

Lunds domkyrka analyseras med ny teknik

”Den här kyrkan ska aldrig någonsin bli färdig” utropade *Jätten Finn* enligt sägnen. Jätten ville riva Lunds domkyrka efter att ha förlotrat ett vad, vilket innebar att han inte skulle få sin lön. Rivningen misslyckades, men innan jätten förstenades mot kolonnen i kryptan hann han ropa ut sin förbannelse [1]. Generationer av skolklasser och besökare har fascinerats av legenden och skulpturen i kryptan där jätten Finn omfamnar en pelare. I inledningen till boken *Lunds domkyrka* skriver *Erik Cinthio* ”Under kyrkans mer än 800-åriga tillvaro har murarens slev och stenhuggarens mejsel bokstavligen knappast någonsin vilat” [2]. Osagt om Jätten Finn har ett finger med i spelet eller ej, så är Lunds domkyrka, *figur 1*, en katedral som vittnar om 900 års byggteknikhistoria, en historia som innehåller de största stilepokerna i Västeuropas moderna tid. Domkyrkorådet har nu inom sitt bevarandearbete initierat ett arbete med att skapa en tredimensionell modell av kyrkan och i anslutning till detta genomförs ett examensarbete vid högskoleingenjörsutbildningen vid LTH, Campus Helsingborg, med syfte att analysera kyrkans takkonstruktion.

Inom ramen för Domkyrkorådets bevarandeprogram har det beslutats att en virtuell tredimensionell modell av kyrkan ska skapas. Teknikkonsultföretaget Sweco har fått i uppdrag att göra det praktiska inmättningsarbetet och den administrativa hanteringen av resultatet. Parallellt med detta har domkyrkoarkitekt *Erik Wikersdal* blivit ombedd att med hjälp av de inmätta koordinaterna skapa en tredimensionell modell.

Kyrkan avbildas med miljontals mätpunkter med hjälp av avancerad laserteknik. Fördelar med detta är att man med god noggrannhet kan avläsa geometrin i kyrkans konstruktion och mäta hur den ändras med tiden.

I anslutning till detta projekt genomförs ett examensarbete inom högskoleingenjörsutbildningen vid LTH, Campus

Helsingborg. Tanken med examensarbetet ”Lunds domkyrkas takkonstruktion genom tiderna” är att bidra med ett tillägg i form av en teknisk analys. Eftersom omfattningen av en teknisk analys av en så komplex byggnad som domkyrkan inte ryms inom ramarna för ett examensarbete har arbetet avgränsats till södra transeptets takkonstruktion, som är den del av domkyrkan som förvaltarna av domkyrkan sett som mest kritisk.

Som förarbete har en litteraturstudie om domkyrkan genomförts, för att få förståelse för hur byggnaden förändrats genom århundraden samt vilka koncept och samhällsförändringar som varit drivande för förändringarna. Det huvudsakliga arbetet handlar om att ställa upp beräkningsmodeller för takkonstruktionen, valven och murverken. I nuläget har kyrkans takkonstruktion i stål analyserats. Fokus är än så länge principen för hur takkonstruktionen fungerar som system. Arbetet kommer att gå vidare med mer detaljerade, kvantitativa, beräkningar med hjälp av finita elementmetoden (FEM).

Från romansk till gotisk katedral

Den romanska arkitekturen började sprida sig i Europa under början av 1000-talet. Romansk betyder ”härstammar från Rom” och stilen har sagts vara västerlänningarnas första självständiga stil efter romarrikets fall. Stilen utmärks av stora släta och raka stenblock som ska införliva



Artikelförfattare är **Isak Berneheim** och **Susanne Heyden**, Lunds tekniska högskola, samt **Christoffer Brand**, Sweco.

