

CHALMERS



Bärförmåga för betongkonstruktioner under nedbrytningsprocess

Slutrapport

KARIN LUNDGREN

Institutionen för konstruktion och mekanik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2004

Rapport 04:14

RAPPORT 04:14

Bärförmåga för betongkonstruktioner under nedbrytningsprocess

Slutrapport

KARIN LUNDGREN

Institutionen för konstruktion och mekanik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2004

Bärförmåga för betongkonstruktioner under nedbrytningsprocess
Slutrapport
KARIN LUNDGREN

© KARIN LUNDGREN, 2004

ISSN 1651-9035
Rapport 04:14
Arkiv nr. 36
Institutionen för konstruktion och mekanik
Betongbyggnad
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Framsida:
Exempel på konstruktion med korroderad armering.

Institutionen för konstruktion och mekanik
Göteborg, Sverige 2004

Load-carrying capacity of concrete structures: environmental impacts

Final report

KARIN LUNDGREN

Department of Structural Engineering and Mechanics

Concrete Structures

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

It is important to be able to calculate how the load-carrying capacity of concrete structures is affected by environmental impacts, not only for assessment of existing structures, but also for design of new constructions. Corrosion of the reinforcement is one of the most important factors that limits the life time of reinforced concrete structures. When reinforcement corrodes, its volume increases, which in turn causes splitting forces on the surrounding concrete. This can lead to splitting cracks along the reinforcement bar, which has a strong effect on the bond between the reinforcement and the concrete.

The aim with this project was to develop a method to analyse how the load-carrying capacity of concrete structures are affected during their life time, in varying environments. A general model describing the bond, with the effect of corrosion included, was developed and implemented in a commercial finite element program. Furthermore, available models describing shrinkage, creep, and development of strength and stiffness of the concrete were used.

The models were used in analyses of several test series found in the literature. A good agreement was found. Thereafter, an overview for different cases was compiled. Furthermore, analyses of how large corrosion penetration that is needed to crack the cover depending on concrete quality, cover, and diameter of the reinforcement bar were carried out, and compiled in a diagram. These are the main results from the project:

- A model that, through detailed 3D-analyses, makes it possible to describe the influence of corrosion on deformations and load-carrying capacity.
- An understanding of the problem – described in an overview.
- A diagram describing how large corrosion penetration that will crack the cover depending on concrete quality, cover and diameter of the reinforcement bar.

Results from the project have been published in several scientific papers, conference papers and reports, and also in an article in the magazine "Bygg & teknik". A complete list of publications is included in this report.

Key words: concrete, reinforcement, corrosion, life time, load-carrying capacity, deformation, environmental impacts

Bärförmåga för betongkonstruktioner under nedbrytningsprocess

Slutrapport

KARIN LUNDGREN

Institutionen för konstruktion och mekanik

Betongbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Vid bedömning av befintliga byggnader och även vid nybyggnation är det viktigt att kunna beräkna hur betongkonstruktioners bärförmåga påverkas av nedbrytning. Korrosion av armering är en av de viktigaste faktorerna som begränsar livslängden hos armerade betongkonstruktioner. När armering rostar, ökar dess volym, vilket i sin tur orsakar spjälkande krafter på betongen som omsluter armeringen. Detta kan leda till spjälksprickor som följer armeringsjärnet, vilket kraftigt försämrar vidhäftningen mellan armeringen och betongen.

Målsättningen med detta projekt var att ta fram en metod för hur man på ett nyanserat sätt skall kunna analysera hur bärförmågan hos en armerad betongkonstruktion påverkas under dess livslängd, i varierande miljöer. En generell modell som beskriver vidhäftningen med effekten av armeringskorrosion inkluderad har tagits fram och implementerats i ett kommersiellt finit element-program. Dessutom har tillgängliga modeller som beskriver betongens krympning, krypning och hur materialegenskaper påverkas med tiden använts.

Modellerna har använts i analyser av ett flertal försöksserier från litteraturen. God överensstämmelse har kunnat påvisas. Därefter har en översikt för olika fall sammanställts. Dessutom har ett diagram över hur stort rostangrepp som spräcker täckskiktet beroende på betongkvalité, stångdiameter och täckskikt tagits fram. Detta är de främsta resultaten inom projektet:

- En modell som gör det möjligt att med noggranna 3D-analyser beskriva rostens inverkan på deformationer och bärförmåga.
- En förståelse för fenomenet – beskrivet i en översikt för olika fall.
- Ett diagram över hur stort rostangrepp som spräcker täckskiktet beroende på betongkvalité, stångdiameter och täckskikt.

