att ytskyddet skall göra betongen så torr att korrosion inte kan fortgå. Säkerheten hos metoden är oklar. Ytskyddet kan enbart försvåra inflöde av vatten genom ytan men kan inte hindra vatten att komma in genom större sprickor eller genom oskyddade ytor.

I vad mån provning av materialegenskaper med standardiserade provningsmetoder blivit allmänt föreskriven av dem som reparerar eller föreskriver reparation är oklart. Troligen används metoderna av vissa materialtillverkare, t.ex. tillverkare av ytskydd.

7.4 Vidareutveckling av material

En genomgång av forskningsbehovet görs i kapitel 13, avsnitt 13.4 ”Reparationsmetoder och reparationsmaterial”.

8 EXEMPEL PÅ UTFÖRDA REPARATIONER

8.1 Exempel på äldre reparationer

8.1.1 Balkonger

I mitten av 1970-talet rasade ett antal balkonger varvid dödsfall inträffade. En omfattande forskningsverksamhet kring balkongbeständighet och balkongreparationer startades och genomfördes vid CBI.

En landsomfattande kontroll av balkongernas tillstånd initierades snart efter dessa olycksfall. Metoder för tillståndskontroll utvecklades och information om dessa metoder spreds brett genom kursverksamhet och informationsskrifter.

Inspektionerna visade att en stor andel av balkongerna hade armeringskorrosion, ofta i kritiska snitt, t.ex. där bärande armering passerade ytterväggen. Betongen var ibland frostskadad, t.ex. under membranisolering och plattbeläggning. Räckesstolpar var ofta infästa i defekt betong med risk att de skulle lossna.

Balkongerna var ofta inte mer än 10 år gamla trots att de hade omfattande skador. Vissa balkongplattor var äldre men hade då normalt en bärande stålram, som också ofta var korroderad.

En kartering genomförd av CBI av erfarenheter av tidigare utförda reparationer visade att man ofta använt billig, s.k. kosmetisk reparation med någon polymer lagd ovanpå betongen, ofta polyesterbaserade bruk och beläggningar. Erfarenheten av dessa "lagningar" var tämligen negativ. Beläggningen hade inte lyckats förhindra fortsatt korrosion av armeringen. Ofta hade den frusit loss eftersom fukt anrikats i gränsytan mellan beläggning och betong. Lagningarna hade huvudsakligen genomförts av småföretag utan större betongteknisk kompetens.

Som nämnts ovan, genomfördes även en stor CBI-undersökning av fuktförhållanden och frostbeständighet hos betongplattor (modellplattor) med olika typer av reparation.

Vid inspektionen visade sig många plattor ha delamineringar, möjligen orsakade av tidig frysning under byggskedet. Resterande bärförmåga hos sådana plattor studerades experimentellt.

Tack vare denna forskning, och då nyligen påbörjad mera intensiv allmän beständighetsforskning i Sverige och utomlands, kunde rekommendationer för mer beständiga betongreparationer tas fram och spridas genom CBI. Ofta ledde rekommendationerna till att balkongplattan bilades bort och ersattes med ny högvärdig betong av "brobyggnadskvalitet". Ett annat alternativ var att miljön runt balkongplattan förändrades till det bättre genom att balkongen glasades in.

Sammanfattningsvis gäller att balkongreparationer, åtminstone fram till 1970-talets mitt, ofta genomförts utan större tanke på konsekvensen. Kunskaper, som trots allt fanns i forskarvärlden, hade inte tillämpats p.g.a. ignorans eller av ekonomiska skäl. Byggherrens förmåga att göra en kompetent upphandling av reparation saknades i stort sett helt.

En annan sak som avslöjades genom de påtvingade inspektionerna var att byggherrens skyldighet att kontrollera och underhålla sina byggnader hade haft mycket stora brister eftersom så mycket skador som kunnat leda till fatala konsekvenser upptäcktes vid inspektionerna.

8.1.2 Betongbroar

8.1.2.1 Kantbalkar

På grund av den ökande användningen av tösalt under 1960-talet kombinerad med att brobetong före 1965 enligt betongnormen inte behövde vara lufttillsatt, och att den därefter sällan innehöll tillfredsställande lufthalt och luftporstruktur, uppstod efter något år saltfrostsador på kantbalkar. Skadorna bestod av en successivt ökande avskalning, vilken på sikt äventyrade armeringens korrosionsskydd och som kunde leda till att räcknet försvagades.

För att undvika problemet tätades ibland kantbalkar med polyester- eller epoxibeläggningar. Förhoppningen var att saltet därefter inte skulle kunna nå betongen och att denna därför skulle skyddas mot fortsatt nedbrytning. Tyvärr visade det sig att beläggningen efter kort tid lossnade på grund av sönderfrysning av betongen vars fuktnivå sannolikt ökades i gränsskiktet mot beläggningen. Försök gjordes även att epoxilimma ett nytt betongskikt mot den rensade betongytan. Inte heller denna metod gav tillräckligt skydd. Troligen beroende på att fukt anrikades under epoxiskiktet.

I den mån lagning med ren betong användes var prognosen bättre, men även i detta fall fick man ofta ny avskalning beroende på att den använda reparationsbetongen inte alltid var frostbeständig. Lufthalten i den hårdnade betongen var för låg på grund av lufthaltsförluster. Frysprovning av reparationsbetongen gjordes inte eftersom en etablerad provningsmetod saknades.

8.1.2.2 Brobanepplattor

Under det sena 1970-talet upptäcktes allvarliga frostsador hos brobanepplattor belagda med fuktisolering och asfalt. Broar i Stockholm, Tranebergsbron, Skurubron, Västerbron, visade sig vara så skadade att omedelbar reparation krävdes. Skadorna hade inte kunnat ses vid normala visuella broinspektioner eftersom de var dolda under asfalten. Det var först när hållfastheten var så nedsatt att brott skedde i betongen som skadorna avslöjades.

Eftersom man kunde misstänka att även andra broar var skadade startade Vägverket i början av 1980-talet en inventering av alla broar, varvid borrkärnor togs ut ur brobanepplattorna för analys av skador och kloridhalt i betongen. En rätt stor andel av broarna (ca 10%) visade sig ha betongskador som krävde reparation.

Som reparationsmetod valdes normalt pågjutning av ny betong sedan skadad betong tagits bort. I samband med dessa reparationer utvecklades och tillämpades ny teknik t.ex. vattenbilningsteknik för borttagning av skadad betong, frysprovning av reparationsbetong med nyutvecklad provningsmetod, samt användning av stålfiberarmerad reparationsbetong.

Veterligen har huvuddelen av dessa reparationer fungerat väl under de ca 20-25 år de exponerats. Troligen beror detta på att tekniker och kunskaper inom reparationsområdet som kommit fram under det föregående decenniet kunde tillämpas.

8.1.2.3 Ölandsbron

Ölandsbron har varit ett "sorgebarn" alltsedan den invigdes år 1972. Redan efter 10 år noterades tecken på omfattande armeringskorrosion i lågbropelare samt erosion i vattenlinjen hos pelarna. Redan dessförinnan hade reparation skett av pelartoppar på vilka brolager vilar och mot vilka avloppen av saltförorenat vatten från brobanan mynnade.

En omfattande kartering av skador genomfördes av CBI på uppdrag av Vägverket. Man undersökte bl.a. kloridhalten i pelarna och hållfastheten i pelarnas olika delar. Pågående armeringskorrosion av s.k. "sprickarmering" i pelarytor kunde noteras genom missfärgning och

avskalning av ytan. Betongen i pelarnas täckskikt hade ofta så låg hållfasthet att den kunde spjälkas av genom lätta slag. Inga skador av frost eller korrosion noterades i kantbalkar och brobaneplattor.

Det gjordes även en potentialkartering för att undersöka om armeringskorrosion pågick. Man upptäckte då intensiv korrosion även i armering långt under vattenytan. Sådan korrosion ansågs av flertalet experter vara i stort sett utesluten. Den har sedermera även observerats i andra undervattenskonstruktioner.

På initiativ av Cementa gjordes även en mätning av pelarnas frostbeständighet genom frysprovning vid ett betonglaboratorium i Finland av utborrade stora kärnor. Resultatet var i högsta grad oväntat. Betongen visade sig nämligen ha osedvanligt låg s.k. inre frostbeständighet. Detta berodde förmodligen på att betongen innehöll porös grov naturballast utvunnen på Öland.

Alla tecken tydde alltså på en undermålig betongkonstruktion med för höga och varierande vattencementtal, med bristfällig komprimering, med låg lufthalt, med olämplig ballast och med små täckskikt. De enda konstruktionsdelar för vilka man föreskrivit viss luftinblandning (3.5% à 4,5%) gällde brobaneplattan, kantbalkar och bropelare till en meter över vattenytan. All övrig betong saknade luft.

Lämplig reparationsmetod för pelarna diskuterades intensivt i början av 1980-talet med bl.a. en expertgrupp initierad av Vägverket. Tre olika reparationsprinciper diskuterades:

Alt 1: ”Lappning” (eng. ”patching”) av skador med någon typ av reparationsmaterial.

Alt 2: Kärnborring vertikalt ned till bottenplattan. Montering av spännkablar i hålen som injekteras. Därmed skulle korroderande bärande vertikala armeringsjärn kunna ersättas utan att korrosionen i dessa behövde stoppas. Metoden kunde kompletteras med någon form av estetisk förbättring av exponerade betongytor.

Alt 3: Omslutning av pelarna med ett helt nytt betongskal som har förmåga att ta all last vilket innebär att de skadade pelarna kan falla sönder utan risk för konstruktionens bärförmåga.

Alt 1 bedömdes vara uteslutet eftersom det i princip skulle innebära att den arbetare som utförde reparationen skulle tvingas bli beständighetsexpert när han skulle välja vilka partier som skulle lappas och till vilket djup skadad betong skulle tas bort. Dessutom ansåg man att man inte kan stoppa pågående inre frostnedbrytning i aktuell fuktig miljö genom beläggningar på ytan. Lappning av delar under vatten ansågs bli mycket besvärlig såvida den inte skedde i torrhet.

Alt 2 ansågs vara osäker eftersom betongens inre hade så dålig frostbeständighet. Det ansågs vara principiellt olämpligt att förstärka betong som hade så medioker inre frostbeständighet.

Alt 3 ansågs vara den enda realistiska förutsatt att arbetet skedde i torrhet innanför en ”fångdamm”.

Slutligen valde Vägverket Alt 3. Man kunde då, vid val av betongkvalitet till betongskalet, tillämpa kunskap som gradvis kommit fram inom beständighetsområdet. Så t.ex. valdes betong med vct 0.40. Betongen frysprovades med den nyutvecklade s.k. Boråsmetoden. Som cement valdes det nya Anläggningscementet. Som täckskikt valdes 45 mm. (Detta är dock i minsta laget. I dag hade man hellre valt 10 mm högre täckskikt av säkerhetsskäl. Det skulle ha ökat den förväntade livslängden med ca 50%!).

För att man skulle undvika den stora risken för temperatursprickbildning i skalet föreslog entreprenören NCC att skalet skulle skiljas från den gamla konstruktionen genom ett mjukt mellanlägg. Mätningar och beräkningar hade nämligen visat att skalet annars lätt kunnat spricka på grund av temperaturskillnader mellan skal och betong. Beräkningsmetoder för temperaturspänningar hade kommit fram under de senaste åren.

Senare har andra skador på Ölandsbron framkommit:

1. Omfattande korrosionsskador även på armering i kantbalkar vilket medfört sprängning av täcksiktet. Möjligen beror korrosionen på galvanisk korrosion driven av räknet eftersom räckesstolpar najats till kantbalksarmeringen.
2. Synlig korrosion av bygelarmering i bärande balkar på lågbron.

8.1.2.4 Sammanfattning betongbroar

Sammanfattningsvis gäller för i stort sett alla typer av skador på betongbroar att de beror på konstruktörens och byggherrens okunskap om betongbeständighet den gång val av betongkvalitet och täcksikt skedde. En annan orsak är dåvarande brist på provningsmetoder, t.ex. provning av frostbeständighet. Man hade helt enkelt en övertro på betongens beständighet. I stället för den "eviga" livslängd som förväntades av en betongkonstruktion, fick man ofta bara 10-20 års livslängd innan dyrbara reparationer blev nödvändiga.

Samma brist på kunskap fanns inte generellt när reparationer genomfördes under 1980-talet. Man kunde då göra en bättre analys av reparationens funktion. Man fann därför att det var lämpligt att välja hög betongkvalitet hos reparationsbetongen och att utnyttja cement som gav säkrare beständighet, samt att använda nya provningsmetoder.

Sådan kunskap utnyttjades inte vid de lagningar av kantbalkar med olika polymerprodukter som gjordes under 1970-talet. Dessa reparationsmetoder valdes troligen mer på känsla än på analys.

8.1.3 Dammkonstruktioner

8.1.3.1 Utskov

Betongskador i utskov uppstår oftast vid ytterkanterna på skibordet i anslutning till dammpe-larna. Skadeorsaken kan vara vattenläckage vintertid med följande frostska-dor vid ytan, eller nötnings-skador i samband med spill ibland som en följd av kavitation vid skarvar och ojämnheter.

Vid Ligga kraftstation i Luleälven (uppförd 1954) fanns skador i betongen på skibordet och det beslutades att reparera detta i början av 80-talet. Vattenbilningsmetoden användes för av- verkning av den gamla skadade betongen, vilket ansågs som ovanligt och kostsamt men effek- tivt. För att få en nötningsbeständig yta valdes dessutom att vakuumbehandla ytan efter gjut- ning. Resultatet blev mycket bra och ser än idag ut att fungera väl.

Reparation med sprutbetong förekom också med mycket blandade resultat. I flacka partier med sprutning nedåt blev problemet att undvika insprutning av spill som annars gav dålig kvalitet och vidhäftning. För anläggningar där man ansträngt sig för att skydda ytor och samla upp spill blev resultatet istället gott.

8.1.3.2 Reparation under vatten

På uppströmssidan om dammpelare kan det i anslutning till utskov bli stora påfrestningar med isnötning. Isfrihållning närmast luckorna är vanligt, men inte vid själva pelarnosarna. Skador som finns både i vattenlinjen och en bit under ytan kan vara svåra att reparera. Om inte möjligheten finns att sänka av ytan eller bygga komplicerade kassuner kan undervattensgjutning användas. Vid Lilla Edets kraftstation i Göta älv (uppförd 1926) användes undervattensgjutning injekteringsbetong (prepakt) vid reparation av dammpelarna.

8.2 Exempel på nyare reparationer

8.2.1 Parkeringsdäck

Många parkeringsdäck har under de senaste decennierna drabbats av omfattande armeringskorrosion. Huvudorsaken är att man när parkeringsdäcken konstruerades ofta betraktade dem som "inomhuskonstruktioner", vilket innebär att man använde betong med alltför högt vct och att man föreskrev för små täckskikt. I verkligheten är parkeringsdäcken hårt belastade med tösalt som droppar från bilarna. Saltet tränger ner i betongen och överkantsarmeringen börjar rosta inom något decennium. Korrosionshastigheten blir högre än i utomhuskonstruktioner på grund av den genomsnittligt högre temperaturen. Efter ytterligare något decennium sprängs täckskiktet.

Parkeringsdäcken är oftast utformade som pelardäck, dvs. de har kraftig överkantsarmering över pelartopparna för att uppta böjspänningar och undvika genomstansning. Armeringskorrosion medför därför en stor säkerhetsrisk, vilket innebär att omedelbar reparation ofta var nödvändig när skadan observerats.

I parkeringsdäck utomhus har ibland även saltfrostsador uppkommit eftersom betongen saknat luftinblandning eller haft bristfällig luftporstruktur.

Många parkeringsdäck har reparerats. Metoden är oftast att till synes skadad (kloridinfekterad och frostsadad) betong tas bort och ersätts med ny högvärdig frostbeständig betong med vct som inte överstiger 0.40 ("brobetong"). I vissa fall föreskrivs att all betong med kloridhalt överstigande ett visst gränsvärde, t.ex. 0.5% av cementvikten, skall bilas bort. Korroderad armering rengörs och kompletteras. Täckskikten ökas. Kloridspärrande tätskikt har ibland påförts betongens överyta.

