

# **Förfinade metoder och modeller för att bestämma bärförmågan hos betongkonstruktioner**

**En litteraturstudie utförd på uppdrag av Vägverket  
Ref nr BY 20 98:5283**

**Lennart Elfgren**

Rapport 1998:xx

Oktober 1998

Avd för Konstruktionsteknik,

Institutionen för Väg- och vattenbyggnad, Luleå tekniska universitet, 971 87 LULEÅ

Tel 0920-91360, fax 0920-91913, E-post [Elfgren@ce.luth.se](mailto:Elfgren@ce.luth.se), [www.ce.luth.se](http://www.ce.luth.se)

# Förord

I denna rapport redovisas en kortfattad översiktlig litteraturstudie som genomförts på uppdrag av Vägverket (BY 20 98:5283) under sommaren 1998 vid avdelningen för Konstruktionsteknik vid Luleå tekniska universitet. Synpunkter har lämnats av bland andra Mats Emborg, Jan-Erik Jonasson, Keivan Noghabai, Ulf Ohlsson och Thomas Olofsson.

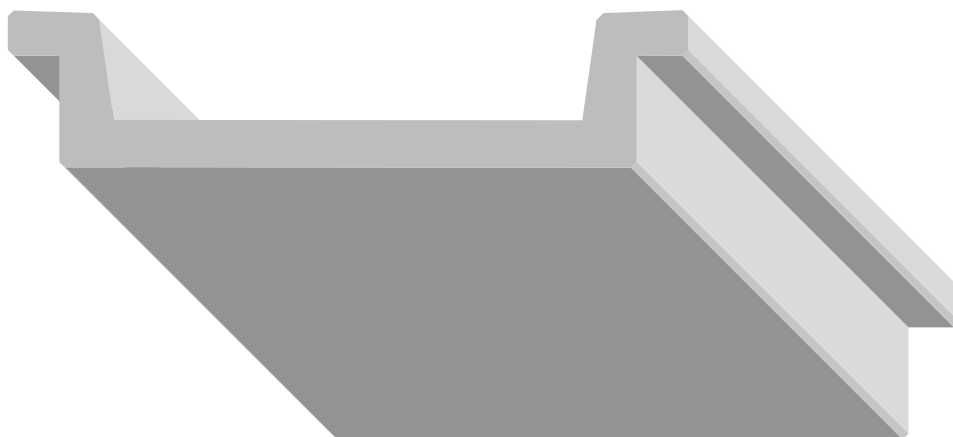
Behandlat område är omfattande och spänner över ett stort område. Rapporten får därför ses som ett första försök att lyfta fram några väsentliga spörsmål som är värda att studera närmare. Vi avser att arbeta vidare härmed och tar tacksamt emot synpunkter och förslag om kompletteringar.

Luleå i oktober 1998  
Lennart Elfgren

# Innehåll

1. Inledning
  2. Böjning
  3. Tvärkraft, vridning och genomstansning
  4. Vidhäftning och förankring
  5. Tryck
  6. Utmattning
  7. Tidsberoende effekter. Nedbrytning. Livslängd
  8. Säkerhet och partialkoefficienter
  9. Fortsatt arbete
- Referenser

Bilden på omslaget är hämtad från Keivan Noghabais doktorsavhandling, Noghabai (1998), och belyser hur bärförmågan byggs upp av konstitutiva och geometriska samband för olika ingående delkomponenter i en struktur. Ökad kunskap om modellering av material och delkomponenter ger säkrare underlag för bedömning av bärförmågan för hela konstruktioner.



Figur 1.1 Trågbro av betong. Från Nilsson et al (1998)

## 1. Inledning

Nuvarande normer och regler är främst avsedda för dimensionering av nya konstruktioner:

- BBK 94 (1994) – Boverkets Handbok om Betongkonstruktioner
- BKR 94 (1994) – Boverkets konstruktionsregler
- Bro 94 (1994) – Vägverkets bronormer
- BVH (1995) - Banverkets Bärighetsbestämmelser
- EC-1(1994), EC-2 (1991) – EU:s grundläggande dimensioneringsregler för laster och för betongkonstruktioner

För kontroll av befintliga konstruktioner kan mer nyanserade modeller behöva användas. Sådana metoder och modeller finns till viss del i nyare förslag till normer och handböcker:

- Design Handbook (1998) framtagen inom det nationella svenska programmet för Högpresterande betongkonstruktioner, se t ex Elfgren(1998), Elfgren et al (1996b, 1998b)
- MC-90 (1994). CEB-FIPs förslag till ny modellnorm (Model Code)

En övergripande synpunkt är att konstruktioner ofta delas upp i delar vid en beräkning och att samverkan mellan de olika delarna inte beaktas fullt ut. Ett exempel på ett sådant fall är en trågbro enligt figur 1.1 där plattans och de två huvudbalkarnas bärförmåga ofta studeras var för sig. När tråget fylls med ballast kommer lastbilden att bli mer komplex och en del last kan komma att bäras genom bågverkan i brons tvärlängd. Trycklinjen kan härvid efter några års packning komma att i huvudsak gå genom ballasten med plattan som ett underliggande dragband. Detta medför en gynnsammare tvärkraftspåkänning i plattans anslutning till huvudbalkarna än vad en konventionell beräkning. Vid en sådan skall ju nämligen all tvärkraft tas i den vanligen icke skjubarmerade plattan. Mer nyanserade beräknings- och bedömningsmodeller för lastbärningen i bruks- och brottstadier kan därför i vissa fall ge en högre kapacitet och ändå ge erforderlig säkerhet.

