

# Förutsättningar för användning av likartade planeringsverktyg inom byggproduktion och järnvägstrafik

Martin Aronsson

SICS  
Box 1263  
164 28 KISTA  
email:martin@sics.se

Adina Jägbeck

AdArk  
Riddarevägen 4  
191 33 SOLLENTUNA  
email: adark@telia.com

2001-12-20

*SICS Technical Report T2001:18*

**Sammanfattning:** Vi presenterar en studie som jämför två branscher där planeringsmetoder är en viktig komponent för lyckad produktion. För en trafikutövare inom järnvägssektorn är resursplanering en mycket viktig komponent för effektiv produktion, och inom byggsektorn är produktionsplanering likaså en mycket viktig komponent för effektiva byggen. Studien är gjord med fokus på möjligheterna att överföra verktyg framtagna för järnvägsoperatörers resursplanering inom projektet TUFF på SICS till planeringssituationen som den ser ut på byggsidan.

Resultatet av studien är att de två branscherna planerar på olika sätt, framför allt skiljer utgångspunkten för planering: för trafikoperatören är framför allt resurserna styrande för planeringen, medan för byggaren är produkten styrande för planeringen. Vidare är planerna för trafikoperatören oftast cykliska och återkommande medan för byggaren är de specifika för en viss produkt eller del av produkt. Mot bakgrund av detta kan vi konstatera att de specifika planeringsmodeller som tagits fram i TUFF inte har en omedelbar och rättfram användning inom byggprojektplaneringen.

Detta arbete finansierades av NUTEK och VINNOVA genom programmet Komplexa system under 1999-2001.

**Nyckelord:** Planering, schemaläggning, produktion, järnvägstransport, bygge.



# Förutsättningar för användning av likartade planeringsverktyg inom byggproduktion och järnvägstrafik

Martin Aronsson

SICS  
Box 1263  
164 28 KISTA  
email:martin@sics.se

Adina Jägbeck

AdArk  
Riddarevägen 4  
191 33 SOLLENTUNA  
email: adark@telia.com

*”Äventyr är resultatet av dålig planering”, Blatchford Snell*

## 1 Inledning

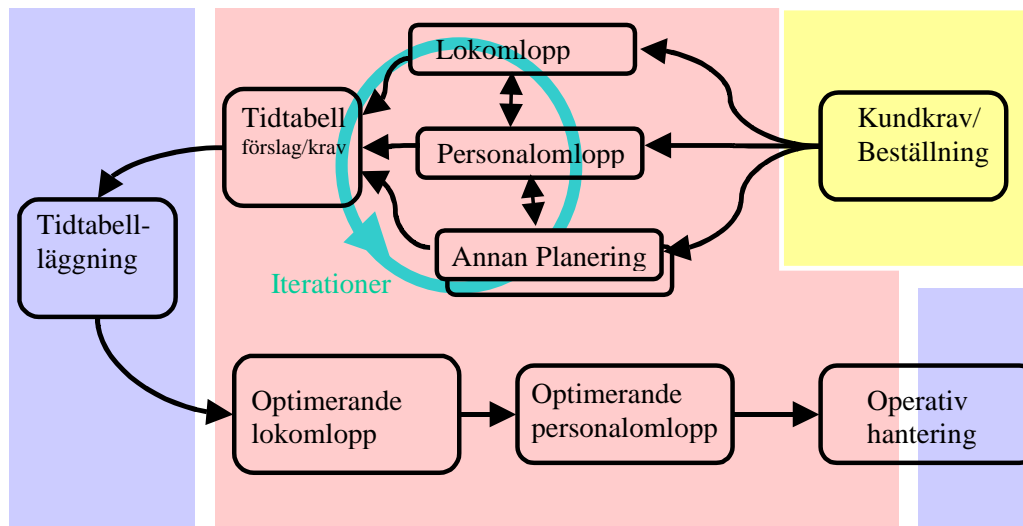
Föreliggande rapport beskriver en jämförande studie mellan resursplanering och tidsplanering såsom den görs inom järnvägssektorn och byggsektorn. Syftet är att studera möjligheterna att tillämpa lösningsmetoder utvecklade för järnvägssektorn i projektet TUFF (Tågplanering Utveckling För Framtiden) på problem som förekommer inom byggsektorn.

