



Projektsammanfattning: Konceptuell design av bärande system - minimering av risker och osäkerheter i den moderna projekteringsprocessen

Sammanfattning av licentiatavhandlingen:

The human factor in structural engineering – a source of uncertainty and reduced structural safety

Bakgrund och syfte

På senare år har det skett ett antal uppmärksammade byggnadsras i Sverige som direkt eller indirekt kan kopplas till fel orsakade av konstruktörer i projekteringsskedet. 2008 dog två byggnadsarbetare när knek-tarna till gjutformen under gjutningen av brobanan till bron över Älandsfjärden kollapsade. Samma år rasade en stålbalk och de betongelement den bar i Kista, även i detta fall krävdes dödsoffer. 2012 kollap-sade en hel byggnad i Ystad. Lyckligtvis skedde detta under natten vilket endast ledde till materiella skador (om än mycket omfattande).

Orsaken till ras är ofta inte enkel att fastställa, det krävs ofta att flera aktörer gör fel för att det ska resul-tera i haveri. Det som däremot är tydligt är att grova fel kan leda till omfattande skador och risk för män-niskoliv. Det är känt från undersökningar från olika delar av världen att nära 50 % av alla ras kan kopplas till fel som begåtts under projekteringen[1], i mindre än 10 % av fallen handlar det om undermåliga material eller att lasterna skulle ha varit högre än de som regleras av byggnormen. Utöver risken för bygg-nadsarbetare och brukare av byggnaderna så visar en Australiensisk undersökning att projekteringsfe-len kostar ungefär 7 % av den totala byggkostnaden att åtgärda[2].

Det är viktigt att förstå att det regelverk som ligger till grund för konstruktionsberäkningar i Sverige (Eurokod [3] med nationella anpassningar enligt EKS [4]) inte hanterar grova fel som sker i projektering-en, på byggarbetsplatsen eller i brukarskedet. Detta måste istället hanteras genom någon typ av kvalitets-kontroll. 1995 avskaffades myndighetskontrollen av husbyggnadsprojekt i Sverige till förmån för det sys-tem vi har idag där kvalitetskontrollen till största delen sker genom egenkontroll. Detta system administreras av en kontrollansvarig (tidigare kvalitetsansvarig). Det råder en tidvis livlig debatt om hur detta system fungerar i praktiken. Bland annat visar haverikommissionens rapport från raset i Ystad [5] på att detta ras kunde ske trots att kvalitetsdokumentationen var i ordning.

Syftet med detta projekt har varit att studera hur konstruktörer arbetar och hur detta påverkar kvaliteten på resultatet av deras arbete; och att belysa effekten av bl a: subjektiva val, bristande kunskap, hantering av osäkerheter och olämpligt användande av avancerade designverktyg och normer. Undersökningar från Australien [6] och Schweiz [7] har visat på stor spridning när olika konstruktörer löser samma uppgifter. Utöver detta presenteras även förslag på olika strategier för att begränsa effekten av mänskliga tillkorta-kommanden.

Metod

Metodiken för att studera hur ingenjörer arbetar delades upp i två steg. Först fick ingenjörerna lösa två olika konstruktionsuppgifter i en *round-robin undersökning*. Detta innebär att varje deltagare individuellt löste respektive uppgift. Detta skedde på ett sätt som i så långt som möjligt efterliknade en verklig projek-teringssituation, vilket innebar att uppgiften skulle lösas under en begränsad tidsperiod (en vecka) och mot



ersättning motsvarande maximalt 8h arbete per uppgift. I övrigt gavs inga restriktioner utan var och en fick möjlighet att lösa uppgiften på sitt eget sätt. För att få en tydligare bild av deltagarnas erfarenhet, hur uppgifterna uppfattats och lösts etc. kompletterades denna första del med en enkät.