Figur 2.1. Olika brottmekanismer vid jämnt utbredd last på en balk beroende på geometri och storlek. (a) Lastpåverkan på stort avstånd, (b) Skiva, (c) Hög balk, (d) Normal balk, (e) Platta. I åtminstone (d) finns en utpräglad storlekseffekt vilket gör att bärförmågan inte ökar proportionellt med storleken. Detta beror framför allt på att mängden elastiskt lagrad energi och spännings-töjningsförhållandena vid spetsen av dominerande sprickor ändrar karaktär när storleken ökar. Motståndet mot sprickpropagering minskar och brottet blir av sprödare karaktär. Från Noghabai (1998).

## 2. Böjning

Nuvarande metoder i Betonghandbok – Konstruktion BHK (1990) är förhållandevis välutvecklade och noggranna. Storlekseffekter kan ibland behöva beaktas, se figur 2.1, speciellt vid lastkombinationer där betongens draghållfasthet är väsentlig.

Kraven på duktilitet kan medföra att armeringens flytförmåga kan behöva kontrolleras i vissa fall. I en ny utredning som genomförts av CEB påpekas att många metoder i Europeiska normer förutsätter jämvikt i ett brottgränstillstånd, vilket ofta kräver betydande deformationsförmåga, CEB 242 (1998). En sådan deformationsförmåga måste då säkerställas och armeringens deformationsförmåga behöver kontrolleras speciellt för konstruktioner av högpresterande betong. I Sverige har en undersökning av rotationskapaciteten för balkar av höghållfast betong genomförts av Fransson (1997). Han fann att rotationskapaciteten även är beroende av mängden omslutande bygelarmering.

Modeller baserade på plasticitetsteori, Johansen (1943), Nielsen (1971, 1984) används i England för utvärdering av återstående hållfasthet i betongbroar, Ibell et al (1997), Middleton (1998). Man har tagit fram ett datorprogram COBRAS vid University of Cambridge med vilket att 50-tal plattbalkbroar genomräknats och därefter givits högre tillåten kapacitet.

Figur 3.1. Ursprunglig fackverksanalogi för tvärkraft. Överst modell enligt Ritter från 1899 och därunder enligt Morsch från 1912. Från Collins – Mitchell (1990).

En plasticitetsteoretisk jämviktsmetod för plattor är strimlemetoden som utvecklats av Arne Hillerborg. En ny handbok är Hillerborg (1996) där exempel och diagram redovisas för att underlätta konstruktörens arbete.

### **3. Tvärkraft, stansning och vridning**

För tvärkraft är våra nuvarande normer uppbyggda på additionsteorin som stammar från W. Ritter (1899) i Schweiz och Emil Morsch (1912) i Stuttgart i början på 1900-talet, se figur 2.1.

En mer rationell metod är tryckfältsteorin utvecklad av Collins och Mitchell (1990), se figur 2.2 och numer införd i de kanadensiska normerna, Canadian Code (1994) och exemplifierad i Concrete Design Handbook (1995). Metodens tillämpning på högpresterande betong kommenterades av Mitchell (1998) vid en konferens i Kanada i september 1998, Aitcin och Delagrave (1998). En modifierad version föreslås även i den nya svenska konstruktionshandboken, Design Handbook (1998), baserad bland annat på de undersökningar som genomförts av Gabrielsson (1993), (1998).

Metoder som beaktar betongens töjningsmjuknande börjar utvecklas allt mer. Här har Arne Hillerborg gjort en pionjärsats, se Hillerborg et al (1976), Elfgren (1989), Elfgren & Shah (1991). En översikt av brottmekanikens utveckling ges i Rossmann (1997). En aktuell lärobok där inverkan av storlekseffekten belyses är Bazant och Planas (1997). En sprödhetfaktor baserad på energiåtgången vid sprickbildning togs tidigt fram av Hans Henrik Bache i Aalborg, se Elfgren (1989), Bache (1995).

Figur 3.2 Tryckfältsteori för en förspänd tvärkraftsbelastad balk. Statisk och geometrisk kompatibilitet samt konstitutiva samband utgör grunden. Från Collins-Mitchell (1990).

Metoder och modeller baserade på betongens töjningsmjuknande har utvecklats vidare av Noghabai (1995), (1998). En ökning av betongens seghet kan ske genom inblandning av fibrer av olika mängd och material. Effekten härav på balkars bärrighet har analyserats.

Kombinerad vridning, böjning och tvärkraft studerades med plasticitetsteori av Elfgren (1971), (1973). Förslag till mer nyanserade metoder än de som nu används i BBK94 (1994) ges i Elfgren och Gryzbowski (1996). Tillämpningar på högpresterande betong redovisas i Gabrielsson (1998).