Epoxybelagd armering användes bl.a. i USA och Kanada hos parkeringsdäck med avsikt att göra armeringen oåtkomlig för kloridjoner och därmed korrosion. Resultatet var inte alltigenom lyckat och tekniken fick ingen användning i Sverige, vilket sannolikt varit bra.

8.2.2 Elementfasader

Under miljonprogrammet användes förtillverkade elementfasader i stor skala. Även kontorshus och offentliga byggnader har ofta försetts med elementfasader. Det yttre elementskalet är ofta rätt tunt (<10 cm) vilket innebär att täckande betongskikt ofta blir litet. Till detta bidrar produktionsmetoden av elementen, eftersom exponerad yta ofta vänts nedåt mot formbotten. Det är då risk att armeringen sjunker ner under gjutningen. Det finns fall där täckskiktet hos ytarmeringen varit nästan obefintligt. I sådana fall har korrosion uppstått efter kort tid.

Även s.k. sprickarmering som schablonmässigt monterats vid kanter och utåtgående hörn har ofta låga täckskikt och drabbas dessutom av karbonatisering från två håll.

Betongnormen B5 från år 1973 (mitt under miljonprogrammet) ställde inget krav på högsta vct. Däremot ställdes krav på lägsta hållfasthet, K250 vilket motsvarar ett genomsnittligt vct av ca 0,65 á 0,70. Enligt mätningar av Tuutti vid CBI skulle detta ge en livslängd före arme-

ringskorrosion av ca 20 à 30 år när täcksiktet är 10 mm. Det bör innebära att synlig korrosion uppträder ca 10 år senare, dvs. efter ca 30 à 40 år.

Elementfasader som producerades 1970 och som har små täcksikt bör alltså redan ha fått synlig korrosion eller kommer att få synlig korrosion inom inte alltför lång tid.

Av produktionstekniska skäl var vct ofta något lägre än 0,65 à 0,70, vilket skulle innebära att längre tid krävs innan korrosion uppträder. Å andra sidan var många element värmehärdade vilket medför en mera öppen materialstruktur vilket motverkar den gynnsamma effekten av lägre vct.

Korrosionsskador har observerats hos element, men omfattningen är ännu inte särskilt stor.

Reparation är inte lätt eftersom man av estetiska skäl inte vill punktrepamera ("lappa") ytan. Ofta blir man tvingad att byta hela fasaden eller enstaka element. Ibland har man accepterat att korrosion pågår och att den inte kan stoppas. Därför har man klätt in hela fasaden med plåt eller skivor. Detta är dock i många fall, t.ex. i stadsmiljö, inte möjligt av estetiska skäl. Det finns alltså ett uppenbart behov av utveckling av reparationsmetoder.

I Finland har omfattande frostsador uppträtt i elementfasader. I Sverige har inte detta observerats trots att luftinblandning nästan aldrig använts. I Finland har man normalt använt värmehärdning för att få snabb elementproduktion. En hypotes som framförts är att värmehärdningen gett sämre materialstruktur och därmed alltför låg frostbeständighet.

Ofta har man använt frilagd ballast i elementets ytterskal. När ljus dolomit använts som ballast har man i flera fall observerat en gradvis ökande utåtbuktning av elementen. Buktningen är irreversibel. Orsaken är inte klarlagd men kan bero på alkali-dolomitreaktion.

Reparation är normalt omöjlig i dessa fall varför fasaden måste bytas eller kläs in. I vissa fall har man provat att använda vattenavvisande ytimpregnering för att förhindra fortsatt nedbrytning.

Andra skador som observerats rör korrosion på infästningar av elementen i betongstommen. Tidigare använde man oftast infästningar av vanligt stål eller förzinkat stål. Dessa har inte varit helt korrosionsbeständiga. Reparationen består naturligtvis av att infästningen byts mot rostfritt stål. Reparationen är dock ofta komplicerad att utföra.

8.2.3 Betongdamm

Storfinnforsen i Faxälven är Sveriges längsta betongdamm. Den är 800 m lång och 40 m hög. Dammen är av lamelltyp med en frontmur som stöds av strävpelare. Under det sena 1980-talet upptäckte dykare isbildning på uppströmssidan av frontmuren trots att det var mitt i sommaren. Uppenbarligen hade isen bildats under vintern genom kylning av kall luft på nedströmssidan av den relativt tunna frontmuren. Vattnet närmast frontmuren understeg därför fryspunkten trots att vattnet i övrigt i dammen översteg fryspunkten. Så mycket is hade bildats under årens lopp att den inte hann smälta under somrarna.

Hållfasthet och frostbeständighet provades på uttagna prover från frontmuren. Eftersom betongen saknade luftinblandning visade sig frostbeständigheten vara osäker vilket även medför att frontmurens förmåga att ta upp vattentrycket är osäker. Hållfasthetsförlust noterades också, antingen beroende på frostangrepp eller på urlakning.

För att undvika fortsatta isbildning och frostangrepp monterades i början av 1990-talet en värmeisolerad vägg nedströms längs hela den 800 meter långa dammen. Utrymmet mellan väggen och frontmuren värmdes så att frysning av frontmuren undveks. Det var således en omfattande åtgärd som vidtogs.

Reparationen förefaller förnuftig eftersom den bör minska risken för isbildning och frostska-
dor, men man hade inte räknat med att de ändrade klimatförhållandena i det värmda utrymmet
kunde medföra att nya spänningsförhållanden uppstod i strävpelarna. Följden av isoleringen
och värmningen blev att skjavsprickor slog upp i pelarna från öppningar i pelarnas nederdel
till dammens topp. Armeringen var inte tillräckligt stor för att förhindra sprickbildning. Följ-
den blev att pelarnas förmåga att ta upp lasten från vattentrycket mot frontmuren minskade.

Fallet är ett exempel på att man genom att göra en till synes förnuftig reparation skapar ett
nytt problem. I efterhand kan man därför tycka att man borde ha gjort en brottmekanisk ana-
lys av dammen innan isoleringsväggen uppfördes. Men detta var naturligtvis inte en självklar
åtgärd.

Frontmuren har nu förstärkts genom att ny betong gjutits mot den befintliga muren. Därvid
minskar dessutom vattenflödet genom frontmuren eftersom denna hade rätt omfattande ge-
nomgående sprickbildning. Hur skjavsprickor skall hanteras är oklart.

8.2.4 Energiomvandlarbassänger

Omedelbart nedströms om utskov i dammar finns ofta en bassängformad del som har till upp-
gift att bromsa vattnet. Syftet med att ta kraften ur det framrusande vattnet är att undvika pro-
blem med erosion på sidorna om utskovet. Om vattnet inte bromsas kan de höga vattenhastig-
heterna ge direkta skador eller skador genom kraftiga bakåtströmmar ("bak-eda") som skapar
erosion i dammens nedströmsdel. Erosionsskadorna kan sedan i sin tur ge stabilitetsproblem
på dammen.

Den kraftigt turbulenta strömningen som uppstår i e-omvandlarbassänger kan ge stora belast-
ningar och om stenmaterial spolats ner i bassängen också mycket stora skador. Håligheter på
flera kubikmeter ner genom betong och vidare ner i berget påträffas ibland.

Vid Stenkullafors kraftstation som uppfördes så sent som 1983 upptäcktes stora skador i sam-
band med dykbesiktningar. Både stora håligheter och mer allmänna skador där täckskikt och
armeringsmattor spolats bort upptäcktes. Även vid Rusfors kraftstation i Umeälven (uppförd
1962) hittades större skador i samband med besiktning.

Den bästa kvaliteten på en reparationsåtgärd skulle i båda fallen nås om en torrläggning och
gjutning under kontrollerade former kunde genomföras. Problemet som man ofta ställs inför
är att de flesta anläggningar inte kan vara helt utan avbördningsmöjligheter under en längre
period. Utskoven är i båda fallen också placerade nära kraftstationens utlopp vilket ger ström-
ningar i bassängen vid produktion, och produktionsbortfall måste undvikas.

I Stenkulla bedömdes kostnaden för att bygga en spontfångdamm nedanför ett utskov i taget
(som klarar full avbördning i angränsande utskov) bli alltför kostsam och traditionell under-
vattensgjutning (UV-betong + antiurvaskningsmedel) blev valet. Ett täckskikt om 100mm
(istället för 70mm) valdes för att klara en bortnötning av det slamrika skikt som lägger sig
överst på en undervattensgjutning.

I Rusfors var inte bassängen gemensam för alla utskov och de höga ledmurarna nedanför ut-
skovet med skador kunde där agera fångdamm. Således krävdes bara fångdamm på ena kort-
sidan av bassängen. Kvaliteten på gjutningarna blev god med en jämn och hård övertyta. Vin-
terkostnaderna för arbeten med fångdamm och intäckning av bassäng blev höga, men måste
ställas i relation till en sannolikt betydligt större livslängd.

9 FÖRSTÄRKNING

9.1 Förstärkning respektive reparation - Motiv till förstärkning

Gränsen mellan reparation och förstärkning är flytande. Med ”reparation” avses *återställande* av den skadade konstruktionen till ursprunglig bärförmåga och allmänna ”funktion”. Med ”förstärkning” avses primärt *ökning* av konstruktionens bärförmåga utöver den ursprungliga.

Metoder för reparation och förstärkning kan dock i vissa fall vara likartade.

Exempel på motiv för förstärkning är:

Ökad last

- Högre trafiklast på broar
- Ändrad användning av byggnader (från bostad till kontor)
- Ändrad användning av lokaler (från kontor till arkiv)
- Tyngre maskiner i industri
- Nya syn på laster på dammar (högre islast)

Ombyggnad

- Håltagning i bjälklag
- Håltagning i väggar/skivor
- Minskning av mängd vertikala bärverk (t.ex. minskning av antal pelare)
- Förstorade utskovsöppningar

Tillbyggnad

- Tillbyggnad på höjden

Felaktigheter i konstruktionen

- Konstruktionsfel hos existerande byggnad (t.ex. för liten armering)
- Felaktigt utförd konstruktion (felplacerad armering, för litet tvärsnitt)

9.2 1970-talet

Redan för 30-40 år sedan fanns välutvecklade metoder att förstärka konstruktioner. Exempel på vanliga metoder är:

- Ökat tvärsnitt genom applicering av ny armerad betong med samverkan till befintligt tvärsnitt
- Komplettering med utanpåliggande armering, t.ex. pålimmade eller påskruvade stålprofiler och stålplåtar.
- Tvärkraftsförstärkning med tvärgående stag genom eller utanpå tvärsnittet.
- Komplettering med utanpåliggande spännarmering (stänger eller linor)

- Avlastning genom ny konstruktion, normalt stål balk eller stålram

Dimensioneringsmetoder för sådana förstärkningstekniker fanns tillgängliga på 1970-talet. Metoderna var i princip desamma som användes vid nybyggnation och som fanns i gällande konstruktionsnormer. En handbok för traditionell förstärkning utarbetades och publicerades 1978⁸. De dimensioneringsmetoder som beskrivs där är i viss utsträckning baserade på kommande norm BBK 79.

Dammolyckor i andra länder gjorde att Svenska Kraftverksföreningens stiftelse för tekniskt utvecklingsarbete (VAST) uppmärksammade behovet av anvisningar för kontroll av underhåll och säkerhet. Första anvisningen kom 1968 och följdes av en mer genomarbetad version 1970. För stabilitetshöjande åtgärder på dammar installerades ofta spännstål. Beräkningarna av stjälpstabilitet genomfördes med säkerhetsfaktorer vilket också var praxis vid uppförandet.

9.3 Nuvarande situation

Samma förstärkningsmetoder och beräkningsmetoder som beskrivs ovan används i stor utsträckning fortfarande. Under de senaste decennierna har det emellertid tillkommit nya intressanta förstärkningsmaterial, som på grund av praktiska fördelar till stor del tagit över från de traditionella förstärkningarna baserade på betong och stål. Oftast baseras dessa nya material på kolfiber i form av band, stänger eller väv.

Kolfibermaterialet limmas mot betongen med hjälp av någon stark polymer, normalt epoxi. De medger enklare, mer lätthanterliga och mindre utrymmeskrävande förstärkningar än de traditionella metoderna baserade på betong och stål.

Exempel på nya förstärkningsmetoder är:

- Kolfiberband som limmas på betongytan
- Kolfiberstavar som limmas i nerfrästa spår
- Kolfiberväv som limmas på betongytan

Användningsområdena är:

- Böjmomentförstärkning av balkar och plattor
- Tvärkraftsförstärkning av balkar
- Förstärkning av pelare genom omslutning med kolfiberväv (längs hela pelaren eller i ett antal separata band; höjer betongens tryckkapacitet genom s.k. omslutningseffekt).

Även för dessa typer av förstärkning finns utarbetade dimensioneringsmetoder⁹.

För kraftindustrins ändamål görs nya installationer av spännförankringar ofta p.g.a. nya betraktelsesätt och bl.a. högre islaster. Idag används vanligen spännkablar istället för stag, som

⁸ AB Jacobson & Widmark: *Förstärkning av betongkonstruktioner*. Byggeforskningsrådet, Rapport T23:1978.

⁹ Exempel på metoder återfinns i:

Täljsten, B.: *Förstärkning av befintliga betongkonstruktioner med kolfiberväv eller kolfiberlaminat. Dimensionering, material och utförande*. Avd. för konstruktionsteknik, LTU, Forskningsrapport 1998:01

Westerberg, B.: *Separata dimensioneringsanvisningar för Böjförstärkning, Tvärkraftsförstärkning och Pelarförstärkning (omslutningseffekt)*, utarbetade för Sika Sverige AB, och senaste uppdaterade 2007

bedöms mer tålig mot korrosion. Dimensioneringen görs på samma sätt som på 1970-talet, men nu med riktlinjerna RIDAS som tagits fram av Svenska kraftverksföreningen. Trenden idag är dock att man jobbar för att använda tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder som också bättre harmonierar med övrig betongdimensionering som utförs med sannolikhetsbaserade dimensioneringsmetoder.

9.4 Kunskapsbehov

9.4.1 Långtidsegenskaper

Långtidsegenskaperna hos de nya fiberkompositmaterialen är dåligt kända. God beständighet förutsätter att den polymer som används för att bygga upp kolfiberkompositen, och som behövs för att ge förband till betongkonstruktionen, är beständig i betongens alkaliska miljö. Polymerer har i många fall inte särskilt hög alkalibeständighet. Långtidsegenskaperna i olika miljöer när det gäller fukt och temperatur bör därför studeras för fiberkompositer baserade på de vanliga polymertyperna ¹⁰.

9.4.2 Frostbeständighet

Ofta har den betong som skall förstärkas inte fullgod frostbeständighet; den saknar luftinblandning och har högt vct. Därför är det rätt stor risk att betongen fryser sönder på grund av fukt som samlas i gränsytan mellan den täta fiberkompositen och betongen. Risken kan möjligen minskas genom att enbart tunnare strimlor av kompositen anbringas medan mellanliggande partier är obelagda.

Vissa laboratorieundersökningar av frostbeständigheten hos betongprover belagda på olika sätt med kolfiberväv har utförts vid LTH. Resultaten är inte helt entydiga.

9.4.3 Konstruktiv samverkan - Kvalitetskontroll

Troligen bör existerande beräkningsmetoder för den konstruktiva samverkan mellan fiberkompositer och betongkonstruktion vidareutvecklas för olika konstruktionstyper utsatta för olika typ av belastning. Det gäller framförallt förstärkning för excentriskt tryck genom omslutningseffekt, där det empiriska underlaget är svagt.

Metoder för kvalitetskontroll av fibermaterialen och av utfört arbete bör utvecklas.

9.4.4 Sannolikhetsbaserad dimensionering av stabilitet på betongdammar

Betongdammars stabilitet utvärderas/dimensioneras baserat på säkerhetsfaktorer, till skillnad från dimensionering av andra konstruktioner där partialkoefficientmetoden används. Problemen med detta är bl.a. att det ger olika säkerhetsnivå för dammar som borde ha samma nivå pga att osäkerheterna inte hanteras på ett bra sätt (därmed även troligen dåligt resursutnyttjande och ombyggnad av tillräckligt säkra dammar) och att det är "fel system" jämfört med det som dagens civilingenjörer utbildas för.