I det andra steget intervjuades deltagarna för att skapa en fördjupad bild av deras arbete och erfarenhet. Intervjuerna genomfördes utifrån fem huvudpunkter:

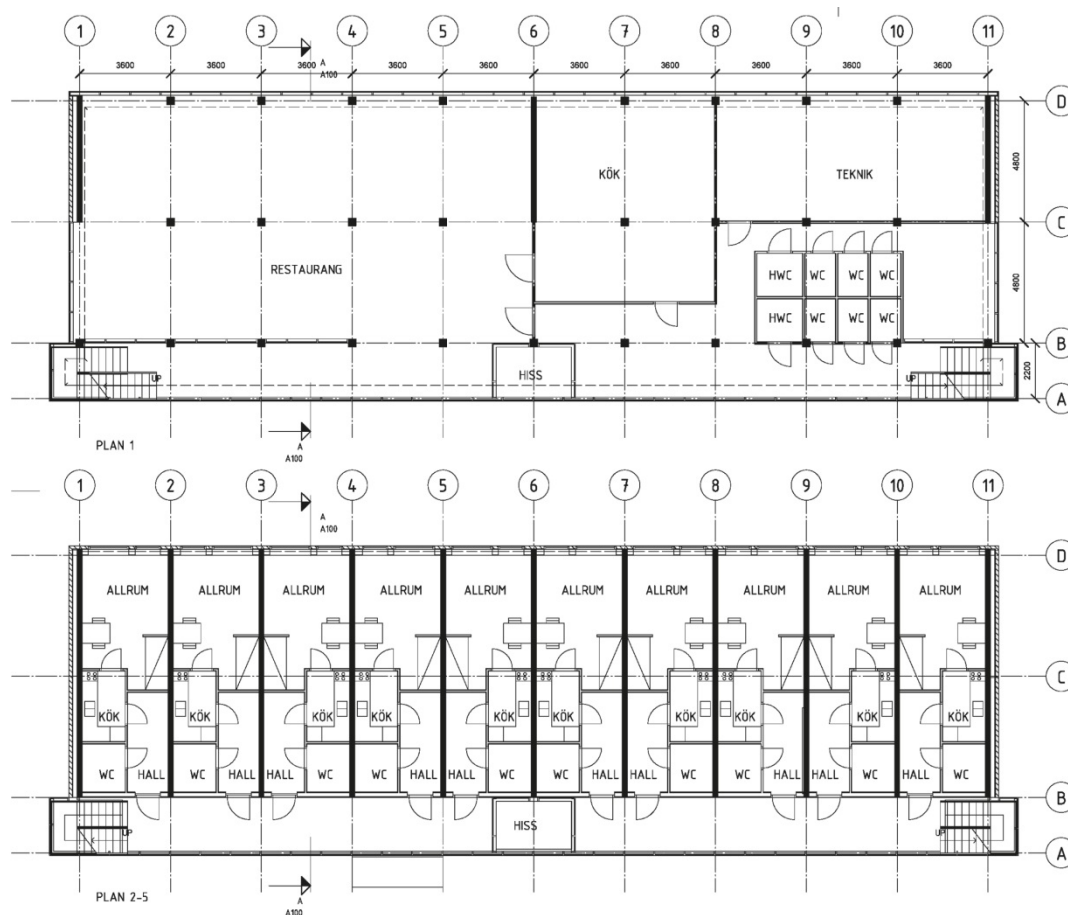
- Tidiga skeden – deltagarens beskrivning av konstruktörens roll i detta skede
- Testet – deltagarens reflektioner från de genomförda uppgifterna (här presenterades resultatet för första gången för deltagarna)
- Beräkningar – deltagarens beskrivning av vad som styr val av beräkningsmodeller och hur man använder normer och regelverk
- Granskning – deltagarens erfarenhet av hur kvalitetsarbetet går till och fungerar
- Ras – deltagarens beskrivning av hur han/hon förhåller sig till och känner inför det ansvar som är kopplat till deras arbete och de ras som skett.

Beskrivning av uppgifterna

Test 1

Den första uppgiften utformades för att efterlikna en del av en totalentreprenad för ett studentbostadshus i Malmö, en femvåningsbyggnad av betong (se figur 1). På bottenvåningen finns en restaurang vilket innebär en öppen planlösning med pelarstomme. Dessa pelare bär i sin tur de lägenhetsskiljande väggarna av betong på övriga våningar. Konstruktören ombads, utifrån ett förfrågningsunderlag i form av arkitektritningar, att åt en tänkt entreprenör leverera följande uppgifter:

- Kontroll att angivna betongdimensioner är tillräckliga
- Pelardimensioner i bottenvåning (prefab betongpelare)
- Laster till grund för dimensionering av pålfundament och pålar (för stabiliserande enheter anges även moment och tvärkraft)

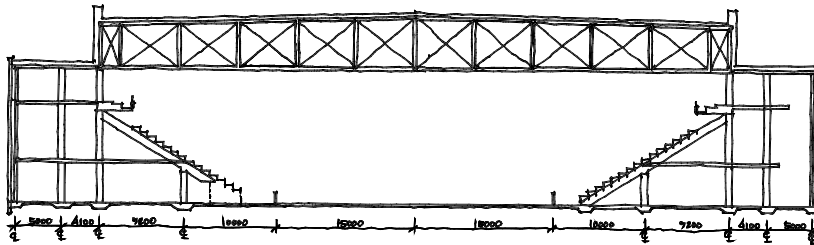


Figur 1 Del av arkitektunderlag Test 1

Test 2

Den andra uppgiften är utformad för att efterlikna ett ännu tidigare skede än den första. Konstruktörens uppgift var här att utforma ett förslag på en takkonstruktion för en inomhusarena i Arboga (spännvidd 68m, se figur 2). Följande uppgifter skulle levereras:

- Skiss över takkonstruktionens geometri med dimensioner och huvudmått redovisade. Fackverk av stål är huvudalternativet.
- Stålvikt takfackverk – för beställarens kalkyl
- Laster vid upplag – input till stomleverantör
- Alternativt förslag i trä. Presenteras som grövre skissförslag.



Figur 2 Del av arkitektunderlag Test 2

Resultat

Deltagare

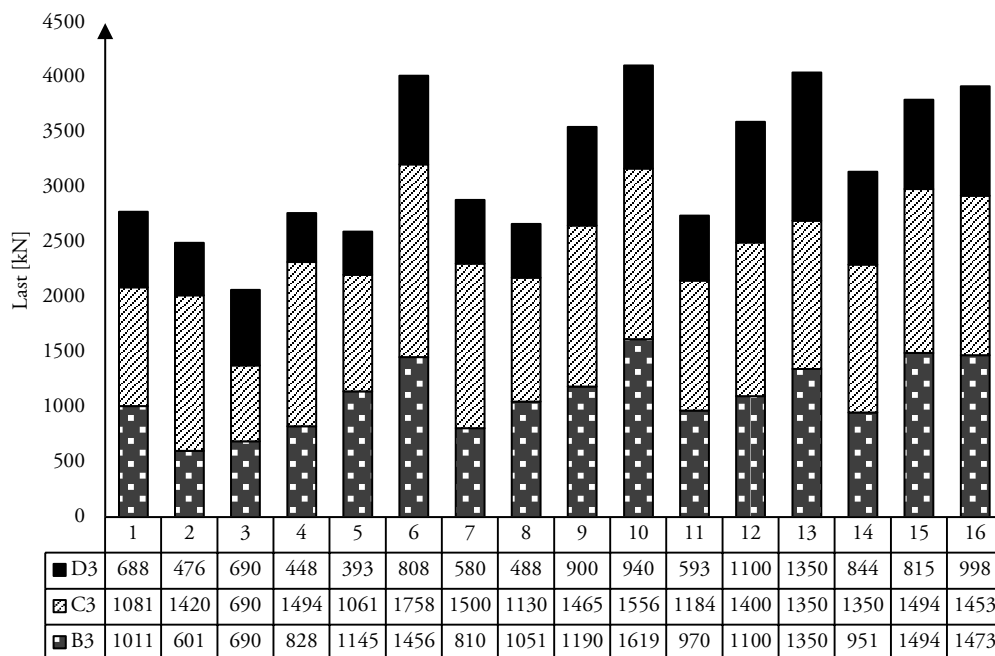
Totalt deltog 17 ingenjörer i undersökningen (16 av dessa svarade på Test 1, 14 på Test 2 och de 13 som lämnat in båda uppgifterna intervjuades). Alla var utbildade civilingenjörer och hade i genomsnitt 12 års erfarenhet.