TUFF<sup>1</sup> är ett framgångsrikt forskningsprojekt som pågått under ett flertal år (1997 – 2001), och som studerat integreringen av olika resursplaneringar med avseende på att skapa en totalt kostnadseffektivare lösning. Idag sker planeringen i huvudsak i sekvens, med utgångspunkt från tidtabellen (se nedre flödet i Figur 1). TUFF utökar planeringsförloppet med verktyg för resursplanering innan tidtabellen är fastställd, i figuren de komponenter som ingår i iterationen innan en beställning av s.k. tåglägen görs hos Banverket Trafik (rutan längst till vänster), som i sin tur tar fram och fastställer en tidtabell. Vi har i TUFF valt att titta på tre huvudproblem, tidtabellläggning, lokomlopp och personalomlopp (turförteckning) i tidiga faser, dvs i det övre flödet i figuren nedan. Det finns ytterligare ett antal resurser som planeras, t.ex. vagnar och deras distribution geografiskt, samt ytterligare ett antal planeringsbeslut som tas t.ex. hur transportbehovet skall fördelas på transporter och vilka transporter som skall utföras. De resterande komponenterna, optimerande lokomlopp och optimerande personalomlopp samt ytterligare en del komponenter har redan idag lösningar som fungerar tillfredsställande eller som tas i bruk inom kort.

---

<sup>1</sup> Flera referenser finns under <http://www.sics.se/library>. Specifikt kan följande kan nämnas:

ACOOOR rapport 1: M. Aronsson, P. Kreuger, S. Lindblom, ACOOR rapport 1, *TUFF systemöversikt och arkitektur*, SICS Technical Report T2000:06, SICS, 2000



Figur 1 Komponenter i planeringssystem för tågtrafik

Det finns flera aspekter inom TUFF som kan vara intressanta att utvärdera inom andra branscher. En av de viktigare rör möjligheten att ställa krav på tidtabellläggningen så att ”goda egenskaper” med avseende på respektive resursproblem bevaras från ursprungsproblemet då tidtabellläggningen sker. Detta för att inte möjligheterna till bra lösningar skall ha förstörts då det är dags för de optimerande verktygen. För transportoperatören är detta extra viktigt eftersom det är en annan aktör (Banverket Trafik) och inte operatören själv som lägger den officiella tidtabellen. I TUFF åstadkoms kraven på tidtabellen genom att vissa nyckelegenskaper och begränsningar tas fram i de tidiga planeringsfaserna (de övre komponenterna), och dessa egenskaper måste sedan upprätthållas av tidtabellläggningen.

En annan aspekt som återfinns i många branscher är den struktur som återfinns i varje enskild ”tåg”/uppdrag. Varje uppdrag delas upp i deluppdrag enligt en fastställd struktur och på ett formellt sätt.

Resursplanering inom järnvägssektorn och projektplanering inom byggindustrin ligger på ett sätt långt ifrån varandra, då järnvägstransporter närmast är en tjänsteproduktion medan byggindustrin producerar fysiska objekt. Vidare genomförs transporter repetitivt, samma tåg avgår samma tid varje vecka eller dygn på ett upprepat sätt (veckorna ser ungefär likadana ut), medan de olika byggprojekten varierar stort, dels med avseende på objektets struktur men också med avseende på hur byggnaden produceras. Å andra sidan används många gånger generella modelleringstekniker och delproblem kan vara av samma natur, vilket motiverar denna studie.

Jämförelsen är genomförd i flera steg. Dels har två olika domänmodeller tagits fram i modelleringsspråket Express, en för järnvägssektorn (avseende resursplanering) och en för byggindustrin (avseende projektplanering). Avsikten var jämföra de olika modellerna för att se likheter och skillnader, och därigenom identifiera de områden som var intressanta att titta närmare på. Express<sup>2</sup> är ett modellbeskrivningsspråk, där olika koncept ges som objekt, vilka relateras till varandra genom relationer. Objekt kan tillhöra en klass, och en sådan relation beskrivs av en ”är en” relation, t.ex. är måsar fåglar, liksom sparvar. Båda kan flyga, dvs det är klassen fåglar som har egenskapen ”kan flyga”. Det finns idag modeller för byggprodukter, men på en annan nivå och med en annan omfattning än den nivå som vi är intresserade av här, vilket gör att vi har skapat egna förenklade modeller.