Resultat från projektet har publicerats i ett flertal vetenskapliga artiklar, konferensbidrag och rapporter, och dessutom i en artikel i Bygg & teknik. En fullständig lista ingår i rapporten.

Nyckelord: betong, armering, korrosion, livslängd, bärförmåga, deformation, nedbrytning

Innehåll

1	BAKGRUND OCH SYFTE	1
2	GENOMFÖRANDE	2
3	RESULTAT	3
4	RESULTATENS PRAKTISKA TILLÄMPNINGAR OCH MÖJLIGA KONSEKVENSER	5
5	PUBLICERAT MATERIAL FRÅN PROJEKTET	7

BILAGA A: EFFEKT AV KORROSION FÖR OLIKA FALL – EN ÖVERSIKT

Förord

Denna rapport sammanfattar resultaten i ett forskningsprojekt “Bärförmåga för betongkonstruktioner under nedbrytningsprocess”. Arbetet har utförts under januari 2001 till december 2004 vid forskargruppen Betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola. Projektet har finansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Forskningsrådet för miljö, areella näringar och samhällsbyggande (Formas). Som referensgrupp har FoU-Väst medverkat. För mer detaljerad information om arbetet som har utförts inom projektet hänvisas till mer detaljerade rapporter och artiklar – en lista över allt publicerat material inom projektet bifogas.

Göteborg, december 2004

Karin Lundgren

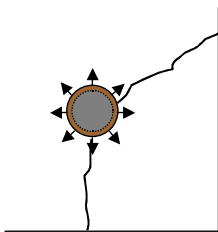
1 Bakgrund och syfte

Varför är det önskvärt att kunna beräkna hur betongkonstruktioners bärförmåga påverkas av nedbrytning? En viktig tillämpning är givetvis vid bedömning av befintliga byggnader, men även vid nybyggnation kan det vara av intresse. Inom byggbranschen idag vill man gå ifrån detaljkrav med hårt styrda normer gällande exempelvis minimiarmering, mot funktionskrav. Detta leder till en större frihet att utforma egna lösningar, men även till ett ökat ansvar och ett behov av noggranna analyser. Att då kunna analysera en konstruktions verkningssätt, och hur denna påverkas under livslängden, kommer att bli ett viktigt instrument för att kunna värdera och jämföra olika konstruktiva lösningar.

Korrosion av armering är en av de viktigaste faktorerna som begränsar livslängden hos armerade betongkonstruktioner. När armering rostar, ökar dess volym, vilket i sin tur orsakar spjälkande krafter på betongen som omsluter armeringen. Detta kan leda till spjälksprickor som följer armeringsjärnet, vilket kraftigt försämrar vidhäftningen mellan armeringen och betongen.

Detta är inte så enkelt att ta hänsyn till då man vill beräkna hur betongkonstruktioners bärförmåga påverkas av att armeringen rostar. Det finns empiriskt framtagna formler för hur bärförmågan påverkas, men eftersom effekten av de spjälkande spänningarna på strukturen beror på en mängd parametrar, till exempel hållfasthet, geometri och randvillkor för den omgivande strukturen, finns det behov av en mer generell modell.

Målsättningen med detta projekt var att ta fram en metod för hur man på ett nyanserat sätt skall kunna analysera hur bärförmågan hos en armerad betongkonstruktion påverkas under dess livslängd, i varierande miljöer. Arbetet har främst fokuserats på att göra det möjligt att analysera viktigare detaljer med godtyckliga utformningar, till exempel ändupplag och anslutningar, genom noggranna analyser med hjälp av finita element metoden. Dessutom ges ett underlag för praktiska bedömningsregler.



Figur 1 Korrosion av armering medför en volymökning som orsakar spjälkkrafter och eventuellt uppsprickning.

2 Genomförande

En generell modell som beskriver vidhäftningen med effekten av armeringskorrosion inkluderad har tagits fram och implementerats i ett kommersiellt finit elementprogram, Diana. Detta arbete utgick från den vidhäftningsmodell som togs fram i ett tidigare projekt: ”Utformning av ramhörn i betongbroar – brottmekanisk tillämpning”. Därefter har en modell som beskriver rostens mekaniska verkningssätt, samt den volymökning som rostbildningen ger upphov till, formulerats och implementerats. Rostens mekaniska egenskaper har undersökts genom en kombination av analyser och försök från litteraturstudier.