Metoder för genomstansning har utarbetats av Henrik Nylander och Sven Kinnunen, se BHK(1990). Som brottkriterium används betongens stukning i tangentialled. Metoden har undersökts för höghållfast betong av Mikael Hallgren (1996). Han fann att den fungerar ganska väl.

Figur 4.1. Strategi för bedömning av vidhäftningskapacitet. Från Noghabai et al (1997)

## 4. Vidhäftning och förankring

En nyanserad metod som bygger på den europeiska modellnormen MC-90 (1993) har utarbetats av Björn Engström och Bo Westerberg på basis av försök och studier av Jonas Magnusson (1997). Vidhäftningsfrågor har även studerats av Noghabai (1995), (1998) och Noghabai et al (1997) och en strategi har utvecklats, se figur 3.1..

Förankring av infästningar och modellering av detta problem behandlas i Ohlsson (1995), Ohlsson och Olofsson (1997) och Elfgren et al (1998a). Internationellt belyses dessa problem av en arbetsgrupp inom International Concrete Federation, *fib*, med Rolf Eligehausen som ordförande, Eligehausen (1994, 1995)

## 5. Tryck

Bo Westerberg har utarbetat metoder i Design Handbook (1998) som bygger på MC-90 (1993) och på försök av Christina Claeson (1995, 1998) och Marianne Grauers (1993).

För pålar av höghållfast betong har studier utförts av Gunnar Holmberg och Krister Cederwall (1996). Diagram för inverkan av slagning har tagits fram.

## 6. Utmattning

Metoder med god noggrannhet finns vad gäller armering och stål. För betong har osäkerheten varit större varför man använder större säkerheter vilket ger i vissa fall onödigt överstarka konstruktioner, Paulsson et al (1996, 1997).

För spännarmerade balkar har försök utförts av Danewid (1997).

En grundläggande framställning av utmattningsfrågor ges i Elfgren – Gylltoft (1997). En metod att koppla samman utmattning och betongkrypning ges i Szerszen och Nowak (1998).

Figur 6.1. Uppmätt utböjning under utmattningsbelastning av en trågbro enligt figur 1.1. Nedböjningskurvorna i obelastat och belastat tillstånd (250 kN axeltryck) är parallella vilket antyder att styvheten bibehålls konstant och att den ökade utböjningen främst beror av betongens krypning. Från Paulsson et al (1997).



Figur 7.1. Ökning av hållfastheten i några av Vägverkets och Banverkets broar . Från Rådman (1998).

## **7. Tidsberoende effekter. Nedbrytning. Livslängd**

Betong tillverkad under 50- till 70-talet tillväxer normalt avsevärt i styrka, Rådman (1998), se figur 7.1. .

Sprickbildning i ung betong kan ge förkortad livslängd. Studier av inverkan av temperatur, tvång, fukt, krympning och krypning har genomförts av Bernander (1996), Emborg et al (1990), (1994), (1997), Jonasson (1994), Hedlund (1996), Groth (1996), Ekerfors (1995), och Westman (1995).

Metoder för värdering av nedbrytning i betongkonstruktioner ges i CEB 243 (1998). En översikt ges även i Svenska Betongföreningens rapport nr 1, SBF (1998).

En modell för beräkning av täcksiktets inverkan på nedbrytningen på grund av armeringskorrosion ges i Noghabai (1998), se figur 7.2.

Metoder för bedömning och utformning av förstärkning av betongkonstruktioner har studerats av Täljsten (1994), (1998).

Figur 7.2. Finita elementmodeller med olika detaljeringsgrad kan användas för att studera spjälkning av täcksiktet kring armeringsstänger på grund av mekaniska laster  $F_q$  och miljölaster  $F_{env}$ . Från Noghabai (1998).

## 8. Säkerhet och partialkoefficienter

För bärförmågan  $R$  ansätts ofta funktionen, se NBK (1987), Schneider (1997):