Sannolikhetsbaserad metodik skulle kunna användas för utvärdering av dammar och förhoppningsvis för att kalibrera partialkoefficienter i en ny riktlinje. Inom ett antal områden behövs mer forskning innan detta är möjligt, bl.a. beskrivning av och värden för skjuvhållfastheten i

¹⁰ Det kan nämnas att ett antal förstärkningar där stålplåt har epoxilimats mot betong har utförts och expanderats i mer än 30 år. Det finns enligt uppgift inga tecken på att limmet skulle ha brutits ned i dessa konstruktioner. Å andra sidan har fuktmiljön troligen varit gynnsam.

betong-berg kontakten samt i berget, definition av tolerabel brottsannolikhet och islaster samt genomräkning av ett flertal dammar av personer med rätt kunskap och kompetens.

Med bättre kunskap på området kan en mer korrekt bedömning av osäkerheter göras och ge ett bättre underlag för beslut om förstärkningsåtgärder. I dagsläget kan det vara så att förstärkningar rekommenderas i onödan, och vad värre är, kanske ej föreslås fast det behövs.

10 UPPHANDLING AV REPARATIONSARBETE

10.1 1970-talet

Som framgår av presentationen ovan var det normalt entreprenören som föreslog reparationsmetod. Ofta fanns det enbart en entreprenör som då valts av ägaren. I vissa fall fanns flera entreprenörer som lämnade var sitt förslag.

Ägaren hade enbart i undantagsfall tagit fram bygghandlingar. Därför fanns det normalt inte heller kvantitativa krav på *reparationsmaterialet*, t.ex. krav på vct hos en reparationsbetong, eller krav på *utförandet*, t.ex. krav på rensning av defekt betong, eller krav på *resultatet av reparationen*, t.ex. krav på vidhäftning mellan ny och gammal betong eller krav på livslängd hos reparationen.

Även skadediagnosen gjordes ofta av entreprenören. Den var inte alltid tillfredsställande. Ofta gjordes inte de analyser av konstruktionens tillstånd som hade varit nödvändiga för att man skulle kunna offerera en lämplig reparation. Som framgår av avsnitt 6.1 "*Principer för val av reparationsmetod*" är det en tämligen avancerad uppgift att välja lämplig reparationsmetod.

Ägaren hade alltså stora svårigheter att göra en bra upphandling. Många gånger valdes det lägsta anbudet trots att det kanske baserades på en olämplig reparationsmetod. Detta fall gällde naturligtvis främst där ägaren saknade egen kompetens inom betongområdet. Detta gäller i särskilt hög grad enskilda fastighetsägare.

10.2 Nuvarande situation

I många fall gäller samma situation, som beskrevs ovan, även i dag. Det framgår av de intervjuer av reparationsentreprenörer som presenteras i avsnitt 6.3.

Ägare och förvaltare av större infrastrukturkonstruktioner, broar, kajer, och liknande, tycks numera i högre grad anlita expertis för att göra skadediagnos och ta fram lämpliga reparationsmetoder och utarbeta bygghandlingar. Detta gäller i synnerhet Vägverket som dock strävar efter att kunna göra totalentreprenader kopplade till funktionskrav på utförd reparation, och med tillämpning av tidsincitament där tidförkortning ger avdrag vid anbudsjämförelsen, medan förlängd tid medför vite¹¹.

Troligen anlitar även större fastighetsägare, som förvaltar ett stort antal fastigheter, expertis, t.ex. konsulter för att ta fram bygghandlingar. Förmodligen är det dock många konsulter som saknar tillräcklig kompetens inom reparationsområdet. Även i dag förslås därför reparationer som inte är optimala.

Det finns numera relativt stor förståelse för att upphandling av reparationsarbete måste ta hänsyn till att skadediagnosen inte kan vara helt säker. Vid stora och komplicerade reparationsobjekt har därför tillämpats upphandling där samverkan mellan entreprenör och beställare förutsätts. Ett exempel på detta är Banverkets reparation av valven på gamla Årstabron. Detta ökar möjligheten att under ordnade former tillgodogöra sig de observationer som görs under reparationsarbetets gång. Med observationsmetoden fås säkrare diagnos och möjlighet att välja optimal reparationsmetod. Det används i dessa samverkansentreprenader ofta någon form av delning av vinst och risk för att öka incitamentet att tillsammans söka bästa möjliga metod.

Ett problem är den uppsjö av nya reparationsystem och -material som lanseras varje år. Det kan vara mycket svårt för en konsult och entreprenör att bedöma värdet av dessa produkter.

¹¹ Rolf Hörnfeldt: Intervju med Kenth Jansson, projektledare brounderhåll, Vägverket, Region Stockholm.

Ofta är de oprövade i svenskt klimat. Risken är att konsulten eller entreprenören faller för marknadsföringen och föreskriver ett material som inte är lämpligt i den aktuella situationen.

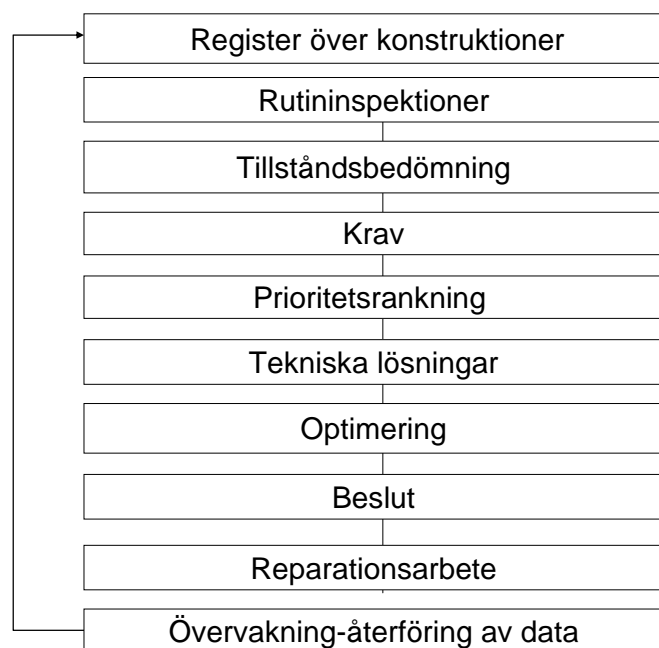
11 SYSTEM FÖR UNDERHÅLL OCH REPARATION

11.1 Principiell uppbyggnad av ett underhållssystem

Den främsta avsikten med ett system för förvaltning och underhåll (eng. management system) av en given population av betongkonstruktioner är att ägaren/förvaltaren skall kunna säkerställa att den konstruktiva säkerheten hos konstruktionerna hålls på en tillfredställande hög nivå. Därför har ägaren skyldighet att genomföra regelbundna inspektioner för att se till att säkerhetskraven är uppfyllda.

En övervakning av konstruktionerna är även nödvändig för att underhållsåtgärder skall kunna sättas in tidigt när de fortfarande inte är så kostsamma. Ofta räcker det inte enbart med okulär besiktning eftersom allvarliga skador som inte syns utanpå konstruktionen kan finnas. Många gånger måste även mätningar göras, t.ex. av karbonatiseringsdjup, täcksiktstjocklek och kloridhalt. När skador kan observeras okulärt är det nämligen ofta för sent med förebyggande underhåll.

Figur 9 visar de element som bör ingå i ett underhållssystem¹². De olika blocken i figuren kommenteras nedan.



Figur 9 De element som bör ingå i ett underhållssystem.

¹² Texten baseras på följande referens: Fagerlund, G., Damgaard Jensen, A.: *MR&R Systems. Chapter in NORECON Task T1: Decisions and Requirements for Repair - a Review*. Norwegian Public Roads Administration, Oslo, 2004.

- **Register över konstruktioner**

Ett register över alla konstruktioner bör upprättas. Detta skall innehålla teknisk information om konstruktionerna. För varje konstruktion skall det finnas en "loggbok" som ger data över konstruktionen (ritningar, konstruktionsberäkningar etc.) och som även innehåller all information från inspektioner, reparationer och övervakning.

- **Rutininspektioner**

Principer för hur *rutininspektioner* skall genomföras utarbetas (frekvens, innehåll och metoder).

- **Tillståndsbedömning**

Rutininspektionen skall påvisa om det finns sådana problem med konstruktionen med avseende på bärförmåga och säkerhet att snar reparation är nödvändig. I de fall inga säkerhetsproblem finns, skall inspektionen möjliggöra en bedömning av den framtida skadeutvecklingen och den framtida säkerheten.

Inspektionen omfattar 4 nivåer:

- **Nivå 1:** Visuell inspektion samt tecken på förändringar i förhållande till tidigare inspektion.

OBS. Ibland räcker inte enbart visuell observation eftersom skador kan vara dolda för ögat. Exempel på detta är de skador som upptäcktes under asfaltisolerings på broar först efter det att hål i brodäcket uppstod. Ett annat exempel är där i stort sett all armering rostas bort i simbassänger utan att detta kunde ses på ytan.

- **Nivå 2:** Om väsentliga förändringar har inträffat görs en skrivbordsstudie baserad på (1) bakgrundsinformation om konstruktionen, och (2) den visuella inspektionen. Studien används som bakgrund till vilka av övriga två nivåer som är nödvändiga.
- **Nivå 3:** Beroende på hur skrivbordsstudien utfaller kan det bli nödvändigt att göra en preliminär beräkning och teoretisk bedömning av konstruktionens säkerhet och tekniska funktion. Man utnyttjar då data från en *begränsad provning* av konstruktionen. Enbart lätt åtkomliga data används. Bedömningen är av typen "kvasi-kvalitativ" och påvisar om Nivå 4 behöver genomföras.
- **Nivå 4:** En så korrekt bedömning av säkerhet och teknisk funktion som möjligt kan bli nödvändig. Då måste man göra en *detaljerad undersökning* av konstruktionen. Sådana egenskaper som läge hos karbonatiseringsfront, kloridprofil, korrosionshastighet, resterande hållfasthet och E-modul i kritiska sektioner, reducerade tvärsnitt, reducerad förankringskapacitet m.m. måste ofta tas fram. Nivå 4 kan betraktas som en *förnyad statisk beräkning*.

Den *aktuella bärförmågan* vid inspektionstillfället är relativt lätt att ta fram genom konventionell statisk beräkning. Den stora svårigheten är att beräkna den *framtida nedgången i bärförmåga*.

- Krav

Krav på den reparerade konstruktionen skall beskrivas. Olika nivåer på krav är:

- Bindande krav i normer och standards
- Ägarens egna krav, t.ex.:

Krav på lastbärande kapacitet

Krav relaterade till ekonomi

Krav på livslängd

Krav på miljöpåverkan

Krav på estetik

- Prioritetsrankning

Baserat på utfallet av inspektionerna och på genomförda beräkningar av bärförmåga och förväntad livslängd, och baserat på övriga krav som ägaren uppställt, har han olika möjligheter när det gäller den enskilda konstruktionen:

- Avvakta med reparation och insätt regelbunden övervakning
- Gör en förfinad beräkning av bärförmågan för att om möjligt ”räkna hem” konstruktionen
- Vidta åtgärder för att förhindra fortsatt nedbrytning
- Återställ bärförmåga och uppgradera utseendet
- Förstärk, vidta ”omkonstruktion”
- Riv

Ofta har ägaren en hel population av liknande konstruktioner, t.ex. fasader, på ett antal liknande byggnader. Genom inspektionerna och beräkningarna finns ett underlag för *prioritering* av vilka konstruktioner som behöver repareras först, och vilka som man kan avvakta med att reparera.

- Tekniska lösningar

Som beskrivits tidigare i denna rapport finns det normalt många tänkbara tekniska lösningar för reparation. Varje metod har sina fördelar och risker. Olika reparationsalternativ bör beskrivas i ägarens underhållsstrategi.

- Optimering

När ägaren beslutat att reparation är nödvändig måste han välja den optimala reparationsmetoden. Principer för val av reparationsmetod visas i avsnitt 6.1 ovan. Reparationen måste uppfylla många disparata krav, t.ex. krav på säkerhet, teknisk funktion, påverkan på yttre miljö, ekonomi etc.

En stor svårighet är att väga olika krav mot varandra, t.ex. miljö mot ekonomi, eller livslängd mot ekonomi.

Metoder för att nå den optimala lösningen bör beskrivas i ägarens underhållsstrategi.

- Beslut

Slutligt beslut beträffande om man skall reparera och hur man skall reparera baseras på kedjan av information dvs.:

- Inspektion och beräkningar
- Samhällets och ägarens krav på konstruktionen
- Prioritetsrankningen
- Analysen av reparationsprinciper
- Analys av den optimala reparationsmetoden

I största möjliga utsträckning skall beslutet baseras på *kvantitativa överväganden*. Helst skall metoden för dessa beskrivas i underhållsstrategin.

- Reparationsarbete

Strategier för hur man skall organisera kontroll av reparationsarbetet bör beskrivas i underhållsstrategin. Provningsmetoder för kvalitetskontroll av arbete och utförd reparation bör fastställas och beskrivas.

- Övervakning. Återföring av data

Metoder för övervakning av långtidsbeteendet hos den reparerade konstruktionen, eller hos den ännu inte reparerade, men skadade, konstruktionen, skall beskrivas i underhållssystemet.

Alla data från reparationsarbetet och från övervakningen skall återföras till registret över konstruktioner.

11.2 Existerande underhållssystem

Det finns ett flertal system för underhåll och reparation av broar. Exempel är:

- BRIME (Bridge Management in Europe)
- PONTIS. Ett amerikanskt system utvecklat av AASHTO
- DANBRO. Ett danskt system utvecklat av Rambøll
- BatMan. (Bridge and Tunnel Management). En vidareutveckling av Vägverkets och Kommunförbundets SAFE BRO-system

Samtliga system har utvecklats under det senaste decenniet.

Det har inte lyckats oss att finna motsvarande system anpassade till vanliga byggnader. Möjligt har stora ägare och förvaltare, t.ex. Riksbyggen, HSB, större kommunala bostadsbolag utvecklat system. Om så inte är fallet borde man göra det eftersom det skulle minska risken för oönskade skador, och troligen minska den totala underhållskostnaden.

12 KOMMANDE REPARATIONSBEHOV

Kunskapen om reparationsbehovet hos svenska betongkonstruktioner är bristfällig. Genomgången nedan utgör därför endast uppskattningar baserade på kunskap om olika konstruktionstypers åldersfördelning och i vissa fall på kunskap om årliga reparationsinsatser. Informationen baseras delvis på en analys publicerad 1998¹³.

12.1 Vägbroar

Av samtliga betongbroar är ca 7000 byggda före 1965, det år när Vägverket för första gången föreskrev luftinblandning i de mest frostbelastade konstruktionsdelarna, kantbalkar och betong i vattenlinjen. Följaktligen är dessa broar dåligt anpassade till det moderna vägljuset med tösalt. Även för broar byggda efter 1965 är frostbeständigheten ofta bristfällig beroende på att olämpliga luftporbildande medel användes, samtidigt som brobetongen inte frysprovades i brist på provningsmetod. Det är först för broar byggda efter 1985, när frysprovning och användning av lågalkaliskt cement blev krav, som åtminstone frostsador lär bli ett litet problem.

Under senare år har man noterat tecken på alkali-kiselsyrareaktioner (AKR) hos en del broar, varav vissa i Stockholmsområdet, t.ex. gamla Årstabron. I denna hade AKR i fundamenten för stålågen orsakat så allvarlig sprickbildning att man akut måste förstärka dem (inom Banverket diskuterades t.o.m. om att stänga bron för tyngre tåg innan förstärkning genomförts.) Det finns misstankar att AKR öppnar betongen för inre frostangrepp. Än så länge är AKR inget större bekymmer men eftersom reaktiv svensk ballast är av långsamreagerande typ kan det tänkas att AKR-problemet ökar med tiden. Vid uppdrag som genomförts vid CBI har man funnit broar som redan har allvarliga skador.

Om man antar att livslängden före reparation av en bro byggd före 1985 är 40 år skulle i princip ca 60% av alla broar, eller 5500, vara i behov av någon typ av reparation. Vissa av dessa broar är redan reparerade genom att asfaltisoleringen rivits av, frostsadad betong rensats bort och ersatts med ny betong. Fortfarande återstår dock ett stort antal broar som förr eller senare behöver repareras. Man kan också räkna med att armeringskorrosion i äldre broar är ett stort kommande problem eftersom vattencementtalet i äldre brobetong var tämligen högt och täcksjiktet alltför små.