Modeller från CEB-FIP Model Code 1990 som beskriver hur betongens materialegenskaper påverkas med tiden i olika miljöer har implementerats i samma finita elementprogram. Därigenom har hållfasthetstillväxt kunnat inkluderas i analyser. Dessutom finns en modell för krympning av betongen, som har varit möjlig att använda. Den modell för krypning som finns tillgänglig går dock tyvärr inte att kombinera med sprickbildning. I en del analyser har därför krypning och sprickor modellerats i separata element. Denna modelleringsteknik har dock den stora nackdelen att sprickbilder måste vara kända innan analysen utförs, och den har därför haft endast begränsad användning.

En litteratursökning om hur förekomsten av sprickor påverkar korrosionsgraden hos armering har gjorts. Den visade att olika forskare inom detta område redovisar mycket olika resultat. Detta bedöms som ett mycket intressant område för fortsatt forskning, där projektmedel har sökts i samarbete med Byggmaterialgruppen på Chalmers.

Inom projektet har samarbete med en gästprofessor från Kina, Congqi Fang, bedrivits. Det gemensamma arbetet har dels behandlat släta armeringsstänger (i övrigt har projektet inriktat sig på kamstänger). Dessutom har kombinationen rost och cyklisk belastning studerats.

De framtagna modellerna har använts i analyser av ett flertal olika försöksserier från litteraturen. God överensstämmelse har kunnat påvisas. Därefter har en översikt för olika fall sammanställts. Dessutom har ett diagram över hur stort rostangrepp som spräcker täcksiktet beroende på betongkvalité, stängdiameter och täcksikt tagits fram.

3 Resultat

De främsta resultaten inom projektet är:

- En modell som beskriver vidhäftningen med effekten av armeringskorrosion inkluderad har tagits fram och implementerats

Detta gör det möjligt att beräkna hur ett rostangrepp påverkar deformationer och bärförmåga för godtyckligt utformade konstruktioner genom att använda detaljerade icke-linjära tredimensionella finita elementanalyser. Då modelleras både armering och betong med solidelement, och i ett speciellt skikt mellan armering och betong modelleras rosten. Rostangrepp orsakar svällning av rostskiktet, som även komprimeras. För information om hur sådana analyser kan utföras se Lundgren (2002c) eller Lundgren (2004bc). Modellen är dock endast kalibrerad för kamstänger – för att kunna användas för släta stänger måste en ny kalibrering göras.

- En förståelse för fenomenet – beskrivet i en översikt för olika fall

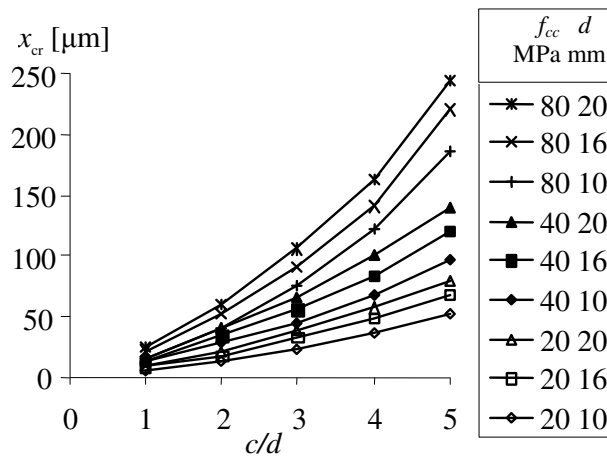
Hur armeringskorrosion påverkar vidhäftningen beror på ett flertal parametrar: armeringstyp, om det finns tvärarmering eller ej, stångdiameter, täcksikt, betongkvalité, mm. Vid en första genomläsning av litteratur inom området är det därför lätt att bli förvirrad. Eftersom modellen som är framtagen bygger på det mekaniska verknings sättet, har en god förståelse av problemet uppnåtts. Utifrån den förståelsen, kombinerad med litteraturstudier av utförda försök, har en översikt för olika fall sammanställts, se Appendix A. Där visas hur korrosion påverkar vidhäftningen för olika fall uppdelat på armeringstyp, tvärarmering eller ej, och vilken typ av brottmod som fås vid utdrag då armeringen ej har korroderat. Därigenom fås ett underlag för att kunna bedöma om korrosion är kritiskt för vidhäftningen i ett aktuellt fall.