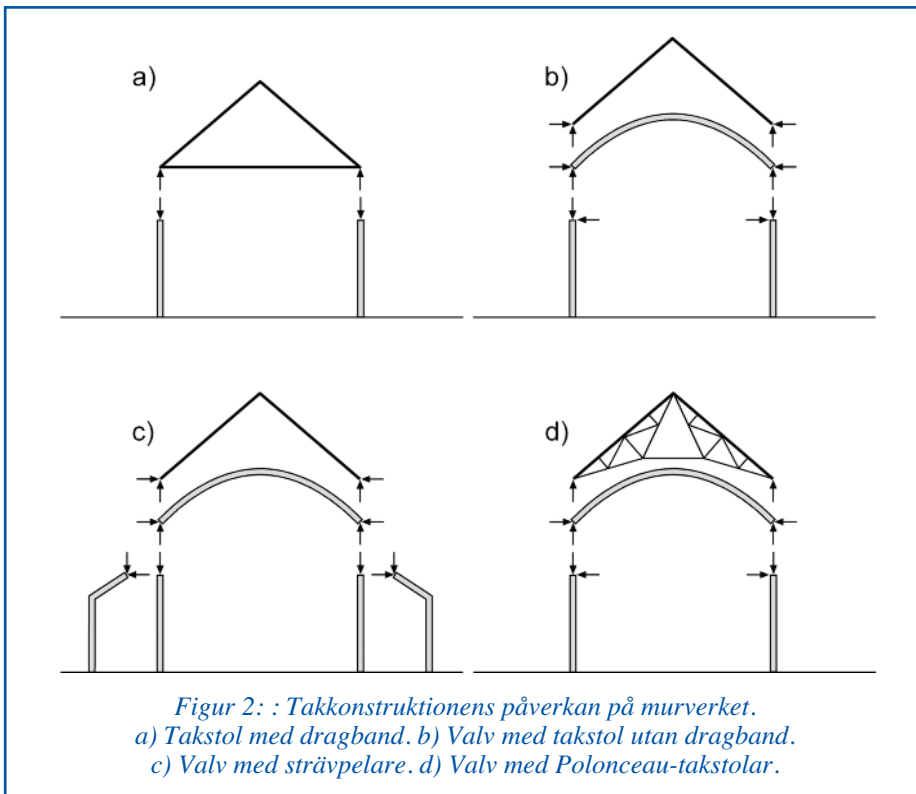
stabilitet och lugn. Under den romanska tiden var det långhuskyrkan som blev den vanligaste formen. Kyrkorna var ofta uppbyggda med en rumsindelning med torn och ingång i det profana väster och kor och absid i det heliga öster, vilka var sammanbundna med ett långhus. Transept sträckte sig från söder och norr förbi koret. Det romanska idealet med kantig och enkel geometri syftade till att skapa en byggnad som förde blickarna horisontellt framåt mot koret. För att förstärka intrycket av att långhuset bildar en väg mot öster var det ofta förlagt under ett platt trätak eller tunnvalv, och väggarna var uppbyggda av arkader och emporer [5].

Den romanska arkitekturens ideal präglade domkyrkan, som först tros ha

Figur 1: Lunds domkyrka idag.



FOTO: BJÖRN ANDERSSON, LUND



Figur 2: : Takkonstruktionens påverkan på murverket.
 a) Takstol med dragband. b) Valv med takstol utan dragband.
 c) Valv med strävpelare. d) Valv med Polonceau-takstolar.

byggts med monumentala kraftiga murverk och ett på insidan platt trätak. Det är dock svårt att uttala sig med säkerhet om domkyrkans äldsta historia på grund av den brand som härjade i kyrkan 1234 och nästintill totalförstörde den [3, 4]. Ett platt trätak ger utrymme för en takkonstruktion med dragband, vilket gör att takkonstruktionen endast påverkar murverket med vertikallaster, se figur 2a.

Den romanska stilen började redan under 1100-talet att gå ur tiden, och gotiken började göra sitt intåg. Gotiken strävade efter att skapa större rymd i jämförelse med det romanska sättet att stänga rummet med massiva väggar och platt trätak. Utvecklingen gick från den enkla tunga konstruktionen med en rörelse som skapar en tydlig siktlinje fram mot altaret till en mer avancerad och lätt konstruktion som skapar

rörelse såväl mot det heliga altaret som upp mot himlen. Valven gick nu från tunnvalv till kryssvalv. Intrycket blir med kryssvalv helt annorlunda, där blicken riktas rakt fram längs ett tunnvalv, riktas blicken nu snarare upp mot krysset, något som skulle få besökaren att blicka upp mot himlen.

Under gotiken utvecklades tre fundamentala delar: korsribbor, spetsbågar och strävsystem. Detta är konstruktiva element som skapar förutsättningar för en optiskt lätt konstruktion, som öppnar upp rummet och släpper in rikligt med ljus. Den gotiska arkitekturen gick så långt att murarnas nyckelroll som bärande system avtog och väggarna kunde förses med stora fönsterpartier. De smala pelarna mellan de stora fönsterpartierna stöttades upp av strävsystem på utsidan. Kraften överfördes från ribborna i korsvalvet ner i

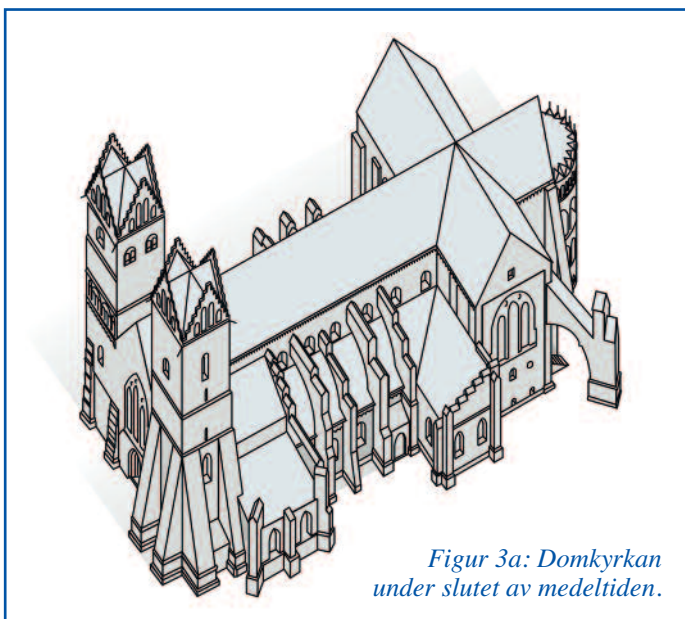
spännbågarna, och vidare ner i strävpelarna som ledde kraften ner i marken. En tydlig trycklinje hade skapats. I motsats till den romanska kyrkan, där de kraftiga murverken tog upp all kraft, fördelades nu kraften på tunna vertikala och horisontella system som tog upp krafterna i tydliga trycklinjer. [5, 6]