Dokumentet innehåller också en kortfattad beskrivning av de olika lösningskomponenterna som tagits fram inom TUFF, med tonvikt på de nyckelegenskaper som dessa komponenter har. Vi har även tagit upp vissa kommersiellt tillgängliga verktyg, då dessa eventuellt skulle kunna tillämpas på vissa områden inom byggsektorn.

## 2 Domänmodellering

Huvudsyftet i båda domänerna är att ta fram en plan för produktionsprocessen, dvs. önska- de transportuppdrag respektive produktion av projekterade byggnader. Modellen är statisk och innehåller begrepp för i produktionsprocessen ingående objektclasser och tillåtna relationer mellan dem.

En instansierad modell är en modell för en specifik produktionsprocess med definierade resultat och resurser. Den instansierade modellen kan vara en plan, en pågående eller förfluten process. I det här sammanhanget är vi intresserade av planer. Hur en modell skall instansieras för att t.ex. skapa en giltig eller optimal processplan ingår inte i modelleringen, men en sådan beskrivning kan förstås göras i relation till den

Vi har valt Express<sup>2</sup> som modelleringsspråk. Skälet är att det är ett modelleringsspråk som ingår i STEP-standardens<sup>3</sup> och som används inom flera industriella områden, bl.a. flyg och bil. Även inom byggindustrin finns en STEP-kompatibel modell framtagen inom branschorganisationen IAI<sup>4</sup> – den s.k. IFC<sup>5</sup> standarden.

Modellen består principiellt sett av tre huvuddelar.

- Produkt – produktens delar och samband mellan dem
- Resurser – olika resurser och samband mellan dem
- Process – olika aktiviteter och samband mellan dem

Produktionsprocessen knyter ihop de övriga två delarna till en enhetlig modell.

## 3 Modell för resursplanering inom järnvägssektorn

Modellen för de resursplaneringsdelar som ingår i TUFF är uppdelad på tre områden:

- planeringsprocesser som är huvudnivån i modellen, och relaterar de övriga delarna i modellen med varandra,
- produkten som är förhållandevis enkel, samt
- resurserna, framför allt spårnätet som har en intrikat struktur och som styr mycket av tidplaneringen.

Utöver detta finns begreppet slinga beskrivet, eftersom en utmärkande egenskap hos all planering i tågdomänen är dess cyklicitet. Typiskt så görs planer för en typvecka, som sedan upprepas om och om igen. Således återfinns de uppdrag, som startar i slutet på typveckan och som pågår över planeringshorisonten, som uppdrag som även pågår i början på typveckan. Enklast kan detta illustreras med att man tänker sig ett Gantt-schema som böjs till en cylinder, med tiden ”roterande” runt cylinder. När så cylindern låts snurra runt så kommer samma uppdrag så småningom att återkomma vilket motsvarar att en ny vecka påbörjas. Typplanerna korrigeras då helger mm påverkar tidtabellens utseende, vilket leder till speciella helg-tabeller både avseende tidtabeller men också för fordonsresurser mm.

Mycket av planeringen inom järnvägssektorn handlar om att utnyttja resurser effektivt, både fordon, personal och spår. Eftersom spårnätet är en begränsande resurs (det kostar mycket att utöka och tar lång tid) går mycket av planeringsprocessen ut på att utnyttja resurserna och planera trånga sektorer. Detta betyder att modellerna för resurser och deras struktur är viktiga.