Test 1

De dimensioner på betongväggar och bjälklag (200mm resp 220mm) som angivits i arkitektunderlaget verifierades av samtliga (i ett fall föreslogs en ökning av tjockleken på de stabiliserande väggarna på plan 1 till 250mm). Generellt innebär denna verifiering att övriga resultat kan anses jämförbara. Samtliga deltagare noterade dessutom att det i byggnadens längsled saknades stabiliserande enheter och olika förslag på lösning presenterades.

Vad gäller pelardimensionerna på plan 1 så föreslog merparten (11 av 16) prefabricerade betongpelare 300x300mm. Endast i ett fall var avvikelser större (700x700mm) men det kan förklaras med att denna deltagare använt pelarna för att stabilisera byggnaden i längsled.

När det kommer till lastnedräkning var variationen betydligt större. I samtliga pelarpositioner var skillnaden mellan högsta och lägsta värde en faktor tre, se figur 3. Anledningen till detta var dels att man tolkat indata och normvärden på olika sätt (t ex val av vikt på fasader, reduktion av nyttig last etc), och dels att man använt olika beräkningsmodeller på systemnivå. Det senare leder till att totallasten fördelar sig procentuellt olika mellan olika pelare. Ett statiskt obestämt och redundant system som detta saknar "rätt svar", men ungefär hälften av deltagarna använde en beräkningsmodell som måste anses olämplig eftersom man inte beaktade stödets (pelarnas och grundens) eftergivlighet, vilket ledde till stora avvikelser gentemot en mer korrekt beskrivning. Resultaten för de stabiliserande enheterna varierade ännu mer, även här främst med anledning av att olika beräkningsmodeller använts.



Figur 3 Sammaställning lastnedräkning Test 1 (Eurokodekvivalenta värden i systemlinje 3)

Test 2

Resultatet för Test 2 uppvisade en annan typ av variation jämfört med Test 1. Trots att uppgiften var att utforma en kostnadseffektiv lösning så gjordes relativt små geometriska avsteg från den geometri som angivits i föreläggat. Den effektiva konstruktionshöjden har stor inverkan på mängden material som krävs i ett fackverk, trots det hade merparten använt den höjd (ca 5,7m) som antytts i arkitektunderlaget. Detta innebär ett höjd/spännviddsförhållande på ca 1:12 vilket kan jämföras med tumregeln 1:10 som ofta används (motsvarar en höjd på ca 6,8m). Trots denna geometriska likhet varierade den uppskattade stålvikten mellan 20 och 50 ton. Denna skillnad berodde inte primärt på att man använt olika last (upplagsreaktionerna var mycket samstämmiga) utan kan snarast kopplas till, för vissa fall, ineffektiv konstituering av diagonaler och lågt utnyttjande av stålets bärförmåga.

Det är inte så anmärkningsvärt att variationen i stålvtikt är stor, eftersom vissa av deltagarna saknade erfarenhet av denna typ av konstruktion. En konservativ hållning är därmed rimlig. Däremot är det mer anmärkningsvärt att man valt att inte variera geometrin nämnvärt. Av allt att döma kan detta kopplas till att alla använt samma typ av beräkningsverktyg – ett finit element verktyg som hanterar ramar och stångsystem. Denna typ av program kräver en väl definierad geometri för att möjliggöra analys, en geometri som i många fall okritiskt har hämtats ifrån arkitektskissen. Utifrån denna geometri har sedan en sub-optimering av ingående komponenter utförts.

Det kan framstå som att deltagarna känt sig tvingade att använda den geometri som angivits i föreläggat, men resultatet från skisserna på ett alternativ i trä motbevisar detta. När deltagarna ombeddes att skissa blev resultatet långt mer varierat och ett flertal kreativa förslag presenterades – framför allt gick man långt utanför de geometriska ramar som antytts i föreläggat.