Efter branden 1234 byggdes det kryssvalv över långhuset och transepten i Lunds domkyrka. Denna takkonstruktion innebär att murverket även belastas med horisontalkrafter, se figur 2b. Murverken var inte från början dimensionerade för detta och det uppstod därför stora problem med konstruktionens stabilitet. Det byggdes även tre tredelade fönster, ett i norra respektive södra transeptet och ett mellan tornen över den västra entrén. Detta bidrog också till att försämra murverkens bärförmåga [3, 4].

Karl den Röde skrev 1318; ”vari omnämns, huru mycket avlat man erhållit för att därmed skaffa medel till underhåll och reparationer av domkyrkan, vars takvalv hotade att instörta” [3]. Kyrkan behövde yttre stöd och det byggdes så småningom strävpelarsystem runt om hela kyrkan för att avhjälpa problemet. Strävpelare var gotikens sätt att ta hand om horisontalkrafterna, se figur 2c. Det är svårt att datera när de första strävpelarna uppfördes, då de byggdes om under 1500-talet. Adam van Diüren var den mästare som då kallades in för att göra en omfattande restaurering av domkyrkan som befann sig i mycket dåligt skick. Figur 3a visar tydligt förvandlingen från den romanska till den gotiska arkitekturen [3].

Återskapandet av den romanska katedralen

Under franska revolutionen förstördes många av de franska kyrkorna. En kommission för historiska monument bildades därför i Frankrike i början av 1800-talet och den franske arkitekten Eugène Viollet-le-Duc var en av de utvalda arkitekter som



Figur 3a: Domkyrkan under slutet av medeltiden.



Figur 3b: Restaureringsförslag av Zettervall.

fick leda restaureringarna. Han kom att bli en av de främsta stilrestauratorerna på 1800-talet och företrädde åsikten ”Att restaurera en byggnad är inte detsamma som att underhålla, reparera eller bygga om den. Det är att återställa den i ett fullständigt tillstånd, som inte behöver ha existerat vid någon given tidpunkt” [7]. Den unge arkitekten *Helgo Zettervall* blev 1860 utsedd till domkyrkoarkitekt och fick därmed ansvaret för att leda en restaurering av domkyrkan. Med stora visioner och Viollet-le-Duc som förebild ville han återskapa den romanska katedralen. De gotiska tilläggen skulle bort och den romanska kyrkan skulle lyftas fram. Hans vision var så stark att han gjorde kyrkan mer romansk korrekt än den någonsin hade varit [4].

Zettervall fick medel av domkyrkorådet att göra en studieresa ner i Europa och besöka de största katedralerna för att få inspiration och att lära. Den vägen han valde och de kyrkor han besökte avspeglas i det förslag han sedan presenterade för domkyrkorådet, *figur 3b*. De gotiska tilläggen skulle bort, alla yttre strävpelare med spännbågar och takvalven i långhuset skulle rivas ner och bytas ut mot ett platt trätak. Mansardtaket skulle byggas om till det ursprungliga spetsiga sadeltaket och tornen skulle byggas om med kolonneggallerier i flera våningar som avslutas med ett spetsigt tak. Förslaget gillades av kommissionen men godtogs varken av domkyrkorådet, staden Lund, eller konsistoriet. Zettervall var energisk och listig och kunde bit för bit genomföra en stor del av de restaureringar han hade föreslagit. De stora förändringar som han ändå inte fick igenom var bland annat de tre tornen i den östligaste delen samt att byta ut valven mot trätak [3, 4].

Det som var utmärkande för hans restaureringsarbete, förutom den återskapande ideologin, var valet av innovativa material och konstruktionslösningar. För att kunna riva strävpelarna utan att ersätta korsvalven med platt trätak var han tvungen att bygga en takkonstruktion som kunde klara denna utmaning. Han valde då en för tiden avancerad takkonstruktion i järn med polonceautakstolar som primärt bärverk, se *figur 2d*.

Tredimensionell modell av kyrkan

Precis som en digitalkamera avbildar verkligheten med en tvådimensionell bild, kan en laserskanner avbildas verkligheten i tre dimensioner. Till skillnad från en kamera som bara kan fotografera en begränsad vy per bild, så skannar laserskannern 360 grader runt lodrät axel och 270 grader runt vågrät och avbildar på så vis allt som omger skannern. En kamera fångar hela bilden på ett ögonblick medan laserskannern sveper med en pulserande laserstråle över omgivningen och mäter avståndet till allt lasern träffar. Resultatet blir ett tätt punktmoln med miljontals mätkoordinater från laserskannern.