Man kan således räkna med ett rätt stort reparationsbehov hos våra broar. Vid den stora inventeringen som genomfördes på 1980-talet fann man brister i isoleringen på brodäck i 30% av totalt 4500 inspekterade broar. Andelen frostsadade brodäck var ca 10%.

År 1987 bedömde Vägverket att det *totala reparationsbehovet* för de 10% av totalt 6700 broar som var konstaterat frostsadade var 410 Mkr. Enligt en annan bedömning gjord 1988 var det årliga reparationsbehovet ca 160 Mkr/år, vilket då utgjorde 0.6% av brobeståndets samlade värde. Det är osäkert om reparationen av Ölandsbron ingår i dessa siffror.

Troligen har en stor andel av broar med frostsadade brodäck redan reparerats.

Bedömningen av *förstärkningsbehovet* för anpassning till EU:s nya lastbestämmelser bedömdes vara ca 320 Mkr/år.

¹³ Westerberg, Bo: *Reparation av betongkonstruktioner. Litteraturstudie*. Stockholm 1998.

I en intervju i år hävdar en representant för Vägverket, Region Stockholm, att man har en reparationsbudget på 65 Mkr/år enbart för Stockholmsregionen. Man skulle behöva en dubbelt så stor budget¹⁴.

12.2 Järnvägsbroar

Järnvägsbroar av betong är normalt inte utsatta för tösalt och borde därför ha mindre frekvens av miljörelaterade skador än vägbroar. Vissa olämpligt utformade äldre konstruktioner som utsätts för frost och höga fuktnivåer har dock fått allvarliga skador. Ett exempel är den gamla Årstabron i Stockholm där vatten som samlats i ”trägen” mellan valvbågarna frusit och givit skador.

Hur stort det totala reparationsbehovet är för större järnvägsbroar är inte bekant. Troligen kommer så småningom armeringskorrosion orsakad av karbonatisering att uppträda i de äldre konstruktionerna.

Vägportar, där järnvägen passerar över en väg, utsätts för ”vägmiljö” genom saltsprut från vägbanan. En kartläggning av 90 vägportar inom Banverkets Östra Region genomfördes 1988. Resultatet är följande:

- 23% av broarna hade allvarliga skador i form av sprickbildning, starkt vittrad (sönderfrusen) betong, kalkutfällningar, armeringskorrosion, hög kloridhalt, djup karbonatisering.
- 27% av broarna hade samma typ av skador men i mindre omfattning.
- 50% av broarna var i gott skick.

Det är troligt att samma skadefrekvens gäller också för övriga regioner.

12.3 Vattenkraftanläggningar

Miljöpåfrestningen består främst av frost i kombination med mycket höga fuktnivåer, liksom urlakning orsakad av genomläckande vatten. Dessutom utsätts armerade konstruktioner för karbonatisering, som dock ofta går långsamt på grund av den höga fuktnivån.

Betongkvaliteten hos anläggningar byggda de senaste 50 åren har normalt varit tillräckligt hög för att konstruktionerna skall kunna motstå miljöpåfrestningarna på ett bra sätt. På sikt kommer dock armeringskorrosion att uppträda, liksom frostsador.

Värdet hos samtliga betongkonstruktioner i vattenkraftanläggningar uppskattades 1988 till ca 50 à 70 miljarder kronor. Om livslängden hos en konstruktion före reparation i genomsnitt bedöms vara 50-70 år kan underhållsbehovet i dag uppskattas till ca 1,5 miljard kronor per år.

12.4 Kärnkraftanläggningar

Sverige har för närvarande tio kärnkraftverk i drift varav tre belägna vardera i Forsmark och Oskarshamn. De övriga fyra finns i Ringhals. Betongkonstruktioner i en kärnkraftanläggning kan grovt indelas i två grupper nämligen reaktorinneslutning (yttre skal inklusive inre betongkonstruktioner) och övriga konstruktioner såsom vattenvägar (inlopps- och utloppstunnlar), intagskulvertar, turbinbyggnader, skorstenar mm.

Reaktorinneslutningarnas yttre konstruktion utsätts inte för några större miljöpåfrestningar, varför skadeomfattningen och därmed underhållskostnaden bör vara låg. Tre av Ringhals in-

¹⁴ Rolf Hörnfeldt: Intervju med Kenth Jansson, projektledare brounderhåll, Vägverket, Region Stockholm

neslutningar är dock till stor del utsatta för yttre klimatpåverkan. Däremot kan de delar av reaktorinneslutningens yttre konstruktioner som är i kontakt med grundvatten innehållande klorider vara utsatta för armeringskorrosion. De utsatta delarna är i allmänhet svåråtkomliga för inspektion, underhåll och reparation vilken kan på sikt leda till höga reparationskostnader. Även betongkonstruktioner inne i en reaktorinneslutning kan vara utsatta för påfrestningar som liknar miljöpåfrestningar. De inre konstruktioner som är i kontakt med kondensationsbassängerna är utsatta för höga fuktnivåer och urlakning, och löper därför teoretisk risk för bli utsatta för armeringskorrosion. Även de yttre konstruktionerna som är utsatta för utomhusklimat kan bli utsatta för en hög fuktighet tillsammans med klorider. Denna miljö kan på sikt leda till problem med armeringskorrosion.

Reaktorinneslutningens yttre skal består, på utsidan, bl. a. av en ca 770 mm betongkonstruktion med spännarmering, tätplåt 5 – 10 mm och inre betongcylinder ca 330 mm tjock. Denna konstruktion står i allmänhet på en bottenplatta av armerad betong. Utförandet varierar något från den ena anläggningen till den andra. Även takkonstruktionerna är utförda på olika sätt. Spännarmeringen hör till de viktigaste komponenterna i en reaktorinneslutning. I fyra av de svenska reaktorinneslutningarna går spännarmeringen i ett rör fyllt med injekteringsbruk, d.v.s. att spännarmeringen är inte inspekterbar och kan inte ersättas. I tre av reaktorinneslutningar går spännarmeringen i ett rör som innehåller torr luft och i de resterande tre går spännkablarna i rör fyllda med fett. I de två sista fallen är spännkablarna inspekterbara och utbytbara. Antalet spännkablarna i en inneslutning varierar beroende på reaktortyp och valt spännsystem. Som exempel kan nämnas att för Ringhals 3 och 4 uppgår antalet spännkablarna till 576 st med en uppspänningskraft på ca 5000 kN. Spännkablarnas tillstånd med avseende på kvarvarande spänning och korrosion är avgörande för inneslutningens säkerhet. För anläggningarna med inspekterbara spännkablarna sker inspektioner med jämna mellanrum då spännkraftsförlusterna mäts och materialegenskaperna hos spännrådarna kontrolleras. Förlust av förspänning och korrosion kan leda till höga reparationskostnader speciellt för den typ som är kringgjuten med injekteringsbruk. För någon anläggning med inspekterbara spännkablarna kan det bli aktuellt med en total uppspanning av samtliga spännkablarna på nytt. Kostnaden för ett sådant arbete torde hamna i storleksordningen 100 Mkr.

Kärnkraftverken i Sverige kyls med hjälp av havsvatten som leds in och ut via långa kanaler och kulvertar. Varje kärnkraftverk kan bestå av flera kilometer kanaler och vattenvägar. Inom ett verk förekommer konstruktionsdelar med olika typer av exponering. Vissa konstruktionsdelar är exponerade mot havsvatten i princip på samma sätt som en bro eller en hamnanläggning, d.v.s. de består av dränkta delar, delar i skvalpzonen samt delar ovanför vattenytan. I ett kärnkraftverk utsätts vissa konstruktioner för varierande vattennivåer, d.v.s. det finns möjlighet för kloridanrikning. Inom byggnaderna finns även konstruktioner utsatta för ensidigt vattentryck. Inomhus, t.ex. i turbinbyggnader, utsätts de sistnämnda konstruktionerna för uttorkning på den torra sidan vilken kan leda till anrikning av klorider och för betongen skadliga ämnen. Detta är stort problem särskilt i utloppskanalerna där vattnet är varmt. Reparationer till stora kostnader är under genomförande och man kan befara att reparationer kommer att behövas under en lång tid framöver. Vidare är ett stort antal pumpar samt annan typ av strömslukande maskiner och konstruktioner anslutna till vattenvägarna vilket ökar miljöbelastningen med avseende på armeringskorrosion. Dessa konstruktioner har nu exponerats under mer än 30-40 år, vilket bör innebära att korrosion på armering blir ett växande problem. Sannolikt uppgår reparationsbehovet av kylvattenanläggningarna vid de svenska kärnkraftverken till storleksordningen en miljard kronor.

12.5 Parkeringsdäck¹⁵

Många parkeringsdäck har utsatts för en miljö de inte konstruerats för. Det är främst tösalt som gett korrosion på armering över pelare. I vissa fall, för utomhusdäck, har även saltfrostangrepp uppträtt. Flertalet av dessa felkonstruerade parkeringsdäck är nu mer än 35 år gamla. Många är redan rivna eller reparerade. Oreparerade äldre däck kommer troligen att behöva repareras under de närmaste åren.

Man kan förvänta sig att även vissa senare byggda parkeringsdäck har otillräcklig kvalitet, eftersom konstruktören ofta betraktat dem som inomhuskonstruktioner och valt betongkvalitet och täcksikt efter den förutsättningen. Till skillnad från broar, vilka projekteras och byggs av "anläggare", produceras nämligen parkeringsdäck av "husbyggare", vilka inte alltid är väl medvetna om beständighetsproblematiken.

Ökad kunskap i branschen om problemen med parkeringsdäck bör trots allt ha medfört att parkeringsdäck byggda de senaste decennierna i genomsnitt har tämligen god förmåga att stå emot miljöpåfrestningarna. Erfarenheter från CBI:s uppdragsverksamhet visar dock att man i många fall fortfarande inte tagit till sig den kunskap om beständighetsproblemen som nu finns.

Totala kostnaden för kommande reparationsbehov kan inte bedömas utan närmare information om däckens åldersfördelning.

12.6 Fasader¹⁶

Hus byggda under det s.k. miljonprogrammet ca 1965-1975 försågs normalt med betongelementfasader. Dessa är nu mellan 35 och 45 år gamla. Eftersom betongkvaliteten oftast var måttligt hög och täcksikten ofta små kommer säkerligen ett omfattande reparationsbehov att uppstå inom inte alltför många år. Även infästningar av fasadelementen har troligen i många fall skadats. Exempelvis är den yttre fasadskivan ofta hopkopplad med den inre medelst zigzagformade armeringsenheter, som är ingjutna i båda skivorna. Produktionssättet ger små möjligheter till kontroll av att denna armering är ingjuten enligt ritningen. Vidare finns ofta inget rostskydd på den. En begynnande korrosion av armeringen mellan fasadskivorna kan inte heller upptäckas vare sig på inre eller yttre skivan förrän det är för sent. Av praktiska, estetiska och ekonomiska skäl blir det ofta mest rationellt att byta fasaden. Något som kan vara mycket svårt att bestämma den rätta tidpunkten för.

Total fasadyta i miljonprogrammet torde uppgå till åtminstone 40 miljoner m². Vid en bedömd reparationskostnad av 2000 kr/m² blir alltså det maximala totala reparationsbehovet ca 80 miljarder kronor.

Betongfasader har även byggts i stor omfattning i bostadshus, kontor och industribyggnader efter det att miljonprogrammet avslutades. Många av dessa fasader har ännu inte fått några skador. Förr eller senare kommer med all säkerhet armeringskorrosion att uppstå

12.7 Balkonger¹⁷

Många balkonger reparerades under 1970-talet. De balkonger som då studerades av CBI och som reparerades tillhörde den balkongpopulation som byggts fram till ca 1965. Senare byggda balkonger bedömdes den gången ha högre livslängd eftersom Betongbestämmelserna från 1965 krävde högre betongkvalitet, bl.a. krav på luftinblandning, dock inte i balkongplattor.

¹⁵ Se även avsnitt 8.2.1.

¹⁶ se även avsnitt 8.2.2.

¹⁷ se även avsnitt 8.1.1.

Det återstår många balkonger av ”äldre årgångar”, t.ex. från miljonprogrammet, som ännu inte har reparerats, men som inom en nära framtid kan komma att behöva lagas eller rivas. Kvalitetsreglerna i 1965 års betongbestämmelserna har inte alltid följts. Ofta har täckskikten blivit för små. 1965 fanns inget krav på högsta vct, utan betongkvalitet uttrycktes i krav på lägsta tryckhållfasthet. Många betongproducenter kunde tillverka hållfast betong med alltför höga vct, vilket drabbade beständigheten.

Senare byggda balkongplattor kommer att bli besvärligare att reparera än äldre balkonger eftersom balkongerna ofta är indragna i fasaden och inspända i denna. Balkonger i elementhus byggda före Ronan Point-raset i England saknar sammanbindningsarmering, vilket kan förorsaka extra kostnader, då man troligen måste införa sådan armering i samband med reparationen.

Omfattningen av reparationsbehovet är oklar.

12.8 VA-anläggningar

12.8.1 Avloppsledningar

Avloppsledningar av betong kan förväntas ha en livslängd av minst 50 år innan de måste bytas, normalt på grund av att tätheten blivit för låg. Fogarna går sönder eller röret brister. I vissa fall fräts rören sönder på grund av aggressivt (surt) avloppsvatten. Detta får dock betraktas som enstaka olycksfall.

Totala längden avloppsledningar var 1988 ca 130 000 km. En stor del av avloppsnätet byggdes ut under 1970-talet. Dessa ledningar är alltså nu 30-40 år gamla och kommer därför att behöva bytas eller renoveras inom något decennium.

Reparation görs oftast genom att rören byts mot nya rör eller mot plaströr. Det har även tagits fram metoder för att renovera betongrör in-situ genom att en ”plaststrumpa” förs in i röret.

Det totala reparationsbehovet uttryckt i pengar är okänt.

12.8.2 Vattenledningar och vattentorn

Vissa större vattenledningar utförs med tryckrör av betong. Dessa har mycket hög kvalitet (högpressterande betong) och kommer därför att ha hög livslängd. Möjligen (men knappast troligen) kommer spänntrådarna i röret på sikt att korrodera p.g.a. karbonatisering. Om så sker havererar röret och måste bytas. Omfattningen av problemet liksom rörens åldersfördelning är okänd. Total kostnadsbedömning för reparation av vattenledningar kan därför inte göras.

Vattentorn utförs numera alltid av s.k. ”vattentät” betong. Miljön runt tornen har låg aggressivitet bortsett från den karbonatisering som alltid sker. Total volym av betong i vattentorn liksom åldersfördelningen hos tornen är okänd varför någon bedömning av reparationskostnaden inte kan göras.

12.8.3 Reningsverk

Många reningsverk byggdes under 1970-talet. Betonganvändningen var stor eftersom alla reningsbassänger byggdes i betong. Miljön är svår p.g.a. hög fuktbelastning, frost och närvaro av olika föroreningar i avloppsvattnet, och olika renande tillsatser till detta.

Reparationsbehovet är inte känt och kan därför inte uttryckas i kostnader.

12.9 Simbassänger

Bassänger drabbas ofta av kloridinitierad korrosion förorsakad av tillsats av klor eller saltsyra. Vissa bassänger är fyllda med havsvatten.

Korrosionsproblemen är omfattande och många bassänger har redan reparerats eller avstängts. Många bassänger återstår att reparera.

Omfattningen av reparationsbehovet är oklart.

12.10 Industrigolv

Många industrigolv utsätts för hård mekanisk eller kemisk belastning. Livslängden blir i dessa fall tämligen låg, vilket leder till ett omfattande reparationsbehov.

Enligt en bedömning 1990 renoverades ca 250 000 m² industrigolv årligen. Det motsvarade den gången en årlig totalkostnad på 125-250 miljoner kronor. Man kan anta att det fortsatta reparationsbehovet är av samma storleksordning, men att totalkostnaden nu är högre på grund av prisstegringen.

