

CHALMERS



Funktionsupprätthållande åtgärder för förspända betongbroar

En fallstudie av Nötesundsbron

MARICA ERIKSSON

LINDA KJELLHOLM

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avd för konstruktionsteknik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2005

Examensarbete 2005:7

EXAMENSARBETE 2005:7

Funktionsupprätthållande åtgärder för förspända betongbroar

En fallstudie av Nötesundsbron

MARICA ERIKSSON

LINDA KJELLHOLM

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avd för konstruktionsteknik

Betongbyggnad

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2005

Funktionsupprätthållande åtgärder för förspända betongbroar

En fallstudie av Nötesundsbron

MARICA ERIKSSON

LINDA KJELLHOLM

© MARICA ERIKSSON & LINDA KJELLHOLM, 2005

Examensarbete 2005:7

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avd för konstruktionsteknik

Betongbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslagsbild:

Bron över Nötesund. Foto Marica Eriksson 2004.

Reproservice / Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg, Sverige 2005

Funktionsupprätthållande åtgärder för förspända betongbroar

En fallstudie av Nötesundsbron

MARICA ERIKSSON

LINDA KJELLHOLM

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avd för konstruktionsteknik

Betongbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Vägverket äger och förvaltar de flesta större broar i Sverige. De har en väl utarbetad metodik för inspektion och bedömning av broars tillstånd. De måste ständigt fatta beslut om hur och när funktionsupprätthållande åtgärder måste vidtas. Många av de broar som förvaltas är förspända betongbroar. För dessa ställs extra höga krav på konstruktionens kondition och valet av möjliga åtgärder begränsas.

De två viktigaste förändringsprocesserna som leder till skador på förspända betongbroar är karbonatisering och kloridangrepp. Både karbonatisering och kloridangrepp orsakar armeringskorrosion, vilket kan få stora konsekvenser för brons tillförlitlighet och prestanda. Detta gäller speciellt förspända betongbroar.

Kunskaperna om karbonatisering och kloridangrepp, samt resulterande korrosion, är idag betydande på materialnivå; dock finns fortfarande stora frågetecken hur dessa kunskaper på materialnivå kan tillämpas på hela strukturer. Examensarbetet har varit inriktat på val av åtgärder för förspända betongbroar, speciellt med avseende på att säkerställa konstruktionens funktion. Målsättningen med examensarbetet är att ta fram en beslutsmetodik som kan underlätta vid val av funktionsupprätthållande åtgärder. Arbetet är ämnat att ge vägledning, till broförvaltare och konsulter.

Examensarbetet har genomförts i form av litteraturstudier, fältundersökningar, intervjuer samt framtagande av en beslutsmetod. Beslutsmetodiken har tillämpats i form av en fallstudie. Arbetet lägger stor tonvikt på att upprätthålla konstruktionens funktion vid val av åtgärd, snarare än att återställa konstruktionen till ursprungligt skick.

För att tillämpa den framtagna beslutsprocessen har en fallstudie gjorts på Nötesundsbron, belägen utanför Uddevalla. Nötesundsbron har höga kloridhalter i lådbalkens underfläns där det även finns spännstål, men som ännu inte börjat korrodera. Ur det samhällsekonomiska perspektivet skulle ett så litet ingrepp som möjligt vara att föredra medan de höga kloridhalterna talar för ett större ingrepp. Med hjälp av den föreslagna metodiken konstateras att det bästa alternativet för Nötesundsbron är att för närvarande enbart övervaka spännstålet för att kunna upptäcka eventuell armeringskorrosion senare. Om armeringskorrosion uppkommer kan andra åtgärder vidtas senare.

Nyckelord: *Förspända betongbroar, brounderhåll, nedbrytningsprocesser, funktionsupprätthållande åtgärder, beslutsprocess*

Function Maintenance Measures for Prestressed Concrete Bridges

A case study of the bridge over Nötesund

MARICA ERIKSSON LINDA KJELLHOLM

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Structural Engineering

Concrete Structures

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The Swedish National Road Administration owns and administrates most of the large bridges found in Sweden. They use well-developed methods for both inspections and assessments of the bridges' conditions and they must constantly make difficult decisions about how and when a bridge should be repaired. Many of the bridges under SNRA's care are made of prestressed concrete. The use of this type of design alternative demands extra safety for the construction, and limits the choice of possible measures for maintaining the bridge's function through its projected lifespan.

The two most important deterioration processes, which cause damage on prestressed concrete bridges, are carbonation and chloride attack. Both carbonation and chloride attacks cause corrosion in reinforcement, which can have serious consequences on the reliability and performance of a bridge, especially concerning prestressed concrete bridges.

Today, the knowledge about carbonation and chloride attacks, and the resulting corrosion, is good on a material level, but many questions still remain about how to apply this material knowledge on whole structures. This thesis focuses on the choice of maintenance measures for prestressed concrete bridges, with the aim of securing the function of the structure. The aim of this thesis is to develop a method concerning how to make necessary decisions concerning the maintenance measures. The thesis should provide guidance for bridge administrators and consultants.

This thesis is a result of literature studies, field investigations, interviews and the establishment of a decision methodology. The decision methodology has been applied in a case study. The thesis emphasises the maintenance of the functionality of the structure, rather than restoring the structures original state.

The decision methodology is applied specifically to a case study on Nötesundsbron, which is a post-tensioned concrete bridge located outside of Uddevalla. The Nötesunds Bridge has high a concentration of chloride in the lower flange of the box-section. Here, there is also found post-tensioned reinforcement which has not started to corrode yet. By applying the developed decision methodology, it can be established that the best alternative at present for the Nötesunds Bridge is to keep the post-tensioned steel under observation by means of a monitoring system, which would be able to detect corrosion when it initiates. Different repair methods can be applied later if the reinforcement steel begins to corrode.

Keywords: *Prestressed concrete bridges, bridge maintenance, deterioration processes, function maintenance measures, decision methodology*

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	V
ABSTRACT	VI
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	VII
FÖRORD	IX
ORDLISTA	X
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Målsättning	1
2 BROAR OCH BROUNDERHÅLL	3
2.1 Förspända betongbalkbroar	3
2.2 Förspänningsmetoder	4
2.3 Spännsystem	6
2.4 Erfarenheter	10
2.5 Brounderhåll och drift	12
2.5.1 Nedbrytning - översikt	14
2.5.2 Korrosion	16
2.6 Samhällsekonomi	23
2.6.1 Nuvärdesmetoden	23
2.6.2 Samhällsekonomiska modeller	24
3 REPARATIONSMETODER OCH FUNKTIONSUPPRÄTTHÅLLANDE ÅTGÄRDER	26
3.1 Utbyte av befintligt material	26
3.1.1 Byte av spännlina	26
3.1.2 Pågjutning med vanlig betong och sprutbetong	28
3.2 Förstärkningsåtgärder	31
3.2.1 Extern förspänning	31
3.2.2 Betong och armering	31
3.2.3 Fiberlaminat	32
3.3 Behandling av betong	32
3.3.1 Neutralisering genom pågjutning av betong	33
3.3.2 Katodiskt skydd	33
3.3.3 Korrosionshämmare	39
3.3.4 Realkalisation	42
3.3.5 Kloridutdrivning ur betong	44
3.3.6 Efterbehandling (kloridutdrivning och realkalisation)	45
3.4 Förebyggande åtgärder	46
3.4.1 Impregnering	46

3.4.2	Skyddande skikt	47
3.4.3	Hydrofoba material	48
3.4.4	Injektering av sprickor	48
4	UNDERLAG FÖR VAL AV ÅTGÄRD	50
4.1	Förutsättningar	51
4.2	Inverkan på konstruktionens prestanda	52
4.2.1	Nedbrytning av armering	53
4.2.2	Fysisk påverkan av betongen	54
4.2.3	Kemisk påverkan på betong	54
4.3	Val av åtgärd	55
4.3.1	Korrosion på spännstål	57
4.3.2	Korrosion på slakarmering	62
5	NÖTESUNDSBRON - EN FALLSTUDIE	69
5.1	Bakgrund	69
5.1.1	Produktionsmetod	71
5.1.2	Spännsystem	72
5.2	Förutsättningar och påverkan av nedbrytning	73
5.2.1	Tidigare utförda reparationer	73
5.2.2	Nuvarande skick	73
5.2.3	Samhällskostnader	77
5.3	Val av åtgärd för Nötesundsbron- lådbotten i högbron	79
6	SLUTSATSER	82
7	REFERENSER	85

BILAGOR

BILAGA A	BRODATABAS
BILAGA B	SPÄNNSYSTEM
BILAGA C	EXPONERINGSKLASSER
BILAGA D	BESLUTSTRÄD
BILAGA E	TRAFIKANTKOSTNADER NÖTESUNDSBRON

Förord

Detta examensarbete har utförts från september 2004 till januari 2005 vid Institutionen för konstruktion och mekanik, Betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola. Arbetet har gjorts som en del av konstruktionsinriktningen inom civilingenjörsprogrammet, Väg- och vattenbyggnad.

Arbetet har utförts på initiativ av REINERTSEN Sverige AB, Göteborg, och har bedrivits i samarbete med Vägverket i Vänersborg. I arbetet behandlas problematiken vid val av funktionsupprätthållande åtgärder för förspända betongbroar och Nötesundsbron används som en fallstudie. Uppgifterna angående Nötesundsbrons tillstånd har fått från inspektioner, materialanalyser och en klassningsberäkning gjorda vid REINERTSEN Sverige AB.

Vi vill tacka vår handledare Jonas Magnusson, REINERTSEN Sverige AB, och vår examinator och handledare professor Björn Engström, Chalmers tekniska högskola, för handledning, stöttning och idéer. Vi vill också rikta ett särskilt tack till Jonas Andersson, Vägverket i Vänersborg, för information och synpunkter. Ett stort tack också till Anders Lindvall, Institutionen för byggnadsteknologi, Byggnadsmaterial vid Chalmers tekniska högskola, för all hjälp och allt materialkunnande. Vi vill även uttrycka vår tacksamhet till Anki Strand, Vägverket i Borlänge, och Jan Hetmar, Skandinavisk Spännbetong, för all värdefull information. Till sist vill vi också tacka våra opponenter Nils Ramfjell och Matthew Batman vid Chalmers tekniska högskola för deras hjälp och synpunkter under arbetets gång.

Göteborg januari 2005

Marica Eriksson och Linda Kjellholm

Ordlista

Skyddsström: Likström som matas från skyddsanod genom elektrolyten till metallytan för att uppnå en skyddspotential

Elektrod: metall eller annan elektron ledare i kontakt med en elektrolyt och genom vilken elektrisk ström kan gå in eller lämna elektrolyten.

Elektrolyt: medium som kan leda ström genom jontransport. Exempel på elektrolyter är vatten, jord och fuktig betong.

Diffusion: Molekyler rör sig från ett område med hög koncentration av ämnet till områden med låg koncentration.

Alkaliska ämnen: Ämnen som har en basisk verkan.

C3A: C: Kalciumoxid, A: Aluminiumhydroxid.

C3AF: C: Kalciumoxid, A: Aluminiumhydroxid, F: Järnoxid.

Diskontera: Räkna tillbaka, ekonomisk summa.

Kalkylränta: Ränta som används vid beräkningar med nuvärdesmetoden.

ÅDT: Årsmedel-dygns-trafik.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Runt om i världen finns många förspända betongbroar. De första svenska förspända betongbroarna började byggas på 1950-talet och det är först nu som långtidseffekterna på dessa förspända konstruktioner kan studeras. Det har funnits tider då förspända konstruktioners tillförlitlighet har ifrågasatts, bland annat efter ett broras i Storbritannien år 1985. Eftersom spännkablarna är utsatta för höga spänningar är de oerhört känsliga för korrosion och relativt små angrepp kan orsaka stora skador. Det finns olika metoder för att reparera förspända betongbroar beroende på vilka skador som uppkommit och vad som orsakat skadorna. Reparationsmetoderna är dock ofta kostsamma och kan i många fall även vara riskfyllda. Dessutom är det att föredra att reparationerna påverkar trafiken så litet som möjligt, då trafikantkostnaden för samhället är en stor och viktig kostnad för samhället som måste beaktas om bron helt eller delvis måste stängas av under reparationen.

I Sverige finns idag 844 förspända betongbroar i Vägverkets regi, vilket utgör knappt 5 procent av Sveriges totala brobestånd. Många av dessa broar är idag i behov av reparation. För att utvärdera broarnas tillstånd och för att ta fram lämpliga reparationsåtgärder anlitas ofta konsultföretag.

En av dessa förspända broar som är i behov av reparation är Nötesundsbron, strax utanför Uddevalla i Bohuslän. Bron förvaltas av Vägverket, Region Väst, som i sin tur har anlitat REINERTSEN Sverige AB i Göteborg för att göra en tillståndsbedömning och ta fram reparationshandlingar för bron.

Detta examensarbete är utfört hos REINERTSEN Sverige AB i Göteborg med stöd och råd från Vägverket, Region Väst, vilket innebär att utredningen är gjord ur konsult/förvaltarsynvinkel.

1.2 Målsättning

Målsättningen med examensarbetet är att identifiera vanligt förekommande skador hos förspända betongbroar. Vidare skall metodik tas fram som kan underlätta vid val av funktionsupprätthållande åtgärd. Arbetet skall ge en ökad förståelse för och kunskap om drift och underhåll av förspända betongbroar. Metodiken prövas i form av en fallstudie av Nötesundsbron där strategier och metoder direkt kan tillämpas.

Arbetet skall utföras genom att med hjälp av litteraturstudier och interjuver få fram nödvändig information om broförvaltning, nedbrytningsprocesser, reparationsåtgärder och vanligt förekommande skador hos förspända betongbroar. Utifrån detta ska sedan en metodik tas fram som underlättar beslutsprocessen vid val av åtgärder för upprätthållandet av en förspänd bros prestanda. Därefter skall en fallstudie av Nötesundsbron göras, där brons bakgrund skall studeras och dess tillstånd bedömas. Sedan skall metodiken prövas och leda fram till en lämplig åtgärd, alternativt kombination av åtgärder, för Nötesundsbron.

Examensarbetet omfattar endast problem med förspända broar och behandlar ovanstående frågeställningar ur ett konstruktionsmässigt perspektiv mer än materialmässigt. Gällande Nötesundsbron förekommer flera olika typer av skador men i detta examensarbete kommer av tidsskäl endast problemen lådbotten i högbron studeras närmre.

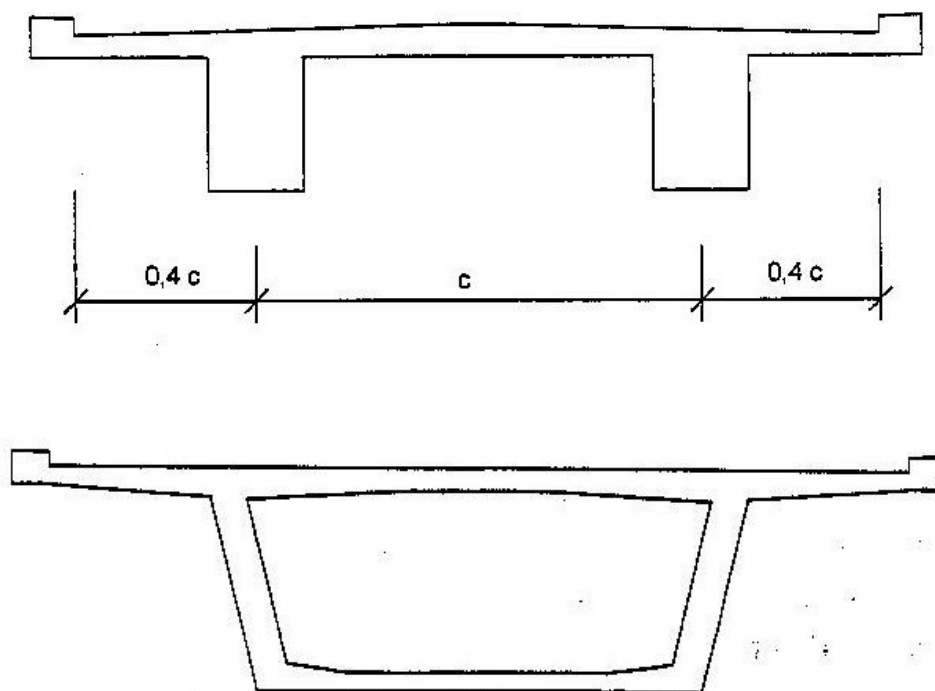
2 Broar och brounderhåll

Sverige är ett land med många sjöar och vattendrag vilket också innebär att det finns många broar. Broarna utsätts ständigt för belastningar från trafik och miljö vilket leder till en successiv nedbrytning. Nedbrytningen kan leda till lägre hållfasthet och bärförmåga men även till andra effekter som estetiska problem. För att säkerställa broarnas funktion krävs kontinuerliga inspektioner och underhåll och reparationer som baseras på väl utarbetade strategier. Vägverket har därför utvecklat rutiner för hur broinspektionerna ska utföras och med vilka intervall inspektionerna ska ske. Flera av Sveriges broar är förspända betongbroar vilket ställer extra krav och sätter begränsningar vid val av livstidsuppehållande åtgärder. I flera länder har det till följd av negativa erfarenheter med förspända konstruktioner funnits en viss tveksamhet till sådana konstruktioner. Med dagens kunskap samt med rätt dimensionering och underhåll är förspända broar dock ett konstruktionsmässigt bra och effektivt alternativ.

Med hänsyn till konstruktionens verknings sätt indelas broar i plattbroar och balkbroar. Dessa kan sedan delas in i undergrupperna rambroar, bågbroar, fackverksbroar, snedkabelbroar och hängbroar beroende på hur stöden är utformade. Varje bro delas också in i en överbyggnad och en underbyggnad. Överbyggnaden tar upp trafiklasten i huvudbärverket (till exempel balkar eller platta) och sekundärbärverket (till exempel brobaneplatta mellan balkar). Underbyggnaden överför sedan lasterna från överbyggnaden till grunden. [Vägverket (1996)]

2.1 Förspända betongbalkbroar

För spännvidder under 25 meter används ofta slakarmerade betongbalkbroar bra, men för spännvidder över 25 meter brukar spännarmerade betongbalkbroar vara att föredra. I spännviddsintervallet 20-30 meter är tillgänglig konstruktionshöjd ofta det avgörande i valet mellan slak- och spännarmerade broar. En vanlig variant av balkbro, med två bärande huvudbalkar, illustreras i figur 2.1. Tvärsnittet utformas ofta så att brobanan utgör en konsol på 40 % av balkarnas c/c-avstånd. Normalt utförs dock inte konsolen längre än tre meter i tvärled. Vid stora spännvidder i längdled eller vid liten tillgänglig konstruktionshöjd används ofta balkbroar med lådtvärsnitt, se figur 2.1. Det är också lämpligt att använda en lådbalkbro om överbyggnaden kommer att utsättas för stora vridande moment, till exempel vid enpelarbroar eller vid starkt plankrökta broar. [Vägverket (1996)]

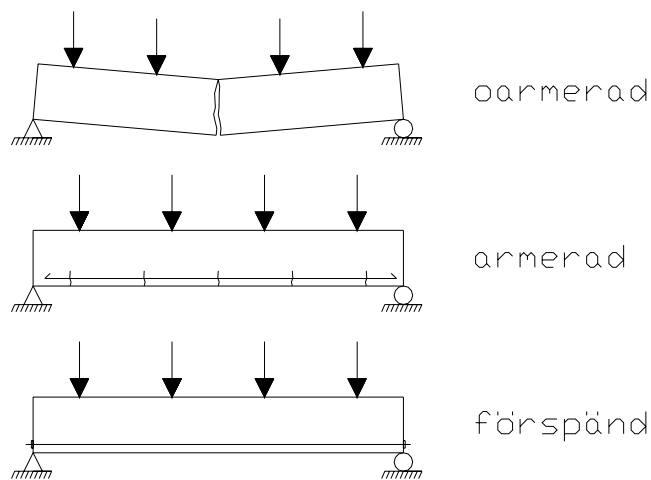


Figur 2.1: Överst: Tvärsnitt av balkbro. Underst: Tvärsnitt av lådbalkbro.

I Sverige finns i Vägverkets regi 844 förspända betongbroar varav 178 är lådbalkbroar. Exempel på stora förspända broar är Skåpesundsbron och Nötesundsbron. Klockestrandsbron över Ångermanälvens norra gren vid Sandö är den första bron i Sverige som utfördes i förspänd betong. Den är byggd 1943 och har utvändigt spännstål. De första förspända broarna med invändigt spännstål i Sverige är bron över Slätbaken vid Stegeborg i Östergötland och en viadukt över järnvägen vid Storvik i Gästrikland, båda byggda 1951. För att ge en bättre beskrivning av hur förspända broar fungerar kommer olika förspänningsmetoder och spännsystem att beskrivas i följande två avsnitt. [Ahlberg, Spade (2001)]

2.2 Förspänningsmetoder

Betong har låg draghållfasthet vilket innebär att sprickor kan uppkomma redan vid mycket låga belastningar. För att bemästra sprickbildningen kan betongen armeras eller förspännas, se figur 2.2. Armering innebär att stålstänger gjuts in i betongen och att dessa sedan kan ta upp dragkrafter då betongen spricker. Armerade betongkonstruktioner är ofta spruckna i bruksstadiet vilket ibland kan vara en nackdel. Sprickbildningen innebär inte att konstruktionen förlorar sin bärförmåga men kan till exempel leda till en ökad risk för armeringskorrosion. Sprickbildningen leder också till en minskad styvhet hos konstruktionen och därmed ökad nedböjning. För att begränsa eller helt förhindra sprickbildningen vid normal belastning kan konstruktionen förspännas. Förspänning ger många fördelar som till exempel minskad nedböjning, minskade sprickvidder, täta konstruktioner, smäckrare konstruktioner och större spännvidder.



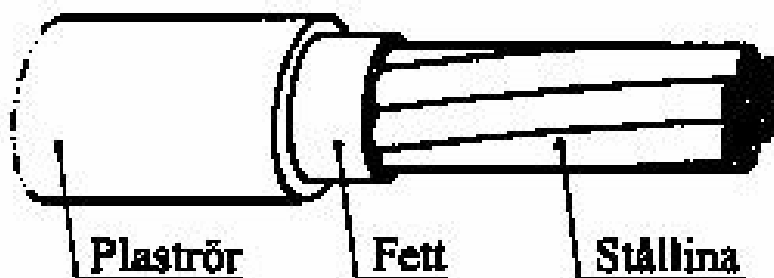
Figur 2.2: Olika konstruktionsprinciper för betongkonstruktioner.

Förspänning innebär att spännstålet i betongkonstruktionen spänns upp och därmed utsätter betongen för en tryckkraft innan lasten läggs på. Det finns två typer av förspänning; förespänning och efterspänning. Förespänning innebär att spännstålet spänns upp innan gjutning. Vid efterspänning spänns spännstålet istället efter att betongen hårdnat. I och med att spännstålet spänns kommer betongen att utsättas för en tryckkraft redan innan lasten läggs på. Detta gör att konstruktionen kan ta upp större snittkrafter innan sprickor uppkommer i och med att dragspänningarna reduceras av den initiella tryckkraften.

Vid efterspänning gjuts rör av metall eller plast in i betongen. I dessa rör finns ospända armeringskablar som sedan, efter gjutningen, spänns upp med hjälp av en hydraulisk domkraft. Kabelrören bör ha ett tvärsnitt som är cirka 2.5 gånger större än stålets tvärsnittsarea. Placeringen av rören kan ofta anpassas till momentkurvan av egentyngd för att minimera effekten av egentyngdsmomentet. Förspänningskraften överförs till betongen genom mekanisk förankring. Vanligtvis spänns linorna från ett håll men kan även spännas från två håll om spänningsförlusterna på grund av friktion eller krökning är markanta. De hålrum som bildas kring förankringarna, de så kallade förankringsfickorna, gjuts ofta igen för att skydda förankringarna. [Petersson, Sundquist (1997)]

Det finns två huvudtyper av efterspänning, nämligen vidhäftande respektive icke vidhäftande spännstål. Vid vidhäftande spännstål injekteras kabelrören vilket innebär att hel eller delvis samverkan mellan stålet och betong uppnås. Injekteringen görs vanligtvis med cementbruk. Vid icke vidhäftande spännstål läggs ett skikt fett mellan röret och armeringen vid tillverkningen, se figur 2.3. Rören kan också injekteras i efterhand med någon form av olja eller fett. Fettet är till för att skydda armeringen från korrosion samt för att minska friktionen. Den största fördelen med icke vidhäftande armering är att det går enkelt och snabbt att montera armeringen samt att

ingen injektering erfordras. Icke vidhäftande spännstål är inte vanligt förekommande hos brokonstruktioner i Sverige. [Petersson, Sundquist (1997)]



Figur 2.3: Exempel på utformning av icke vidhäftande spännstål enligt Petersson, Sundquist (1997).

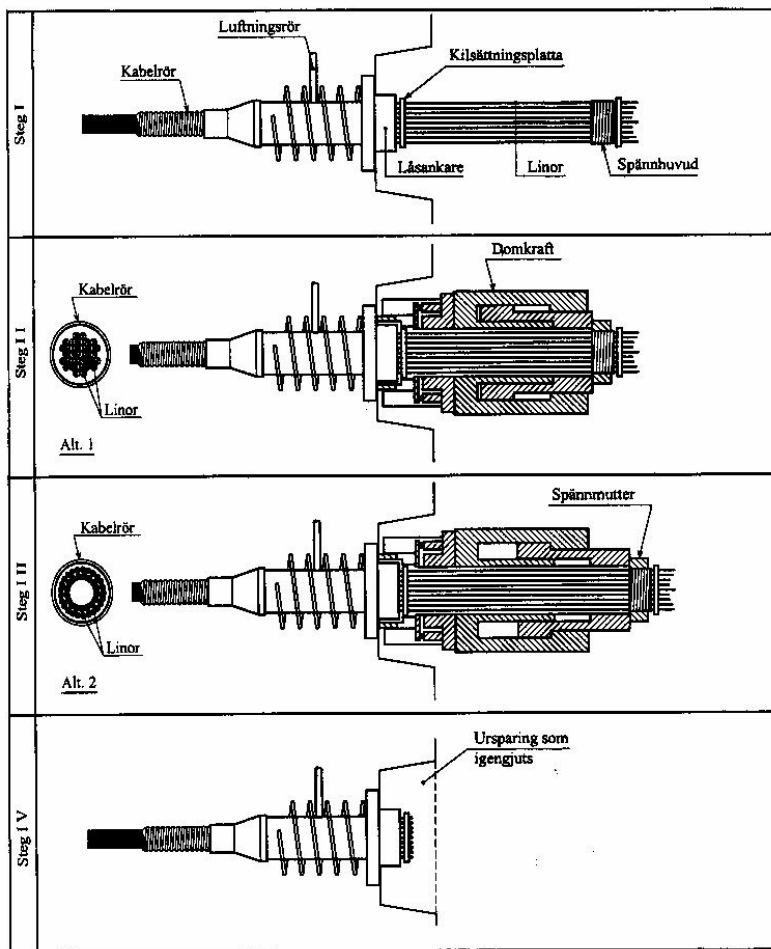
En variant av förspänning är extern eller utvändig förspänning. Kanalerna gjuts då inte in i betongen utan förankras endast i hållpunkter. Kablarna är då mycket lättillgängliga för inspektioner men samtidigt mer exponerade för aggressiva ämnen.

Det är viktigt att spännstålet har hög hållfasthet så att höga initiella ståltöjningar uppnås eftersom förspänningen minskar med tiden på grund av betongens krympning och krypning samt stålets relaxation. Denna minskning får ej procentuellt sett bli för stor. Normalt blir spännförlusten cirka 15-20 procent av initieell förspänning. [Petersson, Sundquist (1997)]

2.3 Spännsystem

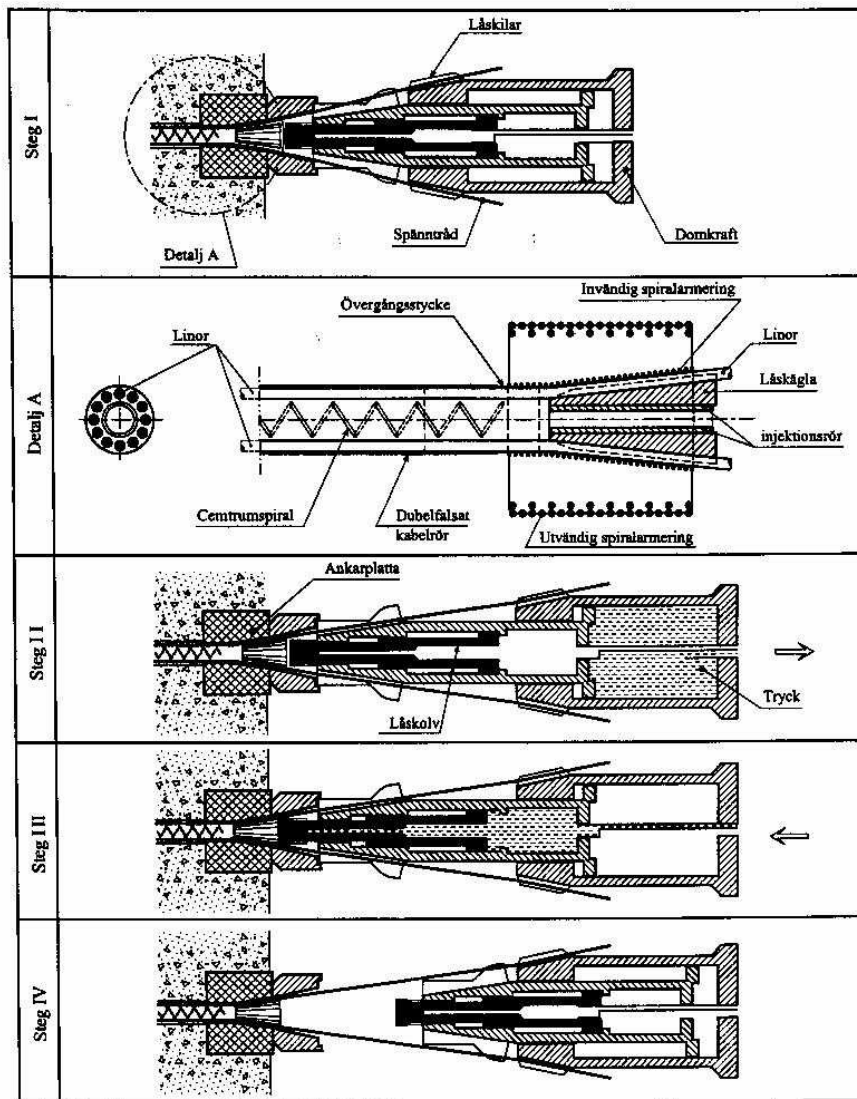
Det finns olika spännsystem tillgängliga på marknaden och de skiljer sig åt dels genom vilken typ av armering som används, dels genom förankringsanordningens utformning. I detta avsnitt kommer fyra av de vanligaste spännsystemen att presenteras. Dessa är BBRV, Freyssinet, VSL samt Dywidag. De olika systemens uppbyggnad och användning kan ses i bilaga B.