- Diagram över hur stort rostangrepp som spräcker täcksiktet beroende på betongkvalité, stångdiameter och täcksikt.

Den korrosion som spräcker täcksiktet är kritisk; om tvärarmering saknas minskar vidhäftningskapaciteten då drastiskt, se sammanställningen i Appendix A. Dessutom är det ofta ett estetiskt krav att täcksiktet inte skall spräckas. Ett praktiskt dimensioneringskrav kan därför vara att täcksiktet skall förbli osprucket. Inom projektet har därför den korrosion som spräcker täcksiktet beräknats för varierande betongkvalité, täcksikt och diameter på armeringen för ett enkelt axisymmetriskt fall, se Figur 2. Jämförelser med 3D-analyser visar att det går att använda dessa även för det normala fallet med täcksikt åt ett håll, vid uniform korrosion. Vid lokaliserad korrosion, till exempel på grund av kloridinitierad korrosion, spräcks täcksiktet vid en lägre genomsnittlig korrosion – därför bör det maximala korrosionsdjupet begränsas enligt Figur 2. Som synes har betongkvalitén en stor effekt på hur stort korrosionsdjup som täcksiktet klarar. Egentligen är det dock inte tryckhållfastheten som är den styrande parametern, utan det är främst brottnenergin, och även draghållfastheten. I analyserna som ligger till grund för Figur 2 har dessa beräknats ifrån tryckhållfastheten enligt uttryck i CEB-FIP

Model Code 1990, för maximal stenstorlek 16 mm. För de tre betongtyperna som visas här är brottenergin 48.7, 79.2, och 128.6 N/m.

Resultat från projektet har publicerats i ett flertal vetenskapliga artiklar, konferensbidrag och rapporter, och dessutom i en artikel i Bygg & teknik. För en fullständig lista se avsnitt 5 i denna rapport. Sammanställningen och diagrammet är tänkta för praktisk tillämpning. Dessa kommer att ingå i en rapport om livslängdsdimensionering som är under utarbetande av Svenska Betongföreningen.



Figur 2 Korrosionsdjup som spräcker täcksiktet (x_{cr}) beroende av betongkvalité, täcksikt och diameter. För max stenstorlek 16 mm.

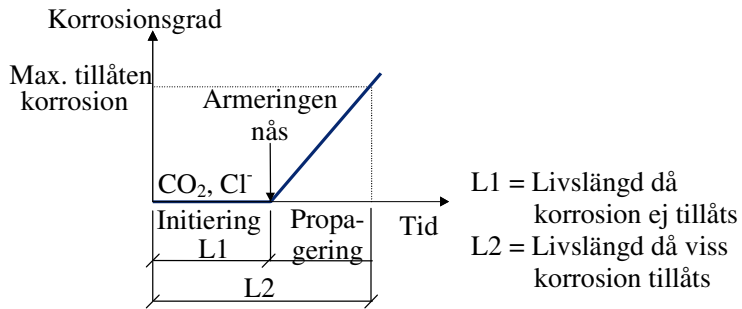
4 Resultatens praktiska tillämpningar och möjliga konsekvenser

Den modelleringssteknik som tagits fram med detaljerade icke-linjära tredimensionella finita elementanalyser innebär att det är möjligt att beräkna hur ett rostangrepp påverkar deformationer och bärförmåga för betongkonstruktioner. Detta innebär dock ganska mycket arbete, och kommer därför (åtminstone inom den närmsta tiden) inte att användas vid nyproduktion. Den är dock fullt möjlig att använda för befintliga konstruktioner, då det finns stor besparingspotential om tillräcklig bärförmåga hos en konstruktion kan påvisas.

För en enklare dimensionering kan man i stället använda dimensioneringskravet att täcksiktet skall förbli osprucket. Tillåten korrosion är då den som kommer att spräcka täcksiktet. Man bör också kontrollera att den minskade armeringsarean inte ger allvarliga konsekvenser. Vanligtvis är dock kraven på att täcksiktet skall förbli osprucket strängare. Det diagram (Figur 2) som har framtagits inom projektet där korrosion som spräcker täcksiktet har beräknats för varierande betongkvalité, täcksikt och diameter på armeringen är tänkt att kunna användas direkt i praktiken. Diagrammet är också tänkt att användas tillsammans med översikten över olika fall i Appendix A, för att kunna bedöma hur allvarlig armeringskorrosionen är för konstruktionen ifråga.