$$R = C a f$$

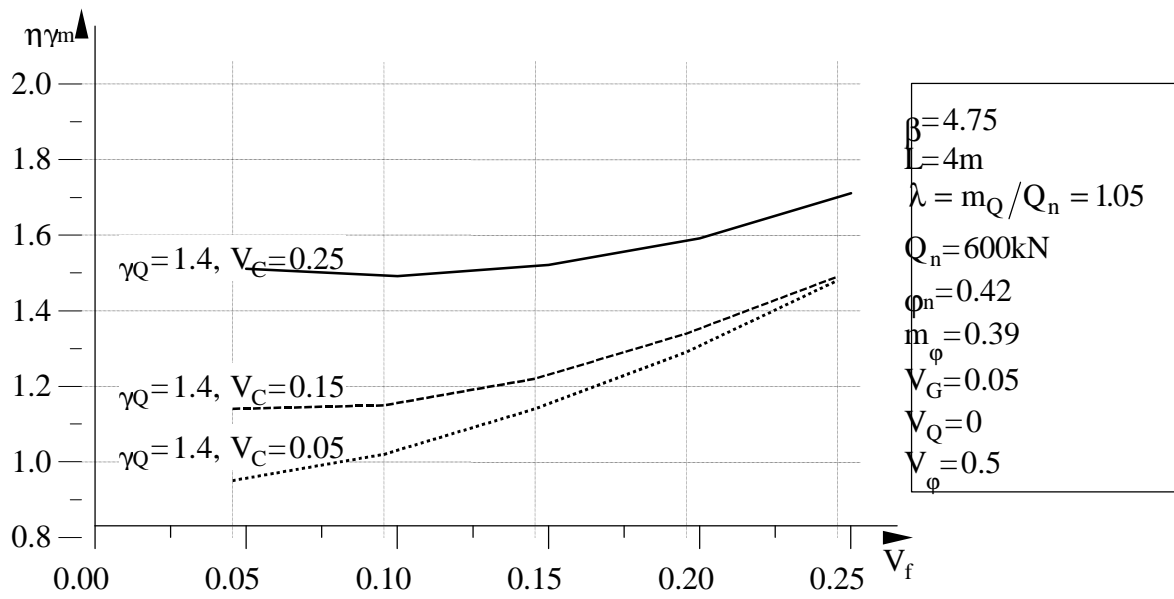
där

$C$  betecknar osäkerheter i modelleringen

$a$  är en geometrisk variabel och

$f$  betecknar hållfastheten

En utredning av Nilsson et al (1998) tyder på att partialkoefficienten för betong  $h_{g_m}$ , som normalt sätts till 1.5 i BBK 94 (1994), kan ges värden som är något lägre om variationskoefficienten  $V_f$  för aktuell hållfasthet  $f$  är känd, se figur 8.1.



Figur 8.1. Partialkoefficientens  $\eta\gamma_m$  variation som funktion av hållfasthetens variationskoefficient,  $V_f$  för tre värden på modelleringens variationskoefficient,  $V_c$ . Lastens partialkoefficient,  $g_Q = 1.4$ , enligt bronormen samt  $g_G = 1$ . Från Nilsson et al (1998).

## 9. Fortsatt arbete

Följande frågor är angelägna att studera vidare:

- Metoder för att bestämma materialparametrar som beskriver *betongens töjningsmjuknande* behöver utvecklas vidare. Metoder för bestämning av relevanta materialparametrar för befintliga konstruktioner behöver tas fram (draghållfasthet, brottenergi). Att som nu korrelera alla egenskaper till betongens tryckhållfasthet är alltför onyanserat. Utveckling inom detta område pågår med stor intensitet internationellt, Mihashi (1998)
- Modeller för beräkning av *tvärkraftshållfastheten och dess samverkan med böjning och vridning*. Tvärkraftshållfastheten har alltid varit central för betongkonstruktioner och fluktuationer i normbehandlingen över tiden gör det särskilt angeläget att noggrant kunna uppskatta aktuell kapacitet.
- *Utmattning* av betong. Användning av töjningskriterier. Bruksgränskriterier. Med ökad trafikintensitet och högre andel rörlig last blir detta område alltmer viktigt även för vägbroar.
- *Tidsberoende effekter*. Inverkan av betongens hållfasthetstillväxt och nedbrytning på konstruktioners bärförmåga behöver kunna modelleras bättre. Mekanismer på mikronivå måste klarläggas för att kunna modelleras på ett rationellt sätt.
- Inverkan av *tidig sprickbildning* på konstruktioners långtidshållfasthet. Förhindrad sprickbildning har stor ekonomisk betydelse. Här har stora framsteg gjorts och stora insatser gör nu i pågående Europiska samarbetsprojekt. Resultaten behöver bearbetas och föras ut för tillämpning.
- Inverkan av täcksiktstjocklek, korrosion, frysning, brand och *samverkan mellan mekaniska och miljöbetingade laster*. Detta är ett område där nya modeller kan komma att ge en mer rationell grund för våra normer än nuvarande empiriska samband.
- *Förstärkningsmetoder* – Beräkning av bärförmåga och deformationer efter lång tid. När noggranna beräkningar inte räcker till för att säkerställa bärförmågan i en konstruktion kan olika förstärkningsmetoder vara ekonomiskt mycket fördelaktiga.
- *Säkerhetsvärdering och partialkoefficienter* för befintliga konstruktioner. Koppling till säkerhetssystemet för nybyggnad. Med bättre kunskap om aktuella konstruktioners materialhållfasthet kan säkrare bedömningar göras av deras bärförmåga. Partialkoefficienter baserade på sannolikhetsteoretiska beräkningar kan här ge betydligt mer nyanserade resultat än nuvarande rekommendationer i BBK 94 (1994).