Eftersom lasern inte kan skanna på baksidan av de föremål den träffar behövs flera uppsättningar/tagningar ifrån olika vinklar för att komplettera det som befunnit sig i skugga från tidigare skannerposition. Tack vare att alla punkter är koordinatsatta mätvärden kan resultatet ifrån flera laserskanningsuppsättningar sammanfogas till ett komplett punktmoln som avbildar verkligheten från alla håll i tre dimensioner.

Resultatet från laserskanningsarbetet av Lunds domkyrka blir en digital avbild av alla utrymmen i och runt om byggnaden. Parallellt med laserskanningsarbetet utförs också fotoskanning av Riksantikvarieämbetet. Fotoskanningen innebär att alla ytor fotograferas med digitalkamera för att sedan kunna leverera färgvärden med hög upplösning till framställda tredimensionella modeller.

Punktmolnet används som referens vid renritning och framställning av tredimensionella ritningar/CAD-modeller. Detta arbete utförs för hand och med noga avvägning för att ta hänsyn till de byggnadstekniska aspekterna i byggnaden. Detta innebär att domkyrkoarkitekten avgör vilka deformationer som ska finnas med och vilka som inte tillför något till de tredimensionella ritningarna. Det finns många utsmyckningar i domkyrkan i form av epitafier, pillastrar och andra detaljerade konstföremål. Dessa förenklas och utesluts i vissa fall helt från de tredimensionella ritningarna. Detta beror på

pågående arbete för verksamheten. De nya digitala underlagen kommer underlätta detta arbete. Som ett led i detta arbete byggs även en WebGL-baserad applikation där mycket av det tredimensionella material som samlas in och framställs kan visualiseras. I applikationen är det möjligt att skriva dokumentation och koppla dokument till en geografisk plats i den tredimensionella modellen. Detta gör det lätt att hitta all relevant information baserat på geografiska utsökningar och metadata. Detta är en applikation som projektledaren på Sweco, *Christoffer Brand*, håller på att bygga upp.

Denna applikation ska även kunna användas för forskning om domkyrkan. Den kan då vara ett instrument för att på ett pedagogiskt sätt tillgängliggöra kunskap om kyrkan och en plattform för att presentera nya forskningresultat.

I det pågående examensarbetet används data från inskanningen för att på ett enkelt sätt få geometridata med stor noggrannhet. Dessa geometridata används sedan som underlag för en analys av takkonstruktionens mekaniska funktion. Det är även en förhoppning att de resultat som uppnås i examensarbetet ska kunna presenteras i applikationen. Detta för att få en modell som även avspeglar hur domkyrkan fungerar som system, inte bara hur den ser ut rent geometriskt. *Figur 4* visar ett exempel på resultat från inskanningen. Bilden visar utrymmet ovanför valvet och man kan urskilja en av huvud-



att det tar för mycket tid att renrita dessa för hand och det blir för utrymmeskrävande/prestandakrävande när man autogenererar tredimensionella modeller med separat programvara.

Mätningarna av domkyrkan kommer användas för att se hur byggnaden rör på sig över tid. Detta är viktigt eftersom det finns problem med sättningar i området som påverkar byggnadens hållfasthet. Tredimensionella ritningar/CAD-modeller kommer ligga till grund för framställning av exempelvis ritningar för el, vatten och värme i byggnaden.

Arbetet med vård och underhåll av domkyrkan är ett omfattande och ständigt

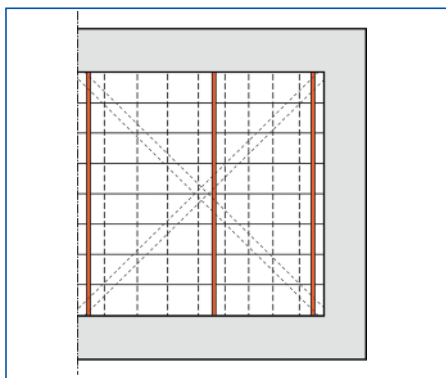
bågarna i kryssvalvet samt olika delar i stålkonstruktionen. Det kraftigaste raka elementet i bilden tillhör inte den bärande konstruktionen, utan är en gångbro i trä som används vid inspektion av utrymmet.

Takkonstruktionens utformning

Taket i långhuset utgörs idag av en serie kryssvalv överbyggda med en yttertakskonstruktion i stål och trä. *Figur 5 på sidan 50* är ett foto taget i långhuset. Även transepten är uppbyggda på detta sätt. *Figur 6* illustrerar med en plan principiellt hur takkonstruktionen över södra transeptets kryssvalv är uppbyggd av bärverk i flera nivåer. Avståndet från insida vägg



Figur 5: Loftet över långhuset.



Figur 6: Principplan över taket i södra transeptet. Streckat kryss – Bågarna i kryssvalvet. Röd linje – Primärbärverk av Polonceau-takstolar. Horisontell heldragen linje – Sekundärbärverk av underspända balkar. Streckad vertikal linje – 3:e ordningens bärverk av mindre stålbalkar.

till insida vägg är cirka 11 m och det streckade krysset markerar de båda bågarna i kryssvalvet.