Intervju

Intervjuerna visade generellt på en rad insiktsfulla reflektioner. De ämnen som behandlades engagerade deltagarna och det är tydligt att många funderat mycket på dessa frågor. T ex framgår det att man känner ett stort personligt ansvar och engagemang inför sitt arbete, många beskriver hur de speciellt som unga haft svårt att sova av rädsla för konsekvenserna av misstag som kan leda till ras. Vidare känner många sig ensamma i sitt ansvar eftersom de saknar kvalitetsgranskning av bl a konstruktionsberäkningarna – motsvarande den kontroll som i princip alltid görs av själva slutprodukten – dvs ritningen. Många upplever även att man som konstruktör ofta kopplas in i ett för sent skede, när byggnadens geometri är fastställd och man har för liten möjlighet att göra mer omfattande förändringar för att skapa ett bättre bärande system. Man upplever också att det behövs ett nära erfarenhetsutbyte med både arkitekter och entreprenörer för att skapa bra och byggbara lösningar. Ett annat bekymmer man upplever är det uppdelade ansvar för det bärande systemet som ofta förekommer i husbyggnadsprojekt, man menar att helhetsbilden lätt tappas och att viktiga bitar hamnar mellan de olika aktörernas stolar.

Slutsatser

Detta forskningsprojekt har behandlat ett ämne som visat sig vara både aktuellt och ett som engagerar många i byggbranschen. Följande slutsatser kan dras från det material som ovan i korthet beskrivits:

- När ingenjörer omvandlar ett ingenjörproblem eller en ritning till en beräkningsmodell introduceras en osäkerhet. Denna osäkerhet är inte bara kopplad till rena mänskliga fel utan också till subjektiva val, bristande kunskap och/eller information. Begreppet *engineering modelling uncertainty (EMU)* har introducerats för att beskriva detta.
- Variationen kopplad till EMU påverkar säkerhetsnivån i byggnader – speciellt mer komplexa system påverkas i hög grad av detta (t ex statiskt obestämda system). För det aktuella exemplet i Test 1 ökar sannolikheten för brott hos t ex en pelare (om den dimensioneras på basis av aktuella laster) med en faktor 10^4 .
- Undersökningen tyder på att de normer och avancerade hjälpmedel som idag används förhindrar utvecklingen av konceptuell helhetsförståelse hos unga ingenjörer. Dessa hjälpmedel och formler är ofta svåra att se igenom och förstå för den normala användaren och kan därmed liknas vid svarta lådor (black boxes), där indata på ett okänt vis omvandlas till utdata. För att kunna använda dessa formler och verktyg tvingas ofta ingenjören att fokusera på indata av underordnad betydelse snarare än det övergripande verkningssättet och helheten.
- Studien har visat att redovisning av beräkningsresultat – vad de betyder och under vilka förutsättningar de är giltiga – ges låg prioritet i arbetet. Även detta inducerar och förstärker de osäkerheter som belysts, i synnerhet om dessa resultat ska användas av andra ingenjörer i projekt med ansvar som delats upp på flera ingenjörer/ aktörer.
- Undersökningen tyder på att det krävs någon typ av extern granskning för att harmonisera och kalibrera branschpraxis. I annat fall riskerar konsekventa fel och arbetsmetoder på sikt att utvecklas



till felaktig praxis inom enheter, kontor och/eller hela branschen. Oberoende granskning kan förhindra att detta sker.

Finansiärer

Detta industridoktorandprojekt är finansierat av Sven Tyréns stiftelse och SBUF.

Referenser

- [1] E. Frühwald, E. Serrano, T. Toratti, A. Emilsson, and S. Thelandersson, "Design of safe timber structures—How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber," *Division of Structural Engineering, Lund Institute of Technology, Report TVBK-3053 edn, Lund, Sweden, 2007*.
- [2] R. Lopez and P. E. Love, "Design error costs in construction projects," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, pp. 585-593, 2011.
- [3] CEN, "EN 1990," in *Eurocode - basis of structural design*, ed: European Committee for Standardization, 2010.
- [4] Boverket, "Boverkets författningssamling BFS 2013:10 EKS 9," Boverket, Ed., ed: Boverket, 2013.
- [5] M. Karanikas and P. Dahlberg, "Slutrapport RO 2013:03 Husras på Aulingatan i Ystad, Skåne län, den 25 maj 2012, in Swedish," Statens Haverikommission RO 2013:03, 2013-12-17 2013.
- [6] M. G. Stewart and R. E. Melchers, "Simulation of human error in a design loading task," *Structural Safety*, vol. 5, pp. 285-297, 1988.
- [7] M. Bürge and J. Schneider, "Variability in Professional Design," *Structural Engineering International*, vol. 4, pp. 247-250, 1994.