## Referenser

- Aitcin, Pierre-Claude and Delagrave, Yves, Editors (1998): International Symposium on High-Performance and Reactor Powder Concretes. August 16-20 1998, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada. Four volumes, 456, 435, 230 and 454 pp.
- Bache, Hans Henrik (1995): Concrete and concrete technology in a broad *perspective*. *Nordic symposium on modern design of concrete structures* (ed K. Aakjær), Dept of Build Techn & Struct Eng, Aalborg University, Denmark, 1995, pp 1-45 (ISSN 0902 7513 R9513).
- Bazant, Zdenek, P. And Planas, Jaime (1997): *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1997, 616 pp. ISBN 0-8493-8284-x.
- BBK 94 (1994): *Boverkets handbok om betongkonstruktioner*. Band 1 - Konstruktion. Band 2 – Material, Utförande, Kontroll. Boverket, Karlskrona 1994, 185 + 116 sid. ISBN 91-7332-686-0, 91-7332-687-9.
- Bernander, Stig (1996): *Practical Measures to Avoiding Early Age Thermal Cracking in Concrete Structures*. RILEM TC 119-TCE, State of the art report. Also available from the Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, 59 pp
- BHK (1990): *Betonghandbok Konstruktion*, utgåva 2. Redigerad av Krister Cederwall, Mogens Lorentsen och Lars Östlund. Svesnk Byggtjänst, Stockholm 1990, 791 sid (ISBN 91-7332-533-3)
- BKR 94 (1994): *Boverkets Konstruktionsregler*. Föreskrifter och allmänna råd, BKR 94:1. Byggeförlaget, Stockholm 1994, 176 sid. ISBN 91-7988-077-0.
- Bro 94 (1994): *Allmän teknisk beskrivning för broar. Bro 94*. Vägverket, Publ 1994:1-9, Borlänge, 1994, ca 575 sidor. Supplement 2, Publ 1996:1, Borlänge 1996, 125 sidor.
- BVH (1995): *Bärighetsbestämning av järnvägsbroar*. Handbok BVH 583.11. Banverket, Borlänge 1995.
- Bärighetsklassning av vägbroar. Remissutgåva, Vägverket, Borlänge, 1996-03-16, 104 sid.
- Canadian Code (1994): *CSA Standard A23.3-94, Design of concrete Structures*. Canadian Standards Association, Rexdale (Toronto), Ontario, Canada, 199 pp. ISSN 0317-5669.
- CEB 243 (1998): *Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures*. Guidance Report from the Task Group 5.4 on 'Assessment, Maintenance and Repair'. (Convenor J Appleton). Bulletin d'Information No 243. Comité Euro-International du Béton, CEB , Lausanne 1998, 184 pp. ISBN 2-88394-040-1.
- CEB 242 (1998): *Ductility of Reinforced Concrete Structures*. Part 1. Synthesis Report from Task Group 2.2 on 'Ductility Requirements for Structural Concrete – Reinforcement' in CEB commission 2. Part 2. Individual contributions from members of the Task Group. (Edited by Rolf Eligehausen, A. Bigaj-van Vliet and U. Mayer). Bulletin d'Information No 242. Comité Euro-International du Béton, CEB , Lausanne May 1998, 332 pp. ISBN 2-88394-039-8.

Claeson, Christina (1995): *Behavior of reinforced high strength concrete columns*. Licentiate thesis, Publ 95:1, Div of Concrete Structures, Chalmers Univ of Technology, Göteborg 1995, 54 pp.

Claeson, Christina (1998): *Structural Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Columns*. Doctoral thesis, Publ 98:1, Div of Concrete Structures, Chalmers Univ of Technology, Göteborg 1998, 91 + 78 pp.

Collins, Michael P. and Mitchell, Denis (1990): *Prestressed Concrete Structures*. Prentice Hall, 766 pp. Reprinted by Response Publications, Toronto, 1997, 766 pp, ISBN 0-9681958-0-6.

Concrete Design Handbook (1995). Part I: CSA Standard A23.3-94 and Explanatory Notes. Part II: Concrete Design Information with Design Examples and Design Aids. Canadian Portland Cement Association, 116 Albert Street, Ottawa, Ontario, Canada K1P 5G3, 1995, 220 + 400 pp, ISBN 1-896553-00-1

Danewid, Robert (1998): *Fatigue of High Strength Concrete Beams*. Dept of Structural Engineering, Lund Institute of Technology. To be published.

Design Handbook (1998): *High Performance Concrete Structures. Design Handbook*. Draft version. (Edited by Lennart Apleberger, Krister Cederwall, Lennart Elfgren, Marianne Grauers and Katarina Nylinder) Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, 1998, 110 pp.

EC-1 (1994): Eurocode 1. *Basis of Design and Action on Structures. Part I Basis of design*. European prestandard ENV1991-1:1994, CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels, 1991, 85 pp.

EC-2 (1991): Eurocode 2. *Design of Concrete Structures - Part 1: General rules and rules for buildings*. European prestandard ENV1992-1-1:1991, CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels, 1991, 253 pp.

Ekerfors, Katarina (1995): *Maturity development in young concrete. Temperature sensitivity, strength and heat development* (In Swedish with a summary in English). Licentiate thesis 1995:34L, Div of Struct Eng, Luleå Univ of Techn, Luleå 1995, 136 pp.

Elfgren, Lennart (1972): *Reinforced concrete beams loaded in combined torsion, bending and shear. A study of the ultimate load-carrying capacity*. Ph D thesis. Publication 71:3, Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2<sup>nd</sup> Ed 1972, 230 pp.