● Primärbärverk – De röda vertikala linjerna markerar de polonceautakstolar

som spanner över valvet. Den takstol som ligger i mitten har en annan utformning än de båda andra, eftersom valvet är högre här.

● Sekundärbärverk – Polonceautakstolarna belastas via underspända balkar, markerade med heldragen horisontell linje.

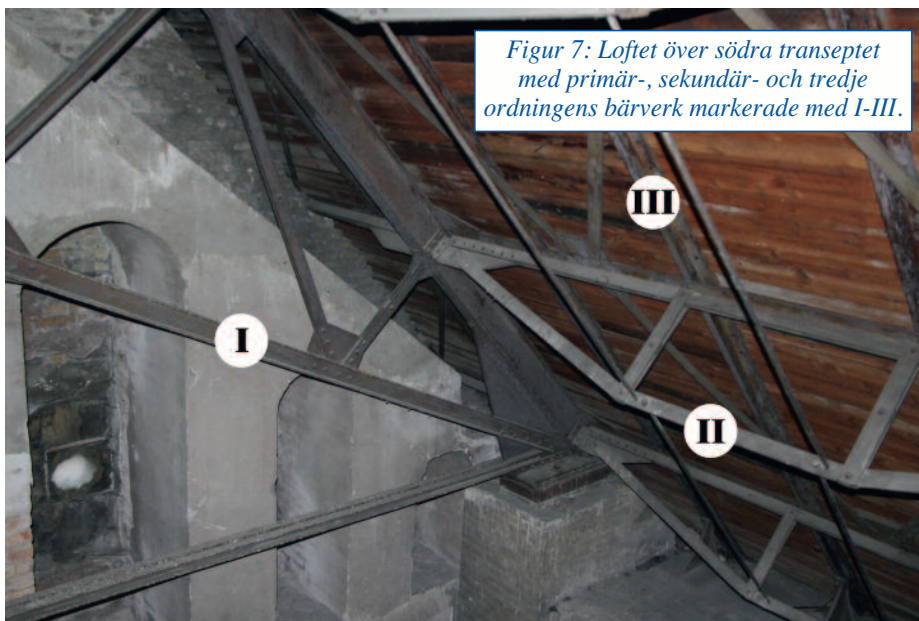
● Tredje ordningens bärverk – Fackverken belastas i sin tur av stålbalkar, markerade med vertikal streckad linje.

● Fjärde ordningens bärverk – Träpanel bär mellan balkarna, och utgör samtidigt en del i klimatskalet. Denna visas ej i figur.

Utöver dessa delar finns även ett system av plattjärn i kryssmönster på insidan av träpanelen, för att förbättra skivverkan i taket samt stag som bidrar till att staga sekundärbärverket mot vippning. Dessa konstruktionselement syns i figur 7 som är ett foto taget i södra transeptet.

Primär, sekundär och tredje ordningens bärverk är markerade I till III i figuren.

För denna typ av bärverk gäller följande två principer [8]:



Figur 7: Loftet över södra transeptet med primär-, sekundär- och tredje ordningens bärverk markerade med I-III.

● För ett och samma tvärsnitt är axialstyvheten betydligt större än böjstyvheten.

● Längden har en särskilt stor inverkan på böjstyvheten.

Det innebär alltså bättre materialutnyttjande att bära med tryck och drag än med böjning. Takkonstruktionen är uppbyggd på ett sådant sätt att polonceautakstolar och sekundärbärverk enbart belastas med punktlaster i knutpunkterna. Detta innebär att dessa delar i bärverket huvudsakligen är utsatta för drag- och tryckkrafter (bortsett från inverkan av deras egen egentynngd). Det är alltså bara tredje och fjärde ordningens bärverk som utsätts för utbredd last. Den utbredda lasten kommer att ge upphov till böjning i balken. Zettervall har alltså följt ovanstående principer mycket väl vid uppförandet av takkonstruktionen på Lunds domkyrka.

Primär- och sekundärbärverk har modellerats som rena fackverk trots att knutpunkterna inte är utformade som leder. Det faktum att samtliga laster angriper i knutpunkterna samt att knutpunkterna omsorgsfullt har utformats så att alla stängers systemlinjer skär varandra i en punkt, se figur 7, gör att denna approximation bör ge bra resultat. Denna inledande analys har utförts med Pointsketch [9] som är ett FEM-program som lämpar sig för snabba, kvalitativa analyser av fackverk. Mer exakta beräkningar kommer inom examensarbetet att göras i CalfeM [10]. Nedan följer en redogörelse som visar hur de olika konstruktionselementen fördelar lasterna genom konstruktionen.

Primärbärverk

Polonceautakstolen utvecklades i början av industrialismen när behovet av lösningar för konstruktioner med stor spännvidd ökade. Det var den franske ingenjören *Camille Polonceau* som utvecklade denna typ av takstol och tidiga exempel finns till exempel i flera tågstationer i Frankrike.

