

SBUF Ärende ID: 11809

Titel: Robustare och kostnadseffektivare stomkonstruktioner genom sannolikheteoretisk dimensionering

Projektledare: Katarina Ljungquist, Skanska Sverige AB, Teknik – Hus & Bostad

Sammanfattande beskrivning av projektet

Bakgrund

I de flesta moderna byggnormer baseras bärförmågan på den så kallade partialkoefficientmetoden i kombination med definierade gränslasttillstånd. Detta gäller för BBR/BKR lika väl som för de snart tvingande Eurokoderna. I *EN 1990 Eurocode – Basis of structural design* ges dock även möjligheten att använda sannolikheteoretiska metoder vid dimensionering. Än så länge är detta en möjlighet som endast behärskas av ett fåtal experter och det finns ett antal hinder som behöver övervinnas för att dessa metoder ska vinna bredare tillämpning. Det finns dock goda skäl för att arbeta med att undanröja dessa hinder.

En väg till resurssnålare byggande, både ekonomiskt och miljömässigt, är bland annat mer exakta dimensioneringsmetoder. I ett industrialiserat byggande, där en part ”äger” och långsiktigt utvecklar en större del av projekterings- och produktionsprocessen, är förutsättningarna för att utnyttja fördelarna med sannolikheteoretisk dimensionering särskilt stora eftersom ”processägaren” har större möjligheter att styra val av material, utformning och produktionsmetoder ur ett helhetsperspektiv. Uppreppningseffekterna ger en större avkastning på investeringar i projektering och produktionsplanering och förutsättningarna för kontinuerlig förbättring av precisionen i förutsägelserna ökar genom systematisk erfarenhetsåterföring.

Att dimensionering med sannolikheteoretiska metoder leder till minskad materialåtgång med bibehållen eller ökad säkerhet, alternativt en mer nyanserad bestämning av risken för brott för existerande konstruktioner, har bland annat visats i ett europeiskt forskningsprojekt, *Probabilistic quantification of safety of a steel structure ...* (Cajot et al, 2005) som finansierats av Europeiska Kol- och Stålunionen och där Stålbyggnad, LTU medverkat, delfinansierat av BFR. I detta

projekt erhöles 10 % reduktion av material i stommen jämfört med de existerande byggnaderna som ursprungligen dimensionerats med partialkoefficientmetoden.

Projektet visade dock även att det finns ett antal hinder som måste övervinnas för att dimensionering med sannolikhetsteoretiska metoder ska kunna tillämpas på bredare front. Ett av de största hindren är att det behövs mer kunskap om de variabler, ”osäkerheter”, som påverkar förutsägelsen av sannolikheten för brott. Detta gäller särskilt osäkerheter om noggrannheten i de teoretiska modeller som används för att beräkna bärförmågan för de brottmoder som är aktuella. Med osäkerhet i den teoretiska bärförmågemodellen, modellosäkerheten, menas här skillnaden i den bärförmåga som ges av den beräkningsmodell som används för dimensionering av ett konstruktionselement utsatt för ett visst lastfall jämfört med konstruktionselementets verkliga bärförmåga. Denna skillnad beror bland annat på att de grundläggande teorierna bakom beräkningsmodellen innefattar förenklingar och antaganden som avviker från konstruktionselementets verkliga beteende vid brott, på hur brott har definierats vid utvärdering av försök om beräkningsmodellen baseras på empiriska resultat samt vilka parametrar som har använts om en beräkningsmodell har kalibrerats mot empiriska resultat. Det finns viss information om modellosäkerheter, bland annat i det arbete som presenterats av JCSS (Joint Committé of Structural Safety), men mycket av denna information kan ifrågasättas vid en kritisk granskning. Detta gäller till exempel hur modellosäkerheterna har definierats, vilket inte har hanterats enhetligt, samt bristen på källhänvisningar.

En annan osäkerhet som har betydelse i sammanhanget och som är ännu mindre studerad än modellosäkerheter är hur valet av stomkonstruktion påverkar risken för fel, bland annat så kallade mänskliga fel, som har inverkan på konstruktionens säkerhet. Denna fråga berörs inte i de säkerhetsfilosofiska modeller som ligger bakom våra byggregler, trots att man vet att den har en inverkan som är betydande i sammanhanget. Några av de få studier som berört detta område är Matousek & Schneider (1976) och Josephson & Hammarlund (2002). En ökad kunskap om hur valet av stomkonstruktion och dess detaljutformning påverkar risken för fel, inklusive mänskliga fel, kan till exempel utnyttjas för en nyansering av säkerhetsindex beroende på vilken stomkonstruktion som är aktuell, produktionspersonalens kompetens, förekomst av kontrollprogram och kvalitetssystem etc.