Elfgren, Lennart (1979): *Torsion-Bending-Shear in Concrete Beams: A Kinematic Model. Plasticity in Reinforced Concrete. IABSE Colloquium Copenhagen 1979*. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich 1979, pp 111-118.

Elfgren, Lennart, Editor (1989): *Fracture Mechanics of Concrete Structures. From theory to applications*. Report of the RILEM Technical Committee 90-FMA Fracture Mechanics to Concrete - Applications. Chapman and Hall, London 1989, 407 pp. ISBN 0-412-30680-8.

Elfgren, Lennart (1997): Material and Structural Testing and Modelling of Concrete. *Selected Research Studies from Scandinavia*. Dedicated to Profesor Göran Fagerlund on his 60th anniversary November 11, 1997. Report TVBM-3078, Div of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund 1997, pp 33-39.

Elfgren, Lennart (1998): Högpresterande betongkonstruktioner. Vad kan vi? Vilka möjligheter finns? *Väg- och vattenbyggaren*, Stockholm, Nr 2, 1998, sid 16-20.

Elfgren, Lennart och Grzybowski, Mirosław (1997): *Uppsprickning av betongkonstruktioner på grund av vridning*. Avdelningen för Konstruktionsteknik, Luleå tekniska universitet, Luleå 1997, 9+25 sidor.

Elfgren Lennart och Gylltoft, Kent (1997): *Utmattningshållfasthet hos betongkonstruktioner*. Avdelningen för Konstruktionsteknik, Luleå tekniska universitet, Skrift 90:10, Luleå 1997, 50 sidor.

Elfgren, Lennart and Noghabai, Keivan (1998): Anchor bolts and tension stiffening of rebars – Two RILEM round robin investigations on bond. *Proceedings FRAMCOS-3*. To be published by Aedificato Publishers, D-79104 Freiburg, Germany, 12 pp.

Elfgren, Lennart and Shah, Surendra, P, Editors (1991): *Analysis of Concrete Structures by Fracture Mechanics. Proceedings of the International RILEM Workshop dedicated to Professor Arne Hillerborg, sponsored by RILEM* (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) and organised by RILEM Technical committee 90-FMA Fracture Mechanics of Concrete - Applications. Abisko, Sweden, June 28-30, 1989. Edited by L. Elfgren and S. P. Shah. Chapman and Hall, London 1991, 305 pp. ISBN 0-412-36980-x.

Elfgren, Lennart; Noghabai, Keivan; Ohlsson, Ulf and Olofsson, Thomas (1996a): Applications of fracture mechanics to anchors and bond. Fracture Mechanics of Concrete Structures, *FRAMCOS 2*, (Ed by F H Wittmann), Aedificatio, Freiburg, pp 1685-1694. ISBN 3-905088-15-0.

Elfgren, Lennart; Olofsson, Thomas; Emborg, Mats and Jonasson, Jan-Erik (1996b): High performance concrete structures – a Swedish research program. *Radical Concrete Technology* (Ed by R K Dhir & P C Hewlett), E & FN Spon, London, pp 141-150 (ISBN 0-419-21480-1).

Elfgren, Lennart; Eligehausen, Rolf and Rots, Jan (1998a): *Round Robin Analysis and Tests of Anchor Bolts in Concrete Structures*. A Project carried out by RILEM Technical Committee 90-FMA Fracture Mechanics of Concrete – Applications. To be published, c 400 pp.

Elfgren, Lennart; Emborg, Mats; Gabrielsson, Henrik; Groth, Patrik; Hedlund, Hans; Jonasson, Jan-Erik; Noghabai, Keivan; Olofsson, Thomas and Westman, Gustaf (1998b): Design of High Performance Concrete in Sweden. *International Symposium on High-Performance and Reactor Powder Concretes*. Edited by Aitcin, Pierre-Claude and Delagrave, Yves, August 16-20, 1998, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada. Volume 2, pp 139-156.

Eligehausen, Rolf, Editor (1994): *Fastenings to concrete and masonry structures*. State of the Art Report. Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford, London 1994, 249 pp. ISBN 0-7277-1937-8.

Eligehausen, Rolf, Editor (1995): *Design of fastenings in Concrete*. Comité Euro-International du Béton. Thomas Telford, London 1995, 83 pp. ISBN 0-7277-2558-0.

Emborg, Mats (1990): *Thermal stresses in concrete structures at early ages*. Doctoral Thesis 1989:73D, Div of Struct Eng, Luleå Univ of Techn, 2nd Ed, Luleå, 1990, 285 pp.

Emborg, Mats and Bernander, Stig (1994): Assessment of risk of thermal cracking in hardening concrete. *Journal of Structural Engineering*, Vol 120, No 10, New York, October 1994, pp 2893-2912.

Emborg, Mats; Bernander, Stig Ekerfors, Katarina; Groth, Patrik and Hedlund, Hans (1997): *Temperatursprickor i betongkonstruktioner* (Temperature cracking in Concrete Structures. A Handbook in Swedish), Luleå Univ of Technology, Div of Structural Engineering, Teknisk Rapport 1997:02, 64+36 pp.