Polonceautakstolen är en vidareutveckling av den underspända balken och idén är att bära med tryck och drag istället för med böjning, detta för att maximera materialutnyttjandet, se figur 8. I figur 8 och alla följande liknande figurer representerar rött dragkraft och blått tryckkraft.

I det södra transeptet finns tre polonceautakstolar med två olika utformningar. Valvet är högst i mitten och i de två takstolarna i kanterna har man därför fått plats med ett dragband i takstolens undre del, figur 9d. Polonceautakstolen som är mitt över valvet är mer av det klassiska utförandet för denna typ av takstol, figur 9a. De två fackverken som takstolen är uppbyggd av är alltså sammanbundna på två olika sätt. Takstolen över valven har bara ett stag mellan fackverken som är

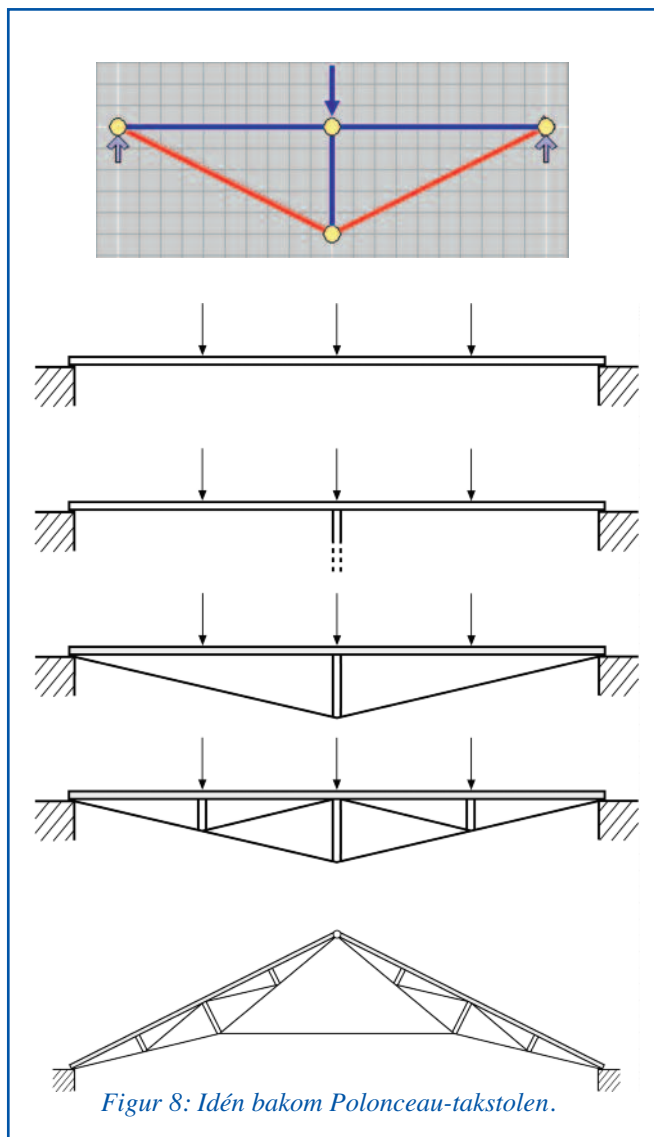
placerat i mitten på konstruktionen medan takstolarna vid sidan av valvet har ytterligare ett stag i underkant. Skillnaden i normalkraftsfördelning blir stor mellan de olika utförandena. *Figur 9b och e* visar de inre krafterna i de båda takstolarna när de utsätts för vertikal last i knutpunkterna, från till exempel egentygnd och snö. Takstolsdelarna kommer att vilja glida isär och då kommer staget i mitten på konstruktionen att bli draget i takstolen över valvet. Detta medför att hela undersidan av konstruktionen blir dragen. Vid de andra två takstolarna kommer det undre staget bli draget och detta medför att den tidigare dragna bågen nu kommer bli tryckt. Det syns också tydligt att dragstaget i underkant gör stor nytta, normalkrafterna blir mycket mindre i detta fall (ju mörkare färg desto större kraft).

Det är också viktigt att notera att i och med att den vertikala lasten inte är vinkelrät mot de två delfackverken så kan lasten delas upp i en komponent längs med, och en vinkelrät mot delfackverken. Detta medför att ju mer takstolarna lutar desto mer kraft kommer den yttersta stången ta upp i axiell riktning. Det syns tydligast i *figur 7e* att tryckkraften blir större längre ner i stången.

Takstolen har här modellerats som fritt upplagd, det vill säga horisontell förskjutning är bara förhindrad i det ena upplaget. Frågan om upplagsvillkoren är central. Infästningarna av takstolen till murverket utgörs av kraftiga förband, så intentionen har inte varit att tillåta rörelse relativt murverket i horisontell led. Även om takstolen är fast förbunden med murverket så kan dock hela murverket ha rört sig utåt som en följd av sättningar och skador i murverket till följd av horisontalkraft från valven. Det kan även vara så att fackverket bidrar till att hålla ihop murverket genom att motverka uttryckskraften från valven. Att det är så är en av hypoteserna för hur murverket nu kan klara sig efter att strävpelarna har avlägsnats.