En konsekvens av resultaten i detta projekt, är att man har verktyg för att bestämma tillåtna korrosionsangrepp i livslängdsanalyser. Tidigare har man vid livslängdsdimensionering vanligen inte tillåtit någon korrosion alls, se Figur 3. Livslängdsdimensionering är sannolikhetsbaserad, det vill säga man accepterar att vissa händelser får inträffa med en viss sannolikhet. Om samma sannolikhet används för de båda kraven (ingen korrosion alls respektive ett visst korrosionsangrepp) kommer man att kunna tillgodoräkna sig en längre livslängd då ett visst korrosionsangrepp är tillåtet (jämför L1 och L2 i Figur 3). Om man kan acceptera en högre sannolikhet för att ingen korrosion alls sker, går det inte att på förhand att säga vilket av kraven som är strängast, utan båda måste kontrolleras för att livslängden skall kunna bestämmas.

För att praktiskt kunna användas för livslängdsdimensionering vore det fördelaktigt att ha ett enkelt analytiskt uttryck för att beräkna rostangreppsdjup som spräcker täcksiktet; detta för att kunna beräkna sannolikheten när olika parametrar varierar. Att ta fram en analytisk beräkningsmetod, eller att komplettera diagrammet i Figur 2 med fler betongkvaliteter och effekter av variationer, är exempel på forskning som behövs inom området. Det vore givetvis även önskvärt med analytiska beräkningsmetoder för att kunna beräkna deformationer och bärförmåga för korroderade betongkonstruktioner.



Figur 3 Korrosion av armering; initiering och propagering samt maximalt tillåten korrosion som bestämmer livslängden. Modifierad från Tuutti (1982).

5 Publicerat material från projektet

Följande artiklar, konferensartiklar och rapporter beskriver arbetet inom projektet:

Fang, C., Gylltoft, K., Lundgren, K., and Plos, M. (2004a): Effect of corrosion on bond in reinforced concrete under cyclic loading. Submitted to *Cement and Concrete Research* in June 2004.

Lundgren K. (2004b): Bond between ribbed bars and concrete: Part 1. Modified model. Accepted for publication in *Magazine of Concrete Research* in January 2004.

Lundgren K. (2004c): Bond between ribbed bars and concrete: Part 2. The effect of corrosion. Accepted for publication in *Magazine of Concrete Research* in January 2004.

Fang, C., Lundgren, K., Plos, M. and Gylltoft, K. (2004d): The effect of corrosion on concrete bridges. In "*Bridge Maintenance, Safety, Management and Cost*", edited by Watanabe, E, Frangopol D. M. and Utsunomiya T. Conference IABMAS 04, October 2004, Kyoto, Japan, Balkema, The Netherlands.

Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., Zhu, C. (2004e): Corrosion influence on bond in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 11, November 2004, pp.2159-2167.

Lundgren, K. (2003): Modelling the splitting effects of corrosion in reinforced concrete. In "*Proceedings Computational Modelling of Concrete Structures*", Euro-C Conference", St. Johann, Austria, 2003.

Lundgren, K. (2002a): A model for bond between corroded reinforcement and concrete. In "*Proceedings Bond in Concrete - from research to standards*", Budapest, Hungary, 2002.

Lundgren, K., Gustavsson, R., and Magnusson, J. (2002b): Finite element modelling as a tool to understand the bond mechanisms. In "*Proceedings Bond in Concrete - from research to standards*", Budapest, Hungary, 2002.

Lundgren, K. (2002c): Modelling the effect of corrosion on bond in reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, No. 3, June 2002, pp. 165-173.

Lundgren, K. and Gustavson, R. (2002d): Examining bond by a combination of numerical modelling and tests. In "*Proceedings XVIII Nordic Concrete Research Symposium*", Helsingör, Denmark, 2002.

Lundgren, K. (2001a): Hur påverkas betongkonstruktioners bärförmåga av armeringskorrosion? *Bygg & teknik* nr 7/01.