Projektets genomförande och resultat

Projektet har utförts som ett examensarbete på Luleå tekniska universitet av civ.ing. Håkan Stenström. Examensarbetet innehåller två huvudmoment, dels dimensionering av en stålstomme, både med hjälp av Eurokoderna samt med

sannolikhetsteori, och dels en utvärdering av hur mänskliga fel i byggbranschen kan reduceras.

Den stomme som har dimensionerats är tagen från ett flerbostadshus beläget i Gåshaga på Lidingö i Stockholm. Några modifikationer har gjorts mot det ursprungliga huset för att förenkla beräkningarna. Ingen stabilitetsdimensionering har utförts då stommen stabiliseras av ett antal väggar bestående av betong. Endast vertikala laster har därmed ingått i dimensioneringen. Dimensioneringen har begränsats till den mest belastade balken respektive pelaren och en optimering av tvärsnitten gjordes för att kunna jämföra de båda dimensioneringsmetoderna.

Den sannolikhetsteoretiska dimensioneringen gjordes med hjälp av programmet @Risk som är en tilläggsapplikation för Excel. Något som försvårat den sannolikhetsteoretiska dimensioneringen är att @Risk visade sig vara ett för trubbigt instrument som inte är anpassat till beräkning av sannolikheter för brott på runt 1/100000. För en variationskoefficient på cirka 10 % krävdes Monte Carlo-simuleringar med 1 700 000 itereringar.

För pelaren gav den sannolikhetsteoretiska dimensioneringen en reduktion på 18 % och för balken en reduktion på 14 % jämfört med dimensionering enligt Eurokoderna. Riktvärdet för dimensioneringen har varit att sannolikheten för brott ska vara lägre än 6/100000 vilket motsvarar ett säkerhetsindex på 3,8 för en konstruktion med en livslängd på 50 år. Det är den nivå som säkerhetsklass 3, inom traditionell svensk dimensionering, baseras på.

Av resultaten kan utläsas att de faktorer som spelar störst roll för den sannolikhetsteoretiska dimensioneringen är värdena på modellosäkerheterna. Ursprungligen användes JCSS (2001) värden och detta medförde att balken inte höll i den sannolikhetsteoretiska dimensioneringen. Vidare så angav modellkoden att osäkerheterna skulle härröras till lasteffekt respektive bärförmåga vilket också medförde att varken pelare eller balk fick tillräcklig bärförmåga. Cajot et al (2005) anger att modellosäkerheterna ska anges för varje enskild last där egentytningarna inte har någon osäkerhet. För att exakt dimensionering ska kunna genomföras måste dessa variabler utvärderas. Cajot et al (2005) anger olika fördelningar och värden mot vad JCSS (2001) gör, vilket skapar förvirring. I Cajot et al (2005) har dock ett stort antal modellosäkerheter tagits fram, men oklarheten om vilken fördelning som bör användas minskar möjligheten att nyttja dessa värden.

Jämfört med de 10 % reduktion av tvärsnittet som blev resultatet av Cajot et al (2005) som använde stokastiska variabler på alla parametrar så fås ju en något högre reduktion här. I den forskningsrapporten användes dock fabricerade balk- och pelartvärsnitt vilket inte görs här. En annan skillnad är att

modellosäkerheterna är framtagna för den rapportens modeller vilket spelar roll med tanke på modellosäkerheternas inverkan. I och med att pelaren skulle ha gått att optimera ytterligare kan riktigheten för modellosäkerheterna ifrågasättas.

En förutsättning för dimensioneringen är att tillförlitliga indata finnas att tillgå. Att få fram mätdata för materialegenskaper har visat sig mycket svårt. Kontakt har tagits med olika tillverkare för att försöka få data för t.ex. stålets sträckgräns samt håldäckens egentyngder, men inga data har gått att få tag på bland annat för att sådana mätningar inte utförs. Ett resultat av projektet är att metoder behöver skapas för att mäta och sammanställa data över materialegenskaper och kvalitetsaspekter. Genom att inte bara kontrollera toleranser utan verkligen mäta dimensionerna på till exempel stålbalkar kan databanker skapas med information. Genom att skapa ett kvalitetssystem som mer liknar en ekonomisk rapportering med numeriska värden på kvalitet som är möjlig att ta med sig från olika projekt kan en ökad total kvalitet skapas. Mätdata från ett sådant kvalitetssystem skulle sedan kunna ligga till grund för optimerad sannolikhetsteoretisk dimensionering.