Systemet BBRV finns dels i ett äldre system som knappt används längre, dels i ett nyare. Det äldre systemet består av trådar med en diameter på 6 mm som kapats i färdig längd och stukats i ändarna på fabrik. Uppstukningen brukar vanligtvis vara 6 eller 7 mm. Trådarna förankras sedan mot ett gängat låsankare. Systemet kräver stor måttnoggrannhet då både linornas krökning och förlängning vid uppspänning måste integreras i den färdiga kapningslängden. Det nyare systemet, även kallat Cona Multi, består av linor som låses med kilar, se figur 2.4. I båda systemen låser en mutter ankaret mot en tryckplatta i betongen efter uppspänning. [Petersson, Sundquist (1997), Jan Hetmar (2004)]



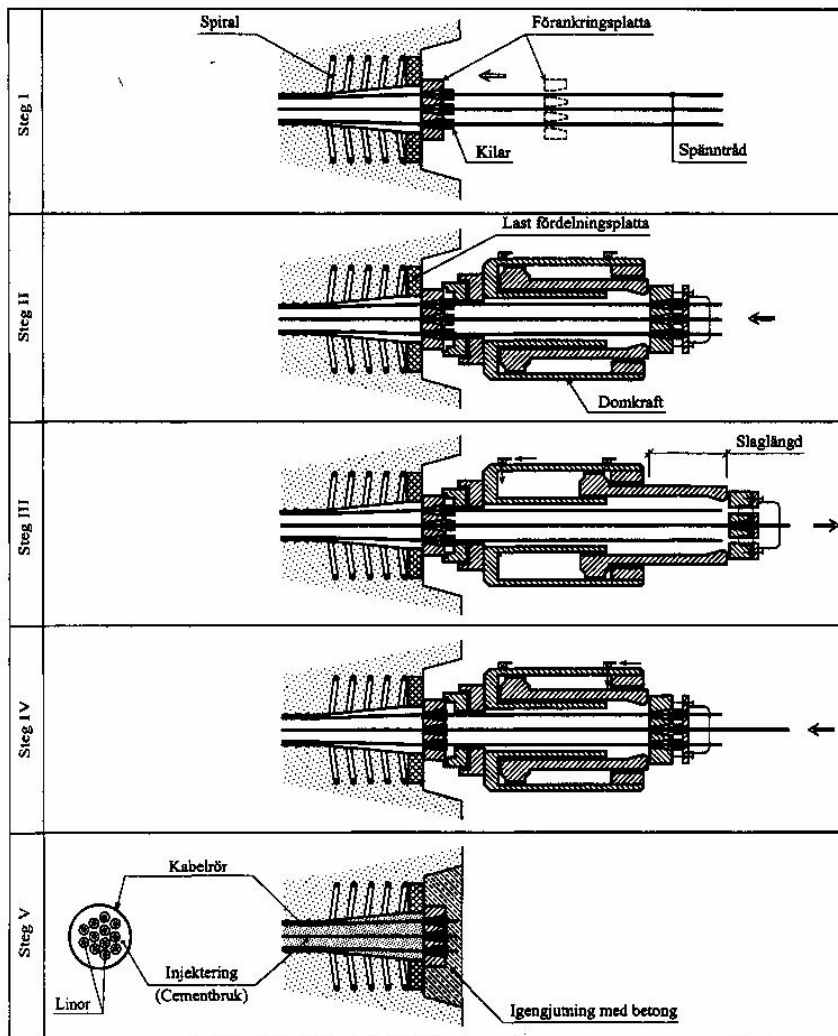
Figur 2.4: Utformning av ändankare och uppspänningsförfarande enligt BBRV.
[Petersson, Sundquist (1997)]

Freyssinet-systemets huvudbeståndsdelar är ett knippe parallella linor, vanligtvis 12 till antalet, samt en förankring. Linorna är cirkulära och placeras ringförmigt runt en spiral som håller dem på plats. Förankringen består av ett cylindriskt block med ett koniskt axiellt hål för kabeln. En låskägla pressar trådarna mot kanten av förankringsblocket och låser trådarna med hjälp av kilverkan, se figur 2.5. Låskägla är försedd med ett injekteringsrör i mitten varigenom kabelkanalen kan fyllas med cement. Förankringen kan för små tråddimensioner tillverkas av armerad betong medan den för större dimensioner görs av stål. Ofta ingjuts förankringen så att den ingår som en naturlig del av konstruktionen med den kan även placeras utanpå den färdiggjutna konstruktionen. [Jan Hetmar (2004)]



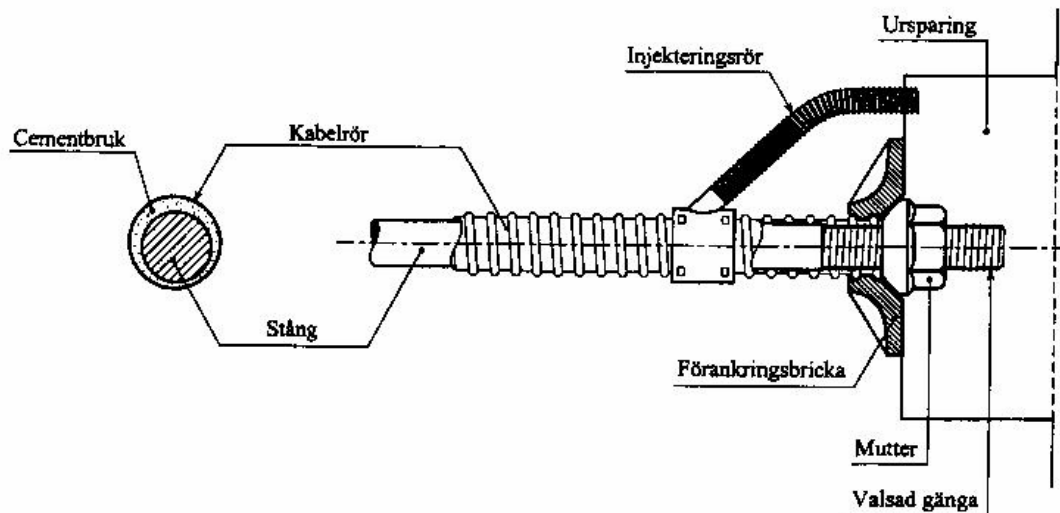
Figur 2.5: Utformning av ändankare och uppspänningsförfarande enligt Freyssinet.
[Pettersson, Sundquist (1997)]

I VSL-systemet låses linorna på samma vis som i Freyssinet-systemet. De lindiametrar som används är 13 mm, 16 mm eller $\frac{1}{2}$ ", se figur 2.6. Skillnaden mellan VSL-systemet och Freyssinet-systemet är bland annat linornas placering i förankringsblocken, blockens utformning samt hur krafterna överförs. [Pettersson, Sundquist (1997), Jan Hetmar (2004)]



Figur 2.6: Utformning av kablar, aktivt ändankare och principer för uppspanning enligt VSL. [Pettersson, Sundquist (1997)]

Dywidag-systemet skiljer sig från de övriga systemen genom att spännstålet utgörs av enstaka stänger. Dessa stänger är vanligen av dimensionerna $\varnothing 26$, $\varnothing 32$ eller $\varnothing 36$ mm. På stängerna finns kallpressade gängor och på dessa sätts en mutter för att förankra kablarna, se figur 2.7. Genom gängornas utformning blir skarvsnitten jämnstarka med stängerna i övrigt. Skarvning av stängerna kan utföras relativt lätt med skarvmuffar. Systemet har därför ofta använts vid konsolutbyggnadsmetoden för broar. [Pettersson, Sundquist (1997)]



Figur 2.7: Utformning av spännehet och ändankare enligt Dywidag. [Pettersson, Sundquist (1997)]

2.4 Erfarenheter

Förspända konstruktioner har inte alltid varit tillförlitliga. Ett välkänt exempel är när bron Ynys-y-Gwas i Wales, Storbritannien, kollapsade år 1985. Bron var en förspänd motorvägsbro som byggts år 1953 och inspekterats regelbundet. Bron byggdes upp genom användandet av segmentteknik, vilket innebär att betongsegment tillverkas på fabrik och sedan sammanfogas på plats. Bron var fritt upplagd och hade ett spann på cirka 18 meter. Anledningen till att bron kollapsade var korrosion hos spännstålet. Korrosionen var i sin tur i huvudsak orsakad av klorider från vägsalter. Utöver detta fanns ett flertal andra faktorer som bidrog till kollapsen. Bland annat gjorde avsaknaden av en platsgjuten platta över balkarna att vatten enkelt kunde nå konstruktionen. Andra orsaker var en icke fungerande vattentätning, ofullständigt skydd av spännkablarna vid elementfogarna, byggfel under produktion och sprickbildning under normal belastning. Även det fuktiga klimatet som rådde vid floden tros ha bidragit till kollapsen. I de kanaler som injekterats på ett korrekt sätt hade ingen korrosion uppstått medan så var fallet då kanalerna var ofullständigt injekterade. Orsaken till kollapsen tros vara den svåra korrosion som angripit spännstålet i brons längdriktning. Spännstålet gick av vilket ledde till att stora krafter fördes över till angränsande tvärgående armering och orsakade en fortskridande kollaps. Detta kan ha satts igång av ett tungt fordon som passerat över bron. Att olyckan inträffade under den kalla perioden av året kan betyda att temperaturen varit en bidragande faktor. [Telford (1988)]

Kollapsen av Ynys-y-Gwas-bron ledde till att de brittiska myndigheterna år 1992 förbjöd nya efterspända brokonstruktioner. Detta förbud hävdes 1996 men gäller fortfarande för segmentproducerade broar på grund av risken för korrosion vid elementfogarna. I andra länder än Storbritannien är det dock fortfarande tillåtet att bygga broar av segmentproducerade betongelement. [Telford (1988)]

Det är inte bara i Storbritannien som problem uppstått med förspända betongbroar. Även i Frankrike, Tyskland, USA och Kanada har problem upptäckts vilket lett till att omfattande inspektionsmetoder och underhållsstrategier tagits fram. Mycket energi har lagts ned på forskning för att utveckla bra produktionsmetoder och mer beständiga konstruktioner. Mycket av de korrosionsskador som uppkommit har i många fall berott på dålig igjutning av kabelkanalerna vilket gjort linorna åtkomliga för fukt. [Taerwe (2001)]

Den utredning som startade i samband med raset av Ynys-y-Gwas-bron visade att de flesta skador som upptäckts hos förspända konstruktioner hade upptäckts av en slump. Skadorna upptäcktes ofta i samband med rivning eller då annat arbete utförts på bron. Slutsatsen blev att bättre strategier för inspektioner och underhåll behövde utvecklas.

Erfarenheter i Sverige

Vid inspektioner utförda på uppdrag av Vägverket har olika brister och fel hittats på de svenska förspända broarna. Dessa problem kan delas upp efter deras orsak enligt Vägverkets brodatabas så som funktionspåverkan, belastning, miljöpåverkan, saltkristallation eller bygg- och underhållsfel. [Vägverkets brodatabas]

I detta examensarbete har informationen i Vägverkets brodatabas studerats för att få en övergripande bild över de skador som upptäckts på förspända betongbroar i Sverige. För att begränsa sökområden har spännarmerade broar med skadad förspänd betong i huvudbärverk använts. Den dominerande brotypen som finns inom området är lådbalkbro. Övriga broar som har skador är av typerna balkbro, plattbro, 0-leds balkrambro och 2-leds balkrambro. De skadade delarna på broarna är i huvudsak balk och platta. De dominerade skadorna på broarna har uppstått av funktionspåverkan vilket har medfört drag- och böjsprickor. Det kan även konstateras att miljöpåverkan är en relativt stor post för lådbalkbroar. Detta kan ses i tabell 2.1. som är en sammanställning av skador som förekommer hos broar i Vägverkets regi. [Vägverkets brodatabas]

Tabell 2.1: Antal skador på förspända broar enligt Vägverkets brodatabas.

Skada	Lådbalksbroar	Övriga broar
Funktionspåverkan	57	8
Miljöpåverkan	9	-
Saltkristallation	7	-
Belastning	6	7
Belastning krympning	6	4
Påkörning	1	5
Brand	-	1
Byggfel	33	10
Övrigt	-	1

Noterbart är även den stora posten av byggfel. Byggfelen utgör i detta fall ca 30% av alla problem och är egentligen problem som inte borde uppkomma. För detaljerad orsak, anledning och område, se bilaga A. [Vägverkets brodatabas]

2.5 Brounderhåll och drift

För att kontrollera broars skick utförs regelbundna inspektioner. Genom inspektionerna ska broarnas fysiska och funktionella tillstånd bestämmas vilket ger underlag för de åtgärder som erfordras, både på kort och lång sikt. Inspektionerna utförs ofta av konsulter och entreprenörer på uppdrag av Vägverket men kan även utföras av Vägverket själva. Det finns idag fem olika inspektioner som kan utföras:

- Huvudinspektion
- Allmän inspektion
- Fortlöpande inspektion
- Översiktlig inspektion
- Särskild inspektion

Syftet med en huvudinspektion är att upptäcka och bedöma brister i konstruktionen som påverkar funktionen eller trafiksäkerheten inom en tioårsperiod. Genom inspektionen vill man också upptäcka brister som kan leda till förhöjda

förvaltningskostnader under tioårsperioden samt kontrollera att kraven som ställts på underhållsreparaturen är uppfyllda. Inspektionen omfattar all delar i bron, även anslutande delar samt maskinell och elektrisk utrustning om sådan finns. Huvudinspektionen genomförs på handnära avstånd. Vid en huvudinspektion utförs även erforderliga mätningar för att bland annat fastställa:

- Bottenprofiler
- Kloridhalt och karbonatisering i betong
- Korrosion på armering
- Sprickor i stålkonstruktioner

Huvudinspektionen ska genomföras med maximalt 6 års intervall. [*Vägverket (1999)*]

En allmän inspektion görs för att inspektera och följa upp de skador som upptäckts under en huvudinspektion men inte reparerats. Inspektionen har även ett syfte att upptäcka brister som skulle kunna leda till bärighets- eller säkerhetsproblem innan nästa huvudinspektion. Den skall även kontrollera att underhållsreparaturen uppfyller de ställda kraven. Inspektionen innefattar samtliga konstruktionselement med undantag av delar som är belägna under vatten. Inspektionen skall göras med maximalt 3 års intervall, inräknat huvudinspektion. Den är dock endast nödvändigt vart tredje år på broar med ett längsta spann längre än 5,0 meter. För mindre broar utförs den vid behov. [*Vägverket (1999)*]

Fortlöpande inspektioner utförs för att upptäcka eventuella akuta problem. Genom dessa upptäcks problem som kan påverka trafiksäkerheten eller konstruktionens tillstånd på kort sikt. Inspektionen görs på bronns översida och bronns anslutande vägbankar. Den utförs kontinuerligt och ofta inom ramen för underhållsreparatur i samband med inspektion av vägnätet. [*Vägverket (1999)*]

Med en översiktlig inspektion är syftet att verifiera att de krav som ställts på underhållsreparaturen är uppfyllda och att underhåll har utförts. För det nationella vägnätet utförs sådana inspektioner minst två gånger per år medan en gång är tillräckligt på övriga broar. [*Vägverket (1999)*]

Genom att utföra en särskild inspektion kontrolleras bland annat maskinell och elektrisk utrustning samt stumsvetsar i primärt bärande stålelement. Den förstnämnda, kontroll av maskinell och elektrisk utrustning, utförs med maximalt tre års intervall medan den andra, kontroll av svetsar, utförs i samband med huvudinspektion. Inspektionerna utförs ofta med hjälp av särskilda undersökningsmetoder, exempelvis ultraljud, radiografi eller termografi. [*Vägverket (1999)*]

Med hjälp av inspektionerna fås ett underlag för bedömning av bronns skick. Bedömningen grundas mycket på erfarenhet och kunskap hos inspektören. Bedömningen syftar till att avgöra var och när någon form av reparation eller andra åtgärder behöver utföras.

Underlaget från inspektionerna används således för att bestämma konstruktionsdelars fysiska tillstånd. Med vetskap om konstruktionsdelarnas fysiska tillstånd bestäms vilken tillståndsklass de tillhör, där följande tillståndsklasser är fastställda:

3	Bristfällig funktion vid inspektionstillfället
2	Bristfällig funktion inom 3 år
1	Bristfällig funktion inom 10 år
0	Bristfällig funktion bortom 10 år (Skadefri vid inspektionstillfället)

Det finns även en huvudtillståndsklass som beskriver hela bronns funktion med hänsyn till bärighet, trafiksäkerhet och beständighet. Huvudtillståndsklassen bedöms utifrån olika konstruktionsdelars klassning och viktas samman till ett värde för hela konstruktionen. Detta görs med hjälp av förbestämda viktningsfaktorer för varje konstruktionsdel. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001) Lindblad (1993)]*

2.5.1 Nedbrytning - översikt

Orsaken till att broar bryts ner och förstörs kan vara många. För att sära på olika sorters nedbrytning brukar de delas in i tre kategorier vilka är funktionsbetingad nedbrytning, miljöbetingad nedbrytning och skadegörelse. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

Med funktionsbetingad nedbrytning avses nedbrytning orsakad av laster. Lastinverkan kan vara i form av överlast, utmattning och successivt ökad sprickbildning. Samband finns mellan funktionsbetingad och miljöbetingad nedbrytning, exempelvis kan en spricka leda till att salter och vatten lättare kan vandra in i betongen och orsaka frost- och korrosionsskador. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

En skadegörelse är exempelvis inverkan i form av påkörning. En idag vanlig skadegörelse är klotter. Ofta avlägsnas klotter med olika saneringsmetoder. Idag finns det inte mycket forskning som visar hur klottersanering och skydd mot klotter påverkar betong men det har dock konstaterats att klotter tränger in ca 2-3 mm i betongen vilken därmed måste avlägsnas vid sanering. Detta kan dock vara svårt med hänsyn till kraven på täckande betongskikt. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

Miljörelaterad nedbrytning av en brokonstruktion i betong kan delas in i tre kategorier:

- Fysikalisk nedbrytning av betong
- Kemisk nedbrytning av betong
- Armeringskorrosion

Den fysikaliska nedbrytningen av betongen kan i sin tur delas in i tre underkategorier:

- Frostsprängning
- Påverkan av frysning och upptining
- Saltkristallisation

Vid frostsprängning tränger vatten in i sprickor eller andra hålrum i konstruktionen. När vattnet sedan fryser till is expanderar det och delar av konstruktionen kan sprängas loss. Frostsprängning är mest aktuell för redan skadade konstruktioner då vatten måste kunna tränga in i sprickor och hålrum. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

Betongen påverkas även av cyklisk frysning. Det behöver dock inte vara på grund av vatten som tränger in i sprickor utan det kan bero på det vatten som alltid finns i porerna hos betongen. Under de tio första cyklerna höjs hållfastheten för betongen men efter ytterligare tio är den åter på samma nivå för att sedan minska. En betong med luftporer minskar risken för frostsprängning. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

Saltkristallisation kan uppkomma i konstruktioner stående i vatten, särskilt i områden med stora tidvattenskillnader och i skvalpzoner. När vattennivån sjunker lämnas salt kvar i konstruktionen. Saltet bildar sedan kristaller vilka växer och kan leda till sprickbildning och spjälkning.

Kemisk nedbrytning av betong kan vara mycket varierande beroende på betongens sammansättning. De viktigaste nedbrytningsprocesserna för betongkonstruktioner i Sverige är:

- Sulfat- och andra saltangrepp
- Alkali-ballastreaktioner
- Urlakning
- Igenfyllning av luftporer
- Kloridinträngning
- Karbonatisering

Kemiskt angrepp av sulfater, som bildar starkt svällande kemiska föreningar, kan skada betongen men är inget större problem för svenska cementsorter och betonger. Inte heller alkali-ballastreaktioner, där alkali från bindemedlet reagerar med ballasten, är särskilt vanligt för svenska broar med hänsyn till de cementsorter som används i Sverige. Det är dock viktigt att beakta risken då reaktionen kan skada konstruktionen svårt. När betongen urlakas reagerar kemikalier med kalciumföreningar i cementpastan varvid lösliga salter bildas som förs ut ur betongen. Exempel på detta kan ses i figur 2.8. Kloridangrepp och karbonatisering beskrivs mer i detalj i följande avsnitt. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

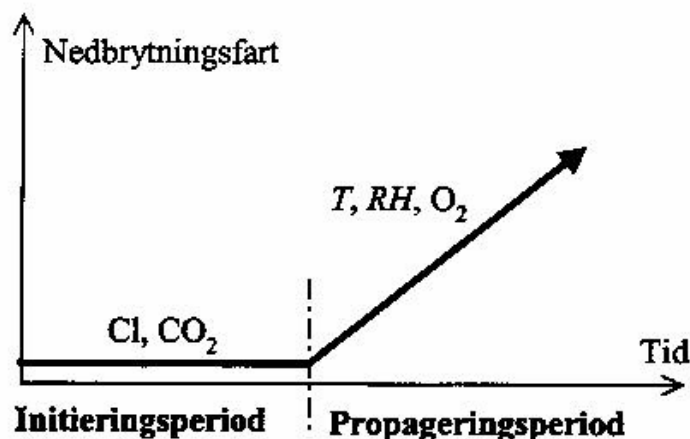


Figur 2.8: Urlakning av betongkonstruktion.

2.5.2 Korrosion

I en betongkonstruktion är armeringsstålet från början skyddat mot korrosionsangrepp i och med att porvattnet är alkaliskt. När armeringsstålet kommer i kontakt med betongens alkaliska porvatten bildas ett stabilt skikt av olika järnoxidföreningar. Armeringsstålet sägs då vara passiverat och korrosionsgraden är nära noll. Vid pH-värden högre än 9,5 är skiktet av järnoxiderna stabilt och det måste brytas ner innan korrosion kan starta. När skiktet har brutits ner och därmed det passiva tillståndet hos armeringen förstörts och övergått i ett aktivt ökar korrosionshastigheten markant. För att kunna få igång denna process måste en förändring av den ursprungliga miljön uppkomma i betongen. Förändringen kan antingen bestå i att miljön i betongen runt armeringen neutraliseras, exempelvis genom karbonatisering, eller att korrosiva ämnen som exempelvis klorider tränger in i betongen och förändrar porvätskan i närheten av armeringen. Dessa två processer kommer att beskrivas mer detaljerat i det följande avsnittet. [Silfwerbrant, Sundquist (2001)]

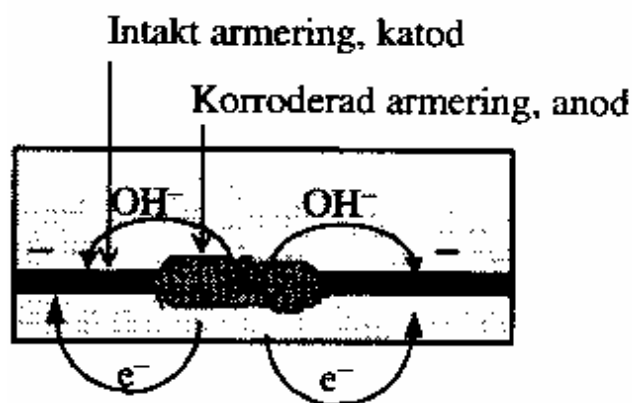
Nedbrytningsprocessen delas vanligtvis in i två faser, en initieringsfas och en propageringsfas. Under initieringsfasen sker ingen korrosion och stålet är fortfarande passiverat men skyddet mot korrosion bryts ned, till exempel genom karbonatisering eller kloridinträngning. Propageringsfasen inleds då stålets passivering förstörs och korrosion startar. Faktorer som påverkar korrosionshastigheten i propageringsfasen är temperatur, fuktighet och tillgång på syre. De olika faserna av stålets nedbrytningsprocess illustreras i figur 2.9 nedan. [Troive (1998)]



Figur 2.9: Nedbrytningsprocessen.

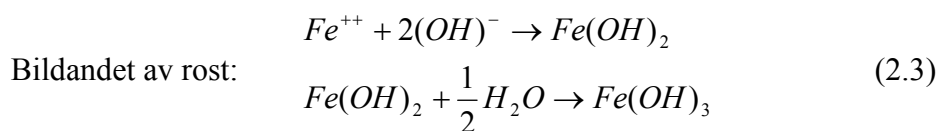
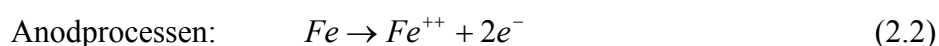
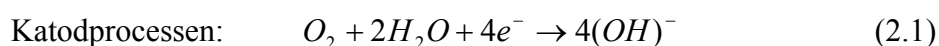
2.5.2.1 Korrosionsprocessen

Korrosion av stål är en elektrokemisk process vilket innebär att stålet löses upp i en elektrolyt med joner som överför elektrisk laddning. Den elektrokemiska upplösningen av stålet kallas för anodreaktion, medan reduktionen av syre kallas katodreaktion, se figur 2.10. Dessa reaktioner kommer att fortlöpa tills jämvikt mellan upplösta järn/hydroxidjoner i elektrolyten och den elektriska potentialen hos stålet har uppnåtts. [Silfwerbrant, Sundquist (2001), Norwegian Public Roads Administration (2004)]



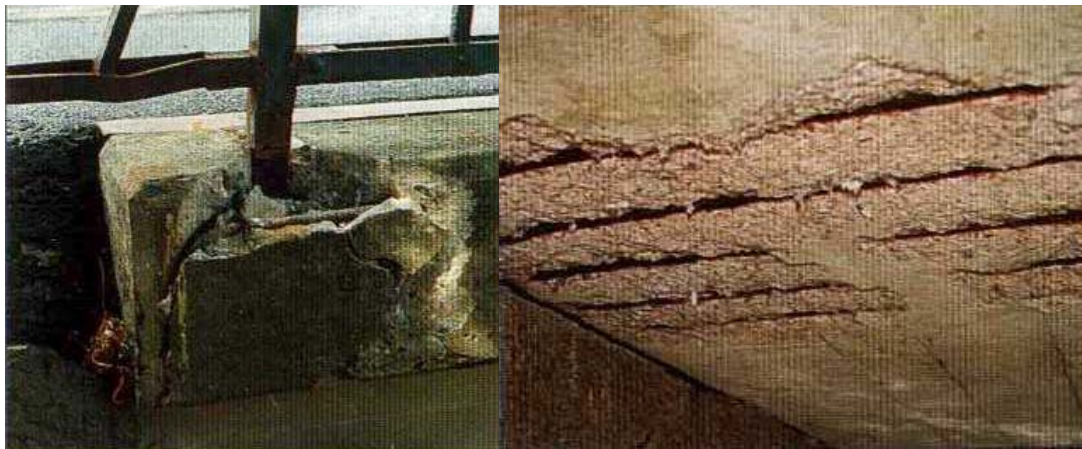
Figur 2.10: Korrosionsprocessen.

Reaktionerna beskrivs nedan:



Ekvationerna visar att förutsättningen för korrosion är tillgång på både syre och vatten. Korrosion på grund av karbonatisering är ofta utbredd över stora ytor medan kloridinträngning ofta ger lokala angrepp på konstruktionen. Mest alarmerande är vanligtvis skador på grund av kloridinträngning då korrosionen snabbt kan accelerera eftersom det är små anodytor i kombination med stora katodytor. En av de korrosionsprodukter som uppstår när armeringsstålet reagerar med vatten och syre är röd-brunt rost med en volym som kan vara 6-7 gånger större än metalliskt järn. Denna volymökning leder ofta till sprickbildning och spjälkning i betongen. Rost är endast en typ av korrosionsprodukt och vilka korrosionsprodukter som uppstår beror helt på

under vilka förutsättningar korrosionen sker. I figur 2.11 visas exempel på konstruktionsdelar drabbade av spjälkning på grund av korrosion. [Silfwerbrant, Sundquist (2001)]



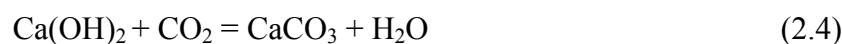
Figur 2.11: Spjälkskador.