12.11 Lantbrukets byggnader - Spannmålssilor

12.11.1 Lantbruksbyggnader

Inom lantbruket används betong framförallt i plansilor och ladugårdsgolv (spaltgolv). Miljöpåfrestningen är extremt hård genom kemiskt angrepp från gödsel och ensileringsvätska, varför man ofta belägger betongen med plast. Detta har dock inte alltid varit till fördel eftersom betongen ändå angrips. Plansilor utomhus angrips lätt av frost, vilken förvärras av aggressiva ämnen i siloinnehållet.

Ofta har man använt betong av inte särskilt hög kvalitet, högt vct, små täckskilt, värmehärdning. Därför är den förväntade livslängden hos "lantbruksbetong" (bortsett från när betongen används i byggnadens väggar) troligen inte särskilt hög. Årlig kostnad för reparation är okänd.

Spannmålssilor

Större spannmålssilor byggs normalt av betong. Den inre miljön i silon är ofta ogynnsam för betong på grund av den höga koldioxidhalten. Karbonatisering går därför mycket snabbt. I vissa fall har hela siloväggen blivit genomkarbonatiserad efter några decennier.

Många silor har feldimensionerats genom att "silotrycket" mot siloväggen starkt underskattats. Armeringen har nått sträckgränsen varvid silon deformerats och väggarna spruckit.

Reparation är komplicerad och dyrbar. Totala årliga kostnaden för reparation av svenska silor är okänd. Många siloanläggningar har redan reparerats.

12.12 Tunnlar

I tunnlar förekommer dels sprutbetongförstärkningar, dels gjutna konstruktioner såsom portaler och bågar. I en del äldre tunnlar förekommer också valv, som sprutats mot krökta asbestcementskivor.

Om tunneln ligger under grundvattennivån kommer betong i kontakt med berg att utsättas för vatten under tryck (ensidigt vattentryck). Detta medför risk för vattenmättnad vilket i sin tur kräver betong som är frostresistent. Genomsipprande grundvatten kan i värsta fall helt laka ur cementen.

Den kemiska sammansättningen hos grundvattnet beror på kemiska reaktioner mellan berg och från ytan penetrerande vatten. Betongens och cementets sammansättning måste anpassas till det lokala grundvattnet.

Vid höga sulfathalter i grundvattnet kan betongen skadas p.g.a. volymförändringar om inte sulfatresistent cement använts. Med salthaltigt grundvatten kan avdunstning vid ytan ge upphov till kristallsprängning i sprickor.

Karbonatiseringen går långsamt varför man i första hand måste beakta kloridinträning/armeringskorrosion och frostskada. Kloridinträning kan bero på grundvatten och/eller trafik. I vägtunnlar kommer trafiken att dra in vägsalter, som skvätter upp på ytorna.

Vid hög fuktighet kan risk för alkalisilikareaktion föreligga.

Vid en besiktning av c:a 50 järnvägstunnlar i Banverkets östra region för några år sedan konstaterades att såväl tunnlar från början av 1900-talet som tunnlar byggda i närtid fortfarande kan vara i gott skick medan andra uppvisar stora skador på betongkonstruktionerna. Avgörande härvid är huvudsakligen bergförhållandena. I sämre berg utsätts konstruktionerna för insipprande grundvatten, vilket leder till skador p.g.a. frost och armeringskorrosion. I gott berg kan råda torra förhållanden, vilket innebär att betongkonstruktionerna får mycket stor livslängd.

Produktiviteten vid reparation av betongkonstruktioner i trafiktunnlar kan bli mycket låg, emedan trafiken inte kan stängas av längre tider. I många fall kan det handla om fyra timmars tillgänglig tid per dygn. Storstockholms lokaltrafik räknar med en fördubbling av kostnaderna jämfört med om tunneln är 100% tillgänglig.

Ett annat problem, som kan bli stort i framtiden, gäller reparation av tunnlar för högfartståg. Där får man räkna med att stora sugkrafter skall kunna förstöra en färsk reparation om inte särskilda åtgärder vidtas. Möjligen skulle ett mera kontinuerligt underhåll, som gör det onödigt att riva bort för mycket av konstruktionerna, vara klokt att införa.

13 FORSKNINGSBEHOV INOM REPARATIONSOMRÅDET

13.1 Värde av ökad kunskap inom reparationsområdet

Att reparera en konstruktion på ett sätt som återger konstruktionen fullgod funktion under lång tid är egentligen en mer komplicerad uppgift än att bygga nytt. Omfattande kunskap krävs nämligen när det gäller det komplexa samspelet, mekaniskt och beständighetsmässigt, mellan reparationsmaterial och konstruktion. Om reparationsområdet skall vidareutvecklas måste därför ökade kunskaper tas fram om hur nedbrytningsprocesser och mekanisk samverkan mellan reparation och konstruktion sker hos konstruktioner reparerade enligt olika principer.

God reparationsteknik kräver även att fuktförhållandena i en betongkonstruktion exponerad för olika miljöer kan förstås och beskrivas bättre än vad som är fallet i dag.

Ett viktigt exempel på det stora värdet av hittills genomförd forskning inom beständighetsområdet är hur ökad kunskap inom området armeringskorrosion medfört att konstruktioner byggda under de senaste decennierna har betydligt högre säkerhet mot alltför tidig start av armeringskorrosion än tidigare byggda konstruktioner.

Ett annat exempel på hur ökad kunskap och ny teknik tagits till vara på ett avgörande sätt är införandet i mitten av 1980-talet av Anläggningscementet och obligatorisk frostprovning inom anläggningsbyggandet. Broar som producerades tidigare fick i alltför många fall bristfällig frostbeständighet; kantbalkar frös sönder bara några få år efter det bron togs i bruk, övre delen av brobaneplattor under asfaltbeläggningen frös sönder p.g.a. salt- och fuktackumulering. Veterligen har så gott som inga broar byggda under den senaste 25-årsperioden några livslängdspåverkande frostsador. Detsamma gäller betongbeläggningar.

Det finns däremot många exempel på hur brist på kunskap kan medföra att konstruktionernas beständighet riskeras. Detta gäller t.ex. när alternativa bindemedel introducerats utan att några mer djupgående analyser av konsekvensen genomförts.

Trots all genomförd forskning återstår många oklarheter, inte minst när det gäller samspelet under lång tid mellan en reparation och den skadade konstruktionen. Det är framförallt kravet på ökad förståelse av nedbrytningsmekanismer och fuktförhållanden i samband med val av reparationsmetod och utveckling av bättre reparationsmetoder och -material som leder till ett behov av omfattande forskningsinsatser. Dessa beskrivs fortsättningsvis kortfattat i detta kapitel.

Ökade kunskaper inom reparationsområdet kommer även att kunna utnyttjas med framgång vid nyproduktion eftersom de medför att bättre och mera beständiga konstruktioner kan produceras. Följden blir att reparationsbehovet hos kommande konstruktioner på sikt bör minska.

13.2 Tillståndsanalys - Analys av skadeomfattning

Det existerar redan i dag ett stort antal metoder att karakterisera skador hos betongkonstruktioner. Existerande metoder listas i Kapitel 4. Det finns trots detta behov av förbättrade metoder. De viktigaste metoder som måste utvecklas eller förbättras anges nedan.

13.2.1 Armeringskorrosion

För att man skall kunna göra en riktig tillståndsanalys av konstruktioner i en miljö där armeringskorrosion kan förväntas uppträda krävs att man kan indikera områden där armeringskorrosion redan har startat. Det är också mycket viktigt att man kan bestämma aktuell korrosionshastighet. Detta behövs för att man skall kunna bedöma den resterande livslängden innan reparation blir absolut nödvändig.

Redan i dag finns fältmässiga metoder för bedömning av troliga korrosionsområden. Dessa s.k. potentialkarteringsmetoder är emellertid inte helt säkra. Påverkan av fuktmiljö och betongkvalitet är t.ex. inte tillräckligt klarlagda.

Det existerar även olika fältmässiga metoder för bestämning av korrosionshastighet. Olika metoder ger olika resultat vilket kan bero på att de baseras på olika mätprinciper och på brister i metodutformning och brister i tolkning av mätresultatet.

Spännkablar kan drabbas av spänningskorrosion om de attackeras av kloridjoner. Eftersom spännkablar och stänger är placerade i foderrör är de inte åtkomliga för normala metoder använda för potentialkartering och mätning av lokal korrosionshastighet.

Sammanfattningsvis finns följande viktiga *forskningsbehov* kopplade till armeringskorrosion:

- Utveckling av säker metod för icke-destruktiv detektering av områden med pågående korrosion.
- Utveckling av säker metod för icke-destruktiv detektering av korrosionshastighet
- Utveckling av metod att klargöra om korrosion pågår i ingjutna spännkablar.
- Utveckling av metod att klargöra korrosionsgraden hos en spännkabel.

13.2.2 Allmän övervakning av en skadad konstruktion

I många fall kan man avvakta med reparation eftersom konstruktionens säkerhet bedöms vara tillräckligt hög. Det är då viktigt att man kan övervaka konstruktionen så att reparation kan genomföras vid lämpligaste tidpunkt.

Följande metodutveckling är viktig:

- Mätssystem för uppföljning in-situ av kloridinträngning
- Metod för långtidsuppföljning in-situ av betongens fuktillstånd vid nivåer överstigande det hygroskopiska området.
- Metod för långtidsuppföljning av konstruktionens deformationer.
- Metod för detektering av spännkraftsförlust i spännarmering.
- Icke förstörande provningsmetoder (OFP-metoder) för att detektera delaminering förorsakad av t.ex. armeringskorrosion, samt OFP-metoder för att detektera defekter i konstruktionen, såsom sprickor och hålrum.

- Metod att detektera tillståndet hos korrosionskänsligt stål som inte är fullständigt ingjutet i betong. Exempel:
 - Armeringsjärn som binder samman de båda skivorna i ett fasadelement och som passerar genom ett isoleringsmaterial.
 - Armeringsjärn som förbinder en balkongplatta med inre bjälklagsplattan och som passerar värmeisoleringen i väggen.
 - Stål som används för att förankra fasadelement och andra betongkomponenter i stommen.
 - Andra korrosionskänsliga ståldetaljer

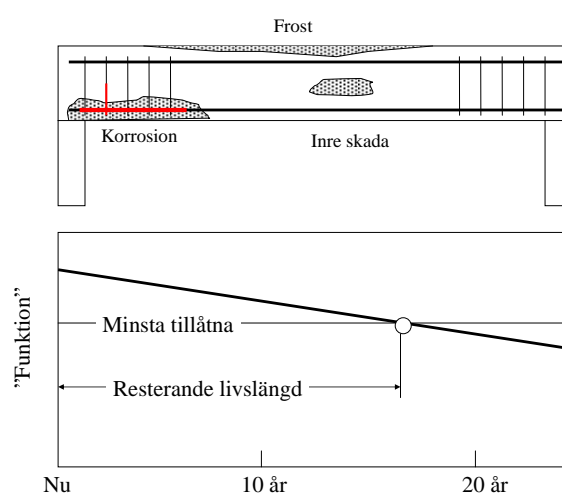
13.2.3 Provbelastning

Värdefull information om tillståndet hos en konstruktion kan man få genom provbelastning. Metoder att provbelasta olika typer av konstruktioner och metoder att bedöma konstruktionens tillstånd genom mätning av dess respons under belastningen, t.ex. dess deformationsmönster, bör utvecklas.

13.3 Analys av reparationsbehov

Efter diagnos av konstruktionen måste man avgöra om akut reparation är nödvändig. För detta krävs dels omfattande utveckling av beräkningsmetoder för att förutse den fortsatta skadeutvecklingen, dels kunskap om samband mellan skada och bärförmåga/säkerhet hos konstruktionen.

Principen visas i Figur 10. Vid inspektionstillfället ("nu") bedömer man att konstruktionen har en viss resterande "funktion" (normalt bärförmåga och säkerhet). Denna bedöms vara högre än den lägsta acceptabla. Fortsatt skadeutveckling, dvs. fortsatt nedgång i "funktionen", prognostiseras teoretiskt genom kunskap om skademekanismen och kunskap om sambandet mellan skadenivå och funktion. På så sätt kan man redan vid inspektionstillfället göra en bedömning av resterande livslängd. (OBS. nedbrytningskurvan är normalt inte linjär).



Figur 10 Principen för analys av reparationsbehov.

Det krävs alltså att följande kunskap är väl utvecklad:

1. Möjlighet att beräkna den framtida skadeutvecklingen (t.ex. utvecklingen av armeringskorrosion i olika kritiska snitt, eller utvecklingen av en frostskada).
2. Möjlighet att beräkna hur en viss skadegrad (t.ex. en viss armeringsgrad eller en viss frostskada) påverkar bärförmågan och säkerheten.

13.3.1 Prognostisering av fortsatt skadeutveckling

Kunskap om olika nedbrytningsmekanismer är nödvändig för att man skall få fram säkra metoder för bedömning av hur observerade skador kommer att utvecklas med tiden, dvs. säkra metoder för livslängdsberäkning. Trots intensiv forskning inom beständighetsområdet under senare decennier återstår många oklarheter. Detta gäller främst de vanligaste nedbrytningstyperna, armeringskorrosion och frostnedbrytning, men även urlakning.

Alla nedbrytningsförlopp påverkas kraftigt av betongens fuktnivå. Därför krävs utveckling av metoder för beräkning av det framtida fuktillståndet i konstruktioner exponerade för olika miljö.

A. Prognostisering av framtida armeringskorrosion¹⁸

Existerande livslängdsmodeller för armeringskorrosion måste förbättras. Detta kräver omfattande forskningsinsatser inom följande områden:

- *Tröskelvärdet* av fri och bunden kloridjonkoncentration för start av korrosion är mycket dåligt klarlagt. Det påverkas sannolikt av sådana faktorer som vattencementtal och täcksiktets tjocklek och fuktillstånd. Det påverkas även av typen av bindemedel. Ökande användning av mineraliska restmaterial kan förutses. Restmaterial kommer sannolikt att minska tröskelvärdet, men i vilken omfattning är okänt.

Tröskelvärdet påverkas säkerligen också av olika åldringsfenomen, t.ex. gradvis urlakning av passiverande joner från betongen (främst OH⁻).

Man kan visa att tröskelvärdet oftast har betydligt större betydelse för konstruktionens livslängd än kloridtransportkoefficienten.

- Den resterande livslängden bestäms av den fortsatta intransporten i betongen av kloridjoner. Den effektiva tidsberoende *kloridtransportkoefficienten* måste därför vara känd för att man skall kunna göra en riktig analys av den resterande livslängden. Omfattande studier av kloridtransportkoefficienten har redan gjorts genom laboratorieförsök och genom mätningar på exponerade konstruktioner. Resultaten är emellertid inte entydiga. Det är framförallt diffusionskoefficientens tidsberoende som inte är helt klarlagt. Troligen beror tidsberoendet i stor utsträckning av påverkan från den miljö i vilken betongen exponeras (t.ex. havsmiljö av olika typ, eller "tösaltningssmiljö")

Forskning behövs framför allt när det gäller att klarlägga hur kloridtransportkoefficienten utvecklas med tiden hos betong i olika kloridmiljö och tillverkad med olika typ av bindemedel.

Kommentar:

Några exempel på betydelsen av dessa frågor är:

¹⁸ Referenslitteratur är: Vägledning för livslängdsdimensionering av betongkonstruktioner. Betongrapport nr 12. Svenska Betongföreningen, 2007.

- (1) Omfattningen av åtgärder i p-hus och garage måste baseras på en bedömning av risken för fortsatta skador inom områden som har relativt hög kloridhalt, men där ännu inga synliga skador uppstått. Eftersom man idag har bristfällig kunskap om kloridtröskelvärdena medför detta att man i många fall sannolikt gör ”onödigt” omfattande reparationer för att eliminera risker för fortsatta skador. Om man å andra sidan felbedömer risken och lämnar områden som borde ha åtgärdats, så kommer nya skador att uppstå och reparationen måste delvis göras om.
- (2) För relativt nya garage har man att ta ställning till om de utan skyddande tätskikt eller byte av tätskikt kommer att få erforderlig livslängd. Otillräcklig kunskap om kloridtransportkoefficienten medför att man idag antingen reparerar i onödan eller att man får för kort livslängd. I båda fallen får man kostnader som kunnat undvikas genom bättre kunskap.