Om horisontell förskjutning förhindras i båda upplagen så blir normalkraftsfördelningen i takstolen utan dragband lik den i takstolen med dragband, i det ena fallet hålls takstolen ihop av dragbandet och i det andra av upplagen.

Figur 9c och f visar de inre krafterna i takstolarna då de utsätts för antisymmetrisk last från till exempel vindtryck på lo-vartsidan och vindsug på läsidan. Normalkraftsfördelningen är i detta fall inte symmetrisk, utan omvänd i de båda halvorna. Takstolen har här modellerats med



Figur 8: Idén bakom Polonceau-takstolen.

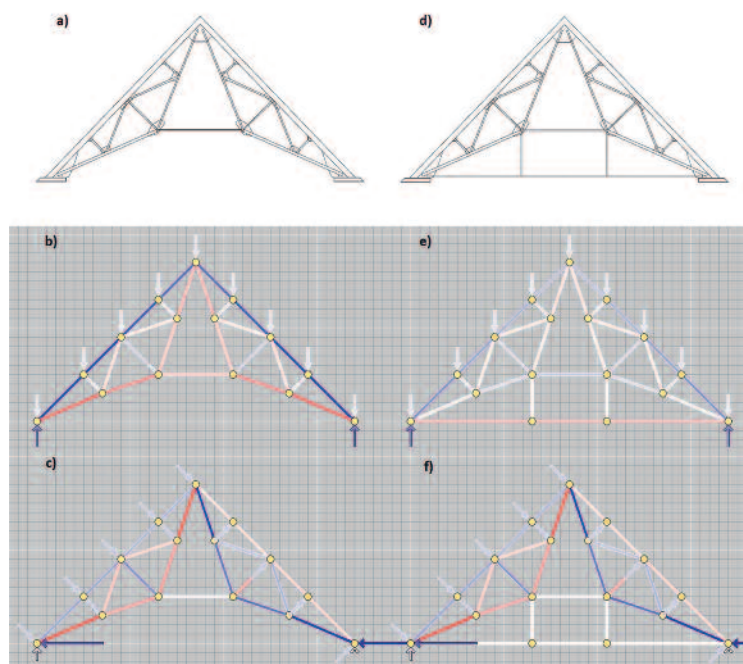
upplag som förhindrar horisontell förskjutning i båda sidorna. I detta fall finns en yttre horisontell last som måste tas upp av upplagen. Normalkraftsfördelningen i fackverket blir olika beroende på vilket upplag som antas vara låst mot horisontell förskjutning vid antagande om fri uppläggning. I den modell som har valts fördelar sig upplagskraften lika mellan stöden.

Eftersom båda upplagen är låsta i horisontell led så förlorar dragbandet sin funktion och fördelningen av normalkraften blir likartad för båda takstolarna. Om man skulle superponera effekten av att ett upplag förskjuts i sidled så blir det åter skillnad mellan kraftfördelningen i de olika takstolarna.

Sekundärbärverk

Det sekundära bärverket bygger på samma grundprincip som polonceautakstolen och fungerar som en underspänd balk med två tryckstag. Drag- och tryckkrafter i de olika delarna orsakade av nedåtriktad (egentyngd och vindlast på lo-vartsidan) respektive uppåtriktad (vindlast på läsidan) last visas i *figur 10 på nästa sida*. Vid uppåtriktad last blir det tryck i den undre delen som ofta betraktas som ett dragstag. För att staga denna mot vippning går

Figur 9: Geometri och normalkraftsfördelning för Polonceau-takstolarna (rött-drag blått-tryck). a) Geometri för Polonceau-takstolen i mitten. b) Inre krafter vid belastning med egentygnd. c) Inre krafter vid belastning med vindlast. d) Geometri för Polonceau-takstolar vid kanterna. e) Inre krafter vid belastning med egentygnd. f) Inre krafter vid belastning med vindlast.



ett stag från nock till takfot som är infäst i samtliga sekundärbalkar.

Tredje ordningens bärverk

Tredje ordningens bärverk i taksystemets stålkonstruktion är den enda ståldelen som kommer utsättas för en utbredd last. Den utbredda lasten kommer att ge upphov till ett moment, vilket medför tryck- respektive dragspänningar i balken. Egentyngden kommer att ge både axiell last och böjning i balken medan vindlasten bara ger böjning.