2.5.2.2 Karbonatisering

Karbonatisering innebär att luftens koldioxid reagerar med kalken i cementet och omvandlar det till karbonater. Eftersom luften alltid innehåller koldioxid är karbonatiseringen av betongen en ständigt pågående process. Hållfastheten hos själva betongen försämras inte men när karbonatiseringsfronten når armeringsstålet kan det orsaka korrosion. [Silfwerbrant, Sundquist (2001)]

Karbonatiseringen ger en kraftig sänkning av pH-värdet i porvätskan, till ett pH lägre än 9. När fronten når armeringen innebär detta att armeringen inte längre befinner sig i en korrosionsskyddande alkalisk miljö. [Silfwerbrant, Sundquist (2001)]

Betongen reagerar med koldioxiden enligt formeln nedan:



Karbonatiseringsdjupets tillväxt kan förenklat beskrivas enligt nedan:

$$x = K\sqrt{t} \quad (2.5)$$

där x är karbonatiseringsdjupet, K är en konstant som beror av betongen och miljön och t är tiden. Viktiga parametrar som påverkar processen och som vägs in i konstanten K är vct och fuktigheten i betongen. Betong med lägre vct än 0,4

karbonatiseras mycket långsamt och utsätts normalt inte för armeringskorrosion. Betong med högre vct än 0,7 karbonatiseras mycket fort och spjälkning till följd av armeringskorrosion kan uppstå redan efter cirka fem år vid tunt täcksikt. [Silfwerbrant, Sundquist (2001)]

2.5.2.3 Kloridinträngning

Det finns många vanligt förekommande källor till klorider, exempelvis vägsalter, klorerat vatten, havsvatten och vindburna salter. Förr förekom det att klorider tillsattes i betongblandningen som en accelerator. Detta sker dock inte längre. Eftersom klorider finns fritt i naturen kommer de alltid att finnas i små halter i betong. Dessa klorider är dock inte skadliga eftersom de är bundna till cementpastan och finns generellt inte lösta i porvattnet inuti betongen. Kloriderna utgör en katalysator i korrosionsprocessen och tränger in i betongen genom konvektion på ytan, eller genom diffusion. Kloridinträngningen kan vara stor vid marina miljöer eller där tölsalter sprids på vägar. Det värsta fallet med hänsyn till korrosion är i skvalpzonen där blandningen av klorider, vatten och syre är optimal. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Klorider bryter ned det passiva hölje som omger armeringen och orsakar både yttlig korrosion och invändig korrosion vilket kan resultera i en betydande minskning av armeringens tvärsnittsarea. Det är viktigt att notera att kloriderna inte konsumeras i korrosionsprocessen utan fortsätter att bryta ned stålets passiverande skikt. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Halten klorider som erfordras i betongen för att korrosion skall initieras, det så kallade tröskelvärdet, är en funktion av betongens pH. Vid ett pH under 9,5 minskar tröskelvärdet för kloridinitierad korrosion drastiskt. En mer korrekt parameter som styr initieringen av korrosion är antagligen det pH-beroende Cl:OH förhållandet. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Diffusion i betongen medför att klorider, koldioxid och syre transporteras in i betongen vilket ger risk för korrosion. Kloriddiffusion är ett icke-stationärt tillstånd där kloridkoncentrationen ändrar sig i varje punkt i betongen. På länge sikt kan ett stationärt tillstånd uppkomma, det vill säga att kloridkoncentrationen blir konstant. Detta förutsätter dock att ingen tillförsel av klorider sker. [Pettersson (1996)]

Diffusionsprocessen kan beskrivas med hjälp av Fick's andra lag, se Pettersson, 1996 för mer information. Enligt Troive, 1998, finns en approximativ lösning till Fick's andra lag, utvecklad av Sarja och Veskari 1996. Tiden, t , tills armeringskorrosionen startar kan då fås ur:

$$t = \frac{x_{cr}^2}{12 \cdot D_{eff} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{cr}}{C_s}}\right)^2} \quad (2.6)$$

Där x_{cr} är avståndet mellan ytan och armeringen, D_{eff} är den effektiva diffusionskoefficienten, C_{cr} är den kritiska kloridhalten då korrosion startar och C_s är kloridhalten på betongytan. Diffusionskoefficienten beror bland annat av betongens kloridbindningskapacitet och antas oftast vara konstant.

Ett annat sätt för klorider att förflytta sig är som tidigare nämnts genom konvektion. Detta innebär att jonerna flyttas till följd av vattenrörelse. Processen är betydligt snabbare än diffusionsförloppet men sker endast i den yttersta delen av betongen. [Pettersson (1996)]

2.5.2.4 Kritiskt gränsvärde av klorider

Halten av klorider som erfordras i betongen nära armeringen för att det passiva skiktet vid armeringen skall brytas ner och korrosion kunna starta har varit en forskningsfråga under många år. För en speciell betongblandning är tröskelvärdet beroende av följande:

- pH
- C_3A , C_4AF
- Tillsatser
- Uttorkningstid för betongen
- Karbonatisering

Det är många forskare som försökt bestämma tröskelvärdet på kloridhalten. Korrosion hos armeringen orsakas av fria klorider i porvätskan vilket visat sig svårt att hantera. Detta har därför lett till att tröskelvärdet redovisas i högsta halt kloridjoner i förhållande till mängden cement i viktsprocent. Några av resultaten redovisas i tabell 2.2 nedan.

Tabell 2.2: Exempel på tröskelvärden enligt olika undersökningar.

Forskare och år	Tröskelvärden, kloridhalt i förhållande till mängden cement i viktsprocent	Anmärkning
Hauseman 1967	0,06-1	pH = 12,5-13,2
Cady 1978	0,2-0,4	Koncentrationen varierar med pH-värdet
Matsushita 1980	0,8	Undervattenstunnel
Brown 1981	0,4	Varierar med cementtyp
Hansson & Sørensen 1989	0,6-1,4	Varierar med cementtyp, uttorkning, vct, tillsatser osv.
Schiessl & Raupach 1990	0,48-2,02	Varierar med cementtyp och tillsatser.
Pettersson 1994	0,9-1,8	vbt=0,4, pH=14,0-14,8 olika cementtyper och tillsatsmaterial

Som tabellen visar är det stor variation mellan olika forskares resultat, vilket är logiskt då förutsättningarna varit olika. För att bestämma ett kritiskt värde för en speciell betongkonstruktion bör en specifik utredning för den aktuella betongblandningen göras. Tröskelvärdet varierar med olika konstruktioner då den beror av stålets elektriska potential och betongkvalitet. [Pettersson (1992), Pettersson (1996)]

Undersökningar om hur kloridtröskelvärdet varierar med tiden är inte utförda. En teori är att tröskelvärdet höjs då passivskiktet runt stålet blir tjockare men å andra sidan kan en sänkning vara aktuell som en följd av hydroxidurlakning. [Pettersson (1996)]

Vid minskat vct hos betongblandningen kommer det att ta längre tid för kloriderna att nå stålet på grund av en tätare struktur, vilket innebär att ett högre vct är negativt för armeringskorrosion. Vid ett högre vct fås snabbare diffusion av kloridjoner till armeringen, snabbare syreinträngning och lägre elektriskt motstånd. Det finns dock en

god inverkan av ökat vct då den fria vattenmängden är större vilket medför en mer utspädd kloridkoncentration. Det finns inget synbart samband mellan vct och kloridjonkoncentrationen i halt kloridjoner av vikt cement. [Pettersson (1992)]

Den kritiska kloridkoncentrationen för att initiera korrosion är inte så beroende av vilken sort cement som använts i jämförelse med vilket vct som använts. Många menar att C₃A är ett ämne i cementpastan som vid ökad mängd skyddar armeringen men det finns provresultat som visar på att ämnet inte har någon särskild inverkan. Med tanke på detta är det även osäkert om C₄AF i cementpastan har någon påverkan. [Pettersson (1992)]

Genom att tillsätta silika, SiO₂, till cementpastan binds kloriderna lättare. Detta sker av två anledningar. Silikapartiklarna är mycket små vilket ökar ytan där kloridjonerna kan absorberas samtidigt som det minskar genomsläppligheten och därmed försvårar inträngningen av kloriderna. Den andra anledningen är det lägre pH-värdet som påverkar kloridbindningen. Det låga pH-värdet påverkar även negativt då det inte krävs lika hög koncentration av kloridjoner för att korrosion skall starta. [Pettersson (1992)]

Genom att tillsätta flygaska i cementpastan ökar tiden innan korrosion initieras. Anledningen är att flygaskan reducerar porositeten, att pH-värdet höjs och att syret har svårare att tränga igenom vid minskad porositet. Det finns olika flygaskor med olika egenskaper vilket kan medföra en stor variation i effekterna och innebära att ovanstående resonemang inte är tillämpligt. [Pettersson (1992)]

2.5.2.5 Standarder

Högsta tillåtna kloridhalt i betong med förspänningsstål är låg. Enligt den internationella standarden EN-206-1 får den maximala kloridhalten vara 0,1 alternativt 0,2 % av mängden cement. De olika värdena beror på de omständigheter som råder på platsen. Dessa värden kan jämföras med samma värden för betong med vanligt armeringsstål som då är 0,2 alternativt 0,4 %. Det är upp till varje land att välja sin tillämpning av värdena vilket innebär att olika länder kan ha olika gränsvärden. Enligt den svenska tillämpningen av standarden, SS-EN-206-1, är det endast tillåtet med en kloridhalt på 0,1 % av mängden cement i förspända konstruktioner. Det samma gäller i Norge enligt standard NS-3473 och i Finland enligt den finska byggbestämmelsesamlingen, del B4, bilaga 3 (Nationell tillämpning av EN 206-1). [Steinar Leivestad, Tauno Hietanen (2004)]

I Danmark beror maximalt tillåten kloridhalt i förspänd betong på exponeringsklassen som konstruktionen är placerad i. För klasserna X0, XC1-XC4, XF1 och XA1 är kravet 0,2 % medan det för resterande klasser är 0,1 %. För beskrivning av exponeringsklasserna, se bilaga C. [Anette Berrig (2004)]

2.6 Samhällsekonomi

Vid en investering i form av en broreparation måste hänsyn tas till investeringskostnaderna och tidpunkten. Kanske måste reparationen inte utföras omgående utan kan vänta några år vilket kan medföra en kostnadsbesparing. Det är inte bara reparationskostnaden i sig som behöver beaktas utan även trafikantkostnader, vilka kan senareläggas och därmed bli en kostnadsbesparing. [Troive (1996)]

2.6.1 Nuvärdesmetoden

En metod för att kunna avgöra när en åtgärd behövs vidtas och jämföra kostnaderna för olika åtgärd är nuvärdesmetoden, även kallad kapitalvärdesmetoden och diskonteringsmetoden. Vid användande av nuvärdesmetoden diskonteras alla kostnader och intäkter till ett tillfälle, det vill säga att kostnaderna räknas tillbaka till exempelvis investeringstillfället. Detta görs med hjälp av en diskonteringsfaktor, den så kallade kalkylräntan. En nyttokostnadskvot eller nuvärdeskvot kan beräknas för att bestämma avkastning – lönsamhet av en investering. Kvoten kan beräknas på två sätt och det är viktigt att notera vilket sätt som använts:

- Brutto - Nuvärde av nyttoeffekt/nuvärde av anläggningskostnad
- Netto - Kapitalvärde/nuvärde av anläggningskostnader

Med kapitalvärde menas alla intäkter och kostnader för ett projekt som diskonteras till tiden då grundinvesteringen genomförts. Kostnaderna för grundinvesteringen kallas anläggningskostnad medan nyttoeffekter är alla framtida kostnader och intäkter inklusive restvärdet. En investering är lönsam om nuvärdet är större än noll, vilket motsvarar att framtida nytta är större än anläggningskostnaden. [Troive (1996) Olsson, Skärvad (2000)]

2.6.1.1 Nuvärde av enstaka utgifter

I nuvärdesmetoden används en kalkylränta som betecknas med r . B_0 betecknar nuvärdet och B en enstaka utgift/inkomst som faller ut n år framåt i tiden. Nuvärdet kan då beräknas genom följande formel:

$$B_0 = \frac{B}{(1+r)^n} \quad (2.7)$$

Som kan ses i ekvationen går nuvärdet mot noll om antalet år går mot oändligheten och ju högre kalkylräntan är desto snabbare går nuvärdet mot noll. Med metoden kommer alltså projekt med stora begynnelseinvesteringar och lång livslängd att gynnas av en låg kalkylränta medan med en hög kalkylränta kommer projekt med investeringar fördelade i tiden och kortare livslängd att gynnas. [Troive (1996)]

2.6.1.2 Summa nuvärde vid betalning varje år

Vid en betalning varje år betecknas den årliga inkomsten/utgiften med B och summa av nuvärde av B_0 . Genom det kan nuvärdet beräknas enligt följande:

$$B_0 = B * \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \quad (2.8)$$

Med formeln kan ses att nuvärdet av underhållskostnaden går mot ett asymptotiskt värde. Med en hög kalkylränta närmar sig nuvärdet asymptoten snabbare. Asymptoten är sedan årliga inkomsten/kostnaden dividerat med kalkylräntan. [Troive (1996)]

Hänsyn till osäkerheten i en investering kan tas på olika sätt. Ett sätt är att använda en hög räntesats men den metoden missgynnar dock långsiktiga investeringar. En bättre metod är att höja avkastningskravet. Det är dock alltid intressant att göra en känslighetsanalys för att kunna identifiera olika parametrars inverkan. [Troive (1996)]

2.6.2 Samhällsekonomiska modeller

Vid reparation av en vägkonstruktion, såsom en bro, måste trafikant- och samhällskostnaderna som påverkas av reparationen vägas in. Trafikantkostnaden beräknas utifrån olika parametrar såsom väglängd, trafikarbete, medelhastighet, drivmedelsförbrukning, olyckor, skadade samt halter av kväveoxider, kolväten och koldioxid. Kostnaderna beräknas per fordonskilometer och uppdelas på följande poster:

- Restidskostnader
- Fordonskostnader
- Godskostnader
- Olyckskostnader
- Miljökostnader
- Komfortkostnader

Restidskostnaden fördelas mellan tjänsteresor med personbil och lastbil och olika fritidsresor. Fordonskostnaderna delas in i drivmedelskostnader och övriga fordonskostnader. Med miljökostnader avses luftföroreningar, som i sin tur uppdelas mellan kväveoxider, kolväten och koldioxid. *[Troive (1996)]*

I samband med reparation beräknas trafikantkostnaden utifrån extra körd sträcka och ett tidstillägg. I kalkylen separeras kostnader för personbilar och lastbilar då dessa har olika driftskostnader. Om bron måste stängas av helt under reparationen kan detta orsaka mycket stora trafikantkostnader. Därför bör det noga utredas om det är möjligt att utföra reparationen med endast ett körfält avstängt. Om endast ett körfält stängs av måste trafiksignaler användas, vilket inte orsakar någon extra kostnad på grund av längre körsträcka men däremot uppkommer en kostnad till följd av väntetiden som uppstår. Beroende på hur komplicerad trafikomledningen blir och hur hög trafikantkostnaden blir kan även alternativ som en tillfällig bro, en ny permanent bro vid sidan av den ursprungliga eller en ny brodel vara ekonomiskt fördelaktiga ur ett samhällsekonomiskt perspektiv. Ibland kan en broavstängning kräva att en färja sätts in för att underlätta trafikomledningen. Utgiften för färjan drabbar broförvaltaren direkt och räknas därför till produktionskostnaden. *[Jonas Andersson, Vägverket]*

Trafikflödet över en speciell bro kan uttryckas med hjälp av årsmedel-dygns-trafik, ÅDT, som sedan används för att göra en analys av trafikantkostnaderna. ÅDT för olika vägar tas fram genom mätningar av Vägverket. Analysen kan utföras på många olika noggrannhetsnivåer beroende på vilken säkerhet som behövs i kalkylen. Det är ofta mycket svårt att veta trafikanternas utgångspunkt och slutdestination vilket gör det svårt att uppskatta hur trafikflödena kommer förändras i och med avstängningen. Om en noggrannare analys önskas kan statistiska undersökningar tas till hjälp. I en förenklad modell räcker det om endast ett trafikflöde används men om en mer realistisk modell önskas måste trafikflödet fördelas på olika vägar. *[Jonas Andersson, Vägverket]*

Eftersom Vägverket använder nuvärdesmetoden vid utförandet av kostnadskalkyler innebär en senareläggning av reparationen en besparing. Det är därför vanligt att göra en analys där reparationen, och därmed även trafikantkostnaderna, senareläggs fyra år. Svårigheten med att senarelägga en reparation fyra år är att det är komplicerat att bedöma nedbrytningen av konstruktionen under denna period. *[Jonas Andersson, Vägverket]*

3 Reparationsmetoder och funktionsupprätthållande åtgärder

Idag används många olika metoder för att reparera och förlänga livstiden för betongkonstruktioner. Vissa är väl beprövade och dokumenterade medan andra fortfarande är ganska okända och obeprövade. Reparationer i samband med förspända konstruktioner är ofta komplicerade på grund av de stora krafterna i spännstålet. Det kan till exempel vara svårt att veta hur stor del av betongen som kan tas bort utan att förankringarna släpper. Ett annat problem är den oro som finns för användandet av katodiskt skydd vid spännstål. Denna oro grundar sig på fenomenet väteförsprödning som beskrivs närmre längre fram i avsnitt 3.3.2.4.

För att åtgärda problem med korrosion i armerade konstruktioner måste först och främst korrosionsprocessen stoppas. Därefter finns tre olika åtgärdsalternativ. Antingen kan den existerande konstruktionen behållas utan att förstärkas eller så behålls konstruktionen i kombination med förstärkning. Det tredje alternativet är att byta ut och ersätta hela konstruktionen, eller delar av den.

Ibland kan det tillåtas att ingen åtgärd vidtas. Ett exempel på detta är om endast ett par trådar i spännkablarna skadats och skadan kan härröras till misstag eller fel i produktionen. Om armeringen inte är vidhäftande kan de skadade spänneheterna dras ut utan att ersättas. Enligt ACI 1995 kan det tillåtas att den totala förlusten av förspänning, på grund av bortagna och icke ersatta linor, uppgår till maximalt 2 %. *[Nawy (1997)]*

Reparationsåtgärderna kan delas in i fyra olika kategorier efter deras påverkan på och användning av konstruktionen. Dessa fyra kategorier är utbyte av befintligt material, förstärkningsåtgärder, behandling av betong och förebyggande åtgärder. Dessa kommer att förklaras i följande kapitel.

3.1 Utbyte av befintligt material

Om det är stora problem på en konstruktionsdel kan det vara ett alternativ att byta ut materialet som är angripet. Om det bara är betongen som är problemet kan eventuell armering sparas och betongen kan bytas ut medan det i andra fall kan vara nödvändigt att även byta ut armeringen.

3.1.1 Byte av spännlina

Att byta ut spännstål är ofta ett tidskrävande och kostsamt arbete. Hur komplicerat ingreppet blir beror bland annat på om spännstålet är vidhäftande eller icke vidhäftande.

Icke vidhäftande spännstål

Om icke vidhäftande ingjuten armering använts i betongkonstruktionen kan delar av armeringen bytas ut. Linans placering kan lokaliseras med hjälp av en pachometer, ett instrument som mäter betongtjocklek, eller i mer komplicerade fall med röntgen.

I det område som ska behandlas tas betongen bort med hjälp av en tryckluftsborr. Därefter införs speciella förankringar och linan kan sedan kapas med en skärmaskin. Om det inte är möjligt att införa nya förankringar kan linan kapas ändå, men extrem försiktighet måste då vidtas. Efter att endast två trådar i en sjustrådslina kapats kommer linan att börja deformeras plastiskt (flyta) för att sedan gå av. Brottet sker med ett mycket högt ljud på grund av all energi som plötsligt frigörs. I vissa fall kan en kontrollerad upphettning av en del av linan vara ett alternativ att föredra. Den del av linan som upphettas bör vara flera decimeter lång. Upphettningen kan minska energichoken och resultera i en mer kontrollerad kapningsprocess. Detta gäller särskilt om en plötslig avspänning kan slå ut kilar i oåtkomliga förankringar och på så vis omöjliggöra återspanning. [Nawy (1997)]

De trådar som ska ersättas kan dras ut från förankringen. En ny tråd med ett korrosionshämmande hölje kan därefter dras genom den existerande kanalen och en speciell skarvanordning gör att linan kan skarvas och återspännas vid punkten för kapningen. Detta är fördelaktigt när åtkomligheten vid ändförankringen gör att linan inte kan återspännas på vanligt hydrauliskt vis. När linan återspänns gjuts ny betong i det upptagna hålet. Lämpligtvis används en betong med samma hållfasthet och elasticitetsmodul som den redan existerande. Exponerat stål bör tvättas och täckas med korrosionsskydd. Exponerad betong bör vattnas innan den nya betongen gjuts. [Nawy (1997)]

I vissa fall kan en hel lina behöva bytas ut på grund av korrosion. I de fall då åtkomligheten för delningen är begränsad kan en ändförankring få utgöra kapningspunkten. Om det är omöjligt att återspänna linan vid den existerande förankringen kan en ny förankring sättas in. Om linan fortfarande är uppspänd är det mycket farligt att försöka släppa förspänningen genom att använda en tryckluftsborr vid förankringszonen. Istället ska precis som tidigare ett hål i betongen tas upp en bit ifrån förankringszonen. Linan kan därefter kapas genom användandet av en skärmaskin. Återigen måste största försiktighet iakttas. Linan kan sedan tas bort genom att ett grunt hål tas ut vid förankringszonen och omgivande betong tas bort med en hammare. [Nawy (1997)]

Metoden med att ersätta skadade spännlinor är den vanligaste reparationsmetoden för icke vidhäftande spännarmering och den är i regel kostnadseffektiv om antalet linor som behövs bytas ut är begränsat. Det finns dock exempel då samtliga linor i en konstruktion bytts ut. I svenska broar är icke vidhäftande spännarmering inte vanligt vilket innebär att det saknas erfarenhet av metoden i Sverige.

Vidhäftande spännstål

Om betongen och spännstålet är skadat lokalt, till exempel vid förankringszonerna, är det möjligt att byta ut de skadade delarna. Detta kan göras genom användandet av en gängad stångförankring med en mutter, där stången förbinds med spännlinorna med hjälp av en särskild koppling. Kopplingen har ett gängat centrumhål för stången och

tolv periferihål för spännlinorna. Innan reparationen görs måste vidhäftningen mellan spännstålet och betongen bortom det skadade området kontrolleras, då en bristande vidhäftning kan medföra en permanent förlust av förspänningskraft och därmed minskad bärförmåga. Vidhäftningen kan kontrolleras genom att med stickprov undersöka injekteringskvaliteten. *[Artikel: Reparation af forspændte broer- et eksempel (1992)]*

Om injekteringskvaliteten är tillfredsställande kan den skadade betongen och förankringen bort. Därefter stukas ändarna på de enskilda linorna och en ny förankringsplatta, nya stångförbindelser, kabelrör och injekteringsrör monteras. Efter att eventuell ny slakarmering placerats in gjuts området igen. Fem till sju dagar efter gjutningen kan spännstålet återspännas och kabelrören injekteras. *[Artikel: Reparation af forspændte broer- et eksempel (1992)]*

Metoden medför att även den nya betongen blir förspänd, vilket gör att konstruktionen bevarar sitt verkningssätt. Att endast välbeprövade komponenter med kända materialdata används är också en fördel. Dessutom ger systemet en minimal låsförlust vilket innebär att erforderlig uppspänningskraft är mindre än den ursprungliga, vilket minskar risken för brott i linorna. *[Artikel: Reparation af forspændte broer- et eksempel (1992)]*

Metoden har använts framgångsrikt vid en reparation av ett 56 meter långt brodäck hos en bro söder om Limfjordstunneln i Danmark. Spännsystemet hos bron var av typen Freyssinet. Reparationen var möjlig att utföra utan att stänga av trafiken vilket minskade samhällskostnaderna radikalt. Metoden var dock dyr att använda och den totala kostnaden för reparationen uppgick till 75 % av den uppskattade produktionskostnaden för en helt ny bro. *[Artikel: Reparation af forspændte broer- et eksempel (1992)]*

3.1.2 Pågjutning med vanlig betong och sprutbetong

Om betongen hos en konstruktion är skadad kan detta i vissa fall åtgärdas genom en pågjutning av ny betong. Exempel på betongskador kan vara spjälkningsskador och påkörningsskador. Ett annat fall när pågjutning är aktuellt är när förorenad betong behövs tas bort och ersättas med ny. Den nya betongen kan påföras i form av sprutbetong eller genom en pågjutning med vanlig betong.

För att ta bort den dåliga betongen kan exempelvis en tryckluftsborr eller vattenbilning användas. Därefter kan ny betong gjas eller sprutas. Om konstruktionen är förspänd kan även spännstålets kondition kontrolleras i och med att betongen tas bort. Det yttre röret måste då avlägsnas för att frilägga spännarmeringen. Detta innebär dock att spännstålet exponeras för atmosfären vilket gör att risken för rostangrepp ökar. Om kabelkanalerna varit cementfyllda kan även vidhäftningen mellan kabeln och betongen kontrolleras vid friläggningen. Ett problem med denna reparationsprocess är att den nygjutna betongen inte kan få samma förspänning som den ursprungliga betongen. Den borttagna betongen var förspänd medan den nygjutna blir slakarmerad. *[Artikel: Repair of Prestressed Concrete- Re-stressing of Replaced Prestressed Concrete]*

När metoden används måste det säkerställas att den nya betongen får tillräckligt goda egenskaper och hänsyn måste tas till att omgivande ej utbytt betong kan vara den svagaste länken i framtiden. Det bör därför utredas hur djupt och över hur stor yta betongen måste tas bort för att det inte skall mynna ut i en reparation som efter några år visar sig ha otillräcklig kvalitet. Eftersom det oftast är ett större ingrepp i konstruktionen erfordras inte bara att en noggrann utredning görs i förväg utan också att en god kontroll på plats under reparationen. Metoden är bra metod om skadorna är begränsade till ett mindre område och om reparationen är lätt att utföra. Om skadorna är större och allvarigare kan en kombination av att ta bort dålig betong och realkalisation eller katodiskt skydd vara en bra lösning. Även korrosionshämmare kan användas för att förbättra effekten av reparationen. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

En noggrann utredning bör bland annat ge svar på följande frågor:

- Hur utbredd är skadan? Exempelvis: Hur mycket armering är korroderad?
- Hur kommer reparationen att klara sig under avsedd återstående livslängd?
- Vilka möjligheter finns att skydda konstruktionen från framtida skador?

För att säkerställa att arbetet med reparationen utförs på rätt sätt bör utförandet kontrolleras. Kontrollen bör innehålla följande:

- Bestämning av kritiska faktorer som påverkar kvalitén på reparationen.
- Specifikation av teknik och utrustning som används för de kritiska detaljerna.
- Specifikation av olika delmoment och kombinationen mellan dessa.
- Om problem inträffar bör det finnas ett åtgärdsprogram för detta.

Vid borttagning av betong med höga kloridhalter är det extra viktigt att ta bort tillräckligt med betong, annars kommer kloriderna fortsätta att vandra inåt och kan orsaka att armering som ännu inte börjat korrodera korroderar senare. Denna transport beror på strävan mot jämvikt i kloridkoncentration. *[Anders Lindvall, (2004)]*

Metoden har tillämpats på olika broar, bland annat på en 98 meter lång motorvägsbro i Danmark. Brons tvärsektion är en 6 meter bred box med 3 meter konsolplatta på varje sida. Brons ena konsolplatta var skadad på grund av frost och alkaliska reaktioner. Efter en noggrann kontroll kunde det dock konstateras att spännkablarna var oskadade och att vidhäftningen mellan armering och betong var tillfredställande. Betongen i förankringszonen avlägsnades och byttes ut vilket medförde att en ny förankring fick anordnas. Därefter kunde spännarmeringen återigen spännas upp med hjälp av en vanlig domkraftsanordning. *[Artikel: Repair of Prestressed Concrete- Restressing of Replaced Prestressed Concrete]*

3.1.2.1 Sprutbetong

Sprutbetong kan användas för att reparera skador i täckskikt, för att ersätta betong och för att förstärka konstruktionselement och grundkonstruktioner. Om det skadade området på betongen är stort och ytligt kan det vara lämpligt att använda sprutbetong som reparationsmaterial. Sprutbetong är också lämpligt vid tunna pågjutningar eftersom ingen formsättning behövs.

Innan den nya betongen sprutas på är det viktigt att behandla den gamla betongytan väl för att få en bra kontaktyta mellan den gamla och nya betongen. Detta kan göras genom exempelvis sandblästring eller vattenbilning. Sandblästringen och vattenbilningen gör det även möjligt att frilägga armeringen och behandla den med avseende på eventuella rostangrepp. Sprutbetongen appliceras i lager på 20-30 mm. Vid flera lager är det viktigt att föregående lager har härdnat tillräcklig innan det nya lagret påförs. Om totala tjockleken överstiger 50 mm krävs armering som förankras väl så att den stannar i sin position när ny betong sprutas på. För att förstärka sprutbetongskiktet ytterligare, så att det bättre kan ta upp dragspänningar, kan fibrer av exempelvis stål, glas eller plast tillsättas. För att undvika att betongen torkar ut för snabbt kan ett plastskikt placeras på ytan.

Sprutbetongen kan appliceras antingen med en torrblandningsmetod eller med en våtblandningsmetod. Allteftersom nya bättre blandningar har tagits fram har den senare metoden blivit allt mer populär. Hänsyn måste tas för att undvika att luftblåsor bildas bakom eventuell armeringen, speciellt om armeringen ligger i flera lager. Med den torra blandningen tillförs vattnet i sprutmunstycket. Med hjälp av tryckluft transporteras de torra ingredienserna genom en slang och slutligen genom det vattenfyllda munstycket. I munstycket tillsätts en tillstyvnadsaccelerator som gör att betongen fäster och stannar kvar där den appliceras. Vid våtblandningsprocessen blandas alla ingredienser, inklusive vattnet, i en betongblandare innan den sprutas på. [Fuzier (2002)].

I Sverige används idag inte sprutbetong särskilt ofta i samband med broreparationer. Anledningen till detta är dels att den yta som behandlats inte blir estetiskt tilltalande men även för att sprutbetongen har en kraftig krympning relativt vanlig betong vilket kan orsaka problem. Ett annat stort problem har varit att få betongen frostbeständig då ingen luft kan tillsättas blandningen. Dessutom har ibland problem uppstått med vidhäftningen mellan ny och gammal betong.

3.1.2.2 Vanlig betong

Om betongen är förorenad av exempelvis klorider och karbonatisering kan det i vissa fall vara nödvändigt att ta bort betongen och ersätta den med ny. En annan anledning till att ta bort betongen är vid problem med vidhäftningen mellan betong och armeringsstål. Innan den nya pågjutningen görs är det viktigt att armeringen rengörs från all eventuell rost. Detta kan göras med sandblästring eller vattenbilning.

Pågjutning med vanlig betong ger en jämnare yta och ett mer estetiskt tilltalande utseende än vid pågjutning med sprutbetong. Metoden kräver formsättning vilket kan göra den svår att använda vid tunna pågjutningar. Formsättningen gör också att

metoden är mer tidkrävande än vid användande av sprutbetong. Efter gjutningen kan betongen efterbehandlas med exempelvis en skyddande ytbeläggning eller impregnering för att minska risken för nya angrepp av skadliga ämnen.

3.2 Förstärkningsåtgärder

Ett alternativ som bör beaktas är att förstärka en konstruktion istället för eller i kombination med andra åtgärder. Det finns olika sätt att förstärka konstruktionen exempelvis genom extern förspänning, fiberlaminat eller pågjutning med eller utan armering dessa kommer att tas upp i kommande avsnitt.