B. Prognostisering av framtida inre frostnedbrytning¹⁹

Inre frostangrepp leder till nedgång i betongens hållfasthet och E-modul, samt nedgång i armeringsvidhäftning. Följaktligen påverkas konstruktionens bärförmåga negativt. Om man noterar en inre frostskada vid inspektionstillfället är det alltså viktigt att man kan prognostisera den framtida skadeutvecklingen.

Inre frostsador beror på att en kritisk fuktnivå överskridits. En prognos kräver därför kunskap om den framtida utvecklingen av konstruktionens fuktillstånd. Eftersom den kritiska fuktnivån alltid ligger över det hygroskopiska området är det nivåer i detta höga fuktområde som man måste kunna förutse.

Det kritiska fuktillståndet beror främst på betongens luftporstruktur eftersom denna påverkar hur fuktnivån utvecklas. Kunskapen om sambandet mellan luftporstruktur och fuktupptagning är till stor del helt okänd.

Viktiga forskningsbehov när det gäller inre frostangrepp är:

- Empirisk undersökning av skadeutvecklingsprocessen hos betong med måttligt hög eller låg frostbeständighet (otillfredsställande luftporsystem) som funktion av exponeringstiden för fritt vatten. Detta ger underlag till en kvalitativ bedömning av det framtida skadeförloppet hos konstruktioner i olika ”fuktmiljö”.
- Utveckling av en teoretisk modell för sambandet mellan exponeringstid för vatten och frostnedbrytning. Detta kräver följande studier:
 - Utveckling och verifiering av en teori för vattenupptagning i betongens luftporsystem under olika yttre fuktförhållanden, innefattande konstant eller intermittant exponering för fritt vatten. Detta gör det möjligt att prognostisera den framtida skadeutvecklingen.
 - Klargörande av inverkan av luftporsystemets utseende på den inre frostbeständigheten. Detta innefattar även att ta fram en teori för kritiskt luftporavstånd hos betong med olika sammansättning.
 - Undersökning av inverkan av saltkoncentrationen hos porvattnet på inre frostbeständigheten.

¹⁹ Referenslitteratur är: G. Fagerlund: A service life model for internal frost damage in concrete. APPENDIX 2: Assessment of the residual service life of frost damaged concrete. Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology. Report TVBM-3119, 2004.

- Utveckling av en realistisk provningsmetod för betongens motståndsförmåga mot inre frostsador. Metoden skall vara representativ för den fuktnivå som betongen uppnår i verkligheten.

Under vissa förhållanden (t.ex. i dammkroppar) kan teoretiskt sett makroskopisk islinstillväxt (tjälksjutning) ske i konstruktionen. Om detta verkligen sker i verkligheten bör undersökas.

C. Prognostisering av framtida saltfrostnedbrytning (ytavskalning)²⁰

Nedbrytningsmekanismen när frysning sker i närvaro av salt på betongytan är inte klarlagd. Inte heller är det säkerställt hur variationer i yttre och inre saltkoncentration och variationer i frysförhållanden påverkar nedbrytningsprocessen. Därför vet man inte hur en observerad yt-skada kommer att utvecklas med tiden. Därmed kan man inte heller förutse den framtida utvecklingen av konstruktionens bärförmåga. En ytavskalning minskar dessutom resterande tid innan armeringskorrosion startar.

Viktiga forskningsbehov är:

- Systematiska undersökningar av sambandet mellan yttre resp. inre salthalt och avskalning för betong av olika sammansättningar.
- Systematiska undersökningar av inverkan av lägsta frystemperatur och nedfrysningshastighet på avskalningen.
- Teoretiskt klarläggande av mekanismen bakom saltfrostnedbrytning. Observerad inverkan av yttre och inre salthalt, och inverkan av nedfrysningstemperatur och frys-hastighet måste kunna beskrivas av teorin för nedbrytning.

D. Prognostisering av alkali-kiselsyrareaktion (AKR)²¹

Svensk alkalireaktiv ballast är i normalfallet mycket mera långsamt reagerande än de mest studerade reaktiva ballasttyperna (t.ex. opal och flinta). Fortfarande återstår ett visst forskningsbehov:

- Typiska skadeutvecklingskurvor för betong med olika typer, mängder och fraktioner av långsamreagerande ballast klargörs.
- Inverkan av fuktnivån på den fortsatta reaktionen och nedbrytningen klargörs.

Kommentar:

Exempel på betydelsen av den föreslagna forskningen är att många fasader på från miljonprogrammet, och även på andra byggnader, har problem med buktande fasadelement orsakade av cement-ballastreaktioner. Deformationerna medför problem med läckande fogar, risk för skador på infästningar och om deformationerna blir för stora måste elementen bytas. Genom att applicera olika typer av yt-skikt på fasadelementen kan fuktförhållandena påverkas och därmed skadeförloppet. En viktig fråga är därvid hur yt-skyddet påverkar fuktillståndet och hur detta i sin tur påverkar cement-ballastreaktionerna.

²⁰ Referenslitteratur är: EU-Project, CONTECVET: A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures. Manual for assessing concrete structures affected by frost. ANNEX E: The future frost scaling. Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology, May 2001.

²¹ Referenslitteratur är: EU-Project, CONTECVET: A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures. Manual for assessing concrete structures affected by ASR. British Cement Association, 2001.

E. Prognostisering av fortsatt kalkurlakning²²

Kalkurlakning orsakas av vatten som läcker genom konstruktionen och som därvid löser upp såväl kalciumhydroxid som, på sikt, kalciumsilikaterna. Ökad vattengenomströmning ger ökad urlakningshastighet. Två typer av urlakning finns:

- Urlakning av själva betongkroppen, vilket leder till hållfasthetsförlust och minskad vattentäthet.
- Urlakning av sprickväggar vilket leder till risk för armeringskorrosion, särskilt om betongen är baserad på bindemedel som innehåller mineraliska restmaterial.

Forskningsbehov är:

- Utveckling av en metod att förutse hur den framtida urlakningen kommer att utvecklas, vilket innebär att den framtida utvecklingen av betongens permeabilitet mot vatten under tryck måste kunna förutses.
- Utveckling av en teori för hur vattengenomströmning och kalkurlakning av sprickväggar utvecklas med tiden.
- Klargörande av inverkan av kalkurlakning i sprickor på risken för armeringskorrosion och korrosionshastigheten. Inverkan av olika bindemedelstyper (OPC, slaggcement, m.fl.)

F. Prognostisering av syraangrepp²³

Syror ger ytangrepp vilket i sin tur reducerar tvärsnittet och som påverkar tiden fram till start av armeringskorrosion. Forskningsbehov är:

- Tidsförloppet för syraangrepp är inte helt klarlagt. Det normalt antagna kvadratrotsberoendet för korrosionsdjup versus tid gäller kanske inte alltid för alla miljöer och alla syror. Särskilt bör inverkan av organiska syror som myrsyra och ättiksyra, vilka förekommer i virkestorkar, studeras.
- Inverkan av syraangreppet på risken för framtida armeringskorrosion bör klargöras. Om inte all syra konsumeras genom reaktion med betongens kalk kan ev. armeringens passivering upphävas.

G. Prognostisering av det inre fukttillståndet

Alla nedbrytningsmekanismer sammanhänger med betongens fukttillstånd. En prognostisering av skadeutvecklingen förutsätter därför en prognostisering av betongens fukttillstånd.

När det gäller att förhandsberäkna fuktnivån inom det *hygroskopiska* området finns i dag goda möjligheter eftersom materialdata för fuktfixering och fukttransport är rätt väl kända, bortsett från betong innehållande större mängder mineraliska restmaterial. Det finns även användarvänliga datorprogram för fuktberäkningar inom det hygroskopiska området.

²² Referenslitteratur är: G. Fagerlund: Leaching of concrete. The leaching process. Extrapolation of deterioration. Effect on the structural stability. Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology. Report TVBM-3091, 2000.

²³ Referenslitteratur är: L. Rombén: Aspects on testing methods for acid attacks on concrete-further experiments. CBI Research Fo 9:79,1979.

Många skadetyper (frostangrepp, urlakning, kemiska angrepp) uppträder emellertid inom det överhygroskopiska området. Här saknas såväl materialdata som mekanismbeskrivning. Beräkningar kan därför inte göras.

Viktiga forskningsbehov är:

- Experimentella studier av fukttransportkoefficienter inom det hygroskopiska området för betong med mineraliska restmaterial.
- Experimentella studier av långtidsvattenupptagning i betong (se även området inre frostangrepp).
- Utveckling av en teori för fukttransport och fuktupptagning vid överhygroskopiskt område (100 % RF).
- Utveckling av teori för fukttransport och fuktomfördelning i konstruktionen vid varierande temperatur och temperaturgradient inkluderande låga temperaturer.
- Metoder att förhandsberäkna fuktillståndet i gränssytan mellan betong och reparationsmaterial under varierande yttre fukt- och temperaturförhållanden måste utvecklas. Detta behövs för att lämpligt reparationsmaterial skall kunna väljas.
- Bestämning av betongs vattenpermeabilitet vid kombinerad kapillaritet och vattentryck (Praktiska exempel är sänktunnlar och sprutbetong i berg.).

H. Inverkan av synergi mellan olika nedbryningstyper på det fortsatta nedbrytningsförloppet²⁴

En viss typ av nedbrytning kan öppna för en annan nedbrytning. En fortgående nedbrytningsprocess, t.ex. alkali-kiselsyrareaktion eller kalkurlakning, kan t.ex. på sikt tänkas öppna för inre frostnedbrytning. Att saltfrostangrepp påverkar livslängden med avseende på armeringskorrosion har redan studerats teoretiskt. Även andra synergieffekter kan tänkas.

Viktiga forskningsbehov är:

- Klargöra synergi mellan AKR och inre frostangrepp.
- Klargöra hur kalkurlakning påverkar armeringskorrosion och inre frostangrepp.

I. Inverkan av mekanisk påverkan på nedbrytningsförlopp

Mekanisk påverkan, som orsakar skador, kan påverka tiden till dess reparation blir nödvändig. Exempel är mekaniska ytskador vilka reducerar det effektiva täcksiktet. Detta medför att tiden till dess armeringskorrosion startar reduceras. Ett annat exempel är där sprickor uppstår som följd av överpåverkan orsakad av yttre last. Sprickor kan öka risken för inre frostsador och öka risken för armeringskorrosion. Samspelet mellan olika typer av mekanisk skada och det fortsatta nedbrytningsförloppet bör studeras.

Ständigt höga lastnivåer kan möjligen medföra att olika miljöbetingade nedbrytningsfenomen förvärras. Samspelet mellan mekanisk last och olika nedbrytningsfenomen har undersökts i mycket liten omfattning. Man har i några få försök sett att kemisk nedbrytning kan påskyndas. Det finns även några få undersökningar som visar att frostnedbrytning kan förvärras. Synergi mellan mekanisk last och olika nedbrytningsfenomen bör studeras.

²⁴ Referenslitteratur är: G. Fagerlund: Synergetic effects of combined destructive action on concrete. In Proceedings from the Conference "Role of Concrete in Sustainable Development". University of Dundee 3-4 Sept 2003.

13.3.2 Samband mellan skada och bärförmåga/säkerhet

Även om en skada noteras innebär det inte nödvändigtvis att konstruktionen är i omedelbart behov av reparation. Å andra sidan finns det fall där skadan inte förefaller vara så allvarlig men där påverkan på konstruktionens bärförmåga är stor. Samband mellan skada och bärförmåga måste därför kunna beskrivas.

A. Inverkan av armeringskorrosion på bärförmåga/säkerhet²⁵

Armeringskorrosion innebär alltid en viss reduktion av konstruktionens bärförmåga. Djupare korrosion ger större reduktion av bärförmågan genom att armeringstvårsnittet minskas. Mera utbredd korrosion kan ge täckskiktsavspjälkning vilket minskar armeringens förmåga att överföra spänningar, och vilket minskar förankringskapaciteten hos armeringen.

Hur stor effekten på bärförmågan blir beror på vilka armeringsstänger som drabbas. Korrosion i förankringszonen har större effekt än korrosion i tryckzonen. Korrosion på skjuvarmering kan ibland få större negativa konsekvenser än korrosion på böjarmering.

Samband mellan korrosionsgrad hos olika delar av armeringen och konstruktionens bärförmåga är inte helt känd. Detta medför följande viktiga *forskningsbehov*:

- Inverkan av korrosion i förankringszonen på förlust av förankringskapaciteten klargörs experimentellt och teoretiskt för olika typer av konstruktioner och olika korrosionsgrad.
- Inverkan av korrosion och täckskiktsavspjälkning på böjkapaciteten klargörs experimentellt och teoretiskt.
- Inverkan av korrosion och täckskiktsavspjälkning på skjuvkapaciteten klargörs experimentellt och teoretiskt.

B. Inverkan av inre frostnedbrytning på bärförmåga och säkerhet²⁶

Inre frostskada reducerar betongens inre kohesion och hållfasthet. Den sänker även vidhäftningshållfastheten mellan armering och betong.

Påverkan på bärförmågan bör gå att beräkna med konventionella metoder genom att sätta in reducerade hållfastheter i formler för bärförmåga. Att denna möjlighet fungerar har emellertid aldrig verifierats. Vissa undersökningar av frostskador på resterande bärförmåga hos armerade balkar har tidigare genomförts vid LTH. Den metodik som utvecklades då bör kunna användas²⁷.

C. Inverkan av yttre saltfrostnedbrytning på bärförmåga och säkerhet

Yttre frostangrepp, t.ex. saltfrostangrepp, reducerar tvärsnittet men påverkar normalt inte betongen innanför det avskalade täckskiktet. Inverkan på bärförmågan av täckskiktsreduktionen kan beräknas med konventionella metoder. Forskningsbehovet är begränsat.

²⁵ Referenslitteratur är: EU-Project, CONTECVET: A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures. Manual for assessing corrosion-affected concrete structures. Eduardo Torroja Institute, Madrid 2001.

²⁶ Referenslitteratur är: EU-Project, CONTECVET: A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures. Manual for assessing concrete structures affected by frost. ANNEX I: Effects of frost on load-carrying capacity. Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology, May 2001.

²⁷ M. Hassanzadeh: Residual strength of frost damaged beams. European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures, and Coupled Problems in Engineering. Lissabon Juni 2006.

D. Inverkan av kalkurlakning på bärförmåga och säkerhet²⁸

Viktiga forskningsbehov är:

- Kalkurlakning av betongens inre sänker hållfastheten om urlakningen gått tillräckligt långt. Sambandet mellan urlakningsgrad och konstruktionens bärförmåga är dåligt klarlagt.
- Kalkurlakning i sprickor reducerar konstruktionens täthet och ökar risken för armeringskorrosion. Sambandet mellan sprickurlakning och armeringskorrosion bör klarläggas.

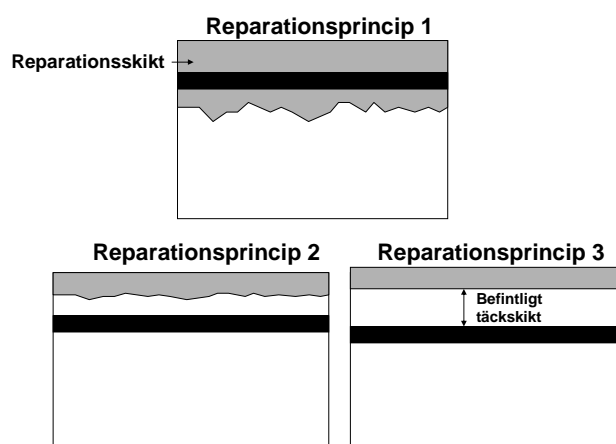
13.4 Reparationsmetoder och reparationsmaterial

Många reparationsmetoder är inte tillräckligt studerade. Viktiga forskningsbehov beskrivs nedan.

13.4.1 Reparationsskikt/förstärkningsskikt av betong²⁹

Betong är ofta ytskadad genom frostangrepp, kemiskt angrepp eller mekanisk belastning (t.ex. nötning eller påkörning). Täcksiktet kan vara bortsprängt på grund av armeringskorrosion.

Reparation sker normalt genom pågjutning av ett nytt betongskikt efter det att den skadade betongen rensats från defekt betong. Pågjutning kan ske enligt tre huvudprinciper, se Figur 11. I samtliga fall kan man *komplettera med ny armering* om så behövs:



Figur 11 Huvudprinciper för pågjutning.