Fransson, Håkan (1997): *Rotation Capacity of Reinforced High Strength Concrete Beams*. Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering, TRITA-BKN Bulletin 32, Stockholm 1997, 75 pp.

Gabrielsson, Henrik (1993): *Shear capacity of beams of reinforced high performance concrete*. Licentiate Thesis 1993:21 L, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå 1993, 111 pp.

Gabrielsson, Henrik (1998): *Ductility in High Performance Concrete Structures. An Experimental Investigation and a Theoretical Study of Prestressed Hollow Core slabs and prestressed Cylindrical Pole elements*. Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå. Doctoral Thesis to be published.

Grauers, M (1993): *Composite columns of hollow steel sections filled with high strength concrete*. Doctoral thesis, Publ 93:2, Div of Concrete Structures, Chalmers Univ of Technology, Göteborg 1993, 140+96 pp.

Groth, Patrik (1996): Cracking in concrete. Crack prevention with air-cooling and crack distribution with steel fibre reinforcement. Licentiate thesis 1996:37L, Div of Struct Eng, Luleå Univ of Techn, Luleå 1996, 150 pp.

Gustafsson, Jonas (1997): *Steel fibers as shear reinforcement in high strength concrete beams*. M Sc Thesis 1997:252 CIV, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, 123 pp.

Hedlund, Hans (1996): *Stresses in High Performance Concrete Due to Temperature and Moisture Variations at Early Ages..* Licentiate thesis 1996:38L, Div of Struct Eng, Luleå Univ of Techn, Luleå 1996, 238 pp.



Hillerborg, A; Modeér, M; Petersson, P-E (1976):. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, Vol 6, 1976, pp 773-782.

Hillerborg, Arne (1996): *Strip Method Design Handbook*, E& F N Spon, London 1996, 320 pp. ISBN 0-419-18740-5.

Hallgren, Mikael (1996): *Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs*. Dept of Structural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), TRITA-BKN Bulletin 23, Stockholm, 206 pp.

Holmberg, Gunnar and Cederwall, Krister (1996): Fatigue of Concrete Piles of High Strength Concrete exposed to Impact Load. *Utilization of High Strength / High Performance Concrete* (Ed by F de Larrard and R Lacroix). Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, pp 705-710. ISBN 2-85978-260-5.

Ibell, T. J.; Morley, C. T.; Middleton, C. R. (1997): A plasticity approach to the assessment of shear in concrete beam-and slab bridges. *The Structural Engineer*, Vol 75, No 19, 7 October 1997, pp 331 – 338.

Johansen, K W (1943): *Brudlinjeteorier*. Omtryckt av Akademisk Forlag, Copenhagen 1963, 191 sid. Även publicerad på engelska av Cement and Concrete Association, London 1962.

Jonasson, Jan-Erik. (1994): *Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete*. Doctoral Thesis 1994:153D, Div of Struct Eng, Luleå Univ of Techn, Luleå, 1994, 225 pp.

Magnusson, Jonas (1997): *Bond and Anchorage of Deformed Bars in High-Strength Concrete*. Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Publication 97:1, Göteborg, 234 +14 pp.

Materialhandbok (1997): *Handbok Högpresterande betong. Material och utförande*. Draft Nov 1997 (In Swedish) (Edited by Christer Ljungkrantz, Nils Petersons, Mats Emborg, Jan Byfors and Gunnar Rise).Cementa, Stockholm, ca 150 pp.

MC-90 (1993):*CEB-FIP Model Code. Design Code*, Comité Euro -International du Béton and Fédération International de la Précontrainte, Thomas Telford, London 1993, 437 pp. ISBN 0 7277 1696 4.

Middleton, C. R. (1998): *Concrete Bridge Assessment*. Surveyor bidge Conference, London, March 24<sup>th</sup>, 1998, 12 pp.

Mihashi, Hirosho(1998): *Fracture Mechanics of Concrete Structures*. Third International Conference, Gifu, Japan, October 1998, to be published Aedificatio Publishers, Freiburg, Germany 1998

Mitchell, Denis (1998): Canadian Structural design Guide for HPC. *International Symposium on High-Performance and Reactor Powder Concretes*. Edited by Aitcin, Pierre-Claude and

Delagrave, Yves, August 16-20, 1998, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada. Volume 4, pp 13-28.

Nielsen, Mogens Peter (1971): *On the strength of reinforced concrete discs*. Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Construction Series No 70, Copenhagen 1971, 261 pp.

Nielsen, Mogens Peter (1984): *Limit analysis and concrete plasticity*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N J, USA, 420 pp. ISBN 0-13-536623-2.

Nilsson, Martin; Ohlsson, Ulf och Elfgren, Lennart (1998): *Dimensionerande betonghållfasthet i befintliga betrongbroar. Utredning av partialkoefficienter och draghållfasthet för broar längs Malmbanan mellan Luleå och Narvik*. Avdelningen för konstruktionsteknik, Institutionen före väg- och vattenbyggnad, Luleå tekniska universitet, Preliminär version, Luleå augusti 1998, 23 sid.