En förstärkningsåtgärd kan vidtas för att höja brons lastkapacitet så att den får en bärförmåga som är större än den ursprungliga. I detta examensarbete syftar dock ordet förstärkningsåtgärd till en åtgärd som förstärker brons aktuella bärförmåga men inte nödvändigtvis måste innebära en ökning av den ursprungliga bärförmågan.

3.2.1 Extern förspänning

För att förstärka en förspänd konstruktion är det i många fall effektivt att tillämpa extern förspänning. Genom att göra detta kan delar av den gamla förspända armeringen tas bort om så önskas. Den inverkan som extern förspänning ger i bruks- och brottgränstillstånd varierar kraftigt med olika applikationsmetoder. Vid användning av extern förspänning är det extra viktigt att förankringarna säkras, eftersom den förspända armeringen inte är ingjuten i konstruktionen. Armeringen kan förankras i ändarna av existerande balk eller så kan nya förankringsklackar utföras. Dessa ansluts lämpligen till livet på lådbalkskonstruktioner. Metoden med extern förspänning har använts i omfattande utsträckning runt om i Europa och i Nordamerika. Förstärkningen är ofta lätt att applicera och inspektera och den enda nackdelen är dess inverkan på estetiken. Om extern förspänning tillämpas på lådbalksbroar är estetiken inte ett problem då kabelkanalerna kan döljas inuti lådan. *[Taerwe (2001)]*

3.2.2 Betong och armering

Om den befintliga armeringen anses otillräcklig kan ett nytt lager betong med ny armering gutas på. Det är då mycket viktigt att rengöra den gamla betongen innan pågjutningen, för att säkerställa en god vidhäftningen mellan den gamla och nya betongen. Om vidhäftningen blir dålig kan detta leda till att den nya pågjutningen förlorar sin funktion och enbart orsakar en extra belastning på den ursprungliga konstruktionen på grund av dess egentyngd.

Pågjutningen kommer att orsaka ett förändrat verkningssätt hos konstruktionen vilket måste beaktas och utredas. Bland annat kommer tryckzonen och neutralaxeln att påverkas. Mer information om själva gjutningen beskrivs i avsnitt 3.1.2.

3.2.3 Fiberlaminat

För att förbättra broars moment- och tvärkraftskapacitet kan olika fiberlaminat användas. Vanligast är kolfiberlaminat men även användande av glasfiberlaminat förekommer. Förr var det vanligt att använda stålplåtar som förstärkning men då priset för kolfibrer sjunkit har det blivit vanligare att använda kolfiberlaminat istället. Kolfiber är ett material som har hög hållfasthet och samtidigt är mycket lätt. Materialet kan appliceras på den konstruktionsdel som behöver förstärkas antingen som en väv eller som laminat. Kolfiberväv består av enbart kolfibrer som limmas på ytan med ett epoxilim. Kolfiberlaminat innebär att kolfiber redan limmats i en matris som i sin tur limmas mot konstruktionsytan. Kolfiberväven kan direkt limmas mot den aktuella konstruktionen medan laminatet måste formas innan det limmas på plats. Båda metoderna med kolfiber har använts i Sverige, exempelvis vid förstärkning av bropelare i Sundsvall och vid förstärkning av en järnvägsbro i Luleå. Metoden är mycket snabb och smidig att använda. *[Gabrielsson (2000)]*

En nackdel med metoden är att fukt kan stängas in i konstruktionen om stora ytor limmas med epoxi. Detta kan innebära en snabbare nedbrytning av betongen och problem med vidhäftning mellan betong och kompositmaterial. Ett annat problem är att det fortfarande är osäkert hur kolfibrerna reagerar om de utsätts för relativt höga temperaturer, som kan vara fallet om de exempelvis används på en brobanepelare där isolering och beläggning läggs ovanpå. *[Gabrielsson (2000)]*

Glasfiberlaminat är inte lika vanligt förekommande på grund av materialets låga hållfasthet och styvhet. Det finns dock exempel i Kalifornien, USA, där metoden använts framgångsrikt för att förstärka pelare med hänsyn till seismisk påverkan. Glasfiberlaminatet tillverkas för att passa en viss pelardiameter och limmas sedan på plats. Ibland används glasfiberlaminat i kombination med glasfiberlinor. *[Gabrielsson (2000)]*

3.3 Behandling av betong

För att behålla konstruktionen i sitt nuvarande utförande men undvika problem kan betongen behandlas genom olika metoder. Tänkbara metoder beskrivs i följande avsnitt.

3.3.1 Neutralisering genom pågjutning av betong

En pågjutning av betong kan göras för att få klorider att ändra rörelseriktning och vandra utåt. OH-joner vandrar då ner i den befintliga betongen och neutraliserar kloridjonerna. Nackdelen med metoden är att det är svårt att förutsäga hur långt OH-jonerna kan vandra och därmed är osäkerheten stor om hur mycket kloridjoner som kan neutraliseras. Metoden är obeprövad och ingen erfarenhet av dess effektivitet finns därför. [Fuzier (2002)]

3.3.2 Katodiskt skydd

Ett sätt att stoppa korrosionsprocessen är att införa ett katodiskt skydd. Principen för det katodiska skyddet är att skapa en strömkrets som tar bort det anodiska området och gör hela armeringen katodisk, vilket släcker ut de ursprungliga korrosionsströmmarna. För att åstadkomma detta måste ett anodsystem monteras på eller i betongen. Den skyddande strömmen kan tillföras i form av en likströmskälla eller med hjälp av offeranoder. Riktningen på strömmen innebär att negativa joner, vanligtvis kloridjoner, vandrar från stålytan mot den nya anoden. [fib Technical report Bullentin 3 Volume 3 (1999), Silfwerbrant, Sundquist (2001)]

Med ett katodisk skydd förhindras armeringskorrosion både över och under vatten. Ovan vatten är problemet att uppnå en jämn fördelning av den skyddande strömmen då armeringen täcks av betong med ett relativt högt elektriskt motstånd. För nya konstruktioner i mycket aggressiv miljö kan ett katodiskt skydd vara nödvändigt redan från början. [fib Technical report Bullentin 3 Volume 3 (1999)]

Man skiljer på galvaniskt katodiskt skydd och elektrolytiskt katodiskt skydd, även en mix mellan de två metoderna kan förekomma. Kloridutdrivning ur betong är en metod som är närbesläktad med elektrolytiskt katodiskt skydd. [Silfwerbrant, Sundquist (2001)]

3.3.2.1 Elektrolytiskt katodiskt skydd

Vid elektrolytiskt katodisk skydd skapas en strömkrets där hela armeringen blir katodisk. För att åstadkomma detta förses konstruktionen med ett anodsystem. Anoden och armeringen ansluts sedan till en likströmskälla. Armeringen ansluts till minuspolen medan anoden ansluts till pluspolen. Detta medför att strömmen går från anodsystemet mot armeringen varvid de ursprungliga korrosionsströmmarna släcks ut. Processen medför att inga järnjoner kommer att bildas. De vanligaste anodsystemen är polymera kabelanoder, titannät, titanband och elledande färgskikt. För att åstadkomma ett beständigt skydd mot armeringskorrosion krävs en beständig anod och en viss strömtäthet på armeringsytan. Om olika delar av armeringen är isolerade från varandra, det vill säga saknar elledande kontakt, uteblir effekten av det katodiska skyddet. Om den isolerade stängen befinner sig nära anoden kan stängen dessutom drabbas av läckströmskorrosion orsakad av skyddsströmmen. [Silfwerbrant, Sundquist (2001)]

3.3.2.2 Galvaniskt katodiskt skydd

I motsats till det elektrolytiska skyddet bygger inte det galvaniska katodiska skyddet på en strömkälla och pålagd ström utan på ett system med offeranoder. Drivkraften i detta fallet blir istället potentialskillnaden mellan offeranoderna och armeringen. Med andra ord innebär detta att en metall med större benägenhet att korrodera än stål fästs på konstruktionen. Offeranoderna består ofta av zink- eller aluminiumlegeringar. För att skapa en katod ansluts offeranoderna med elektriskt ledande kablar till armeringen. Processen innebär att offeranoderna förbrukas genom oxidation vilket medför att dessa behöver bytas ut med jämna mellanrum. [*Silfwerbrant, Sundquist (2001)*]

3.3.2.3 Olika anodsystem

Det finns olika typer av anodsystem som passar vid olika typer av konstruktioner. Anoderna kan exempelvis vara monterade på konstruktionsdelens yta, inbäddade i konstruktionen eller nedgrävda i marken bredvid konstruktionen.

Titannät med täckande betongskikt

Att använda ett titannät som anod är en mycket beprövad metod. Den är applicerbar över vatten- och marknivå och ger ett jämnt skydd, vilket minimerar risken för överskydd. Överskydd innebär en okontrollerad och kraftig potentialsänkning vid stålet som leder till att vätejoner reduceras till vätgas, vilket i sin tur ger en risk för väteförsprödning. [*Fuzier (2002), fib Technical report Bullentin 3 Volume 3 (1999)*]

Titannätet utgör en anod och läggs på betongens yta. Därefter gjuts ett tunt lager betong över nätet för att säkerställa elektrolytisk kontakt mellan anoden och armeringen. Vid behov kan flera lager användas för att skydda en större armeringsyta. Flera lager kan dock ge problem med skiktning och det tillför dessutom extra vikt till konstruktionen. [*Fuzier (2002), fib Technical report Bullentin 3 Volume 3 (1999)*]

Titannäten tillverkas genom att titanstänger läggs i ett rutmönster och besprutas med en blandad metalloxid. Nätet bränns sedan in i en ugn så att metalloxiden bildar ett slags keramiskt hölje. Dessa nätanoder är lämpliga för stora betongområden. [*Norwegian Public Roads Administration (2004)*]

I den europeiska standarden, EN 12696, finns riktlinjer för användandet av titannät med metalloxidhölje. Den långvariga strömtätheten bör begränsas till maximalt 110 mA/m² men under korta perioder, det vill säga månader, kan strömtätheten tillåtas vara upp till 220 mA/m². Anledningen till att en sådan restriktion finns är att cementen i området kring anoden skadas av hög strömstyrka. Tillverkarna producerar idag anodnät i ett stort antal olika utformningar vilka ger olika strömstyrkor där 15 mA/m², 25 mA/m² och 35 mA/m² är de vanligaste. [*Norwegian Public Roads Administration (2004)*]

Anodiskt rutsystem med ursparingar

Anodiskt rutsystem med ursparingar är kvadratiska hål, vanligtvis med dimensionen 25x25 mm, som tas upp i betongytan. I hålen läggs sedan täta rutnät eller band av titan. Hålen återfylls sedan med cementbruk. Risken för skiktning är med denna metod mycket liten och livslängden kan höjas genom att använda en större anod. Minsta täcksikt på betongen kan påverka jämnheten hos strömfördelningen. [Fuzier (2002)]

Vatten/jordanoder

Metoden bygger på ett anodsystem bestående av beprövade material såsom järn med hög kiselhalt, bly eller silver. Alternativt kan platinaöverdragna titanstavar med en diameter på 3-6 mm användas. Dessa stavar läggs i ett ledande återfyllnadsmaterial, kapslas in i geotextil och läggs i en grop i marken, vid sidan av konstruktionen som ska skyddas. Vid grunt vatten är anoden nedgrävd i marken medan den i havsvatten kan monteras direkt på bropelare i ett skyddande rör, för att skyddas vid en eventuell påkörning av båt. Anoderna är drivna av en likströmstransformator vilket medför att stora armeringsareor hos kraftiga betongkonstruktioner kan skyddas. Systemet används mestadels i kombination med andra system för att minska problem med strömförluster. [Fuzier (2002)]

Elektrolytiskt band/bruk

Ett elektrolytiskt band/bruk som skapar en elledande väg till betongen lindas runt en pelare eller påle följt av ett titannät. Ytterligare ett lager av det elektrolytiska bruket läggs runt titannäten för att säkra en kontaktyta hos den yttre sidan av anodnätet. Mekaniskt skydd anordnas i form av motståndskraftiga polyeten- eller fiberglasomslag. Systemet är svårt att montera på stora konstruktionsdelar och är känsligt för stötlaster. Dessutom påverkar de konstruktionens utseende. [Fuzier (2002)]

Elektrolytiskt bruk/panel

Metoden bygger på samma princip som ovanstående metod men i detta fall är det en förtillverkad stöttålig fiberglasskiva som bultas fast. Detta system är användbart på balkar och pelare och är lätt att installera. Metodens nackdel är tjockleken på skivan och i och med detta dess estetiska påverkan. Brukets alt panelens livslängd måste även beaktas. [Fuzier (2002)]

Inre anodsystem

Metoden bygger på att anoden byggs in i betongen. Detta görs genom att hål med en diameter på 12 mm borrar in till ett djup av 300-400 mm. Hållängden beror av

erforderlig anodlängd och av vilken konstruktionsdel som ska skyddas. Ett grafitbaserat återfyllnadsmaterial eller en konduktiv gel injekteras i hålet och sedan isättes 3 mm platinaöverdragna titanstavar. Systemets livslängd, som av tillverkarna uppskattas till 20-30 år, beror i huvudsak på konsumtionshastigheten hos det grafitbaserade återfyllnadsmaterialet. Metoden är mycket kostnadseffektiv för större element såsom balkar, pelare och pirar, medan den är mindre passande för tunna sektioner. [Fuzier (2002)]

Katodisk skyddssystem med sprayad zink

Sprayad zink är ett offersystem som är mycket enkelt och har en låg investeringskostnad. Genom att spraya på ett 0.4 mm tunt lager av 99,9 % rent zink kan ett skydd på 12 till 15 år åstadkommas. Genom att med jämna mellanrum bättra på zinklagret kan livslängden förlängas. Systemet kan även installeras som ett inbäddat strömsystem och en skyddande beläggning kan användas för att ytterligare förlänga livslängden på det katodiska skyddet. I kombination med sprayad zink brukar andra offeranoder användas för att skydda de täckta områdena samt för att minska strömförlusterna. [Fuzier (2002)]

System med offeranod av zink

Anodsystemet med zink kan antingen vara förankrat direkt på pelaren under vattenlinjen eller nergrävd i marken för att skydda området under vattenytan samt skvalpzonen. Verkningsgraden hos metoden varierar kraftigt beroende på styrkan hos den ström som avges från anoden, polarisationsgraden hos det vattentäckta området och tidvattenvariationer. Överskydd av armeringen är inget problem då zinkanodens strömgivning är självreglerande med en låg spänningsstyrka. [Fuzier (2002)]

3.3.2.4 Sidoeffekter vid användning av katodiskt skydd

Genom att introducera ett katodiskt skydd uppstår även vissa sidoeffekter. En av de negativa effekterna är att det katodiska skyddet kan orsaka uppkomst av väte vid katoden. Om den uppnådda potentialen är tillräckligt negativ kan väte utvecklas på stålytan och sedan absorberas. Detta kan orsaka att stål utsatt för påkänning blir sprödare med tiden. Risken för försvagning på grund av lokal korrosion är vanligtvis mycket högre än risken för försprödning av väte orsakad av katodiskt överskydd. Inga fall med försprödning av armeringsstålet hos existerande konstruktioner på grund av väte har dock rapporterats. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

En annan negativ effekt av det katodiska skyddet är att det kan öka korrosionshastigheten hos närliggande konstruktioner som befinner sig i samma elektrolyt. Detta måste beaktas under projekteringsstadiet. Möjligtvis kan de båda konstruktionerna behöva isoleras från varandra för att dämpa potentialskillnaderna. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Ytterligare en negativ effekt är att den lokalt ökade alkaliniteten kan orsaka alkali-silika reaktioner. Detta är dock mycket ovanligt för katodiska skyddssystem som drivs med normala strömstyrkor, det vill säga 0.1-20 mA/m². [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Det finns också positiva sidoeffekter med att använda katodiskt skydd. Bland annat så leder den kemiska reaktionen vid anoden till att hydroxidjoner produceras. Detta innebär att betongens alkalinitet i detta område lokalt kommer stiga och att morfologin i kontaktytan mellan stål och betong kan ändras. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

En annan positiv sidoeffekt är att negativt laddade kloridjoner kan förflyttas bort från stålytan. Med ett visst strömflöde kan kloridjonerna hållas kvar på ett visst avstånd från stålytan. Ytmonterade anoder kan till och med reducera kloridinträngningen bortanför anoden och betongytan. Detta beror på att den positivt laddade anoden attraherar de negativt laddade kloridjonerna. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

3.3.2.5 Val av anodsystem

Idag finns flera olika anodsystem tillgängliga på marknaden. Inget av dessa är perfekt utan alla har sina fördelar och nackdelar. Valet av anodsystem beror av exempelvis erforderad strömstyrka, estetik, önskad livslängd, vikt, underhållsmöjligheter, investeringskostnad och monterings-tid. I tabell 3.1 nedan visas fördelar och nackdelar med de vanligaste kommersiella anodsystemen.

Tabell 3.1: Jämförelse av olika anodsystem.

+++ : Uppfyller kraven mycket bra

++ : Uppfyller kraven

+ : Användningen begränsad och förbättringar är omöjliga eller för kostsamma

	Titannät med täckande betongskikt	Inre anodsystem	Konduktiv färg	Rutssystem med ursparingar	Sprayad zink	Elektrolytiskt bruk
Strömstyrka	+++	++	+	++	+	++
Strömfördelning	+++	++	+	+	++	++
Estetik	Synligt täckande skikt	Synliga hål	Synlig färg	Ursparingar synliga	Synlig metall	Synligt bruk
Miljöutsatthet	+++	+++	+	++	+	++
Livslängd	+++	++	+	++	+	++
Tillskottsvikt/ ändrad dimension	++-+++ (beror av skiktets tjocklek)	+++	+++	+++	+++	++
Underhåll	+++	++	+	++	+	++
Övervakning	++	+++	+	++	+	+

För att kunna kontrollera systemen krävs någon form av övervakning. Det är mycket viktigt att armeringens elektrodpotential är tillfredsställande så att det katodiska skyddet verkligen fyller sin funktion. Enligt den europeiska standarden är endast en kontrollmetod tillåten att användas, även om flera kontrollmetoder finns. Den tillåtna metoden bygger på potentialmätning med referenselektroder som gjuts in i betongen. De grundläggande kraven på referenselektroderna är att de är stabila och beständiga. Flera års stabilitet krävs för att potentialen ska kunna mätas. För att mäta potentialförändring krävs istället endast ett par dagars stabilitet. De vanligaste referenselektroderna i Skandinavien är gjorda av magnesium/magnesiumdioxid och silver/silverklorid. Även titannät med metalloxidöverdrag kan användas för mätning av potentialförändring. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Den avgörande faktorn för hur effektiva referenselektroderna är, är deras placering och hur väl de kapslats in i bruket. Om det finns brister i monteringen kommer

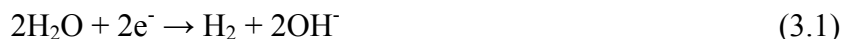
resultaten att bli missvisande. Annan utrustning som använts för dessa mätningar är korrosionsplattor och oisolerade stänger. Båda dessa tekniker kräver en avancerad tolkning av de data som erhålls vilket har inneburit att de idag inte används i kommersiellt syfte. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Automatiska datakontrollerade övervakningssystem tillåter en mycket mer detaljerad kontroll, där aktuell data från referenselektroder kan fås direkt. Detta innebär att kontrollen av det katodiska skyddet blir både säkrare och bättre. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

3.3.2.6 Väteförsprödning

Om väte tränger in i armeringsstålet kan det orsaka så kallad väteförsprödning. Försprödningen beror på att vätet låser fast dislokationer i metallgittret och därigenom försvårar rörelser i stålet. Detta leder under hög dragspänning till sprickbildning i stålet. *[Camitz, Pettersson (1991)]*

Det finns olika anledningar till att atomärt väte bildas. En anledning vid användning av katodiskt skydd är om potentialsänkningen sker okontrollerat till mycket låga potentialer, så kallat överskydd. Om potentialen är lägre än omkring $-1,15$ V börjar vätejoner reduceras till vätgas och ett mellansteg i den processen är just atomärt väte. Processen då atomärt väte bildas kan beskrivas genom nedanstående två reaktioner:



Väteförsprödning i samband med katodiskt skydd är ett relativt sällsynt fenomen och det finns inga kända fall i samband med förspänd armering. Det är dock ett fenomen som väcker mycket oro på grund av de svåra konsekvenser det kan orsaka. *[Camitz, Pettersson (1991)]*

3.3.3 Korrosionshämmare

Korrosionshämmare är ett medel som används för att förlänga initieringstiden för korrosion. Korrosionshämmare kan även minska korrosionshastigheten när korrosionen har startat. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Korrosionshämmare är medel i pulver-, gel- eller flytande form som minskar hastigheten av korrosionsreaktionen då de fungerar som ett kemiskt blockerande lager nära armeringen. Detta ökar tiden till första korrosionsangreppet och minskar fortlöpandet av korrosionsprocessen. Medlen kan antingen blandas direkt i betongmixen eller läggas på ytan av konstruktionen. Det finns tre olika typer av korrosionshämmare; anod-, katod- eller multihämmare där multihämmaren är den

bästa. Korrosionshämmare förbrukas med tiden och är en metod som bara fungerar bra vid små doser av klorider. [Fuzier (2002)]

Med en anodisk korrosionshämmare används en kemisk substans som reducerar anodreaktionen. Detta medför att korrosionspotentialen ändras till ett mer positivt läge. Vid användning av anodiska korrosionshämmare är det viktigt att använda tillräcklig koncentration av hämmaren. I annat fall kommer den katodiska arean bli för stor vilket medför en korrosionsökning på den anodiska sidan. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Vid katodisk korrosionshämmare reduceras den katodiska reaktionen genom syrereduktion eller väteutdrivning, vilket medför att korrosionspotentialen ändras till ett negativt värde och pH-värdet höjs. Vid multihämmaren minskas både reaktionen vid anoden och katoden. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

3.3.3.1 Mätare och kontroll av korrosionshämmare

Det finns idag inga standardiserade testmetoder för att utvärdera verkningsgraden av korrosionshämmare. Det finns dock två testmetoder för att kontrollera hur effektiva korrosionshämmarna är. Den ena är att mäta koncentrationen av hämmare i betongen och direkt på ytan och den andra är att mäta korrosionsgraden på armeringen. Ett system som mäter korrosionsgraden är oftast det bästa sättet att kontrollera korrosionshämmarens effektivitet. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

I vissa fall kan porvatten som pressats ut ur betongen analyseras, men detta görs mest för att kontrollera diffusionen av hämmare i betongen. Det bör dock beaktas att det kan vara svårt att få ut porvatten ur betongen. Ett problem är också att den kemiska processen är väldigt komplex och inte lätt att beskriva. Den största nackdelen med användandet av korrosionshämmare är att det inte finns så mycket erfarenhet av det i praktiken. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

3.3.3.2 Olika typer av korrosionshämmare

Den huvudsakliga skillnaden mellan ytpålagda korrosionshämmare och korrosionshämmare som tillsätts betongblandningen är att de ytpålagda måste vandra ner genom betongen för att nå armeringen. Ytpålagda korrosionshämmare är ett sätt att bromsa korrosionsprocessen hos existerande konstruktioner, medan de korrosionshämmare som tillsätts betongblandningen är lämpliga vid nybyggnation. Om korrosionshämmaren tillsätts till betongblandningen bör ämnets verkningsätt beaktas. Armeringsstålet börjar vanligtvis inte korrodera förrän efter 20 till 30 år och därför måste korrosionshämmaren stanna kvar i betongen denna tid innan den kommer att vara verksamt. Det måste även beaktas att ämnet kan läcka ut och bli kemiskt instabilt eller att det under blandningen med vatten kan inverka negativt med avseende på betongens hållfasthet. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

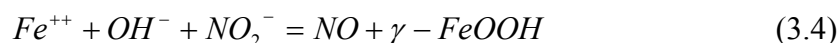
Det har visat sig att resultaten från ytpålagda hämmare har en sämre effekt då transporten genom betongen ned till armeringen har varit varierande. Metoden är dock

förhållandevis billig och medlet är relativt lätt att applicera genom att spraya, rolla eller måla på. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Nitriter och nitrater

Metoden med att använda nitriter, och då oftast kalciumnitriter, har använts bland annat i USA. Metoden är i dagsläget förbjuden i största delen Europa på grund av nitriternas giftighet den har dock nyligen tillåtits i Tyskland. Metoden har haft en bra effekt i USA på bland annat parkeringsdäck, motorvägar och marina konstruktioner, där den har hämmat korrosionsprocessen både vid karbonatisering och vid kloridinträngning. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Metoden bygger på att det passiva oxidlager som omger armeringen innan korrosion, och som bryts ner vid korrosion, kan återställas. Detta sker genom följande reaktioner:



Nitriterna oxiderar de reducerade järnjonerna och förhindrar dessutom en fortsatt reduktion vilket motverkar korrosion. När korrosion på grund av klorider ska behandlas har det visat sig att halten nitriter i förhållande till klorider bör var 0,5 till 1,0. Det har även påvisats att relativt höga doser har en positiv verkan. Nitriterna kan appliceras både i betongblandningen eller som ett ytlager. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Det är även vanligt att använda kalciumnitrat, $Ca(NO_3)_2$, som har liknande egenskaper som kalciumnitrit. Den största skillnaden är att kalciumnitrat inte är giftigt. Det finns dock väldigt lite data samlat om nitrats verkan och effektivitet i praktiken.

Aminoalkoholer

Eftersom kalciumnitrit i dagsläget är förbjudet i Europa på grund av dess giftighet har andra preparat med samma korrosionshämmande egenskaper men som inte är giftiga tagits fram. De flesta av preparaten är organiska multihämmare vilket innebär att inverkan sker både på anoden och katoden. Preparaten kan i likhet med kalciumnitrit användas både i betongblandningen och på ytan av betongen. Laborationsförsök har påvisats att aminoalkoholer som hämmare i lagom koncentration förlänger tiden till första korrosionsangreppet men att det inte kan minska korrosionshastigheten. Eftersom dessa organiska hämmare inte har varit på marknaden särskilt länge är det

svårt att bedöma effekterna efter längre tid. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Monofluorfosfater – ytpålagda korrosionshämmare

Monofluorfosfater med natrium kan bara användas som ytbehandling. Anledningen till att det inte kan användas i betongblandningen är att det då sker en reaktion mellan hämmaren och kalciumjoner och att det till följd av denna reaktion bildas kalciumfosfat. Monofluorfosfater har även en negativ effekt genom att den hämmar hydratationen hos betongen. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Monofluorfosfater transporteras in i betongen kapillärt och genom diffusion. Detta innebär att transporten är beroende av betongens porositet. Det kan vara problematiskt med inträngning vid applicering på vertikala betongkonstruktioner. Preparatet har använts i praktiken vid både problem med karbonatisering och kloridinträngning. Det bör dock noteras att det finns försök som visar på att den inte hindrar korrosion på grund av klorider då preparatet inte tränger tillräckligt långt in i betongen. Däremot uppvisas preparatet bättre resultat vid karboniseringsproblem. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Andra typer av korrosionshämmare

Vissa blandningar baserade på organiska material har också använts som korrosionshämmare. Blandningarna är då ofta baserade på olja och vatten och tillsätts i vattnet i betongblandningen. Likt ovanstående metoder är det en relativt ny metod och därmed finns ingen data om dess effekter på lång sikt. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

3.3.4 Realkalisation

Korrosion i karbonatiserad betong beror på att vid låga pH-värden bryts det passiverande skiktet som omger armeringen ned. Problemet kan därför motverkas genom att pH-värdet höjs igen, vilket kan göras på fyra olika sätt. Det första sättet är genom diffusion av alkaliska ämnen från cementmaterial som appliceras på ytan. Det andra sättet är genom diffusion av alkalijoner från okarbonatiserad närliggande betong. Ett tredje sätt är genom kapillär absorption av alkaliska lösningar. Det fjärde och sista alternativet är att tillämpa elektrokemisk realkalisation. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

I Tyskland har försök gjorts med att applicera högalkalisk betong ovanpå den karbonatiserade betongen för att skapa en diffusionsgradient inåt, i riktning mot den karbonatiserade betongen. Försöken visade dock att metoden var mycket osäker och tidskrävande. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Tekniken är effektiv om fullständig realkalisation uppnås men för att detta ska vara möjligt krävs fullständig vattenmättnad hos konstruktionen. Metoden passar därför

bäst för tunnlar, källare etc. I en gångtunnel till centralstationen i Oslo i Norge och vid en Shell bensinstation, i Sola nära Stavanger, har lyckade försök gjorts med att använda anslutande okarboniserade konstruktionsdelar för att genom diffusion realkalisera den förorenade betongen. I dessa fall täcktes betongytan med en polyetanbeläggning vilket resulterade i att betongen blev fullständigt vattenmättad. Beläggningen hindrade också syre från att nå betongen samt stoppade vattentransport från betongen och ut i luften. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Vid den elektrokemiska realkalisationen får armeringen agera som katod medan en temporär anod fästs på betongens utsida. Alkalijonerna kan sedan drivas ut med en ström. Anoden är oftast gjord av standardarmeringsnät som är fastsatt på träplankor som i sin tur är fastsatta på i betongen med isolerade förankringar. Anoden omsluts sedan av en elektrolytisk massa vilken ofta är en cellulosa massa innehållandes natrium- och/eller kaliumkarbonat. Den pålagda spänningsstyrkan varierar mellan 6 och 40 volt beroende på tjockleken och resistiviteten hos den täckande betongen. Strömstyrkan är begränsad till 1 A/m^2 av betongytan. Processen genererar hydroxidjoner på armeringsytan som temporärt höjer pH-värdet i betongen till ca 12 vilket återställer det passiverande oxidlagret hos armeringen. Den pålagda strömmen gör att alkalijoner dras från anoden till betongen. Genom att använda natrium eller kalium som elektrolyt kan konstruktionen göras mer motståndskraftig för fortsatt karbonisering. Flera olika typer av anoder kan användas men vanligast är rutnät av stål eller titan. Processen tar vanligtvis mellan tre och fem dagar men kan i vissa fall ta flera veckor. Med hjälp av en pH-indikator som exempelvis fenolftalein kan man avgöra när behandlingen kan avslutas. Efter behandlingen kan alla kablar, träplankor och anoden med dess cellulosa-hölje avlägsnas. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Den elektrokemiska realkalisationen utnyttjar tre fysikaliska och kemiska processer som sker samtidigt. Dessa processer är elektroosmos, elektrolys samt jonvandring. Kortfattat kan sägas att den elektroosmosiska reaktionen, i kombination med kapillärsugning och diffusion, introducerar natrium- och/eller kaliumkarbonat som en pH-buffert och säkerställer ett permanent pH-värde. Värdet ligger ofta mellan 10,0 och 10,8 vilket är tillräckligt högt för att bevara det passiva skiktet kring armeringen. Elektrolysen gör att stålytan renas och passiveras vilket genererar pH-värden på 13-14 i stålets omgivning. I och med att pH-värdet ökar återställs stålets passiva skikt. Hydroxidjoner produceras genom elektrolysen och jonvandringen gör att dessa joner förses med joner av motsatt laddning. Dessa joner kommer att befinna sig nära armeringen för att säkerställa det passiva skiktets pH-värde även efter strömmen slagits av. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Vid användning av denna metod måste hänsyn tas till att väte kan utvecklas vid armeringen. Metoden används därför vanligtvis inte på förspända konstruktioner. Kabelrören kring spännstålet kan skydda stålet från väteförspädningen förutsatt att spännstålet inte har någon kontakt med kabelröret, vilket kan vara svårt att garantera. Realkalisationen kräver elektrisk kontinuitet hos stålet inom de områden som ska behandlas. Det krävs också en rimlig nivå och jämnhet i betongens konduktivitet. Andra förutsättningar är avsaknad av kortslutningar mellan anod och katod och inga elektriskt isolerade lager i täckskiktet eller i armeringens omgivning. Metoden kan användas för att behandla hela ytor hos konstruktionen ifråga och dess användning har ökat kraftigt sedan 1980-talet. *[Fuzier (2002)]*