Generella forskningsbehov oavsett reparationsprincip:

- Det fuktmekaniska samspelet (fukttransport, fuktomfördelning) mellan den äldre betongen och den högvärdiga reparationsbetongen studeras för olika kombinationer av

²⁸ Referenslitteratur. Fotnot 5.

²⁹ Referenslitteratur är. G. Fagerlund: Ytreparation av betongkonstruktioner. Beständighet och Livslängd. Rapport utarbetad på uppdrag av Vattenfall Utveckling, 2006.

underlagsbetong och reparationsbetong under olika temperaturbetingelser, t.ex. frysing, och olika yttre fukt-betingelser (t.ex. exponering för fritt vatten).

- Testmetod för frostbeständigheten hos ”kompositen” reparationsbetong + underlagsbetong utvecklas, så att olämpliga kombinationer kan undvikas.
- Frostbeständig reparationsbetong för undervattensreparationer bör utvecklas.

Reparationsprincip 1

Borttagning av hela täcksiktet och pågjutning av nytt täcksikt.

Metoden kan användas i två fall:

1. Betongskadorna går djupare än till armeringen, dvs. denna har frilagts.
2. Armeringen rostar med eller utan täcksiktssprängning.

Forskningsbehov utöver de generella är:

- I det fall skadan beror på kloridinitierad korrosion undersöks högsta acceptabla kloridhalt i rensad underlagsbetong.

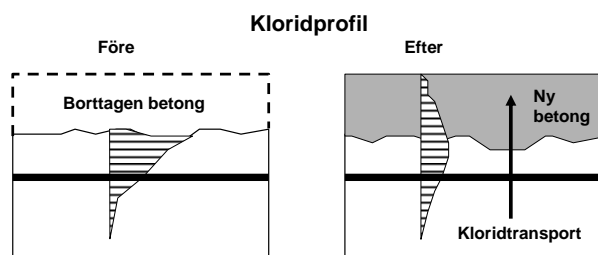
Reparationsprincip 2

Borttagning av övre delen av täcksiktet och komplettering med nytt täcksikt.

Metoden kan användas när betongskadorna inte går ända ned till armeringen och denna ännu inte börjat rosta. Genom pågjutning återställer man konstruktionens yttre geometri. Samtidigt fördröjer man tiden tills armeringen börjar rosta.

Viktiga forskningsbehov utöver de generella är:

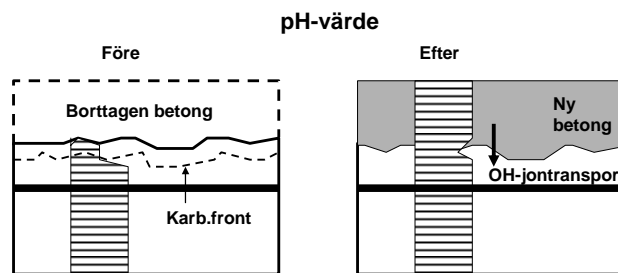
- Studier av hur kloridjonfördelningen i underlagsbetongen ändras (minskas) genom diffusion in i pågjutningsbetongen. Påverkan av sådan kloridomfördelning på resterande livslängd studeras. Inverkan av olika typer av bindemedel i pågjutningen (slagcement, portlandcement av olika typ etc.) på kloridomfördelningen studeras.



Figur 12 Kloriddiffusion i pågjutet betong.

- Studier av återalkalisering av karbonatiserad underlagsbetong genom indiffusion av OH-joner från pågjutningsbetongen. Inverkan på resterande tid till korrosionsstart undersöks.

Figur 13 Diffusion av pågjuten betong i underlagsbetong.

*Reparationsprincip 3:**Pågjutning på befintligt och oskadat täckskikt*

Metoden kan enbart användas när armeringskorrosion ännu inte startat

Genom pågjutning fördröjer man tiden tills armeringen börjar rosta genom att fortsatt intransport av kloridjoner i underlagsbetongen stoppas under lång tid. Samtidigt stoppar karbonatiseringen i underlagsbetongen under lång tid. Omfördelning av kloridjoner och OH-joner mellan underlagsbetong och pågjutning - se Figur 13 - ger en ytterligare ökning av livslängden.

Man kan försvåra fortsatt inre förstörelse av betongen t.ex. kalkurlakning och inre frostangrepp genom att fuktupptagningen minskar.

Metoden används även vid förstärkning av betong med ny betong.

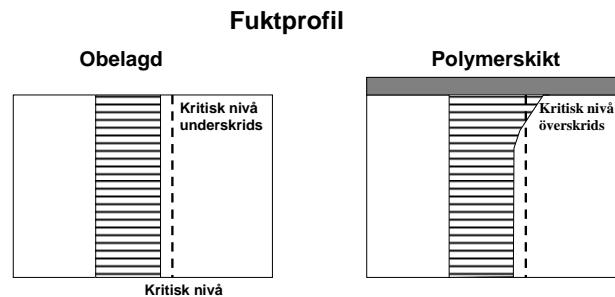
Forskningsbehoven är detsamma som för reparationsprincip 2.

13.4.2 Polymerbaserade ytreparationer³⁰

Ytskador kan i princip repareras genom applicering av polymerbaserade material på den rensade betongen i stället för betong. Erfarenheten av sådana reparationer är emellertid dålig av följande orsaker:

- Polymerbaserade material har i sig själva ofta bristande beständighet i kontakt med den högalkaliska underlagsbetongen, eller när de exponeras för solens UV-strålning. Många polymerer åldras dessutom negativt genom gradvisa, spontana eller fuktinducerade förändringar i molekylstrukturen. Detta leder ofta till försprödning, krympning och sprickbildning.
- Vatten ansamlas lätt i gränssytan mellan underlagsbetong och polymerskikt eftersom detta förhindrar avdunstning. Temperaturvariationer i ytan kan också medföra fukttransport upp mot gränsskiktet och ackumulering av fukt där. Risken är därför stor att reparationsskiktet fryser loss eftersom den kritiska fuktnivån med avseende på frostskador överskrids; se Figur 14. Samtidigt kommer underlagsbetongens att frostska i anslutning till reparationen.

³⁰ Referenslitteratur är samma som fotnot 9.



Figur 14 Inverkan av polymerskikt på fuktprofil.

- Polymerbaserade material har ingen koldioxidabsorberande eller kloridbindande förmåga och kan därför inte hindra armeringskorrosion, utan enbart, i bästa fall, fördröja korrosionsstart och korrosionshastighet.

Ett mycket stort antal provningsmetoder har standardiserats för polymerbaserade reparationsmaterial (*EN 1504 "Products and systems for the production and repair of concrete structures"*) men det finns inga provningsmetoder för samspelet mellan reparationsmaterialet och underlagsbetongen.

Polymerbaserade reparationskikt kan i princip användas enligt samma tre reparationsprinciper som används för betongskikt, se figuren ovan. Riskerna är dock stora om inte ett antal oklarheter blivit studerade och klarlagda.

Generella forskningsbehov oavsett reparationsprincip är:

- Inverkan av reparationsmaterialets naturliga åldring på dess täthet mot fukt, koldioxid och kloridjoner måste klarläggas.
- Inverkan av exponering för betongens höga pH-värde på materialets täthet och vidhäftning mot betongen måste klarläggas.
- Fuktförhållanden i gränsytan mellan polymerskikt och underlagsbetong vid naturliga temperaturväxlingar innefattande fryscyklar av varierande art måste studeras teoretiskt och experimentellt.
- Testmetod för frostbeständigheten hos "kompositen" polymerskikt + underlagsbetong måste utvecklas så att olämpliga kombinationer kan undvikas.

Reparationsprincip 1

Borttagning av hela täckskiktet och applicering av nytt polymerbaserat täckskikt

Eftersom det nya täckskiktet är helt polymerbaserat kommer armeringen inte att skyddas av ett högt pH-värde. Korrosion kan därför i princip ske omedelbart efter avslutad reparation. Korrosionshastigheten kan emellertid bli låg om miljön som omger armeringen är gynnsam.

Metoden kan främst användas när enbart kort livslängd krävs. Forskningsbehov utöver de generella är:

- Korrosionshastigheten hos polymeringjuten armering i olika yttre miljö vad avser fukt och kloridhalt måste klargöras.

- Inverkan av naturlig åldring av polymerskiktet på korrosionshastigheten måste klarläggas.

Reparationsprincip 2

Borttagning av övre delen av täckskiktet och komplettering med nytt polymertäckskikt.

Metoden kan i princip användas när armeringen fortfarande befinner sig i ”frisk” betong och man vill återställa konstruktionens funktion. Metoden kan också i princip användas när återstående tid till dess korrosion kan förväntas starta är tämligen kort. Livslängden fram till korrosionsstart kan då förlängas, förutsatt att polymerskiktets täthet mot koldioxidinträning och kloridinträning är hög.

Forskningsbehoven är de generella enligt ovan och då främst inverkan av åldring och miljöpåfrestningar på polymerskiktets täthet mot inträngning av vatten, koldioxid och kloridjoner. Även risken för fuktackumulering i gränsskiktet och dess effekt på frostbeständigheten måste studeras.

Reparationsprincip 3:

Pågjutning av ett polymerskikt på befintligt och oskadat täckskikt

Metoden kan användas för att öka täckskiktets motstånd mot inträngande koldioxid och kloridjoner. Därmed kan den förväntade livslängden fram till korrosionsstart förlängas.

Metoden kan också användas för att öka betongytans motståndsförmåga mot nötning eller förbättra utseendet hos konstruktionen.

Forskningsbehoven är desamma som för reparationsprincip 2.

13.4.3 Förstärkning med fiberkomposit

De viktigaste forskningsbehoven är i princip desamma som för polymerbaserade ytreparationer, d.v.s:

- Polymerens beständighet i olika miljöer måste undersökas.
- Risken för fuktackumulering i gränssytan mellan fiberkomposit och underlagsbetong under frysförhållanden måste undersökas för olika principiella metoder att förstärka.

Dessutom återstår att klargöra vissa frågor rörande den konstruktiva samverkan mellan fiberkompositen och underliggande konstruktion, t.ex. excentriskt tryckta konstruktioner.

13.4.4 Ytskydd³¹

Det finns ett stort antal material, ofta polymerbaserade, som saluförs som medel att skydda betongen mot nedbrytning. Exempel är:

- Hydrofoberande medel som målas eller sprutas på betongytan. Avsikten kan vara att:
 - sänka fuktnivån i betongen så att risken för frostsador eller andra nedbrytningsfenomen kopplade till höga fuktnivåer minskas.
 - försvåra kloridinträning så att tiden till start av armeringskorrosion ökar.

³¹ Referenslitteratur är: (a) L. Johansson: Ytskydd för betong – En litteraturstudie. CBI, Rapport 1992:1.
(b) EU-projekt REHABCON. Annex F, ”Surface treatments”. 2004

- Klorid- eller koldioxidretarderande skyddsskikt (ej cementbaserade) med avsikt att fördröja inträngning av karbonatiseringszonen eller kloridjoner i betongen.
- Polymermodifierade cementslammor vilka ibland används som alternativ till polymerbaserade skyddsskikt.

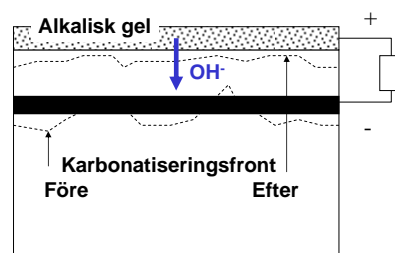
Viktiga forskningsbehov är:

- Klargörande av långtidseffekten hos materialen inkluderande undersökningar av tidsberoende förändring/försämring av den avsedda skyddseffekten. Effekter att studera är:
 - Inverkan på underlagsbetongens fuktnivå.
 - Kloridabsorberande/kloridfördröjande egenskaper.
 - Realkaliseringseffekt
- Studier av potentiella negativa effekter på underlagsbetongen, framförallt risken för fuktansamling i gränsytan och därav orsakad frostnedbrytning.
- Enligt Vägverkets nuvarande regler skall alla brodelar som kan utsättas för saltstänk förses med vattenavvisande impregnering med vissa intervall. Om detta verkligen behövs på broar med de krav på betongkvalitet och täckskikt man har idag vet vi inte säkert. Dessutom indikerar senare forskning att det är mycket tveksamt om man får någon effekt av impregneringen på de höga betongkvaliteter som används nu. Själva impregneringen är relativt billig, men det rör sig totalt om ett mycket stort antal kvadratmeter broyta som impregneras. Möjligheten att få en effektiv impregnering hos brobetong bör utredas.

13.4.5 Elektrokemiska metoder³²

Elektrokemiska metoder avsedda att öka konstruktionens livslängd är:

- Metoder för re-alkalisering av karbonatiserad eller kloridinfekterad betong.

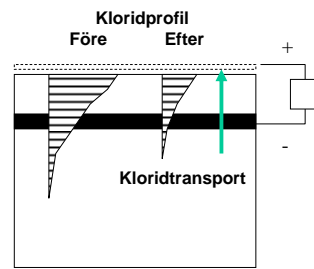


Figur 15 Realkalisering av betong.

- Metoder för kloridutdrivning från betong.

³² Referenslitteratur är: EU-projekt REHABCON. Annex D, "Electrochemical techniques" .2004.

Figur 16 Kloridutdrivning från betong.



- Katodiskt skydd av ingjuten armering.

Forskningsbehoven är omfattande och avser främst studier av funktionen hos olika metoder och deras långtidseffekter. När det gäller katodiskt skydd måste inverkan av olika yttre miljö undersökas för att undvika att metoden används på ett sätt som ger nya problem vid sidan av att lösa aktuella problem.

13.4.6 Inverkan av sprickor

Sprickor som är öppna vid betongytan kan medföra beständighetsproblem. Exakt vilken inverkan sprickor har är inte helt klarlagd. Följande forskningsbehov finns:

- Kritisk sprickvidd med avseende på kloridinitierad armeringskorrosion i olika miljö (hav, tösaltning) måste klargöras. Värdet avgör behovet av armering och är därför av stor ekonomisk betydelse.
- Inverkan av ytsprickor och sprickvidd på vattenupptagning och inre frostbeständighet bör klargöras.

13.4.7 Försegling av sprickor

Sprickor kan förseglas genom inpressning av en polymer (epoxi eller polyuretan) eller cementpasta baserad på finkornigt injekteringscement. Under vissa betingelser kan sprickor även självtätas. Forskningsbehov är:

- Långtidsbeständigheten (livslängden) hos polymerinjektering i olika miljö bör utredas.
- Metodik för injektering med finmalet cement bör vidareutvecklas.
- Möjligheten till självtätning av sprickor i olika miljö bör studeras. Därvid är inverkan av bindemedlet viktigt att studera, t.ex. användning av mineraliska restmaterial (flygaska, slagg, silikastoft) eftersom dessa kan förvänta försämra självläkningsförmågan.

13.4.8 Injektering av urlakad betong

Urlakad betong, t.ex. en dammkropp, har reducerad hållfasthet och minskad täthet mot vattengenomträngning. Konstruktionen kan i princip återfå sin ursprungliga funktion genom injektering av cementpasta (-bruk). Att genomföra injektering i en grov betongkonstruktion är komplicerat. Utveckling av injekteringsmaterial och injekteringsmetod bör ske.

13.4.9 Rostfri armering

Möjligheten att använda rostfri armering för reparationsändamål bör utredas. Framförallt är det viktigt att utreda motståndsförmågan mot kloridinitierad korrosion hos olika typer av rostfritt stål i olika miljö (olika fuktnivå, salthalt och syrekoncentration).

13.4.10 Reparation av avloppsledningar³³

Funktionen hos avloppsledningar av betong reduceras ofta genom läckande fogar, igensättning som reducerar flödet (t.ex. inväxande rötter) och ibland sönderfrätning. Normalt måste rören grävas upp och ersättas med nya. Metoder för in-situ reparation av ledningar, t.ex. genom produktion av ett nytt rör inne i det skadade finns utvecklade. Infodringen utförs med såväl plastmaterial som cementbruk. Testmetoder för att kunna förutsäga infodringarnas livslängd finns framtagna bl.a. i Tyskland. Det finns ett behov att opartiskt analysera de olika renoveringsmetoder som är i bruk i Sverige ur livslängdsperspektiv och lämplighet för olika användningsområden.