NKB (1987): *Retningslinier for last- og sikkerhetsbestemmelser for baerende konstruktioner*. NKB-rapport nr 55, 107+55 sidor. ISBN 87-503-6991-1.

Noghabai, K (1995): *Splitting of concrete in the anchoring zone of deformed bars. A fracture mechanics approach to bond*. Licentiate thesis 1995:26L, Div of Struct Eng, Luleå Univ of Technology, Luleå, 1995, 131 + 56 pp.

Noghabai, K; Olofsson, Th and Elfgren, L (1997): *Fracture Mechanics Applied to Bond. Advanced Design of Concrete Structures* (Ed. by K. Gylltoft, B. Engström, L.-O. Nilsson, N.-E. Wiberg and P. Åhman). CIMNE, Barcelona 1997, pp 57-64 . ISBN 84-87867-94-4.

Noghabai, Keivan (1998): *Effect of Tension Softening on the Performance of Concrete Structures. Experimental, Analytical and Computational Studies*. Ph D Thesis 1998:21, Div of Structural Engineering, Luleå Univ. of Technology, Luleå 1998, 147 pp.

Nylinder, Katarina (1997): *Mechanical Properties of High Performance Concrete. A Summary of test results obtained in a Swedish Research Program*. Report K6:2, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, 58 pp.

Ohlsson, Ulf (1995): *Fracture mechanics analysis of concrete structures*. Doctoral Thesis 1995:179D, Div of Struct Eng, Luleå Univ of Techn, Luleå, 1995, 94 pp.

Ohlsson, Ulf and Olofsson Thomas (1997): *Mixed-Mode Fracture and Anchor Bolts in Concrete Analysis with Inner Softening Bands*. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No 10, New York, October 1997, pp 1027-1033.

Mörsch, Emil (1912): *Der Betoneisenbau, seine Anwendung und Theorie*. Fjärde upplagan, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1912, innehåller på sidorna 270f en beskrivning av fackverksanalogin. I tidigare upplagor från Wayss & Freytag A.G., Neustadt a d Haardt, 1902, 1908 finns den inte med, Elfgren (1972).

Paulsson, Björn; Töyrä, Björn, Elfgren, Lennart; Ohlsson, Ulf; Danielsson, Georg; Johansson, Håkan och Åström, Lars (1996): *30 ton på Malmbanan. Rapport 3.3 Infrastruktur*.

*Forsknings- och utvecklingsprojekt avseende betongbroars bärighet.* Banverket, Borlänge 1996, 51 + ca 100 sidor.

Paulsson, Björn; Töyrä, Björn, Elfgren, Lennart; Ohlsson, Ulf; Danielsson, Georg (1997): Increased Loads on Railway Bridges of Concrete. *Advanced Design of Concrete Structures* (Ed. by K. Gylltoft, B. Engström, L.-O. Nilsson, N.- E. Wiberg and P. Åhman).CIMNE, Barcelona 1997, pp 201-206 (ISBN 84-87867-94-4).

Ritter, Wilhelm (1899): Die Bauweise Hennebique. *Schweizerische Bauzeitung*, Vol 33, Nr 5, 4 Februar 1899, pp 41-43, Nr 6, 11 Februar 1899, pp 49-52, och Nr 7, 18 Februar 1899, pp 59-61.

Rossmann, Hans Pieter, Editor (1997): *Fracture Research in Retrospect. An anniversary volume in honour of G. R. Irwin's 90<sup>th</sup> birthday.* Balkema, Rotterdam 1997, 570 pp. ISBN 90 5410 679 4.

Rådman, Johanna (1998): *Development of Concrete Compressive Strength.* M Sc Thesis, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå 1998, 55 + 15 sid (To be published).

SBF (1998): *Beständiga betongkonstruktioner.* Betongrapport nr 1. Svenska Betongföreningen, Stockholm, Utgåva 2, 1998, 89 sid. ISBN 91-971755-9-5.

Schneider, Jörg (1997): *Introduction to Safety and Reliability of Structures.* IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering), Zurich, Schweiz, 1997, 138 pp.

Täljsten, Björn (1994): *Plate Bonding. Strengthening of Existing Concrete Structures with Epoxy Bonded Plates of Steel or Fibre Reinforced Plastics.* Doctoral Thesis 1994:152D, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå 1994, 2<sup>nd</sup> Ed , 308 pp .

Täljsten, Björn (1998): Strengthening of Beams by Plate Bonding. *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineering, ASCE, New York, Vol 9, No 4, November 1997, pp 206-212.

Szerszen, Maria M and Nowak, Andrzej S. (1997): *Prediction of the remaining life of reinforced concrete T-beams in bridges.* Department of Civil and Environmental Engineering, 2370 G.G. Brown Building, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125, 18 pp + 3 fig. ([mariasz@engin.umich.edu](mailto:mariasz@engin.umich.edu); [nowak@engin.umich.edu](mailto:nowak@engin.umich.edu)).

Westman, Gustaf (1995): *Thermal cracking in high performance concrete. Viscoelastic models and laboratory tests.* Licentiate thesis 1995:27L, Div of Struct Eng, Luleå Univ of Techn, Luleå 1995, 120 pp.