För att behandlingen skall vara varaktig är det viktigt att det introducerade karbonatet kan hålla ett högt pH-värde och att pH-värdet inte är känsligt för mindre variationer i karbonatkoncentration. Natriumet och kaliumet reagerar med koldioxiden i luften och bildar bikarbonat. Under normala omständigheter omvandlas cirka 12 % av karbonatet i en en-molarslösning till bikarbonat. Denna reaktion är reversibel och når snabbt jämvikt. En nygjord lösning med natrium har inledningsvis ett pH-värde på mer än 12,6 men vid jämvikt har detta värde reducerats till 10,6. Lösningar med kalium uppför sig på samma sätt men uppnår ett något högre pH-värde vid samma molaritet. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Idag har cirka 1000 konstruktioner behandlats med denna metod och än så länge har inga rapporter om förnyad korrosion rapporterats för dessa konstruktioner. 1989 realkaliserades en utav byggnaderna vid NTNU i Trondheim, Norge. Karbonatiseringsdjupet var då mellan 15 och 20 mm och betongens täcksikt varierade kraftigt. Den pålagda spänningen var runt 12 volt medan strömdensiteten var mellan 0,3 och 0,5 A/m². Den totala ytan som behandlades uppgick till 2000 m² och processen tog 3-5 dagar. Efter behandlingen gavs byggnaden ett antikarbonatiskt skikt för att bromsa karbonatiseringshastigheten och för att förbättra byggnadens utseende. Ett annat fall där metoden används framgångsrikt är på NEMKO huset i Oslo. Reparationen utfördes 1991 och inga nya skador har uppkommit sedan dess. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

3.3.5 Kloridutdrivning ur betong

Liksom för elektrolytisk katodiskt skydd utnyttjar metoden kloridutdrivning ur betong också en likströmskälla och ett elektriskt ledande nät som appliceras på betongen. Nätet ansluts till pluspolen medan armeringen ansluts till minuspolen, vilket medför att de negativt laddade kloridjonerna vandrar bort från armeringen och ut mot nätet och betongytan. Materialet som för nätet är både stål och titan. Svårigheten med denna metod har varit att lyckas driva ut alla klorider. Metoden går långsammare än realkalisation och kräver en utföringstid på en till två månader samt en strömtäthet på 0,5-2 A/m². *[Silfwerbrant, Sundquist (2001), fib Technical report Bullentin 3 Volume 3 (1999)]*

Under processen sker både en elektrolys och en jonvandring. Elektrolysen resulterar i att stålytan renas (även kallat katodisk renskrapning) och genererar mycket höga pH-värden. Elektrolysen leder också till att klorid/hydroxid-förhållandet ändras i en riktning som motverkar korrosion. Jonvandringen ser till att kloriderna försvinner från betongen och förser konstruktionen med positivt laddade joner vilka är nödvändiga för att bevara pH-värdet efter att strömmen slagits av. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Direkt vid stålytan och ut ett avstånd av en armeringsstångdiameter är det inte praktiskt möjligt att reducera kloridinhållet till noll. I detta område och i täcksiktet är den globala reduktion vanligtvis 50 till 80 % av det ursprungliga kloridinhållet. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

För att korrosionsskyddet ska vara beständigt är det viktigt att kloriderna inte vandrar tillbaka in i betongen. Om konstruktionen inte exponeras för nya klorider har det

visats att det tar mycket lång tid för kloriderna att göra detta. Det gäller särskilt om betongen inte är vattenfylld. Med kloridutdrivning har det visat sig möjligt att ge ett bra korrosionsskydd i över ett årtionde. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Försök har visat att kloridutdrivningen inte endast tar bort klorider som finns fritt i porvattnet utan även tar bort en stor del av de klorider som finns bundna i betongen. Dessa kloridjoner måste återetableras innan fria joner återigen gör det möjligt för initiering av armeringskorrosion. Detta innebär att kloridkriterier eller tröskelvärden som uttrycks som kloridinnehåll per procent cement eller betongmassa inte är relevanta för betongkonstruktioner som utsatts för kloridutdrivning. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Idag anges kriterierna som en kloridnivå i procent av cementinnehållet, exempelvis 0,1 %. Enligt de kloridutdrivningskurvor som framtagits i olika försök är dessa kriterier väl tilltagna. Detta resulterar i en onödig konsumtion av anoden, slöseri med tid och andra resurser samt en ökad risk för etsning av betongytan till följd av en ökad syrakoncentration vid den externa anoden. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Burlington Bay Skyway är en mycket stor bro nära Toronto i Canada. Sommaren 1989 gjordes en kloridutdrivning på den nedre delen av en pelare. Pelaren innehöll stora mängder klorider som orsakats av att tösalt läckte ner från broplattan. Trots att pelaren hade ett täcksikt på minst 70 mm var armeringen utsatt för korrosion. Kloridutdrivningen pågick i 8 veckor med en strömstyrka på cirka 1 A/m² av betongytan. Som anod användes ett stål nät med ett täckande lager av cellulosa fiber. Den uppnådda reduktionen var omkring 50-70 % av det ursprungliga kloridinnehållet. Mätningar av pelarens tillstånd har gjorts kontinuerligt och år 1998, nio år efter behandlingen, befann sig fortfarande pelaren i ett tillstånd där risken för korrosion var mycket låg. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

3.3.6 Efterbehandling (kloridutdrivning och realkalisation)

Efter att kloridutdrivningen eller realkalisationen avslutats och den utrustning som använts tagits bort, är det onödigt att göra extra åtgärder för att bevara effekten av behandlingen. Ett undantagsfall är om konstruktionen måste skyddas för nya kloridattacker eller, vid realkalisation, om konstruktionen måste skyddas från vatten som om det tränger in i betongen kan orsaka läckage av pH-bufferten. Vanligtvis skrapas cellulosa fibrerna bort och rostfläckar från anoden tas bort genom sand- eller vattenblåstring. Ibland målas det behandlade området av estetiska skäl. Både kloridutdrivningen och realkalisation resulterar i en nära på vattenmättad betong. I fallet med realkalisation uppnås också ett permanent högt pH-värde vid betongytan. Denna alkalinitet kommer inte snabbt att minska på grund av karbonatisering, vilket är fallet med ny betong. Dessa effekter måste därför beaktas vid val av färg och beläggningar. Det är också viktigt att tänka på att vissa organiska eller cementbaserade beläggningar kan göra det svårt att kontrollera och bevaka tillståndet hos den underliggande armeringen med hjälp av ytplacerade referensceller. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Fördelar med de båda metoderna är att de minskar miljöbelastningen och användandet av nya resurser, de har liten inverkan på konstruktionen och de ger ett litet ingrepp och påverkan vid monteringen. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

3.4 Förebyggande åtgärder

För att undvika att problem uppstår bör tanken på eventuella problem väckas redan i byggskedet. Även vid en eventuell reparation kan det vara aktuellt att utföra en förebyggande åtgärd. Exempel på det är om betong har ersatts på grund av kloridproblem då det kan vara lämpligt att förhindra att klorider tränger in i den nya betongen. Olika exempel på förebyggande åtgärder kommer att behandlas i följande avsnitt.

3.4.1 Impregnering

Många processer som leder till problem i betongkonstruktioner är beroende av vatten och vatteninträning för att fortlöpa. När betong impregneras kan eventuellt skadliga processer avstanna eller åtminstone hämmas. Vid impregnering förhindras vatten och lösningar att tränga in i betongen utan att invändig fukt förhindras att lämna betongen. Det finns två huvudgrupper av impregneringsmetoder, sådana som bildar ett lager på ytan och de som inte gör det. *[Fuzier (2002)]. [Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Det vattenavvisande medlet är ofta baserat på silikon. Silikon är en substans som medför att porsystemet i betongen blir hydrofobt, det vill säga vattenavstötande. Användningen av silikonbaserad impregnering startade i Tyskland runt 1950 och sedan dess har utvecklingen gått framåt med förbättrade metoder. Idag används alkylgrupper som det hydrofoba ämnet. De består av kolkedjor och generellt kan sägas att en lång kolkedja ger bättre alkaliskt motstånd och är mer flyktigt men har svårare att tränga in i betongen. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Förutom att ha god alkaliskt motstånd måste även en impregnering hindra vatten från att tränga in i betongen. När vatten förhindras att tränga in hindras även den största delen av klorider att tränga in. Med detta uppnås flera fördelar:

- Förlängd tid innan korrosion påbörjas.
- Lägre korrosionshastighet.
- Lägre risk för saltsprängning orsakad av saltinträning.
- Reducerad risk för alkali-silikareaktion. (på grund av lägre fuktighet och uteslutning av alkaliska metalljoner från lösbara salter)

För att impregneringen ska vara korrekt utförd måste inträngningsdjupet minst vara 2 mm över hela ytan. Det nödvändiga inträngningsdjupet beror på betongens vct. Impregneringen bör även appliceras på en torr och ren yta vilket innebär att ytan bör rengöras i förväg. Varmt vatten ger oftast bäst resultat. Därefter bör ytan torka ut innan impregneringen appliceras. Betongens fuktighet i kombination med dess vct är faktorer som starkt påverkar inträngningsdjupet vid impregnering. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

I praktiken har impregnering används på många broar i de nordiska länderna. Efter minst 9 års användning har det kunnat utläsas att impregneringen har minskat kloridinträngningen. Även en sänkning av korrosionshastigheten har i många fall kunnat påvisas. För att uppnå ett bra resultat har det visat sig att rätt applicering är avgörande. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

3.4.2 Skyddande skikt

Ett skyddande skikt skyddar ytan från mekanisk påverkan, bland annat genom att jämna ut ojämnheter i ytan. Andra positiva effekter som kan fås med en skyddande skikt är:

- Förbättring av utseendet (exempelvis med färg och ytbehandling)
- Övertäckning av defekter (exempelvis fläckar)
- Bevarande av utseendet (exempelvis genom motstånd mot klotter)
- Ökad säkerhet (exempelvis vägmarkering eller halkskydd)
- Skydd mot nedbrytning (exempelvis mot syraattack, väderpåverkan, kloridangrepp och karbonatisering)

Här läggs tonvikten på den sista punkten där nedbrytningsprocesser förebyggs. I vissa fall kan det, trots en bra konstruktionsutformning, behövas en förbättring av konstruktionens skydd mot nedbrytning. Även gamla konstruktioner kan få en ökad motståndskraft genom användandet av en skyddande skikt. *[Fuzier (2002)].*
[Norwegian Public Roads Administration (2004)]

Olika sorters skyddande skikt kan användas till olika konstruktioner och problem. För att uppnå ett bra resultat med skiktet är det viktigt att det appliceras på ett korrekt sätt. Appliceringen av skiktet görs oftast med hjälp av en borste, roller eller med spraypistol. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Skyddande skikt klassificeras beroende på komponenter, funktion, aktuella krav eller speciella egenskaper, såsom inträngning och tjocklek hos ytkiktet. För att få ett skyddande skikt helt tät måste minst två lager appliceras. Ett skyddande skikt används sällan ensam utan oftast i kombination med något annat system som exempelvis impregnering. Vid kombinationen av impregnering och ett skyddande skikt kan en låg vatteninträngning säkerställas även om skiktet skulle spricka. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

Ett skyddande skikt medför att armeringen skyddas mot klorider då inträngningen reduceras med ca 90 %. Reduktionen beror på att vatteninnehållet i betongen minskas genom applicerandet av det skyddande lagret. Med den minskade vattenhalten har kloridjonerna svårare att kunna transporteras i betongen. Även gasinträngning kan förebyggas med ett skyddande skikt vilket därmed även kan reducera karbonatisering. Även en minskning av pågående armeringskorrosion kan uppnås till följd av den minskade syretillförseln och den minskade fuktigheten. Därmed minskar även mängden av elektrolyt vilket leder till en minskad korrosionshastighet. Är det möjligt att göra en kraftig reduktion av fuktigheten kan korrosionen i vissa fall helt avstanna. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

3.4.3 Hydrofoba material

Hydrofoba material kan antingen tillsättas i betongblandningen eller som ett skikt på ytan. Det hydrofoba materialet stöter bort vatten vilket medför att vattnet har svårt att tränga in i betongen. Medlet kan vara exempelvis olje- eller vaxbaserat men det är även vanligt med silikonbaserade material. Metoden är användbar på områden som inte är konstant exponerade för vatten utan mer periodiskt. *[Norwegian Public Roads Administration (2004)]*

3.4.4 Injektering av sprickor

Sprickor kan uppkomma till följd av exempelvis krympning, överbelastning, sättningar eller spjälkning. I massiva betongkonstruktioner så som brofundament och bropelare kan temperatursprickor vara ett stort problem. Sprickorna leder i sin tur till att nedbrytande ämnen, som klorider, får direkt tillgång till armeringen. Det finns både levande och döda sprickor. Med levande sprickor menas att sprickornas bredd förändras genom exempelvis cyklisk belastning eller klimatvariationer. Döda sprickor har en konstant sprickbredd efter uppkomst. Vid problem med för stora sprickbredder kan ett material som expanderar och tätar sprickorna injekteras. Är sprickorna levande är det en fördel om sprickorna lagas när de är som störst eftersom lagningen då enbart kommer att utsättas för tryckkrafter i framtiden. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

Ibland räcker det att en spricka förseglas. Detta kan göras med membran, fogmassa eller spackling beroende på vilka krav som ställs på förseglingen. Spackling är en enkel och billig metod som är lämplig att använda om kraven på täthet inte är stora. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

Om inte försegling är en tillräcklig åtgärd krävs injektering. En vanlig metod är att fästa nipplar med jämna mellanrum längs sprickan. Därefter förseglas sprickan för att hålla emot under injekteringen. Injekteringen brukar vanligtvis börjas i ena änden av sprickan och sedan fortsätter injekteringen successivt i de andra nipplarna efter hand som injekteringsmedlet nått fram till dessa. *[Silfwerbrant, Sundquist (2001)]*

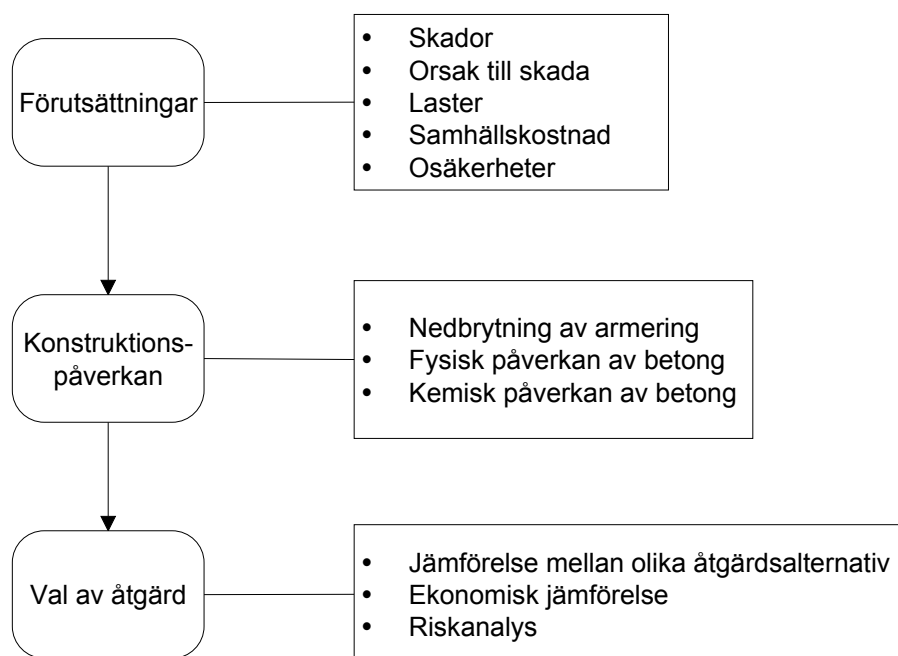
Det finns både kemiska och cementbaserade injekteringsmedel. Exempel på kemiska injekteringsmedel är epoxi, akrylater, polyestrar och silikaner. De kemiska injekteringsmedlen har ofta en bättre inträngningsförmåga än de cementbaserade, men

är i regel också dyrare. Fördelen med cementbaserade medel är att de i stort sett har samma egenskaper som betongens bindemedel. [*Silfwerbrant, Sundquist (2001)*]

Att injektera sprickor är tidskrävande och därför också dyrt. Problem kan dessutom uppstå om det tryck som används vid injekteringen är för högt då detta kan medföra att sprickan i sig förstoras och mer skada orsakas. [*Norwegian Public Roads Administration (2004)*]

4 Underlag för val av åtgärd

För att fatta ett beslut om vilken åtgärd som är det bästa alternativet för en förspänd konstruktion påverkad av nedbrytning är det många faktorer som måste vägas in, se figur 4.1 nedan.



Figur 4.1: Beslutsprocessen.

Det första som bör göras är att utreda konstruktionens förutsättningar. Förutsättningar kan exempelvis vara vilka skador konstruktionen har och orsakerna till dessa skador. Andra viktiga förutsättningar är vilka laster som verkar på konstruktionen och hur lasterna kan tänkas förändras i framtiden. När förutsättningarna har utretts bör det göras en bedömning av hur konstruktionen påverkas av pågående nedbrytningsmekanismer. Därefter kan olika åtgärdsalternativ jämföras varvid en ekonomisk analys bör göras. I den ekonomiska analysen måste både kostnaden för själva reparationen och samhällskostnaderna måste vägas in. Även kostnader på längre sikt måste beaktas då ett åtgärdsalternativ som har en mycket hög investeringskostnad kanske är det alternativ som blir billigast i längden. Det kan även vara lämpligt att göra en riskanalys för att uppskatta osäkerheten i såväl mätvärden som beräkningsmodeller. Det är viktigt att tänka på att det viktigaste inte är att återställa konstruktionen till ursprungligt skick utan att upprätthålla/återställa konstruktionens funktion.

4.1 Förutsättningar

Innan beslut om åtgärder tas är det viktigt att reda ut förutsättningarna för konstruktionen. Det första steget är att bestämma vilka skador konstruktionen har och vad dessa skador beror på. För att göra detta behövs de uppgifter som tidigare inspektioner gett ofta kompletteras med olika mätningar och provtagningar i fält. Mätningarna bör ge svar på om korrosion finns, om det finns risk/förutsättning för korrosion samt om det finns eller finns risk för någon annan sorts nedbrytning. Vidare bör kvarvarande livslängd, med avseende på samhällets krav och utveckling, på konstruktionen bedömas. En kortare livslängd kan innebära mindre omfattande åtgärder och en större osäkerhet kan vara acceptabel.

Brons läge är en viktig aspekt när det gäller trafikantkostnader. Om bron behöver stängas av och trafiken ledas om kommer de totala trafikantkostnaderna att öka. Åtgärder som går att utföra utan att bron stängs av helt reducerar därför trafikantkostnaderna drastiskt. Det är också viktigt att uppskatta hur bron kommer att användas i framtiden. Kanske förändras trafikströmmarna så att bron inte kommer att vara en lika viktig länk eller så kommer dess användning och trafikbelastning att öka. Även framtida laster bör uppskattas. Kanske behöver bron ta tyngre laster i framtiden då tyngre fordon eventuellt kan komma att användas. En annan bedömning som bör göras är hur lång tid som kan tillåtas från upptäckt av en eventuell skada till dess skadan kan åtgärdas. Ju längre tid det går att avvakta med att sätta in åtgärden, desto mer pengar kan sparas enligt nuvärdesmetoden.

Konstruktionens laster är en viktig parameter då de aktuella lasterna kan skilja sig från de som bron ursprungligen var konstruerad för att bära. Ibland görs en klassningsberäkning för att utreda brons aktuella kapacitet. I beräkningen kan mer avancerade metoder och modeller användas, så som finita elementmetoden. Klassningsberäkningen kan visa att bron kan ta högre last än vad som är nödvändigt och att ingen förstärkning därför behöver göras. Möjligtvis behöver inte all spännstål vara intakt för att konstruktionens prestanda ska vara tillräcklig. Beräkningen kan också ge resultatet att bron inte klarar de aktuella lastkraven. Om så är fallet kan bron förstärkas men det är även möjligt att klassa ner den genom att exempelvis inte tillåta lastbilar utan enbart personbilar att trafikera bron. Klassningsberäkningen ger även information om vilken faktor som är kritisk. Till exempel behöver inte spännstålet vara den kritiska faktorn i en förspänd konstruktion utan det kan vara slakarmeringen.

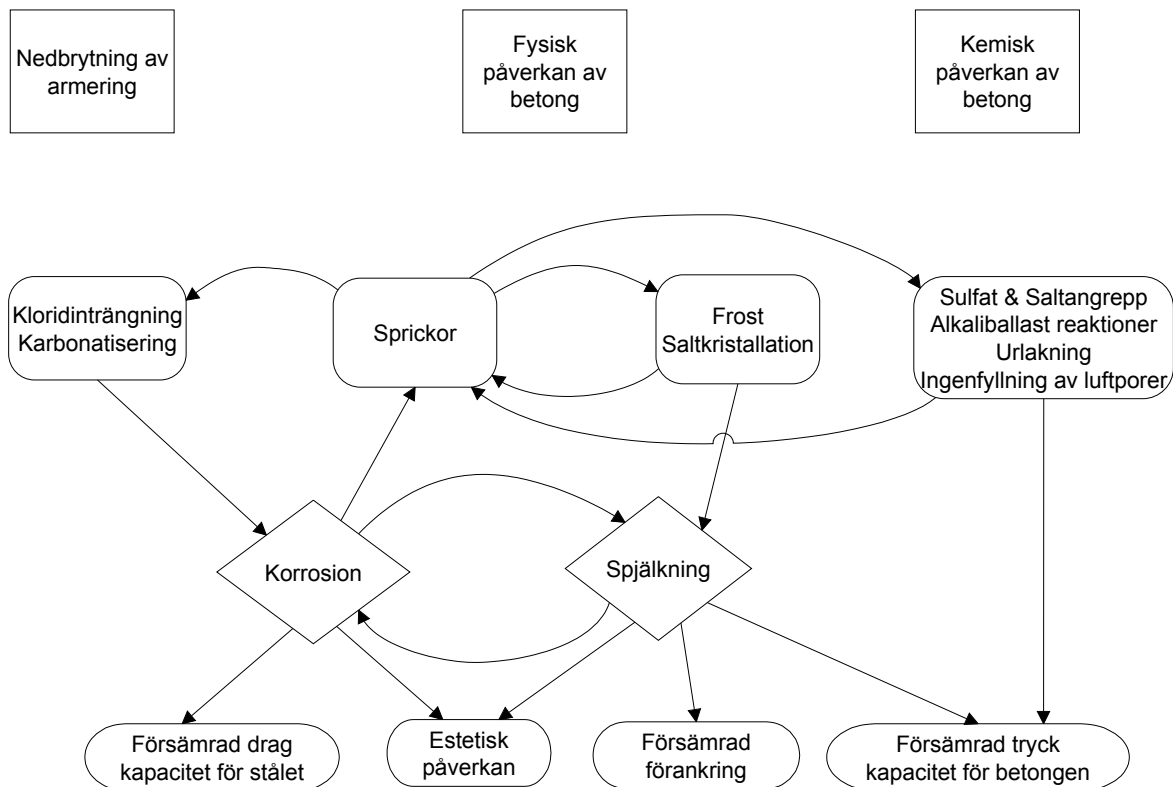
Osäkerheter finns i alla led och detta är viktigt att beakta och värdera. De mätmetoder som använts har vissa osäkerheter och antalet observationer och mätningar är ofta begränsat. De värden som kan tas fram ger enbart en indikation på brons aktuella skick då de bara beskriver läget i en viss punkt. Mätningarna är ofta indirekta, det vill säga att det som mäts är kloridhalter och karbonatisering och alltså inte förekomsten av korrosion. Kopplingen mellan kloridhalt/karbonatiseringsgraden och initiering av korrosion är också oklar och att avgöra korrosionshastigheten är mycket svårt. Andra osäkerheter kan vara att förutsättningar ändras genom olika laster och påverkningar. Olika beräkningsmetoder och modeller har även begränsningar då exempelvis indata och randvillkor behöver vara väldefinierade. Även mätvärdenas användning i beräkningsmodellerna är begränsad. Materialvetare använder ofta modeller som bygger på exempelvis tröskelvärden vilket inte kan användas i en strukturanalys.

Dessutom finns det olika risker och osäkerheter med många av de möjliga åtgärdsalternativen.

Dagens normer sätter begränsningar för hur stora halter av exempelvis klorider som får finnas i betongen hos armerade konstruktioner. Normerna tar ingen hänsyn till vilken miljö konstruktionen befinner sig eller armeringens funktion. Bland annat gör detta att det även finns osäkerheter och begränsningar i normerna.

4.2 Inverkan på konstruktionens prestanda

Nedbrytning av betongkonstruktioner kan ske av olika anledningar och kan på olika sätt inverka på konstruktionens prestanda. Inverkningar som är vanliga är kloridangrepp, karbonatisering, sprickor, urlakning och frostsprängning. Mindre förekommande är nedbrytning på grund av exempelvis saltkristallation. Nedbrytningen kan leda till negativa effekter hos konstruktionens funktion. Problem som kan uppstå är att bärförmågan minskar, till exempel genom att stålets dragkapacitet försämras på grund av minskad tvärsnittsarea, betongens tryckkapacitet minskar eller att vidhäftningen mellan stål och betong försämras. Samband mellan olika orsaker och deras påverkan kan ses i figur 4.2 och de vanligaste anledningarna är beskrivna i kommande avsnitt. Andra effekter som kan uppstå till följd av nedbrytning är minskad böjstyvhet och därmed ökad nedböjning. Även problem som inte direkt påverkar konstruktionens prestanda utan enbart är av estetisk karaktär kan uppkomma.



Figur 4.2: Inverkan på konstruktionen av nedbrytning.

4.2.1 Nedbrytning av armering

Vid korrosion av armering försämras dragkapaciteten på grund av att stängernas tvärsnitt reduceras. I och med att korrosionsprodukterna har en större volym än ursprungsstålet uppkommer en radiell spänning runt armeringsstålet. Det radiella trycket medför till en början en ökad vidhäftning mellan armeringen och stålet. Vid fortsatt korrosion leder det radiella trycket till att spjälksprickor uppkommer vilket ger en uppluckring av betongen och försämrad tryckkapacitet. Om korrosionen sedan fortsätter kan delar av betongen spjälkas bort. Detta innebär att det skyddande betong lagret försvinner och att armeringskorrosionen kan fortskrida med ökad hastighet. Om spjälkningen sker i en zon där konstruktionens tvärsnitt är tryckt minskar tryckkapaciteten och konstruktionens bärlighet påverkas.

En annan effekt som uppkommer till följd av stor armeringskorrosionen är att vidhäftningen mellan stålet och betongen blir sämre. Detta leder till en försämrad förmåga att hålla ihop sprickor hos konstruktionen och även bärförmågan påverkas. Dessutom påverkas förankringskapaciteten negativt. De två huvudsakliga orsakerna till armeringskorrosion är kloridinträngning och karbonatisering.

Armeringen kan också brytas ned på grund av utmattning. I en förspänd konstruktion där sprickor öppnas och stängs kan utmattning vara ett stort problem, särskilt om förorenande ämnen som exempelvis klorider kommer in i sprickorna. Detta har varit ett problem för segmentbyggda broar.

4.2.2 Fysisk påverkan av betongen

Betongen kan påverkas genom olika mekanismer såsom sprickor, frost och saltkristallation.

Sprickor kan uppkomma till följd av frostsprängning och armeringskorrosion eller genom belastning av konstruktionen och tvångsinverkan. Armeringskorrosionen kan i sin tur vara orsakad av kloridangrepp eller karbonatisering. I bruksstadiet finns normalt sprickor i konstruktionen, exempelvis dragsprickor, böjsprickor och skjvsprickor. Sprickor kan även uppkomma om fri krympning hos en betongkonstruktion inte är möjlig eller av andra förhindrade rörelsebehov såsom temperaturvariationer. Sättningar kan också orsaka sprickor då sättningarna ger upphov till påtvingade förskjutningar.

Sprickor påverkar konstruktionens prestanda och dess utseende negativt. En försämring av vattentätheten gör att nedbrytande ämnen, som exempelvis klorider, kan följa med vattnet och lättare tränga in i konstruktionen och därmed orsaka armeringskorrosion, spjälksprickor och spjälkning. Öppna sprickor ger även nya ytor från vilka angrepp kan fortskrida. När det gäller sprickor är det en blandning av orsak och verkan. Sprickor kan leda till korrosion och korrosionen kan leda till fler sprickor.