En parameter för mänskliga fel i konstruktionsberäkningarna skulle kunna ge ett redskap för att under projekteringen kunna utvärdera riskerna med till exempel olika stommar. Svar på en fråga som "Ska en betongstomme eller stålstomme väljas?" skulle kunna besvaras utifrån mer än ett kostnadsperspektiv. Säkerhet och kvalitet skulle kunna säkras redan hos projektörerna. Dit är det dock långt och denna rapport ämnar ligga till grund för fortsatt arbete. Inga försök att integrera mänskliga fel i beräkningsmodellen har gjorts i detta arbete.

En intervju har genomförts med en erfaren stomkonstruktör, Thomas Axelsson på Skanska Stomssystem, för att försöka identifiera problem inom byggbranschen i allmänhet och stomkonstruktioner i synnerhet som kan härröras till mänskliga fel. Axelssons erfarenheter stämde ganska väl överens med studerad litteratur på ämnet och han anser att det mest effektiva sättet att reducera uppkomsten av mänskliga fel är att skapa standardiserade lösningar för konstruktioner.

Dock har man identifierat ett tydligt samband mellan mänskliga fel och standardlösningar för konstruktioner relaterade till brist på engagemang på byggarbetsplatserna. Detta är viktigt på grund av det stora fokus som idag riktas mot industrialisering av byggbranschen. Standardlösningar tas fram för att eliminera riskerna för mänskliga fel, men kan alltså också ligga till grund för fel. Detta är inget som ska hindra en fortsatt industrialiseringen eftersom fördelarna är så stora ekonomiskt och kvalitetsmässigt, samt att fel i projekteringen i de flesta fall är mycket dyrare än fel i produktionen.

I Toyotas produktionssystem *lean production* finns en del som kallas *poka yoke*. Detta är japanska och fritt översatt står det för automatiska kontroller av

monteringen. Genom att analysera fel som uppstår skapar konstruktörerna lösningar som förhindrar felen att uppstå. Istället för att lägga stora pengar på att inspektera konstruktionsdelar efter montage gör dessa lösningar att felen upptäcks med en gång och kan rättas till genast (Åhlström, 1997). Exempel på detta kan vara en våg som avgör om alla broschyrer ligger i en kartong genom att vågen larmar om vikten inte överensstämmer med den förprogrammerade innan kartongen ska förslutas. Toyota har, trots en mycket strikt linjetillverkning, lyckats engagera sina medarbetare. Delaktighet är grunden där alla medarbetare får vara med och förbättra. Eget tänkande är redan en grund bland hantverkare i Sverige och detta bör kunna utvecklas även inom det industrialiserade byggandet.

För att kunna göra sannolikhetsteoretisk dimensionering till ett instrument för att eliminera risken för mänskliga fel måste flera stora arbetsinsatser utföras. Metoder för att samla in data måste skapas för att få ett tillförlitligt underlag och de riktvärden vad gäller sannolikheten att brott uppstår måste korrigeras. Med de projekt förekommer inom industrialiserat byggande borde en fortsättning av detta projekt vara möjlig för att minimera materialåtgång, säkerställa kvaliteten samt engagera inblandade personer för att finna robusta lösningar.

Referenser

Cajot L. G, Cerfontaine F, Conan Y, Haller M, Johansson B, Kraus O, Lagerqvist O, Rondla J, Sedlacek G. (2005) *Probabilistic quantification of safety of a steel structure highlighting the potential of steel versus other materials*. Technical steel research. European Commission report: EUR 21695 EN. ISBN 92-894-9864-1

EN 1990 Eurocode – Basis of structural design, CEN 2002

JCSS, Joint Committee on Structural Safety. (2001) *Probabilistic Model Code, Part I-IV*. 12th draft. JCSS-OSTL/DIA/VROU-10-11-2000. Hämtad från: JCSS' hemsida, <http://www.jcss.ethz.ch/JCSSPublications/PMC/PMC.html>

Josephson P.-E. & Hammarlund Y., (2002). *Kvalitetsfelkostnader på 90-talet – en studie av sju byggprojekt, Del I: Resultat*, Institutionen för Byggnadsekonomi, Chalmers, Göteborg.

Matousek M. & Schneider J., (1976). *Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken*, Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zurich, Bericht No. 59, ETH Zurich.

Åhlström P. (1997) *Sequences in the Process of Adopting Lean Production*. Stockholm. Ekonomiska forskningsinstitutet vid Handelshögskolan. ISBN 91-7258-456-4.