Fjärde ordningens bärverk

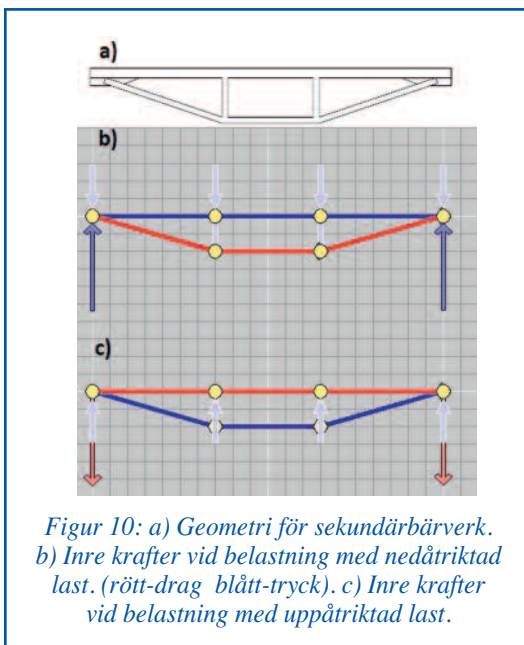
Träpanelen bär genom böjning mellan stålbalkarna. Avståndet mellan stålbalkarna är cirka 1,4 m. Träpanelen ligger i vissa fall kontinuerligt över tredje ordningens bärverk men har idealiserats som fritt upplagd i beräkningarna.

Fortsatt arbete

Takkonstruktionen var innovativ för sin tid och är än idag en konstruktion av hög ingenjörsmässig kvalitet, med tydliga och genomtänkta delkomponenter i bärverket.

Arbetet kommer att gå vidare med en analys av murverken och samspelet mellan murverk och takkonstruktion. Här kommer en del antaganden att få göras eftersom det är svårare att få full information om murverkens utformning. Den geometriska utformningen av valv, väggar och takkonstruktion har kunnat tas fram med hjälp av inmätta koordinater. Det har däremot inte varit möjligt att bestämma hur konstruktionen ser ut inuti murarna.

Murverken som tidigare var hårt påfrestade av horisontalkrafter från valven verkar klara sig betydligt bättre efter Zettervalls ombyggnad. Det finns källor som menar att takkonstruktionen i stål bidrar till att hålla ihop murarna, "Zettervall var en duktig ingenjör och lyckades med konststycket att få domkyrkan att stå utan yttre stöd.(...) Ett raffinerat system av järnbalkar konstruerades så att väggarna



Figur 10: a) Geometri för sekundärbärverk. b) Inre krafter vid belastning med nedåtriktad last. (rött-drag blått-tryck). c) Inre krafter vid belastning med uppåtriktad last.

skulle hålla varandra på plats" [11]. En målsättning i examensarbetet är att gå vidare med att göra en uppskattning av om detta är möjligt. En faktor som talar mot takstolarnas förmåga att hålla ihop murverket är att deras upplag ligger cirka 6 m högre än valvets. För att horisontalkraften ska kunna överföras från valven krävs det att denna biten av mur kan ta upp kraften genom böjverkan.

Det finns även uppgifter om att Zettervall gjöt en betongkrans runt om murverken uppe på loftet för att förstärka murarna och få en sammanhållande konstruktion. En säker källa för detta saknas dock i nuläget. I ett kryssvalv kommer huvuddelen av lasten ner mot väggen via bågarna, det vill säga i hörnen. En del last kan, beroende på hur valvet är utformat, även belasta murarna mellan bågarna. En armerad betongkrans skulle ge möjlighet att föra ut dessa laster till hörnen där det finns murar med potential att bära lasten samt takstolar med ett riktigt dragband.

Alla dessa frågor kommer inte att kunna få klara svar i det pågående examensarbetet men förhoppningsvis kommer man en bit på vägen i att förstå funktionen i

denna gamla och intressanta byggnad. Framförallt visar examensarbetet nytan i den nya tredimensionella modell som håller på att skapas. Detta är början på ett mycket användbart system, och en unik plattform för att samla och sprida information om domkyrkan. ■

Referenser

- [1] Tidsskriften Finn (2014:1). Lund: Svenska kyrkan, Lunds domkyrkoförsamling.
- [2] Cinthio, E. (1953). *Lunds domkyrka*. Malmö: AB Allhem.
- [3] Rydbeck, O. (1923). *Lunds domkyrkas byggnadshistoria*. Lund: Gleerups.
- [4] Rydén, T. , Lovén, B. & Hammar, KG. (1995). *Domkyrkan i Lund*. Malmö: Corona AB.
- [5] Weigert, H. (1966). *Romansk arkitektur*. Malmö: AB Allhem.
- [6] Gerstenberg K. & Domke H. (1964). *Gotisk arkitektur*. Malmö: AB Allhem.
- [7] Svedberg, O. (1988). *Arkitekturernas århundrade – Europas arkitektur på 1800-talet*. Stockholm: Arkitektur förlag AB.
- [8] Dahlblom, O. & Olsson, K-G. (2010). *Strukturmekanik – modellering och analys av ramar och fackverk*. Lund: Studentlitteratur AB.
- [9] Pointsketch. <http://www.chalmers.se/sv/institutioner/arch/forskning/pointsketch2D/Sidor/default.aspx>.
- [10] Calfem. <http://www.byggmek.lth.se/calfem/>.
- [11] Ulvros, E-V., Larsson, A. & Andersson, B. (2012). *Domkyrkan i Lund, En vandring genom tid och rum*. Slovenien: Ednas Print.