Vatten som finns i en betongkonstruktion påverkas av olika temperaturförhållanden. Vid frost fryser vatten till is och vatten i fast tillstånd utvidgas i förhållande till vatten i flytande tillstånd, vilket kan leda till att delar av konstruktionen sprängs bort. Den största påverkan finns där vatten kan ta sig in i konstruktionsdelar som är spruckna eller har andra håligheter. Frostangreppen kan i detta fall vidga sprickorna. När delar av konstruktionen sprängs bort försvinner det skyddande betonglagret vilket leder till en ökad korrosionshastighet och en minskad tryckkapacitet. Frostskadorna är oftast lokala och ytliga.

Det cykliska förhållandet mellan frost och upptining påverkar hållfastheten hos betongen då den ökar de första tio frostcyklerna för att därefter minska. Den lokalt minskade hållfastheten kan leda till att konstruktionen inte kan bära den last den är dimensionerad för.

Saltkristallation innebär att salt från havsvatten lämnas kvar i betongen när vattennivån sjunker. Saltet bildar sedan kristaller vilka växer och kan orsaka sprickbildning och spjälkning. Spjälkningen kan leda till de skador som beskrivits ovan om nedbrytning av armering.

4.2.3 Kemisk påverkan på betong

Betongen påverkas kemiskt bland annat i form av urlakning eller försenad ettringitbildning.

Urlakning sker då kemikalier tränger in i betongen och reagerar med kalciumföreningarna i cementpastan och bildar lösliga salter som löses ut ur

betongen. Urlakningen leder till att cementpastan försvinner och betongen försämras. Fenomenet kan oftast upptäckas tidigt då kalkutfällningarna kan ses vid sprickor och skarvar.

Under härdningsprocessen av betong reagerar vattnet med kalciumhydroxid och ämnet ettringit bildas. Ettringiten orsakar en expansion med cirka 220 % vilket inte är något problem i nygjuten betong som inte hårdnat. Bildandet av ettringit avstannar om temperaturen är hög och kalciumhydroxiden ligger sedan latent i konstruktionen. Om vatten sedan når konstruktionen startar ettringitbildningen och om betongen redan härdat orsakar expansionen sprickor i konstruktionen. I och med att expansionen är kraftig kan sprickbildningen i vissa fall liknas vid en sprängning och kan orsaka stora skador hos konstruktionen. Sprickorna gör också betongen mer lättillgänglig för kloridangrepp och karbonatisering.

4.3 Val av åtgärd

Vid val av åtgärd är det viktigt att ta hänsyn till orsaken till skadan. Exempelvis kan en skada orsakad av ett byggfel åtgärdas permanent medan en miljöbetingad skada kan återuppträffa om förorenande ämnen kan fortsätta att verka.

Det är inte alltid så att en specifik åtgärd är det bästa alternativet utan en kombination av flera åtgärder kan vara den optimala lösningen. En reparationsåtgärd kan även kompletteras med en förebyggande åtgärd för att inte samma problem skall uppstå i framtiden. Ett exempel är att impregnera nygjuten betong där den gamla har tagits bort på grund av kloridinträngning. De olika åtgärder som har tagits upp i tidigare avsnitt är listade nedan. Det bör även kontrolleras om det finns andra nya metoder som kan vara användbara i det aktuella fallet. Det finns även alternativet att inte vidta någon åtgärd och bara övervaka konstruktionen.

- Utbyte av befintligt material
 - Utbyte av spännlina kap 3.1
 - Pågjutning med vanlig betong och sprutbetong kap 3.1.1
 - Pågjutning med vanlig betong och sprutbetong kap 3.1.2
- Förstärkningsåtgärd
 - Extern förspänning kap 3.2
 - Betong och armering kap 3.2.1
 - Fiberlaminat kap 3.2.2
 - Fiberlaminat kap 3.2.3
- Behandling av betong
 - Neutralisering med pågjutning kap 3.3
 - Katodiskt skydd kap 3.3.1
 - Korrosionshämmare kap 3.3.2
 - Realkalisation kap 3.3.3
 - Kloridutdrivning ur betong kap 3.3.4
 - Efterbehandling kap 3.3.5
 - Efterbehandling kap 3.3.6

• Förebyggande åtgärd	kap 3.4
Impregnering	kap 3.4.1
Skyddande skikt	kap 3.4.2
Hydrofoba material	kap 3.4.3
Injektering av sprickor	kap 3.4.4

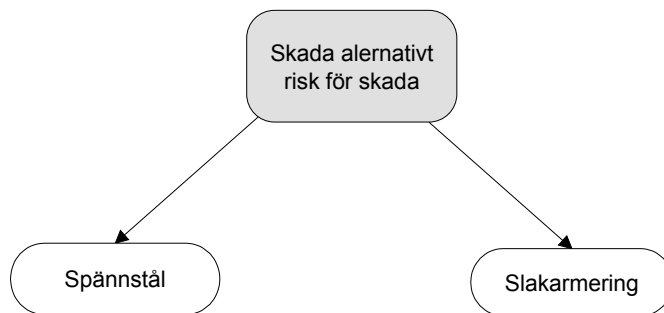
I de flesta fall är ett så litet ingrepp i konstruktionen som möjligt att föredra. Därför kan det vara lämpligt att välja åtgärd i följande ordning:

1. *Ingen åtgärd* - Att inte behöva göra någon fysisk åtgärd är det billigaste alternativet om det är möjligt. Kanske är konstruktionens skador inte så allvarliga, eller så bedöms nedbrytningen ske så pass långsamt att konstruktionen kan behålla sin funktion under hela dess planerade livslängd utan att någon åtgärd behöver göras. Om konstruktionen är så pass skadad att den inte kan ta avsedd last men den ekonomiska situationen gör att ingen förstärkningsåtgärd är försvarbar, är det var möjligt att genom en klassningsberäkning klassa ned konstruktionen. Detta innebär att begränsningar för hur stora laster som får påföras konstruktionen måste införas. Exempelvis kan endast personbilar, och alltså inga tunga lastbilar, tillåtas köra på en nedklassad bro.
2. *Ingen åtgärd i kombination med övervakning* - Att inte göra någon åtgärd men att övervaka konstruktionen är ett alternativ som ger stora besparingar enligt nuvärdesmetoden. Övervakningssystemet måste vara tillförlitligt och lätt att använda. Den måste ge en ganska stor tidsmarginal från det att skadorna upptäckts tills det att en eventuell åtgärd måste sättas in.
3. *Behandling av material* - Kanske är det möjligt att behandla betong utan att ta bort material. Exempel på sådana åtgärder är katodiskt skydd, realkalisation, kloridutdrivning och korrosionshämmare. Det kanske också räcker att applicera ett skyddande ytskikt om konstruktionen inte redan är allvarligt skadad.
4. *Borttagning av material* - Om spännstålet redan är allvarligt skadat eller om betongen innehåller mycket nedbrytande ämnen kan skadat material behöva tas bort och ersättas.
5. *Förstärka och ersätta konstruktionens funktion* - Istället för att ta bort material, vilket kanske inte alltid är möjligt, kan konstruktionen förstärkas. Konstruktionens verkningssätt ändras men dess funktion kan upprätthållas. Exempel på förstärkningsåtgärder är fiberlaminat, extern förspänning och pågjutning med slakarmering.
6. *Riva konstruktionen* - Om konstruktionens skador är mycket omfattande kan ibland det billigaste alternativet vara att riva konstruktionen och ersätta den med en helt ny. Till exempel kan en ny bro byggas vid sidan av en existerande och när den nya bron är helt färdig kan trafiken ledas om och den gamla bron rivs. Produktionskostnaden för den nya bron är hög men kan kompenseras av att samhällskostnaderna blir mycket låga då trafiken inte behöver stängas av samt att man slipper kostnaden för att reparera den befintliga bron.

Oavsett vilken åtgärd som väljs är det viktigt att orsaken till skadan utreds så att inte samma problem uppstår igen. För beslutsunderlag och beslutsträd se bilaga D och bilaga E. I samtliga fall kan ”ingen åtgärd”, ”ingen åtgärd i kombination med övervakning” och ”rivning av konstruktionen” vara användbara alternativ. Detta måste dock övervägas från fall till fall och valet är ofta beroende av samhällskostnader. Dessa alternativ kommer därför inte att tas upp i kommande avsnitt men de kan alltså vara aktuella för samtliga fall.

En förstärkningsåtgärd kan, som tidigare nämnts, vidtas för att höja brons lastkapacitet så att den får en bärförmåga som är större än den ursprungliga. En förstärkning kan också vara en åtgärd som förstärker brons aktuella bärförmåga men inte nödvändigtvis måste innebära en ökning av den ursprungliga bärförmågan.

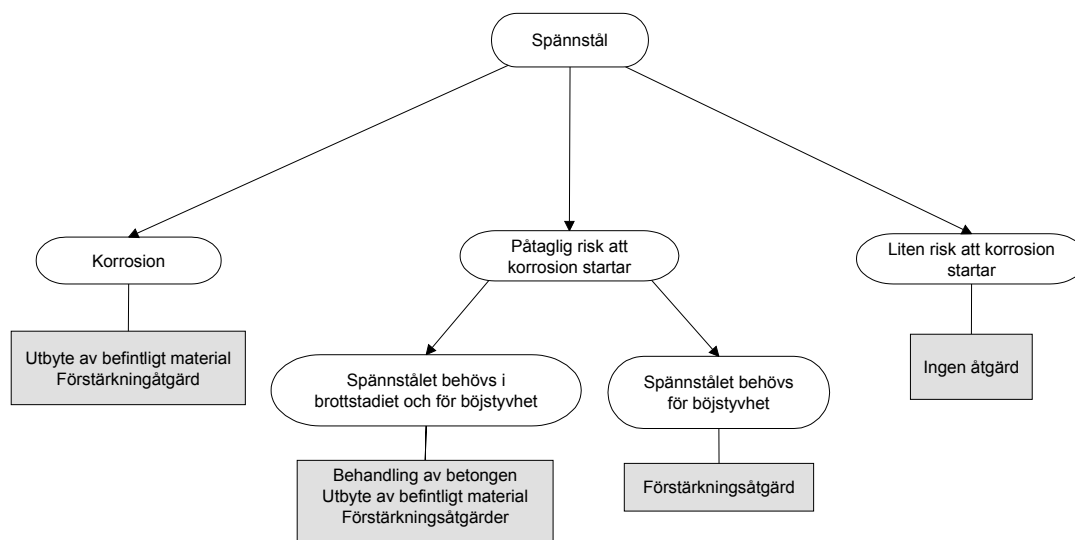
För att välja en lämplig åtgärd är det bra att först konstatera om det är spännstålet eller slakarmeringen som är utsatta för problem, se figur 4.3.



Figur 4.3: Risk för skada på spännstål alternativt slakarmering.

4.3.1 Korrosion på spännstål

När det gäller spännstålet är det viktigt att kontrollera om det finns korrosion och om det finns risk för korrosion på spännstålet. Utifrån om det finns, stor risk eller liten risk för korrosion finns det olika åtgärder som är lämpliga, se figur 4.4. De olika delarna kommer att beskrivas i följande avsnitt.



Figur 4.4: Korrosion på spännstål.

4.3.1.1 Korrosion på spännstålet pågår

Om korrosion har startat på spännstålet måste det på något sätt åtgärdas. Åtgärder som kan vara lämpliga i detta fall är följande:

- Byte av spännstål
- Ny pågjutning med armering
- Extern förspänning
- Fiberlaminat

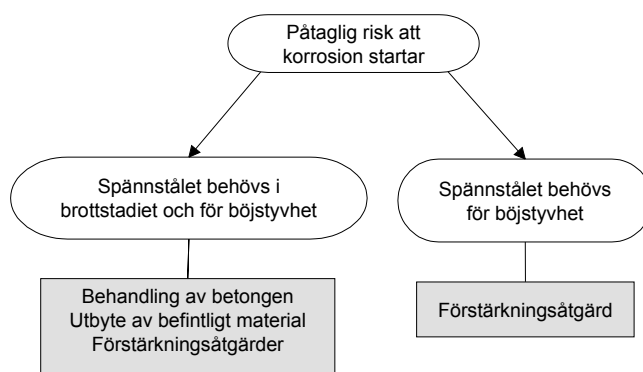
Vid byte av spännstål som korroderat kan även betongen i området tas bort. Metoden medför stora ingrepp i konstruktionen och kräver oftast en total avstängning av konstruktionen vilket leder till höga samhällskostnader. Ett annat alternativ kan vara att lägga ett nytt lager slakarmering som sedan gjuts in vilket ger en förstärkning.

Används extern förspänning eller fiberlaminat måste fortfarande problemet med de befintliga spännkablarna beaktas. Hänsyn måste tas till graden av korrosion, då stor korrosion eller snabbt ökande korrosionshastighet kan medföra spjälkning av betongen och därmed förstöra konstruktionen. En tänkbar lösning är att kombinera extern förspänning med ett katodiskt skydd i fallet med kloridproblem eller realkalisation vid karbonatisering. Detta för att stanna upp korrosionen och säkerställa bärförmågan med den extra förstärkningen. Idag är detta ingen metod som används då risken för väteförspredning vid katodiskt skydd i samband med spännstål anses vara alltför hög. Vid förstärkning med fiberlaminat eller extern förspänning behöver

konstruktionen antagligen inte stängas av helt och en lägre samhällskostnad erhålls i jämförelse med om det befintliga spännstålet tas bort och ersätts. Det är även möjligt att öka mängden slakarmering och/eller spännstål och gjuta in det i ny betong.

4.3.1.2 Påtaglig risk att korrosion startar

Om det i dagsläget inte finns någon korrosion på spännstålet är det inte nödvändigt att byta ut det befintliga spännstålet. En viktig aspekt i valet av åtgärder då om spännstålet är nödvändig för konstruktionen i brottstadiet eller om den enbart behövs för en tillfredsställande böjstyvhet, se figur 4.5. Om spännstålet endast behövs för böjstyvhet kan lägre säkerhetsmarginaler accepteras då brott hos spännstålet inte får lika stora konsekvenser.



Figur 4.5: Påtaglig risk att korrosion startar.

4.3.1.2.1 Spännstålet behövs i brottstadiet och för nedböjning

När spännstålet behövs i brottstadiet innebär det att korrosion på spännstålet inte är tillåten, om inte konstruktionen görs starkare så att dess funktion i brottstadiet säkerställs. De åtgärdsalternativ som finns när spännstålet behövs i brottstadiet och för nedböjning är följande:

- Byte av spännstål
- Ny pågjutning med armering
- Extern förspänning
- Fiberlaminat
- Pågjutning med betong
- Kloridutdrivning

- Katodiskt skydd
- Korrosionshämmare
- Realkalisation
- Avlägsna kontaminerad betong och gjuta på ny

Alternativen som även är aktuella för konstruktioner där spännstål har börjat korrodera är även aktuella i detta fall, se avsnitt 4.3.1.1. Nackdelen med de metoderna är att de är kostsamma och det kan vara mer ekonomiskt att välja något annat alternativ.

Ett annat alternativ är att behandla den befintliga betongen. Behandling av betongen kan göras genom att gjuta på ett lager med betong. Den nya betongen medför att befintlig betong neutraliseras och klorider vandrar tillbaka in i den nya betongen vilket minskar koncentrationen i den gamla. Metoden är dock inte helt tillförlitlig då det är osäkert i vilken grad den kan neutralisera betong och få kloriderna att vandra ut.

Kloriderna kan även drivas ut med hjälp av elektriska strömmar. Exempel på sådana metoder är katodiskt skydd och kloridutdrivning. För att avlägsna kloriderna från betongen kan kloridutdrivning användas. Det är dock svårt att driva ut alla klorider och metoden kräver en relativt hög ström, vilket kan öka risken för väteförsprödning. Det katodiska skyddet är också användbart då det inte har lika hög ström vilket minskar risken för väteförsprödning. Det katodiska skyddet medför att kloriderna inte fortsätter att vandra in i betongen utan stannar upp och därmed stoppar korrosionsprocessen. Mer erfarenhet behövs dock vid kombination med förspänning.

Korrosionshämmare är bra vid små doser av klorider och kan kombineras med andra åtgärder. Korrosionshämmare förbrukas med tiden och är en relativt osäker metod då det saknas erfarenheter. För att behandla betong som karbonatiserats kan realkalisation användas. Metoden bygger på samma princip som det katodiska skyddet, men är en osäker och tidskrävande metod. Metoderna som bygger på elektriska strömmar är dock inte tillåtna att använda i dagsläget på förspänd betong på grund av risken för väteförsprödning men det pågår forskning i området vilket kan medföra att det i framtiden kan bli tillåtet.

Ett alternativ är att ta bort källan till att armeringskorrosionen vilket kan göras genom att avlägsna förorenad betong och ersätta med ny betong. Genom att avlägsna den gamla förspända betongen och gjuta på ny betong måste konstruktionens verkningssätt beaktas då den nya betongen inte blir förspänd. I detta fall, då ny betong ersätter den gamla och miljön därmed ändras runt armeringen, måste källan till att betongen blivit kontaminerad fastställas. Om källan kan elimineras, exempelvis tack vare att ett byggfel kan åtgärdas, bör detta göras för att inte den nya betongen ska få samma problem som den gamla.

4.3.1.2 Spännstål behövs för begränsning av nedböjning

Om spännstålet inte behövs för konstruktionen i brottstadiet kan den vara nödvändig i brukstadiet där spännkraften motverkar nedböjning och därmed böjsprickor. Åtgärder som kan användas vid eventuella problem med nedböjning är följande:

- Extern förspänning
- Fiberlaminat
- Ny pågjutning med armering

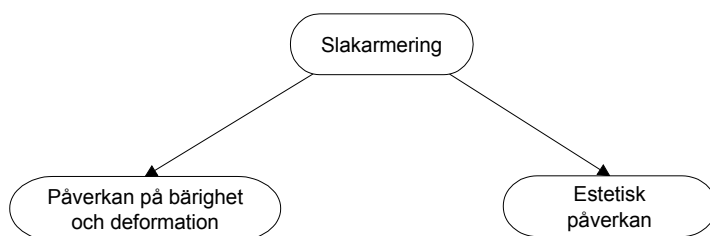
När det finns risk för korrosion på spännstålet, och därmed ökad nedböjning, är det lämpligt att åtgärda genom att förstärka konstruktionen. När det inte är brottstadiet som är avgörande kan viss korrosion på spännstålet tillåtas. Det är dock mycket svårt att avgöra hur mycket korrosion som kan tillåtas vilket gör det svårt att bedöma säkerhetsmarginalen. Lämplig förstärkning i det fallet är att montera extern förspänning, extra armering eller att tillsätta fiberlaminat. Vid val mellan de olika alternativen bör kostnaderna för respektive metod beaktas. Hänsyn måste även tas till klimatet runt konstruktionen då fuktiga miljöer och relativt höga temperaturer, exempelvis de som fås under brobanebeläggningen, inte är fördelaktigt för fiberlaminat. Det externa utanpåliggande spännstålet kan utsättas för sabotage och det är exponerat för klimatet. Mellan kabelröret och spännstålet finns ett skyddande lager fett men vid dålig infettning kan kablarnas exponerade placering leda till högre korrosionsrisk. En stor fördel med att spännstålet inte är ingjutet i konstruktionen är att det blir mycket lättare att inspektera och byta ut kablarna. En pågjutning med extra slakarmering tillför konstruktionen en extra tyngd men hjälper också till att begränsa ytterligare nedböjning. Om nedböjningen i dagsläget är för stor är extern förspänning ett bra alternativ.

4.3.1.3 Liten risk att korrosion på spännstål startar

Om det i dagsläget inte finns någon korrosion på spännstålet måste det avgöras om det finns förutsättning för korrosion på spännstålet i framtiden. Finns det inte tillgång till komponenter som syre, vatten eller en risk för en sänkning av pH-värdet i betongen har korrosion svårt att starta och propagera. Om så är fallet kanske ingen reparationsåtgärd behöver utföras. Hänsyn måste dock tas till att miljön runt spännstålet kanske förändras och att korrosion därmed kan starta. Om halten klorider i betongen då är stor, kan problem med snabb korrosionshastighet uppstå.

4.3.2 Korrosion på slakarmering

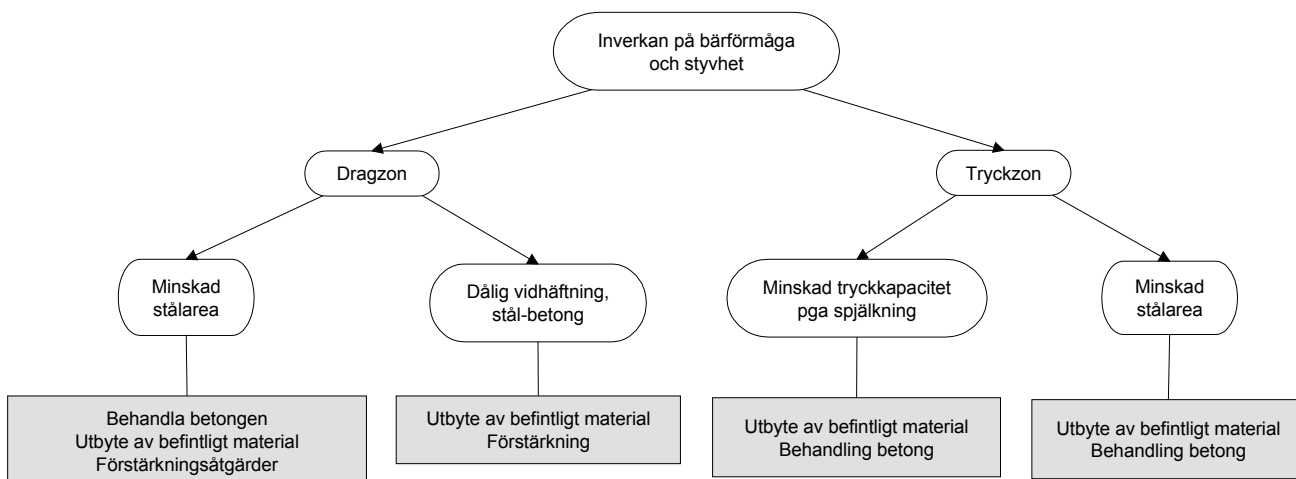
Ringa korrosion på slakarmering är oftast inte lika allvarligt som i fallet med spännstål. Problem med slakarmeringen kan delas upp i två huvudgrupper. Den ena avser slakarmering som behövs för bärlighet och deformation. Den andra avser inverkan på estetiken orsakad av eventuella rostangrepp, se figur 4.6.



Figur 4.6: Korrosion på slakarmering.

4.3.2.1 Inverkan på bärförmåga och styvhet

En förspänd konstruktion innehåller inte bara bärande spännstål utan även vanlig slakarmering då lasterna behöver tas upp i flera riktningar. Av denna anledning kan en förspänd konstruktion tappa sin bärförmåga även om inget fel finns på spännstålet. Slakarmering kan finnas både i de dragna och tryckta delarna av konstruktionen. Exempel på slakarmering är tvärkraftsarmering, tvärrarmering och spjälkarmering. För att kunna bestämma en lämplig åtgärd har indelning gjorts enligt figur 4.7.



Figur 4.7: Inverkan på bärförmåga och styvhet.

I dragzonen kan problem uppstå då armeringen börjar korrodera. Problemen som kan uppstå är att armeringen kan få minskad kapacitet på grund av minskad stålarea eller att vidhäftningen mellan stålet och betongen försämras.

Även i tryckzonen kan konstruktionen påverkas då armeringen börjar korrodera. För den tryckta delen är det betongen som påverkas genom spjälksprickor och bortspjälkning vilket leder till minskat betongtvärsnitt, men även stålets area minskar och kan leda till att konstruktionen kan ta mindre last.

Skjuvning av slakarmering resulterar i samma åtgärder och resonemang som för slakarmering i dragzonen. Val av åtgärd för skjuvarmering kan därför utföras med utgångspunkt för val av åtgärd för slakarmering i dragzonen.

4.3.2.1.1 Minskad stålarea i dragzonen, slakarmering

Om risken för korrosion och därmed minskad stålarea är hög, eller att korrosionen redan har startat, måste det förhindras att korrosionsprocessen påbörjas eller fortlöper. Åtgärdsalternativen är följande:

- Pågjutning med betong
- Katodiskt skydd
- Kloridutdrivning
- Realkalisation
- Korrosionshämmare
- Fiberlaminat
- Ny pågjutning med armering
- Utbyte av armering

Genom att behandla den befintliga betongen kan miljön runt armeringen förändras vilket kan medföra att korrosion fördröjs eller stoppas. Genom att gjuta på ett extra lager betong kan det neutralisera föroreningar i den befintlig betong genom att kalk från den nya betongen vandrar in i den gamla, samtidigt som det får kloridjoner att vandra från den gamla till den nya betongen för att skapa jämvikt i konstruktionens kloridkoncentration. Därmed kan ett lager med extra betong motverka korrosion, men det är osäkert till vilken utsträckning det hjälper. Pågjutningen medför även en ökad egetyngd hos konstruktionen

Ett annat alternativ för att behandla betongen är att använda elektriska strömmar. Metoderna som bygger på principen med elektriska strömmar är katodiskt skydd, realkalisation och kloridutdrivning ur betong. Används ett katodiskt skydd på konstruktionen stoppar en eventuell korrosionsprocess och det stoppar klorider från att vandra inåt i konstruktionen. Är ambitionen att avlägsna kloriderna från konstruktionen kan kloridutdrivning användas eller ett aktivt katodisk skydd. Det är

dock svårt att driva ut alla klorider och processen tar 1-2 månader. Vid karbonatisering kan realkalisation användas för att förhindra korrosion. Alla metoder som använder elektriska strömmar för att motverka korrosion kan användas för att stoppa upp korrosionsprocessen hos stålet. Det kan däremot inte återskapa det stål som bildat rost, vilket medför att det kvarvarande stålet måste ha tillräcklig bärförmåga för att metoden skall vara användbar. Risken för väteförsprödning i samband med spännstål måste beaktas och noga utvärderas för varje fall, då försprödningen kan få svåra konsekvenser.

Innehåller konstruktionen enbart små doser av klorider är korrosionshämmare ett alternativ. Metoden minskar korrosionshastigheten och ökar tiden innan korrosion startar. Korrosionshämmare förbrukas med tiden och det saknas brist på erfarenhet om metoden.

Om korrosionen är så långt gånge att armeringen är obrukbar kan denna tas bort och ersättas med ny. I det fallet då armeringen byts ut fås en helt ny konstruktionsdel och därmed bör skillnaderna mellan den gamla och nya betongen, såsom olika behov av krympning, beaktas. Det kan även få konsekvenser för förspänningen då den nya betongen inte blir förspänd.

Genom att enbart förstärka konstruktionen tillåts det befintliga stålet att korrodera och dess funktion ersätts med fiberlaminat eller genom att placera mer armering i ett lager utanför den befintliga konstruktionen. Fiberlaminatet är lätt och medför därmed inte någon extra tyngd att bära för konstruktionen. Risken för att armeringen korroderar mycket och därmed orsakar spjälkskador som kan medföra att fiberlaminatet lossnar bör beaktas. Om en ny pågjutning med extra armering skall utföras måste vidhäftningen mellan den gamla och nya betongen vara tillfredsställande för att önskat verknings sätt ska erhållas.

4.3.2.1.2 Dålig vidhäftning i dragzonen, slakarmering

Om armeringen börjar korrodera kan vidhäftningen mellan betongen och armeringen påverkas och försämrats. För att åtgärda det problemet kan följande åtgärder vidtas:

- Ersätta gammal betong med ny
- Fiberlaminat
- Nu pågjutning med armering

När den befintliga betongen ner till armeringen tas bort och ny betong gjuts på är det viktigt att armeringsstålet rengörs för att säkerställa en god vidhäftning. När den gamla betongen ersätts med ny fås även en annan miljö vid armeringen vilket kan medföra att armeringskorrosionen inte fortlöper efter åtgärden.

Vid sämre vidhäftning kan armeringens dragkapacitet ersättas genom förstärkning med fiberlaminat. Vid användning av fiberlaminat måste det säkerställas att korrosionen på armeringen bara kommer att medföra sämre vidhäftning och inte spjälkning av betongen. Det kan även vara en möjlighet att ersätta den gamla armeringens funktion med ett nytt lager med armering och betong.

4.3.2.1.3 Spjälkskador på betongen i tryckzonen, slakarmering

Vid spjälkskador på betongen tappar konstruktionen lastupptagningskapacitet på grund av det minskade betongtvärsnittet. Åtgärderna som kan vidtas är:

- Gjuta på ny betong
- Katodisk skydd
- Kloridutdrivning
- Realkalisation
- Korrosionshämmare
- Ersätta gammal betong med ny
- Tätt skikt

Om det inte finns något problem eller bara små problem med spjälkskador i dagsläget kan en behandling av betongen vara lämplig. Att behandla betongen är lämplig då det är klorider eller karbonatisering som är orsaken till eventuella spjälkskador. Ett alternativ som finns för att behandla betongen är att gjuta på ny betong, vilket medför både att betongen neutraliseras och att klorider vandrar mot den nya betongen och att kloridhalten därmed minskas. Det andra alternativet är att lägga på en ström vilket påverkar kloriderna. Metoderna som kan göra det är katodiskt skydd och kloridutdrivning. Valet mellan de olika grundas på halten av klorider och erforderad utdrivningsgrad. Om alla klorider skall avlägsnas från betongen är kloridutdrivning ett lämpligt alternativ. Om det är tillräckligt att hindra klorider från att fortsätta vandra in i konstruktionen kan katodiskt skydd vara en lämplig åtgärd. Om betongen däremot är kraftigt karbonatiserad är realkalisation ett alternativ. Realkalisationen kräver inga höga strömmar vilket minskar risken för väteförsprödning som kanske kan påverka spännstålets bärförmåga. Korrosionshämmare är en lämplig metod om det bara finns låga halter av klorider.

För att åtgärda spjälkning, om den redan har startat, kan den gamla spjälkade betongen ersättas med ny betong. Finns det risk för spjälkskador kan metoderna att behandla den befintliga betongen och pågjutning av betong användas.