13.4.11 Reparation och förstärkning av sprutbetong – utveckling av nya strategier och metoder

Ett stort antal trafiktunnlar har byggts sedan 1990-talet och framåt. På sikt kommer sprutbetonginklädningarna i dessa att kräva reparation. Att vänta för länge med sådana åtgärder, så att rivning och ny sprutning måste utföras, kommer att medföra stora kostnader och komplikationer. Anledningen är att tillgängligheten för reparationsarbeten i trafiktunnlar med tät trafik är mycket begränsad. Det kan handla om ett fåtal timmar per dygn. Betongsprutning i en tunnel, som redan tagits i drift, kräver dessutom omfattande tilläggsarbeten i form av inklädningar som skydd mot betongsprut och damm.

I en tunnel för trafik med höghastighetståg tillkommer dessutom problemet att tågen förorsakar stora sug- och tryckkrafter, som en färsk betongreparation kanske inte klarar. I sådana fall måste tågen gå med reducerad fart under flera dygn.

Alternativet är att utveckla reparationsstrategier, som syftar till att utföra underhåll kontinuerligt, så att sprutbetongen aldrig hinner brytas ned i någon större omfattning. Vidare bör reparationsmetoder utvecklas, som kräver liten materialåtgång och där materialet härdar snabbt.

Ett intressant koncept består i cementbaserat, snabbhärdande bruk i kombination med kolfibernät. Sådant material kan snabbt appliceras med roller i tunna skikt, som ändå ger en förstärkningseffekt, som kan vara tillräcklig för att återge den befintliga sprutbetongen dess ursprungliga bärförmåga.

I ett doktorsarbete vid avd. för Betongbyggnad, KTH, påvisas potentialen i en sådan metodik³⁴.

13.4.12 Utveckling av snabbare cementbundna reparationsmaterial

De viktigaste reparationsmaterialen kommer med all säkerhet även i framtiden att utgöras av cementbaserad betong eller av cementbruk. Eftersom dessa material normalt baseras på traditionellt cement tar det flera timmar innan härdningsförloppet startar och flera dygn innan reparationen kan belastas. I många fall kan detta inte accepteras, vilket medför att andra mera snabbhärdande material, framförallt polymerbaserade, i stället används. Dessa har dock normalt inte samma goda funktion och beständighet som cementbaserade material. Därför finns det behov av att utveckla reparationsmaterial baserade på snabbreagerande oorganiska cement. Sådana ”ultrasnabba” cement har under senare år utvecklats framförallt i Japan och i

³³ Referenslitteratur är handboken ”No-dig Handbok” utgiven av föreningen Scandinavian Society for Trenchless Technologies (SSTT)

³⁴ Wiberg, A., Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fibre Composites, Doctoral Thesis, TRITA-BKN. Bulletin 72, 2003, ISSN 1103-4270, ISRN KTH/BKN/B--72--SE

Kina. Sedan länge finns även snabbhärdande fosfatbaserade cement vilka har använts t.ex. för reparation av betongvägar och landningsbanor.

Svensk erfarenhet av dessa nya cementtyper är bristfällig. Därför finns behov av att studera hur betong baserad på nya snabba bindemedel fungerar tillsammans med konventionell betong, framförallt när det gäller påverkan på den reparerade konstruktionens beständighet.

13.5 Förstärkning

Av kapitel 9 framgår att behovet av forskning när det gäller den rent mekaniska samverkan mellan konstruktionen och förstärkningsmaterialet inte är så omfattande. Fortsatt utveckling av material och produktionsmetoder kan dock förutses inom områdena fiberkompositer och sprutbetong. Inom dammområdet måste fortsatt utveckling inom sannolikhetsbaserad dimensionering göras för att nå en harmonisering med moderna betraktelsesätt som används vid övrig betongkonstruktion.

13.6 Inventering av reparationsbehov

Av kapitel 12 ”Kommande reparationsbehov...” framgår att kunskapen om reparationsbehovet hos svenska betongkonstruktioner är bristfällig. En analys av behovet inom olika konstruktionstyper, helst kopplad till en detaljerad analys av konstruktionernas utgångskvalitet avseende vattencementtal, cementsort, täckskikt, exponeringsförhållanden, samt ålder, bör vara av stort värde, inte minst för bedömning av vilka utvecklings- och forskningsinsatser som är mest akuta.

13.7 Utveckling av ”reparationsvänliga” betongkonstruktioner

Betongreparationer är oftast komplicerade och därmed dyra. Förutom de rena reparationskostnaderna för material och arbete tillkommer ofta kostnader kopplade till att konstruktionen måste utrymmas eller stängas av under rätt lång tid. Behovet av reparation minskar naturligtvis avsevärt om man redan vid utformningen av konstruktionen ser till att material, detaljutformning och utförande är sådana att livslängden kan förväntas bli hög. Ett alternativ, eller komplement, är att man utformar konstruktionen på ett sådant sätt att starkt utsatta delar är lätta att ersätta utan att konstruktionens eftersträvade funktion försämras. Ett exempel är att bulta fast kantbalkar på broar till den bärande konstruktionen i stället för att de armeras ihop med denna. Ett annat exempel är att man redan vid byggnationen lägger in några extra spännkablarna för att öka konstruktionens ”robusthet”. Det kan finnas många fler exempel på hur man vid planeringen kan ta hänsyn till kommande reparationsbehov.

Ett utvecklingsarbete bör startas med syfte att studera olika möjligheter till reparationsvänliga konstruktioner.

13.8 Upphandlingsformer

Av kapitel 10 framgår att observationsmetoden kan vara ett sätt att slutligt utforma optimal reparationsmetod. De samverkansformer som krävs för att detta arbetssätt ska bli framgångsrikt behöver utvecklas, liksom upphandlingen av sådana ofta komplicerade projekt.

14 EFFEKTIVITETSMÅTT REPARATION

14.1 Effektivitetsmåttens uppbyggnad

De effektivitetsmått som tas fram inom Bygginnovationen är i princip av typen output/input.

14.2 Outputmått

Output i form av reparerade eller förstärkta betongkonstruktioner mäts efter marknadens värdering. Outputmåten utgår ytterst från marknadspriser och återspeglar alltså beställares betalningsvilja och är på så sätt kundorienterade.

Reparation skiljer sig på många sätt från nyproduktion, medan utveckling av outputmått för förstärkning har mycket gemensamt med nyproduktion. Därför behandlas reparation och förstärkning separat här, även om det givetvis förekommer projekt med inslag av både reparation och förstärkning.

Reparation

En rationell beställare av betongreparationer skulle kunna tänkas beräkna nuvärdet av sannolikhetsviktade framtida utfall av en reparationsinsats, men som har framgått av tidigare kapitel var kunskapsluckorna stora under 1970-talet i fråga om långtidsegenskaperna och är fortfarande så stora att det inte är realistiskt att föreställa sig en beställare som utnyttjar den formella teorin för reala optioner. Med framtida utfall avses både kostnader för framtida reparationsinsatser och kostnader för stillestånd under reparation eller reducerad kapacitet i den produktion som bedrivs med byggnadsverket som basresurs. Därtill kommer å andra sidan utfallet att byggnadsverket av andra skäl än nedbrytning kan komma att sluta användas med en viss sannolikhet vid en viss tidpunkt. Skälet kan då till exempel vara att en anläggning har för låg kapacitet i förhållande till det aktuella behovet eller att läget inte längre är optimalt.

I stället kan man utgå från att beställarnas efterfrågan är en funktion av betongarean som ska repareras. En komplicerande faktor är att kostnaden per ytenhet i hög grad är beroende av på hur många åtskilda, kanske svåråtkomliga, platser, som reparation skall utföras. Till detta kommer beställarens bedömning och värdering av tid till nästa åtgärd, d.v.s. vilken kvalitet som reparationen har i den meningen att den förväntas förlänga livslängden mer eller mindre. I normalfallet brukar beställare välja den säkraste tillgängliga reparationsmetoden för att om möjligt undvika framtida avbrott i verksamheten. Tidsaspekten är dock viktig både för valet av den reparationsmetod som ska tillämpas omedelbart – hur stort avbrott eller inskränkningar i den primära verksamheten innebär reparationen – och för beställarens syn på förväntade framtida reparationstillfällen och deras effekter, små eller stora, på verksamheten.

Vi kan då utgå från en ekvation på nivån reparationsprojekt:

$$p = P_j \{ k_0 s A [1 - k_1 T_1 - (C + k_2 T_2) / (1 + i)^t] + k_3 \}$$

med

p = kontraktssumma [SEK]

P_j = prisindex för år j

k_0 = konstant, specifik för objekttypen [SEK per m²]

s = skadade partiets utspridning och svåråtkomlighet (skala 1-3?)

A = reparerad betongarea [m²]

k_1 = konstant [SEK per m² och dag]

T_1 = avbrottstid som motsvaras av aktuell reparation [dagar]
 C = kostnad för en andra reparation vid tid = t [SEK per m^2]
 k_2 = konstant [SEK per m^2 och dag]
 T_2 = avbrottstid som motsvaras av en andra reparation [dagar]
 i = kalkylräntefot (till exempel 0,1, d.v.s. 10 %)
 t = tidpunkt för en andra reparation [år räknat från år j]
 k_3 = konstant (motsvarar fasta kostnader för ett projekt) [SEK]

Det borde vara möjligt att estimeras variabelvärden och konstanter genom multipel regression baserad på data från tillräckligt många reparationsprojekt. I avsaknad av tillräckliga data kan expertuppskattningar utnyttjas.

Exempel 1

Vi skall reparera en konstruktion under 2010. Arbetet börjar 2010-01-01 och slutar 2010-12-31. Vi bortser från kommande reparationer. Det pris ägaren antas vilja betala blir då:

$$p = P_j \{ k_0 s A [1 - k_1 T_1] + k_3 \}$$

P_j = Prisindex för 2010 = 1,00

$T_1 = 365$

osv.

Man kan här fråga sig om storleken på värdeökningen hos det reparerade objektet. Det är osannolikt att ägaren vill betala mer än värdeökningen.

Exempel 2

Vi reparerar en konstruktion under 2010. Arbetet börjar 2010-01-01 och slutar 2010-12-31. Vi tror att en ny reparation behövs 2030. Den börjar 2030-01-01 och slutar 2030-12-31. Hur mycket lägre blir output nu, jämfört med Exempel 1?

$$\Delta p = - P_j k_0 s A (C + k_2 T_2) / (1 + i)^t$$

P_j = Prisindex för 2010 = 1,00

$T_1 = T_2 = 365$

$t = 20$

$i = (\text{antag } 5\%) = 0,05$

osv.

En komplikation är outputmåttets beroende av beställarnas kunskapsläge i beställningsögonblicket. Detta berör livslängdskvalitetsfaktorn. Det är troligt att många av 1970-talets beställare överskattade livslängdseffekterna av de reparationer som då utfördes. Men även idag är våra kunskaper otillräckliga i vissa avseenden. Med andra ord framstår åtgärder ofta som mer effektiva *ex ante* än *ex post*, när man vet hur det gick. Givet vårt nuvarande kunskapsläge är det verkliga effektivitetsökningen sedan 1970-talet större än om vi tar rådande kunskapslägen som utgångspunkt för en jämförelse över en trettioårsperiod.

Arkitektonisk (estetisk kvalitet) hos den reparerade ytan skulle i princip kunna motsvaras av en enkel poängskala baserad på subjektiva omdömen. På liknande sätt kan reparationers på-

verkan på konstruktionens funktion (inkl. flexibilitet i användning) och användares upplevelser av komfort hanteras.

Beställare av reparationer kan tänkas visa ökad betalningsvilja för reparationsprojekt som lämnar avsett resultat med liten spridning i utfallet. Man kan tala om en robust reparationsmetod i den meningen att utfallet är förutsägbart inom snäva gränser.

Negativa miljöeffekter av en reparation är ofta inte prissatta på en marknad. De utgör emellertid en typ av samhällelig effekt som antingen bör tas upp bland outputmått eller inputmått eller delvis som output (t.ex. när en viss reparationsmetod ger lägre miljöbelastning), delvis som input. Skyddsåtgärder av miljöskäl hör definitivt hemma på inputsidan.

Förstärkning

Outputmått för förstärkning (se kapitel 9) blir i hög grad beroende av byggnadsverkets användning. Dessa mått bör alltså hämtas i största möjliga utsträckning från Bygginnovationens analysgrupper för nyproduktion.

14.3 Inputmått

De resurser som förbrukas i reparationsprojekt är antingen interna i företag som tillhör näringsgrenen Byggverksamhet eller är köpta från andra näringsgrenar. Resursmönstret har uppenbarligen förskjutits sedan 1970-talet (till exempel har vattenbilning fått större betydelse, se avsnitt 6.3).

Exempel på typiska inputmått (av vilka en del är relevanta bara för vissa näringsgrenar):

- Arbetstimmar [h]
- Reparationsbetong [m^3]
- Avfall (riven betong) [m^3]
- Polymerer [m^3 , kg?]
- Vatten [m^3]
- Energi [kWh]
- Maskininsats [h]

Orsaken till att effektivitetsmått inte uttrycks i penningbelopp är behovet av att göra jämförelser över en lång tidsperiod, under vilken relativpriserna för olika resurser kan ha förskjutits kraftigt. Med kännedom om enhetskostnader eller enhetspriser det aktuella året kan man uppskatta resursförbrukningen i fysiska termer.

För reparationer är det lämpligt att försöka särredovisa resursinsatser från flera olika näringsgrenar. För att kunna bedöma effektivitetsutvecklingen inom Byggverksamhet sedan 1970-talet är det nödvändigt att ta hänsyn till ökade eller minskade resursinsatser från andra näringsgrenar. Vad gäller måttet Arbetstimmar är det arbetstimmar dels i företag som tillhör Byggverksamhet och dels i företag som tillhör Konsultverksamhet (se ”71” nedan) som bör särredovisas. Inhyrd utrustning hör hemma i näringsgren N (”77” nedan).

C TILLVERKNING

20 Tillverkning av kemikalier och kemiska produkter

23 Tillverkning av andra icke-metalliska mineraliska produkter

D FÖRSÖRJNING AV EL, GAS, VÄRME OCH KYLA**E VATTENFÖRSÖRJNING; AVLOPPSRENING, AVFALLSHANTERING OCH SANERING**

36 Vattenförsörjning

38 Avfallshantering; återvinning

F BYGGVERKSAMHET**M VERKSAMHET INOM JURIDIK, EKONOMI, VETENSKAP OCH TEKNIK**

71 Arkitekt- och teknisk konsultverksamhet; teknisk provning och analys

N UTHYRNING, FASTIGHETSSERVICE, RESETJÄNSTER OCH ANDRA STÖDTJÄNSTER

77 Uthyrning och leasing

Det är inte säkert att inputs från alla dessa näringsgrenar är tillräckligt betydelsefulla, utan det kan ske är tillräckligt med särredovisning, eventuellt i termer av penningbelopp, för tre eller fyra näringsgrenar.

14.4 Effektivitetsmåten för reparation

Effektivitetsmåten är en uppsättning av kvoter mellan output och input. För reparation föreslås att konstruera ett viktat outputmått som innehåller spridningsmättet s , betongarean A , reparationstiden T_1 , den framtida reparationskostnaden C , motsvarande framtida reparations-tid T_2 , kalkylräntan i och tiden t till följande reparation (jämför formeln i avsnitt 14.2):

$$sA[1 - k_1T_1 - (C + k_2T_2)/(1 + i)^t]$$

Med detta viktade outputmått i täljaren kan ett antal effektivitetsmått åstadkommas med olika nämnare:

- Arbetstimmar [h] inom Byggverksamhet (F)
- Arbetstimmar [h] inom Konsultverksamhet (M)
- Reparationsbetong [m³] (från Byggverksamhet, näringsgren C)
- Avfall (riven betong) [m³] (näringsgren E)
- Polymerer [m³, kg?] (från näringsgren C)
- Vatten [m³] (från näringsgren E)
- Energi [kWh] (från näringsgren D primärt, men eventuellt också i eller från andra)
- Maskininsats [h] (inom Byggverksamhet, från näringsgren N)