Lundgren, K. (2001b): A model for 3D-analyses of bond between corroded reinforcement and concrete. In "*Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-brittle Materials, Proceedings of the Sixth*

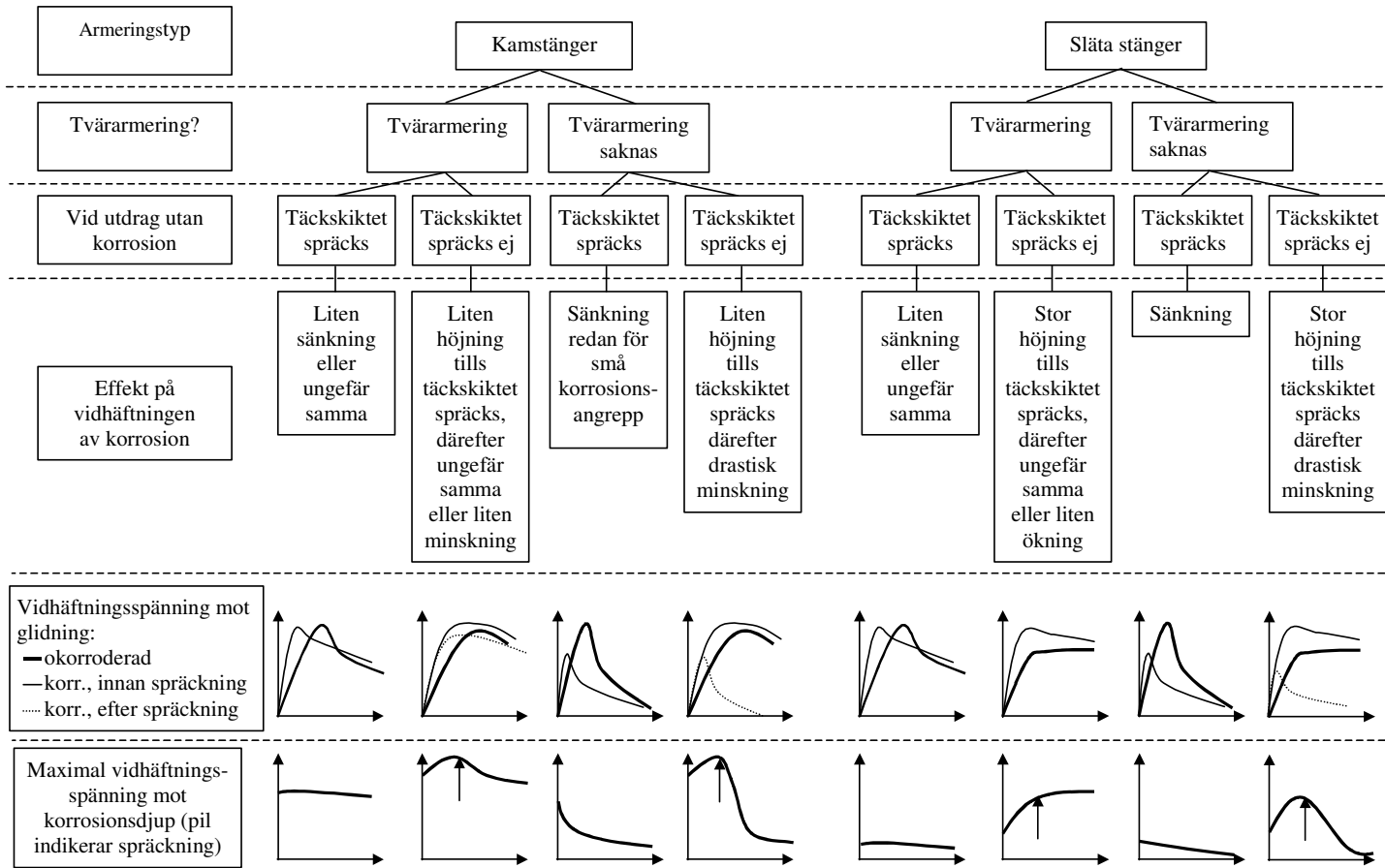
International Conference, Concreep-6@MIT", Ulm et al. (eds), Elsevier, the Netherlands, 2001. pp.485-490.

Lundgren, K. (2001c): Modelling bond between corroded reinforcement and concrete. in "*Fracture Mechanics of Concrete Structures*", de Borst et al. (eds), Balkema, the Netherlands 2001.

Lundgren, K. (2001d): *Bond between Corroded Reinforcement and Concrete*. Report 00:3. Chalmers University of Technology, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Göteborg 2001, 51 pp.

Lluciá Fleitas, M. (2001): *Effects of Corroded Reinforcement in Concrete Beams*. Master Thesis 01:7. Chalmers University of Technology, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Göteborg 2001, 76 pp.

- en översikt



Figur A1 Effekt av korrosion på vidhäftning mellan armering och betong.