Om spjälkskadorna är stora kan den sämre betongen avlägsnas och ett nytt lager av betong kan gjas på. Genom metoden återskapas den gamla konstruktionen. Källan till spjälkskadan bör utredas då exempelvis spjälkskadan kan bero på armeringskorrosion men också frostsador. Om det är frostsador som är orsaken kan någon form av tät skikt appliceras på ytan för att täta konstruktionen.

4.3.2.1.4 Minskad stålarea i tryckzonen, slakarmering

Om det finns risk för minskad kapacitet på grund av minskad stålarea i tryckzonen är det möjligt att åtgärda följande:

- Pågjutning med ny betong
- Katodisk skydd
- Kloridutdrivning
- Korrosionshämmare
- Realkalisation
- Ersätta gammal betong med ny
- Ny pågjutning med armering

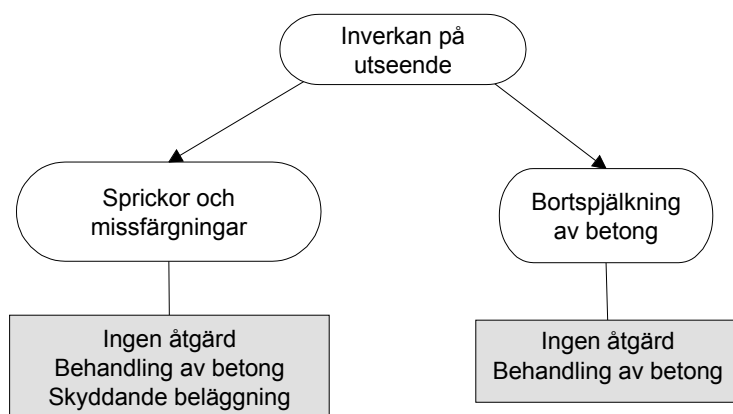
Vid behandling av den befintliga betongen genom att gjuta på ett extra lager betong kommer den nya betongen att neutralisera den befintliga och klorider kommer transporteras från den gamla till den nya betongen. Pågjutningen medför även en förstärkning av konstruktionen. Metoder som katodiskskydd, korrosionshämmare, kloridutdrivning och realkalisation kan även användas och följer samma resonemang som i avsnittet om minskad stålarea i dragzonen.

Det kan förekomma höga halter av klorider i betongen eller karbonatiseringsgrad men armeringen behöver inte ha börjat korrodera, eller att enbart ringa korrosion finns på armeringen. Om så är fallet kan borttagning av den kontaminerade betongen och ny pågjutning vara ett bra alternativ. Det är då viktigt med en noggrann rengöring av armeringen för att motverka ny korrosion och förbättra vidhäftningen. Om armeringen är starkt korroderad och inte har tillräcklig bärförmåga kan armeringen behövas bytas ut.

4.3.2.2 Inverkan på utseende

Utseendet hos en konstruktionen estetik kan behöva beaktas, även om detta inte direkt påverkar konstruktionens funktion. Exempel på detta kan vara rost som har bildats på

sekundärarmeringen eller om ytskikt har spjälkats bort och därmed påverkar intrycket som konstruktionen ger. Även om konstruktionens funktion inte är nedsatt på grund av skadorna är det fortfarande viktigt att bron ser tillförlitlig ut. Indelningen vid estetisk påverkan kan ses i figur 4.8 nedan.



Figur 4.8: Inverkan på konstruktionens utseende.

4.3.2.2.1 Sprickor och missfärgningar

Vid korrosion av sekundärarmering hos en konstruktion kan man välja att inte göra någon åtgärd, då det inte får någon effekt på konstruktionens funktion. Reparation kan dock vara nödvändig ur andra synvinklar, då konstruktionens utseende exempelvis kan ge trafikanter intryck av bristande tillförlitlighet. Följande alternativ finns att beakta:

- Ingen åtgärd
- Pågjutning av betong
- Skyddande ytbeläggning

Fortsatt korrosion kan motverkas genom att ett extra lager med betong gjuts utanpå skadan, vilket även medför att befintliga rostfläckar döljs. Pågjutningen kan göras med både sprutbetong och platsgjuten betong. Nackdelarna med sprutbetong är att den kan uppfattas estetiskt icke tilltalande och att problem med vidhäftning mot den gamla betongen kan uppstå. För den platsgjutna betongen är det negativt att en form måste byggas, vilket är tidskrävande och kostar pengar.

Rostskadorna kan också döljas provisoriskt genom påläggande av en skyddande ytbeläggning. Beläggningen kan även förhindra nyinträngning av exempelvis klorider. Risken med att bara använda sig av en skyddande beläggning är att korrosionen kan

fortsätta på grund av de nedbrytande ämnena som redan finns i betongen. Korrosionen kan medföra spjälkskador vilket i sin tur medför ytterligare problem med bland annat estetiken på konstruktionen.

4.3.2.2 Bortspjälkning av betong

Om betong spjälkas bort utan att det direkt påverkar konstruktionen kan man välja följande åtgärder:

- Ingen åtgärd
- Pågjutning av betong

Att inte göra något kan dock leda till, som nämnts i tidigare avsnitt, att trafikanter kan uppfatta konstruktionen som osäker. För att åtgärda problemet kan en pågjutning på betongen göras vilket inte bara förbättrar ytan utan även kan motverka fortsatt korrosion och därmed fortsatt bortspjälkning av betongen.

5 Nötesundsbron - en fallstudie

För att tillämpa och testa den beslutsprocess som beskrivits i föregående kapitel kommer en fallstudie av Nötesundsbron att göras. Bron ägs och förvaltas av Vägverket som har anlitat REINERTSEN Sverige AB för att utföra erforderliga inspektioner, ta fram reparationshandlingar samt göra en klassningsberäkning.

5.1 Bakgrund

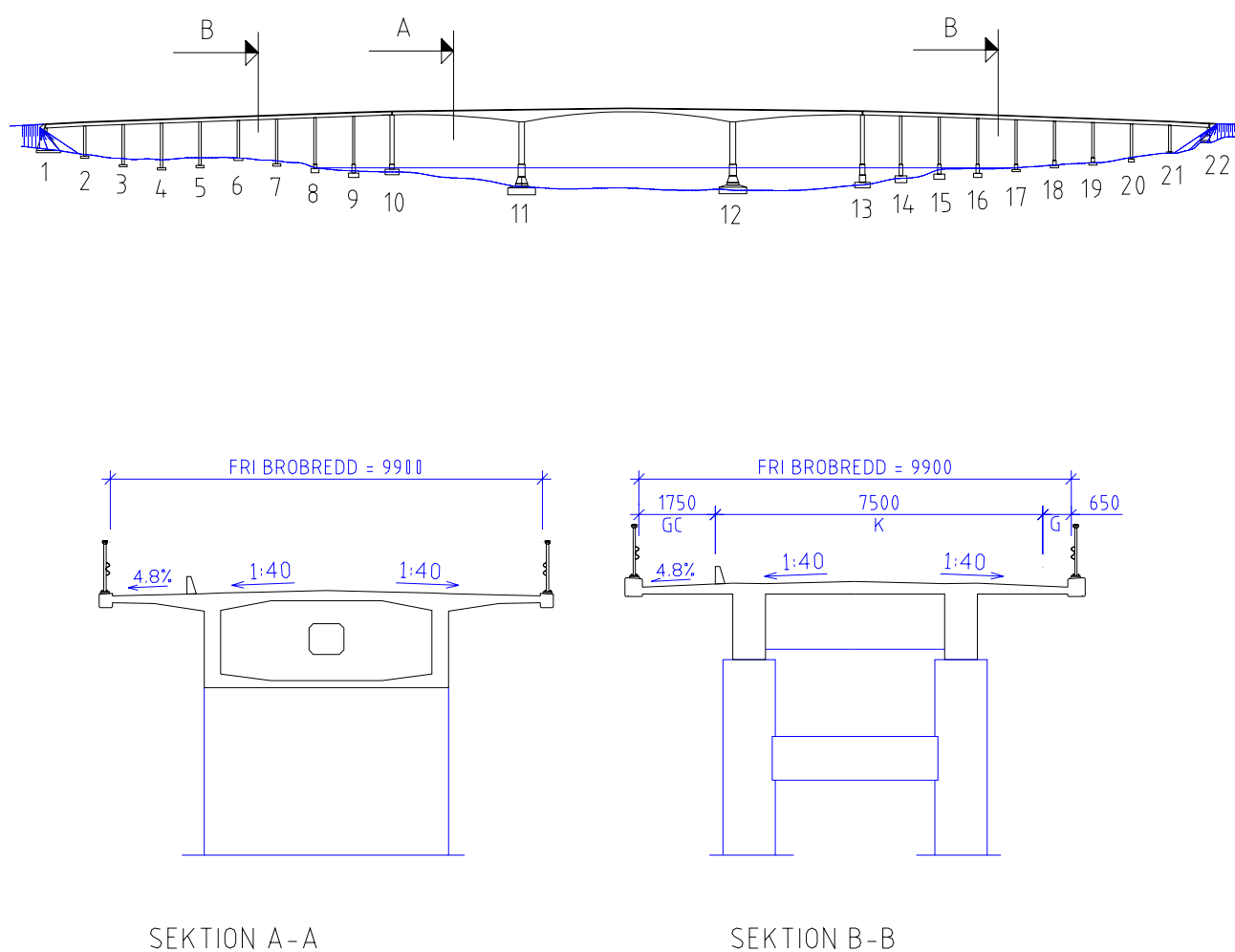
Nötesundsbron (bro 0 584, väg 160) är en knappt 614 meter lång och drygt 30 meter hög betongbro som stod färdig år 1966. Bron sträcker sig mellan Sund och Vindön på vägen mellan Uddevalla och Orust och har en segelfri höjd av 28 meter. Bron byggdes av dåvarande Svenska Vägaktiebolaget och konstruerades av ingenjörfirman Birger Ludwigson AB, se figur 5.1. [*Svenska Vägaktiebolaget (1966)*].



Figur 5.1: Nötesundsbron.

Bron ingår i den så kallade Nötesundsleden som byggdes för att skapa en yttre nordsydlig led, parallell med E6 i södra Bohuslän, bland annat för att ge Orust och Tjörn en bättre vägförbindelse med Uddevalla. Nötesundsleden består av Nötesundsbron, en tunnel genom Vindön samt en bro vid Gåres kile. Tunneln genom berget på Vindön är 490 meter lång och placerad vid Nötesundsbrons södra landfäste. Bron vid Gåres kile, mellan Orust och Vindön, är 270 meter lång och har en högsta höjd på 30 meter. [Svenska Vägaktiebolaget (1966)]

Nötesundsbron består av två olika typer av överbyggnader. Men mittersta delen mellan stöd 10 och 13, högbron, är en förspänd lådbalkbro, medan tillfartsbroarna är kontinuerliga balkbroar av armerad betong. Tillfartsbroarna bärs upp av 18 par cirkulära pelare medan lådbalkbron bärs upp av två stöd av låd-tvårsnitt. Den fria brobredden är 9900 mm, se figur 5.2. [Svenska Vägaktiebolaget (1966)]



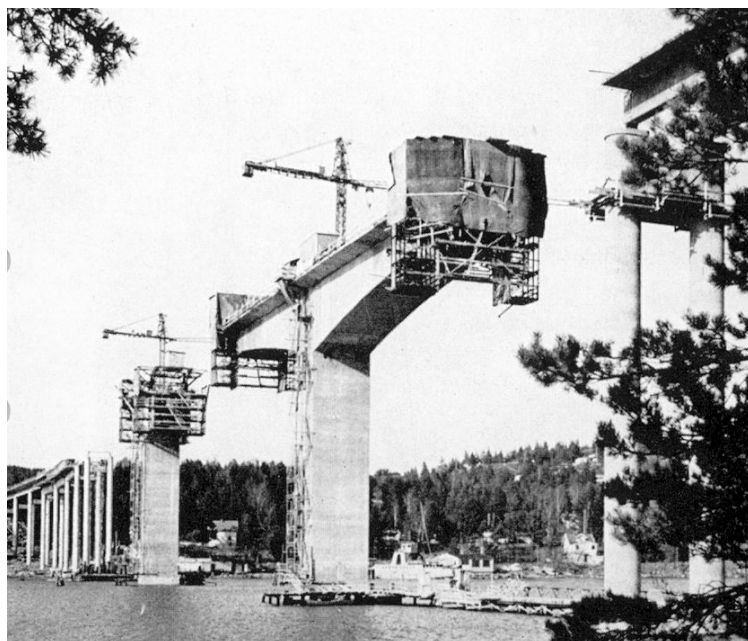
Figur 5.2: Elevation och sektioner för Nötesundsbron.

Tillfartsbroarna har nio spann vardera, med spännvidden 20 meter. Spännvidderna för mittspannen uppgår till 67,5, 110,0 samt 67,5 meter. Pelare 11 och 12 har ett lådtvärsnitt med yttermåten 5,7 x 3,0 meter och en väggjocklek på 30-50 centimeter. Det finns en dörr i vardera av dessa pelare plus att det finns två nedstigningsluckor i lådbalken för att göra bron tillgänglig för inspektioner och underhållsarbeten.

5.1.1 Produktionsmetod

Tillfartsbroarna är utförda som slakarmerade kontinuerliga balkkonstruktioner. Samtliga cirkulära pelare är glidformsgjutna och sammanbundna upptill med tvärbalkar. Huvudbalkar och farbaneplattan är gjutna på ett underliggande ställningsfackverk. [Svenska Vägaktiebolaget (1966)]

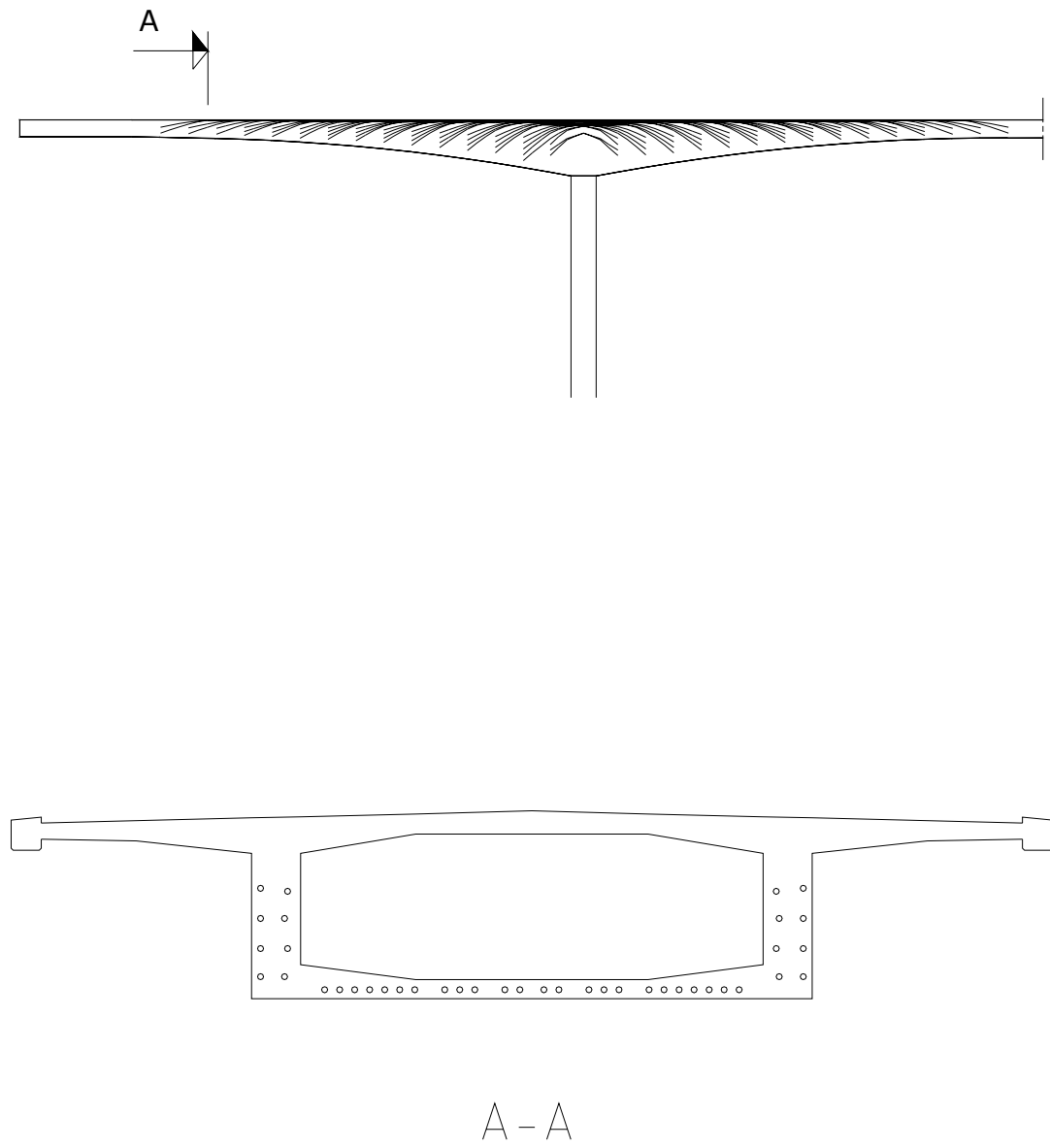
De tre mittspannen är en kontinuerlig, balanserat konsolutbyggd förspänd lådbalk. Lådbalkbron vilar på rörliga lager på ytterstöden medan den är hopgjuten med de båda mittstöden. Pelare 11 och 12 är grundlagda på 14 meters djup under vattenytan på utbredda plattor av undervattensgjuten betong som vilar på sand. Bottenplattorna fortsätter i pelarskaft som torrgjutits genom användandet av stålspons upp till 1,8 meter över vattenytan. Pelarna har glidformgjutits till en höjd av 22 meter. Överbyggnaden är även den en lådsektion som har byggts ut som balanserade konsoler, symmetriskt kring de båda mittpelarna. Konsolerna byggdes ut i etapper om 3,34 meter och förspändes med spännkablar. På grund av de tidigare angivna spännvidderna återstod 12,5 meter vid vardera ytterstöd efter att mittspannet färdigställdes genom symmetrisk utbyggnad, se figur 5.3. Den återstående delen byggdes på en särskild ställning med upplag i konsolarmen och på ytterstöden. I bron återstod en mindre del som gjöts ihop på en ställning upphängd i konsolarmarna. [Svenska Vägaktiebolaget (1966)]



Figur 5.3: Byggnation av Nötesundsbron.

5.1.2 Spännsystem

I Nötesundsbron användes för första gången i Skandinavien förspänningssystemet Freyssinet med kablar bestående av 12 stycken $\varnothing 7$ mm trådar i stålqualität St 145/165. Den totala mängden spännarmering uppgår till 70 ton. Placeringen av spännkablarna kan ses i figur 5.4. [*Svenska Vägaktiebolaget (1966)*]



Figur 5.4: Spännkablarnas placering.

5.2 Förutsättningar och påverkan av nedbrytning

För att kunna fatta ett bra beslut om vilka funktionsupprätthållande åtgärder som är de bästa alternativen för Nötesundsbron är det viktigt att utreda allmänna förutsättningar samt hur nedbrytningsprocesserna har påverkat konstruktionen och dess prestanda. Förutsättningar såsom tidigare reparationer, nuvarande skick och samhällskostnader kommer att tas upp.

5.2.1 Tidigare utförda reparationer

Det har tidigare inte funnits någon särskilt framtagen underhållsstrategi för Nötesundsbron. Däremot har en objektsspecifik underhållsplan funnits som bland annat innefattat att de dörrar som finns i de två mittenpelarna samt de båda nedstigningsluckorna i ändarna på lådbalksektionerna skall gå att öppna. *[Gunilla Kleiven (2004)]*

I början av nittiotalet upptäcktes problem med korrosionsangrepp på spiralarmeringen i de cirkulära pelarna. För att motverka detta togs ett katodiskt skydd i bruk. I mitten av nittiotalet upptäcktes läckströmmar som i sin tur hade resulterat i sönderrostade räcken. Räckena byttes därför ut och avisolerades. De höjdes även för att ge ett bättre skydd för cyklister. I övrigt har kantbalkarna impregnerats, brobanepattan omisolerats och övergångskonstruktionerna har bytts ut. Från början fanns dessutom en vägren som fungerade som gång- och cykelbana på var sin sida av respektive körfält. Detta ändrades till endast en gång- och cykelbana längs den västra sidan av bron på grund av att de existerande gång- och cykelbanorna endast var en meter breda och alltså för smala.

5.2.2 Nuvarande skick

Under åren 2003 och 2004 har utförliga inspektioner och provtagningar gjorts av REINERTSEN Sverige AB på uppdrag av Vägverket, region väst. Generella problem har bland annat visat sig vara frilagd armering i pelare och överbyggnadens konsoler samt spjälkskador intill grundavlopp, se figur 5.5.



Figur 5.5: Spjälkskador nära ytavlopp.

Andra problem är sönderrostade lager och höga kloridhalter i lagerpallar och överbyggnadens konsoler. De nedstigningsluckor som finns i lådbalksdelen har varit mycket dåligt tätade vilket lett till att vatten med vägsalter runnit in i lådbalken, se figur 5.6 nedan.



Figur 5.6: Nedstigningslucka

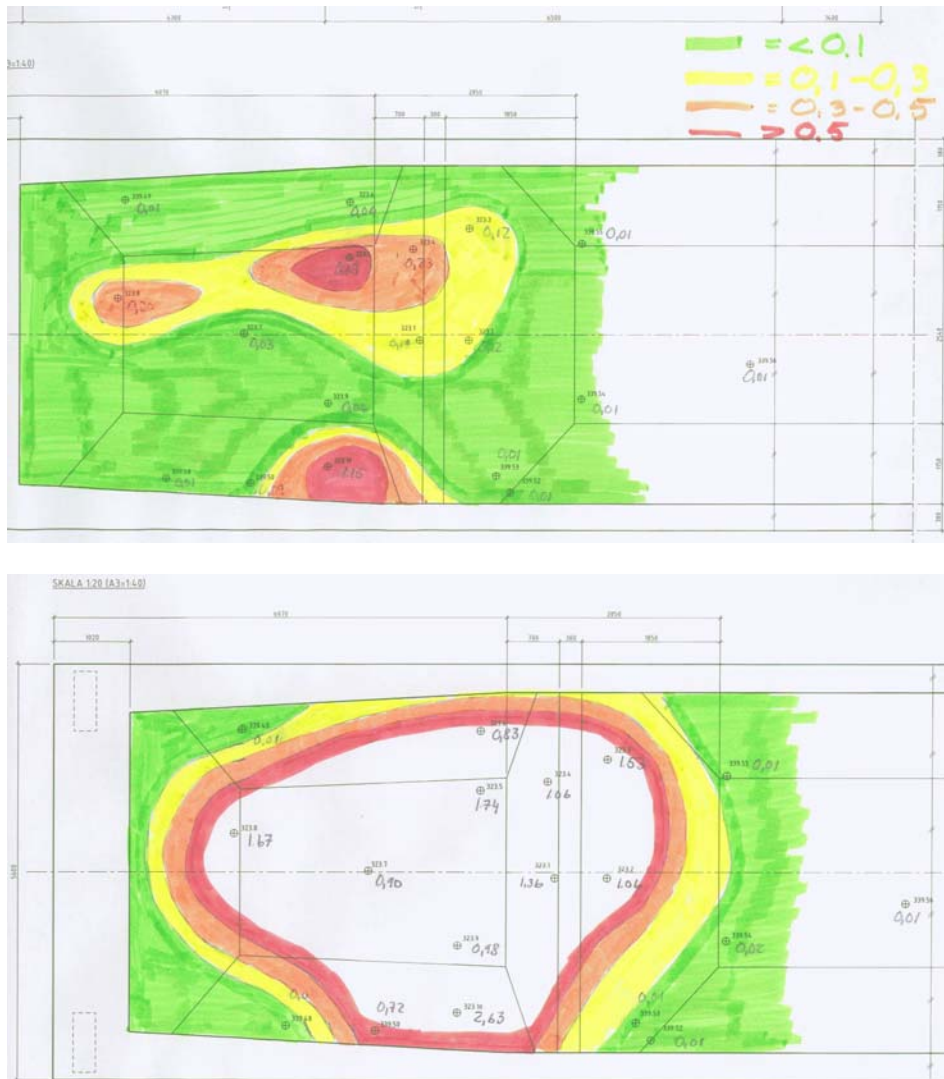
De otäta nedstigningsluckorna har gett höga kloridhalter i lådbotten vilket i sin tur lett till armeringskorrosion hos slakarmeringen, se figur 5.7.



Figur 5.7: Korrosionsproblem under en av nedstigningsluckorna på grund av stående vatten.

Kloridinträngningen orsakad av läckaget från nedstigningsluckorna är ett extra stort problem på grund av att spännkablar finns i bottenplattan av lådbalkssektionen. Fältundersökningar har visat att kabelrören var fullständigt injekterade. Undersökningarna visade också att ringa rost på spännstålet kunde observeras i de flesta provhål som gjorts. Rosten bedöms dock komma från byggskedet och inte på grund av de höga kloridhalterna i den omgivande betongen.

Kloridprover har tagits för att få en bättre bild av koncentrationerna av klorider på olika djup runt nedstigningsluckorna. Spännstålet ligger mitt i bottenplattan, 90 mm från ovansidan. Prover är tagna i intervallet 30-60 mm och 60-90 mm. Skisser över kloridkoncentrationen vid stöd 10 kan ses nedan i figur 5.8 där den övre bilden representerar 75 mm in i konstruktionen och den undre bilden 45 mm. Liknande koncentrationsförhållande finns vid stöd 13.



Figur 5.8: Kloridkoncentration i intervallet 60-90 mm och 30-60 mm. Gröna områden är koncentrationer mindre än 0,1 %, gult i intervallet 0,1-0,3 %, orange i intervallet 0,3-0,5 % och röd är koncentrationer större än 0,5 %. Det vita området i mitten av den under bilden är ett område där koncentrationen är större än 0,5 %

Figur 5.8 visar att ett stort område har en kloridhalt på mer än 0,5 % ner till ett djup av 45 mm. På ett djup av 75 mm har kloridhalten över större delen av området minskat, men fortfarande är kloridhalten högre än 0,5 % lokalt. Dessa halter kan jämföras med den högsta tillåtna halten på 0,1 % för spännarmerad betong enligt SS-13 70 03, 2002.

Ett annat problem som upptäckts är att karbonatiseringsfronten nått in till 23 millimeters djup i väggarna i lådbalken, vilket i jämförelse med det täckande betongskiktet på 25 mm är oroväckande. Ytterligare funna problem är läckströmmar från det katodiska skyddet hos ett utav stöden (stöd 9) samt sprickbildning och synlig armering hos många av de cirkulära pelarna.

REINERTSEN Sverige AB har utfört en klassningsberäkning av Nötesundsbron. I en klassningsberäkning utnyttjas dagens kunskap och beräkningsmodeller för att bestämma hur mycket last konstruktionen kan ta i nuvarande skick. Detta kan ibland

innebära att konstruktionen bedöms kunna ta mer last än den en gång var dimensionerad för. Den klassificeringsberäkning som REINERTSEN Sverige AB utfört visade att endast hälften av spännstålet i lådans botten kan tillgodoräknas. Den begränsande faktorn är flänsavskjuvning mellan lådans botten och väggar, det vill säga mängden slakarmering mellanbotten och väggar. Detta innebär att en 50 procentig förlust av spännstålet i lådans botten kan tillåtas innan klassningslasten påverkas. Dock behövs alla kablarna i lådans väggar och de kablar som befinner sig under lådbottens överyta måste även de vara intakta. Att det finns mer spännstål än vad som krävs för att uppfylla kravet på bärförmåga kan bero på att allt spännstål faktiskt behövdes under produktionen.

5.2.3 Samhällskostnader

För att kunna beräkna samhällskostnaderna för olika åtgärdsalternativ har trafikantkostnaderna tagits fram. Väg 160 har en årsmedeldygnstrafik, ÅDT, på 4130 fordon varav 210 är lastbilar. Trafikantkostnaderna framgår av tabell 5.1.

Tabell 5.1: Trafikantkostnader per enhet.

	Kostnad per bil och körd mil	Kostnad per bil och extra restid (tim)
Personbil	11	115
Lastbil	37	257

Det är inte bara samhällskostnader som bör beaktas utan även andra produktionskostnader såsom eventuell tillfällig bro eller om trafiken leds på en färjelinje då antagligen fler turer behöver sättas in.

Nötesundsbron ligger som tidigare sagts mellan Orust och Uddevalla vilket medför att det är svårt att omdirigera trafiken. För att komma till Orust med bil finns det bara fyra alternativ. Det är antingen från norr över Nötesundsbron eller från söder över Skåpesundsbron, men även via färja mellan Svanesund-Röd eller de två färjorna mellan Morlanda-Malö och Flatön-Dragsmark.

För att beräkna de totala trafikantkostnaderna har tre olika trafikströmmar använts. Alla trafikströmmar har Uddevalla som slutdestination. Reparationsåtgärden på bron har beräknats ta 60 dygn, se bilaga F. Trafikströmmarna kan ses i figur 5.9 där den svarta linjen symboliserar trafikströmmen vid total avstängning av bron.



Figur 5.9: Trafikströmmar.

I det första fallet används endast en trafikström som går mellan Härod via färjan i Svanesund till Uddevalla. Alternativet medför en samhällskostnad i form av trafikantkostnaden och en produktionskostnad i form av extrainsatta färjeturer. I analysen har det räknats med en extra körsträcka på 22,6 km och extra tid för personbilar på 25 minuter och 27 minuter för lastbilar. Med endast en trafikström fås en total trafikantkostnad på ungefär 19,6 Mkr varav 17,1 Mkr är av personbilar och 2,5 Mkr från lastbilar.

I det andra fallet har två trafikströmmar antagits; en som går som i det första fallet dit alla lastbilar har hänvisats och 2/3 av personbilarna. Den resterande tredjedelen av personbilarna antas ta vägen från Ellös till Uddevalla via de två färjorna mellan Morlanda-Malö och Flatön-Dragsmark. För att åka mellan Ellös och Uddevalla har personbilarna fått en extra körsträcka på 1 km och ett tidstillägg på 15 minuter. Med dessa trafikströmmar får man en samhällskostnad på drygt 16,3 Mkr varav 13,8 Mkr är för personbilar och 2,5 Mkr är för lastbilar. Även i detta fall tillkommer produktionskostnader i form av extra färjetrafik.

I det tredje alternativet stängs inte hela bron av utan endast ett utav körfälten. Trafikljus måste då användas för att reglera trafiken. Detta medför att hela trafikströmmen kan köra över bron och därmed tillkommer inga samhällskostnader för extra körsträcka, däremot tar det extra tid att stanna vid rödljus. För att beräkna samhällskostnaden för att stanna vid ljusreglering har ett tidstillägg på 2 minuter antagits. Med en reparationsmetod som bara kräver en körriktning avstängd kommer samhällskostnaden att bli omkring 1 Mkr varav 0,9 Mkr för personbilar och 0,1 Mkr för lastbilar.

För de tre fallen kan beräknade samhällskostnader jämföras och slutsatsen blir att det ger en stor kostnad att stänga av Nötesundsbron jämfört med att bara stänga ett körfält, se tabell 5.2. Detta betyder att det är en stor ekonomisk fördel med de reparationsalternativ som inte kräver någon avstängning av bron.

Tabell 5.2: Samhällskostnader.

Fall	Personbilar [antal]	Sträcka [km]	Tid [minuter]	Lastbilar [antal]	Sträcka [km]	Tid [minuter]	Total kostnad [Mkr]
1	3920	22,6	25	210	22,6	27	19,6
2	2613	22,6	25	210	22,6	27	16,3
	1307	1	15	0	1	15	
3	3920	0	2	210	0	2	1,0

5.3 Val av åtgärd för Nötesundsbron- lådbotten i högbron

Den del av Nötesundsbron som här valts ut för att pröva metodiken för val av åtgärd är underflänsen i lådbalken, under de båda nedstigningsluckorna. Denna del har i dagsläget höga kloridhalter men ingen korrosion på spännstålet har kunnat konstateras, se figur 5.4 för tvärsnitt. En viktig aspekt är att REINERTSEN Sverige AB:s klassningsberäkning visat att endast 50 % av spännstålet i lådbotten behövs med hänsyn till kraven i brottgränstillstånd. Det aktuella områdets nuvarande skick gör att det kan kategoriseras under rubriken ”Spännstålet behövs i brottstadiet och för böjstyvhet” i beslutsträdet, vilket leder till att följande alternativ blir aktuella:

- Extern förspänning
- Fiberlaminat
- Ny pågjutning med armering
- Borttagning av kontaminerad betong och nygjutning
- Pågjutning med betong
- Korrosionshämmare
- Kloridutdrivning

- Katodiskt skydd
- Byte av spännarmering

De tänkbara åtgärdsalternativen för Nötesundsbron är således förstärkningsåtgärder, katodiskt skydd och borttagning av gammal betong och ersättning med ny. De höga kloridhalterna gör att korrosionshämmare och en pågjutning med betong inte är aktuella alternativ, då dessa endast är effektiva vid små kloridmängder. Att behandla betongen genom elektriska strömmar kan däremot vara ett bra alternativ. Ett katodiskt skydd är att föredra framför kloridutdrivning då kloridutdrivningen kräver en högre strömstyrka vilket ökar risken för väteförsprödning. Det katodiska skyddet är i dagsläget inte tillåtet att använda på förspända konstruktioner men förhoppningsvis fortsatt forskning kan visa att det kan vara en godtagbar lösning. Ett katodiskt skydd skulle förhindra korrosionsprocessen vilket skulle vara en mycket lämplig åtgärd i Nötesundsfallet då spännstålet ännu inte börjat rosta.

Ett alternativ för att säkerställa bronns prestanda utan att ersätta spännstålet är att förstärka underflänsen. Det skulle kunna vara möjligt att använda fiberlaminat som förstärkningsåtgärd om det fästes på väggarna för att undvika flänsavskjuvning. För att fiberlaminatet ska kunna ta upp dragspänningar i flera riktningar måste det också appliceras i flera riktningar.

Bron kan även förstärkas genom extern förspänning som kan monteras på väggarna eller vid plattan. För att undvika flänsavskjuvning kan det vara bättre att placera kablarna på väggen. Om extern förspänning används måste kontinuerliga kontroller av betongen runt den ursprungliga armeringen genomföras. Kontrollen sker med anledning av att betongen kan spjälkas bort till följd av korrosion.

Ett bra alternativ för att motverka korrosion på spännstålet är att avlägsna den kontaminerade betongen och ersätta den med ny betong. Det är dock mycket komplicerat då det kan vara svårt att avlägsna all förorenad betong utan att frilägga spännkablarna helt. Den största delen av kloriderna avlägsnas och halten av klorider i den kvarvarande betongen minskas genom att den nya betongen gjuts på. Ett annat problem vid borttagning av betong kan uppstå på grund av risken för flänsavskjuvning mellan lådans väggar och botten. I och med att mängden slakarmering är den kritiska faktorn skulle det få allvarliga konsekvenser om borttagningen av betongen orsakar att denna slakarmering mister sin funktion. All förorenad betong kan därför inte tas bort samtidigt vilket innebär att reparationstiden kommer öka markant.

De höga kloridhalterna i underflänsen härstammar från de båda nedstigningsluckorna i den övre plattan. Dessa luckor har tätats temporärt och kommer sedan att sättas igen vilket innebär att själva källan till problemet har tagits bort och ingen nämnvärd ökning av koncentrationen klorider är att vänta. Trots de höga kloridhalterna har spännstålet ännu inte börjat rosta. Detta kan vara en indikation på att kloridhalterna är för små för initiering av armeringskorrosion. En annan anledning kan vara att någon av förutsättningarna för korrosion inte finns, exempelvis syre och vatten. I så fall ger detta ytterligare ett alternativ i beslutsträdet:

- Ingen åtgärd

Det senare är dock ett svårt och riskfyllt beslut att fatta eftersom det är mycket svårt att bedöma vilka förutsättningarna för korrosion som finns och hur de eventuellt kommer förändras i framtiden. Det är därför inget lämpligt alternativ att lämna bron utan någon form av kontroll på spännstålet. En möjlig lösning är att installera ett bevakningssystem i form av potentialmätning. Metoden går ut på att mäta potentialförändringar och är den enda accepterade icke förstörande metoden för bedömning av korrosionstillstånd hos armering utan synliga tecken på korrosion. En stark potentialsänkning innebär oftast att korrosion har initieras. Metoden utnyttjar en referenselektrod med känd och konstant elektropotential och mätningen görs sedan mellan armeringen och referenselektroden. För att skapa en extra säkerhet, det vill säga längre tid från korrosionsinitiering till brott, är det i Nötesundsfallat lämpligt att göra potentialmätningen mellan referenselektroden och kabelröret, då dessa är av stål. I och med att kabelrören är injekterade bör det finnas det gott om tid från det att korrosion startat på rören tills det att den startar på spännstålet. För Nötesundsbron finns det ytterligare en säkerhet då endast 50 % av spännstålet behövs i brottgränstillstånd. Genom att använda sig av ett bevakningssystem kan en eventuellt erforderlig åtgärd flyttas fram i tiden och det kan därför bli en stor kostnadsbesparing.

Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut i Borås har utvecklat en ny sorts mätutrustning som skulle kunna användas för Nötesundsbron. Mätutrustningen och metodiken ger en kostnadseffektiv kartläggning av armeringskorrosion i betong och är samtidigt som den är icke förstörande och mycket lätt att använda. Instrumentet som kan hanteras för hand mäter korrosionshastighet, korrosionspotential och betongens resistivitet vilket möjliggör en säkrare bedömning. Metoden bygger på potentialmätning genom att en ströms med känd styrka leds genom armeringen.

Rekommendationen för åtgärd av Nötesundsbron blir således att installera ett bevakningssystem och med hjälp av detta kontrollera att korrosion ej börjar. Om korrosion på något av kabelrören trots allt börjar kan en då lämplig åtgärd vidtas. Då kan även forskningen ha hunnit utreda huruvida väteförspändning är ett problem för spännstål eller inte. Det kan medföra att det finns fler tillåtna åtgärdsalternativ som är möjliga att genomföra vid det aktuella tillfället. Om det inte har blivit någon förändring beträffande det katodiska skyddet kan bortbilning av kontaminerad betong och ersättning med ny eller extern förspänning vara bra åtgärder. Som sista utväg kan även spännstålet bytas ut, men detta är en mycket omfattande reparation som leder till stora kostnader. Genom att skjuta upp eventuell åtgärd tills den verkligen behövs kan en stor kostnadsbesparing göras

I och med att extern förspänning kan vara en bra åtgärd i ett senare skede kan det vara lämpligt att förbereda detta genom att skapa nya förankringar. Detta minskar den tid som behövs för att applicera den externa förspänningen vilket ger större säkerhetsmarginaler och minskar samhällskostnaden vid reparationen.

6 Slutsatser

När en inspektion av en förspänd betongbro utförs görs även en bedömning av bronns skick. Utifrån bedömningen av bronns skick och en utredning av orsaken till eventuella skador kan den föreslagna beslutsprocessen tillämpas. Eftersom beslutsmodellen bygger på att indata är kända är det viktigt att mätvärdena utvärderas nog. Deras felmarginal kan vara stor då många av de mätmetoder som finns är osäkra och svåra att använda. Dessutom är det inte ekonomiskt eller praktiskt möjligt att ta prover över hela konstruktionen. Därför måste mätpunkterna väljas med omsorg så att inte resultatet blir missledande. Beslutsmodellen är generellt utformad för att gälla förspända konstruktioner. Varje konstruktion och dess utformning är unik, precis som dess skador och förutsättningar, vilket medför att alla föreslagna åtgärder kanske inte alltid kan användas. En bedömning från fall till fall måste alltid göras där konstruktionens funktion nog utreds och åtgärdernas effekt på bronns funktion bedöms.

Beslutsmodellen är endast ett sätt att tänka på av flera möjliga. I detta fall är modellen baserad på ett konstruktionsmässigt och funktionsmässigt tänkande. Med andra ord organiserar beslutsmodellen tankegången vid val av funktionsupprätthållande åtgärd ur ett funktionsmässigt perspektiv.

Beslutsträdet är lätt att använda men förutsätter att användaren har förståelse för skadeorsaker och konstruktionens verknings sätt. Svårigheten vid användandet kan vara att tolka de data som fås från inspektionerna samt att bestämma konstruktionens förutsättningar. Om det till exempel har konstaterats att det finns klorider i den förspända betongen återstår det att bedöma om det finns risk för att korrosion startar, när korrosionen i så fall uppkommer och hur snabbt korrosionsprocessen fortlöper. Dessutom måste det bedömas hur korrosionen påverkar konstruktionens funktion. Det måste även avgöras om det är slakarmeringen eller spännstålet som begränsar konstruktionens bärförmåga. En klassningsberäkning kan ge svar på den senare frågan och resultatet kan leda till begränsningar i fråga om möjliga åtgärder och ställa extra krav vid reparationsutförandet. Tillämpningen av beslutsträdet på Nötesundsbron fungerade bra, mycket tack vare att både skadorna och skadeorsakerna var väldefinierade.

Enligt nuvärdesmetoden ger en senareläggning av en eventuell åtgärd en kostnadsbesparing. Detta sätt att tänka på kan diskuteras. En senareläggning av en reparationsåtgärd kan kanske innebära att konstruktionen brutits ned ytterligare och en större och mer omfattande reparation måste göras, vilket ger en ökad reparationskostnad. Valet av åtgärd för Nötesundsbron kan bli annorlunda om en annan ekonomisk modell används.

Idag grundar sig normerna i huvudsak på materialkrav. Detta kan ibland leda till missvisande tillståndsbedömningar av förspända konstruktioner. Istället för att fokusera på att återställa konstruktionens ursprungstillstånd borde målsättningen vara att återställa eller upprätthålla dess funktion. Kanske behöver den skadade konstruktionsdelen inte ersättas, utan ett billigare och effektivare alternativ kan vara att leda om krafterna men ändå bevara konstruktionens funktion.

Normerna har i dagsläget låga gränsvärden för klorider i förspänd betong. Kanske är de kritiska kloridhalterna för lågt satta och högre kloridhalter kan kanske accepteras. En indikation på detta är forskningsprojektet HETEK, lett av Vejdirektoratet i Danmark, som kommit fram till att kloridhalterna för korrosionsinitiering kan variera mellan 0,2 och 2,0 procent av cementhalten för betong med ett vct på 0,4. Utredningen visar också att initieringshalterna ökar med minskat vct samt att de är olika på olika områden hos konstruktionen. Enligt dagens normer så tolkas höga kloridhalter i princip som detsamma som påbörjad armeringskorrosion. Det finns dock exempel som visar att så inte är fallet vilket innebär att fortsatt forskning inom området behövs. En eventuell ändring i normerna skulle kunna leda till stora besparingar och förhindra onödiga reparationer. Normerna tar idag inte någon hänsyn till spännstålets funktion för konstruktionen. Om spännstålet inte behövs i brottgränstillstånd kan lägre säkerhetsmarginaler tillåtas och högre kloridhalter kan accepteras.

Inspektionerna som ligger till grund för en eventuell åtgärd är också en viktig aspekt i beslutet om åtgärd. Det är den vanliga inspektionen som kan leda till att grundligare utredning görs. Det är därför viktigt att grunden för bedömningen av konstruktionens skick är lika i alla fall. Det ställs stora krav på den som utför inspektionen för att skadorna ska bedömas på ett riktigt och enhetligt sätt. Inspektören måste ha stor kunskap om olika skadors inverkan för att kunna avgöra vilka skador som är farliga. Till exempel behöver inte sprickor tyda på pågående nedbrytning utan kan ha uppkommit under produktionen.

Många av de metoder som finns att använda i samband med reparationer och andra åtgärder är idag obeprövade. Kanske kommer en utökad användning av metoderna och en fortsatt forskning att ändra synen på deras effektivitet och tillämpning. Det är också troligt att nya metoder kommer att dyka upp som kanske är mer effektiva och kräver mindre ingrepp än de metoder som finns idag. I och med att det finns en marknad och efterfrågan på nya metoder är fortsatt forskning inom området nödvändig. Om fenomenet med väteförsprödning av spännstål saknas det ännu mycket kunskap. Om det skulle visa sig att katodiskt skydd faktiskt är möjligt att använda hos förspända betongkonstruktioner skulle detta ge stora besparingar. Oron för det katodiska skyddets negativa effekter grundar sig på brist på kunskap och inte på erfarenheter från verkliga fall.

Det är mycket viktigt att kunna bedöma armeringens skick på enkelt sätt. Idag är potentialmätning en av få praktiskt användbara och icke förstörande mätmetoder. Sveriges provnings- och forskningsinstitut har utvecklat en ny mätutrustning och metodik för kostnadseffektiv kartläggning av armeringskorrosion i betong. Mätutrustningen är lätt att använda och förhoppningsvis kan detta bli ett praktiskt redskap för inspektörerna som dessutom kan leda till en säkrare bedömning av konstruktionernas tillstånd. En fortsatt forskning även inom detta område skulle kunna leda till säkrare tillståndsbedömningar och användarvänliga mätmetoder.

För att bättre kunna bedöma konstruktioners tillstånd bör behovet av inspektioner och mätningar beaktas redan vid projekteringen av nya konstruktioner. Exempelvis kan sensorer och utrustning för mätning av korrosion hos spännstålet byggas in redan från början. Om en sensor byggs in kan en bättre uppföljning och kontroll fås men även förändringar av konstruktionens tillstånd kan lätt upptäckas. Även ett skydd mot inträngning av exempelvis tölsalter kan appliceras redan vid nybyggnation på utsatta

delar av konstruktionen för att ge bättre skydd mot exempelvis kloridangrepp. Om det redan från början kan konstateras att extern förspänning kan komma att bli ett lämpligt åtgärdsalternativ kan detta förberedas redan vid nybyggnationen. Detta har exempelvis gjorts på en nybyggd bro i Norge. Detta minimerar reparationstiden när åtgärden väl behöver sättas in och kan därför ge stora besparingar, inte minst i form av minskade samhällskostnader. Det kan även vara ett alternativ att för förspända konstruktioner redan från början använda sig av extern förspänning då spännkablarna är lättare att inspektera och byta ut vid behov. Genom att redan i projekteringsstadiet fundera över vilka problem som kan uppkomma, hur dessa upptäcks och hur de åtgärdas, kan stora besparingar göras i framtiden.

Ett tätare samarbete mellan materialforskare och konstruktörer skulle föra reparations- och underhållsbranschen framåt och gynna ett mer effektivt handlingsätt i fråga om val av åtgärder. Samtidigt som de olika nedbrytningsprocessernas påverkan på byggnadsmaterialen måste kartläggas måste tonvikten flyttas från materialtänkande till funktionstänkande.

7 Referenser

Böcker:

Ahlberg S-O., Spade B. (2001): *Våra broar – en kulturskatt*, Banverket och Vägverket, 2001, ISBN 91-88250-43-1

Aronsson B., Bolin J-O., Ericsson K, Eriksson B., Jansson K., Mildton B., Nilsson B-G., Nilsson P-A., Rosén L., Rutgersson B., Sundén H. (1999): *BRO handbok för broinspektion*, Vägverket Publ. 1993:34, utgåva 2 1999

Burström P. G. (2001): *Byggnadsmaterial Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, Studentlitteratur, 2001, ISBN 91-44-01176-8

Byfors K., Fratesi R., Grønvold F, Gudmundsson G., Janz M., Klinghoffer O., Mattila J., Miller J. B, Poulsen E. (2004): *Repair and Maintenance of Concrete Structures. Repair Methods – A Review*, Norwegian Public Roads Administration, 2004. ISBN 82-91228-28-0

Camitz G. och Petterson K. (1991): *Katodiskt korrosionsskydd av stålarmering i betongkonstruktioner*, Korrosionsinstitutet, Bullentin nr 103, 1991

Edward G. Nawy (1997): *Concrete construction engineering handbook*, Boca Raton 1997.

FIB (2001): *Durability of post-tensioning tendons*, fib Technical report Bullentin 15, 2001, ISSN 1562-3610

FIB (1999): *Structural Concrete Textbook on Behaviour, Design and Performance*, fib Technical report Bullentin 3 Volume 3, 1999, ISSN 1562-3610

Fuzier J-P. (2002): *Managemant, maintenance and strengthening of concrete structures*, fib Technical report Bullentin 17, 2002, ISSN 1562-3610

Gabrielsson H. (2000): *Förbättring av befintliga broar*, förstudie till FoU-ramprojekt, Vägverket, Avdelningen för bro och tunnel, 2000.

Ganz H. R., Elices M.(2003): *Influence of material and processing on stress corrosion cracking of prestressing steel - case studies*, fib Technical report Bullentin 26, 2003, ISSN 1562-3610

Lindbladh L. (1993): *Mätning och bedömning av broars tillstånd*, Vägverket Publ. 1993:35, 1993

Nilsson L.-O., Sanberg P., Poulsen E., Tang L., Andersen A. & Fredriksen J. M., HETEK, *A system for estimation of chloride ingress into concrete, Theoretical background*, Denmark Ministry of Transport, 1997, ISBN 87 7491 783 8

Olsson J., Skärvad P-H. (2000): *Företagsekonomi 99*, Liber Ekonomi, 2000, ISBN 91-47-04392-X

Paulsson-Tralla J. (1999): *Service Life of Repaired Concrete Bridge Decks*, Kungl tekniska högskola Institutionen för byggkonstruktion, TRITA-BKN. Bulletin 50, 1999, ISSN 1103-4270

Paulsson J.(1997): *Effects of Repairs on the Remaining Life of Concrete Bridge Decks*, Kungl tekniska högskola Institutionen för byggkonstruktion, TRITA-BKN. Bulletin 27, 1997, ISSN 1103-4270

Petersson T., Sundquist H. (1997): *Spännbetong*, Kungl. Tekniska Högskolan, Byggkonstruktion. TRITA-BKN Rapport 46, 1997. ISSN 1103-4289

Pettersson K. (1996): *Betonkonstruktioners livslängd – i kloridmiljö*, Cement och Betong Institutet, Stockholm, 1996. ISSN 0346-8240 CBI rapport 3:96

Pettersson K. (1996): *Olika faktorerers inverkan på kloriddiffusion i betongkonstruktioner*, Cement och Betong Institutet, Stockholm, 1996. ISSN 0346-8240 CBI rapport 4:94

Pettersson K.(1992): *Corrosion threshold value and corrosion rate in reinforced concrete*, Cement och Betong Institutet, Stockholm, 1992. ISSN 0346-8240 CBI rapport 2:92

Silfwerbrant J, Sundquist H. (2001): *Drift, underhåll och reparation av konstbyggnader*, Kungl Tekniska Högskolan Institutionen för byggkonstruktion, TRITA-BKN. Rapport 53, Brobyggnad utgåva 2 2001, ISSN 1103-4289

Steering Committee conference proceedings 7 (1995): *Fourth International Bridge Engineering Conference Volume 2*, National research council, 1995, ISSN 1073-1652

Svenska Vägaktiebolaget, *Nötesundsleden*, 1966.

Svensk Standard, SS 13 70 03, *Betong – Användning av EN 206-1 i Sverige*, 2002

Svensk Standard, SS 13 70 10, *Betongkonstruktioner – Täckande betongskikt*, 2002

Taerwe L.(2001): *Durability of post-tensioning tendons*, fib Technical report Bullentin 15, 2001, ISSN 1562-3610

Thomas Telford Ltd, London (1988): *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1 Design and Construction, volume 84*, 1988, ISSN 0307 8353

Troive S. (1998): *Structural LCC Design of Concrete Bridges*, Kungl tekniska högskola Institutionen för byggkonstruktion, TRITA-BKN. Bullentin 41, 1998, ISSN 1103-4270

Troive S. (1996): *Optimering av åtgärder för ökad livslängd hos infrastrukturkonstruktioner*, Kungl tekniska högskola Institutionen för byggkonstruktion, TRITA-BKN. Bullentin 21, 1996, ISSN 1103-4270

Vägverket (1996): *Broprojektering – En handbok*, Avdelningen för bro och tunnel, ISSN 1401-9612 Publikation 1996:63

Artiklar:

Mohr P. (1984), *Repair of Prestressed Concrete- Re-stressing of Replaced Prestressed Concrete*, A/S Skandinavisk Spandbetong nr1984/1, Danmark

Mohr P. (1981), *Inspektion af spændbetonkonstruktioner*, Nordisk Betong 4:1981

Pedersen T., Quist Nielsen C. (1992), *Reparation af forspændte broer- et eksempel*, COWIconsult, Aalborg, Dansk vejtidsskrift nr 3, 1992

Personligkontakt:

Jonas Andersson, Vägverket Vänersborg, 2004

Anette Berring, Teknologisk Institut beton, 2004

Jan Hetmar, Skandinavisk Spaendbetong, 2004

Anders Lindvall, Byggnadsmaterial Chalmers, 2004

Anki Strand, Vägverket, 2004

Utdrag ur Vägverkets brodatabas

Gunilla Kleiven, Vägverket, 2004

Steinar Leivestad, Standard Norge, 2004

Tauno Hietanen, Rakennusteollisuus, 2004

System	Uppbyggnad	Stålkvalitet fyk/fstu	Brottlast kN	Dim. för ankarplatta eller bock	Minsta centrum- avstånd till förankrings- centrum	Minsta avstånd från kant till förankrings- centrum	Rörelse vid förankring (kilglidning etc.)	Inv. diameter för ursparings- rör	Största avstånd mellan under- stöttingar	Betongens lägsta kubhållfasthet vid uppspanning
Enhet		Mpa		mm * mm	mm	mm	mm	mm	m	Mpa
BBRV	Tråd 12ø6	1500/1770	600	140 * 140	190 (160)	100	1,0	30	0,8	28
*	Tråd 22ø6	1500/1770	1100	200 * 200	250 (220)	135	1,0	40	1,0	28
*	Tråd 32ø6	1500/1770	1600	220 * 220	305 (270)	165	1,0	50	1,2	28
*	Tråd 44ø6	1500/1770	2200	260 * 260	350	190	1,0	60	1,2 - 1,5	28
Freyssinet	Tråd 12ø7	1470/1670	745	ø120	215 (150)	110	5,0	40	1,0	32
*	Tråd 12ø8	1320/1570	940	ø150	240 (180)	125	6,0	42	1,0	32
*	Lina 6ø13	1630/1860	1100	200 * 200	250 (220)	135	4,0	40	1,0	28
*	Lina 12ø13	1630/1860	2200	260 * 260	350	190	4,0	60	1,2 - 1,5	28
*	Lina 12ø16	1550/1770	3180	300 * 300	420	230	6,0		1,5	28
VSL	Lina 7ø13	1630/1860	1285	210 * 210	290 (250)	155	5,0	50	1,2	28
*	Lina 12ø13	1630/1860	220	250 * 250	350	190	5,0	70	1,2 - 1,5	28
*	Lina 12ø16	1550/1770	3180	300 * 300	420	230	6,0		1,5	28
*	Lina 3ø1½"	1670/1860	625	140 * 140	190 (160)	100	5,0	41	1,0	28
*	Lina 7ø½"	1670/1860	1460	210 * 210	300 (260)	160	5,0	50	1,2	28
BBR Cona Multi	Lina 12ø13	1670/1830	2200	240 * 270	350	190	6	70	1,2 - 1,5	28
Dywidag	Stång 1 ø26	835/1030	545	140 * 140	180 (160)	90	0,5	32	1,8 - 2,5	28
*	Stång 1 ø32	835/1030	830	160 * 160	220 (210)	110	0,5	38	1,8 - 2,5	28
*	Stång 1 ø36	835/1030	1050	180 * 180	150 (240)	125	1,0		1,8 - 2,5	28

Exponeringsklasser

Exponeringsklasserna är grupperade efter de viktigaste angreppsmekanismerna, och beteckningarna förklaras enligt följande:

X0	Ingen risk för korrosion eller angrepp
XC (Carbonation)	Korrosion föranledd av karbonatisering
XD (De-icing agents)	Korrosion orsakad av andra klorider än från havsvatten, tex tösalt
XS (Sea water)	Korrosion orsakad av klorider från havsvatten
XF (Frost)	Angrepp av frysning/upptidning
XA (chemical Attack)	Kemiska angrepp

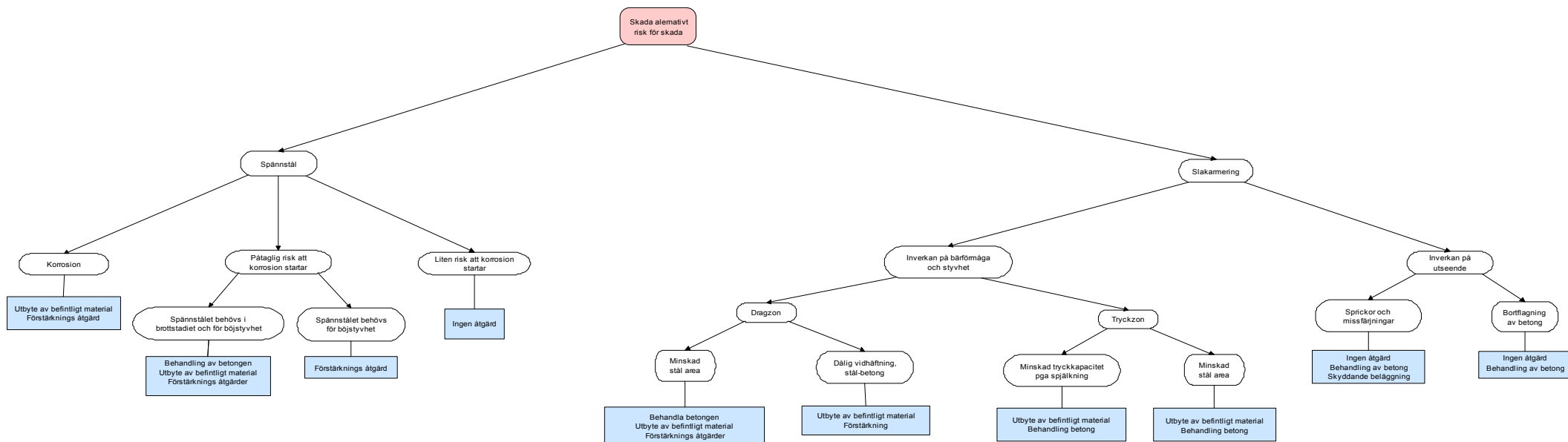
Tabellen nedan ger en översikt av exponeringsklasserna. För den fullständiga tabellen hänvisas till standarden.

Typ av angrepp		Klass	Beskrivning
Ingen risk		X0	Oarmerat utan frost, eller armerat i mycket torr miljö
Korrosion föranledd av karbonatisering		XC1	Torr eller ständigt våt
		XC2	Våt, sällan torr
		XC3	Måttlig fuktighet
		XC4	Cykliskt våt och torr
Korrosion orsakad av klorider	Andra klorider än från havsvatten	XD1	Måttlig fuktighet
		XD2	Våt sällan torr
		XD3	Cykliskt våt och torr
	Havsvatten	XS1	Luftburet salt
		XS2	Ständigt under vatten
		XS3	Tidvatten-, skvalp- och stänkkzon
Frostangrepp		XF1	Måttlig vattenmättad, utan avisningsmedel
		XF2	Måttlig vattenmättad, med avisningsmedel
		XF3	Hög vattenmättad, utan avisningsmedel
		XF4	Hög vattenmättad, med avisningsmedel eller havsvatten
Kemiskt angrepp		XA1	Obetydligt kemiskt aggressiv miljö
		XA2	Måttlig kemiskt aggressiv miljö
		XA3	Starkt kemiskt aggressiv miljö

BILAGA D: Beslutsträd

beslutsträd.igx

Bestuisträd
Skada



- UTBYTE AV BEFINTLIGT MATERIAL**
 Utbyte av armering
 Utbyte av betong
- FÖRSTÄRKNINGS ÅTGÄRDER**
 Extern förspänning
 Fiberlämnat
 Pågjutning med armering
- BEHANDLING AV BETONG**
 Pågjutning av betong
 Katodiskt skydd
 Korrosionshämmare
 Kloridutdrivning ur betong
 Realkalisation
 Efterbehandling
- FÖREBYGGANDE ÅTGÄRDER**
 Impregnering
 Skyddande beläggning
 Hydrofoba material
 Sprickinjektering