---

<sup>2</sup> [http://www.steptools.com/support/stdev\\_v8\\_docs/devtools/devtools\\_9.html](http://www.steptools.com/support/stdev_v8_docs/devtools/devtools_9.html) eller, exemplifierad för bygg [http://cig.bre.co.uk/iai\\_uk/documentation/Data%20Modelling%20Using%20EXPRESS-G%20for%](http://cig.bre.co.uk/iai_uk/documentation/Data%20Modelling%20Using%20EXPRESS-G%20for%20)

<sup>3</sup> <http://www.nist.gov/sc4/>

<sup>4</sup> <http://iaiweb.lbl.gov/>

<sup>5</sup> <http://iaiweb.lbl.gov/> och ”Documents” eller [http://cig.bre.co.uk/iai\\_uk/iai\\_documents.htm](http://cig.bre.co.uk/iai_uk/iai_documents.htm)

### 3.1 Terminologi

I många fall är begrepp som används inom tågdomänen vardagliga och enkla, såsom station och lok. Vissa begrepp kan dock behöva förtydligas och ges en beskrivning i ord. Begreppen kommer även att definieras i Express-modellen senare.

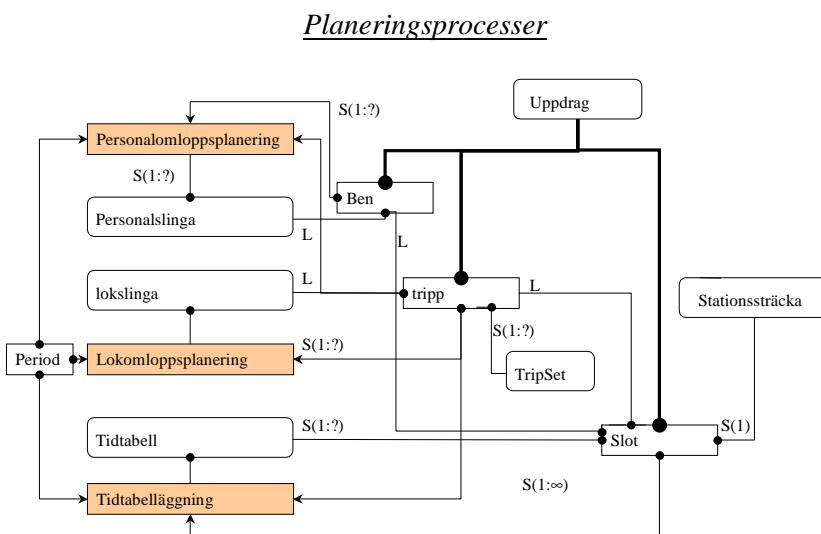
- Tripp:** En planerad transport av åtminstone ett lok mellan två platser.
- Ben:** Den minsta schemaläggningseenheten i personalplaneringssammanhang. Varje tripp bryts upp i ett antal ben.
- Cykeltidsgräns** Planeringsperiodens (typveckans) slut, vilken sammanfaller med planeringsperiodens start
- Vändning:** En vändning mellan två ben/tripper (ben i personalplaneringssammanhang, tripper i lokplaneringssammanhang).
- Slot:** Den minsta schemaläggningseenheten i tidplaneringssammanhang, representerar ett tågs allokering av ett spåravsnitt
- Förspång:** Minsta tidsavstånd mellan två tåg i samma riktning på ett spår
- Traverseringstid:** Tid det tar att utföra en tripp/ben/slott.

### 3.2 Express-modell

Nedan presenteras Express-modellen för de planeringsoperationer som finns i TUFF-systemet. Vi har gått utanför standarden och markerat operationer/beräkningar med orange färg samt indata i form av pilar, för att tydligare markera de system som utvecklats inom TUFF och som är föremål för denna studie.

De tre planeringsoperationerna *personalomlopp*, *lokomlopp* och *tidtabellläggning* och deras relation till data av olika slag framgår principiellt. Gemensamt för samtliga planeringsproblem är att de utgår från en uppsättning *uppdrag* på olika aggregeringsnivå (*tripp*, *slot* och *ben*) samt att de alla är beroende av den *planeringsperiod* som planeringen omfattar, normalt en vecka (s.k. typvecka). Kopplingen till nätet sker genom de mest grundläggande uppdragen, slottarna. Brukaren av systemet hanterar mängder av uppdrag genom s.k. *tripset*, vilket är mängder av tripper.

Notera att tidtabellläggningen syftar till att tidsätta samtliga slottar, medan de två andra operationerna syftar till att skapa slingor av uppdragen (cykliska sekvenser) och att den eventuella tidsättningen av uppdragen i detta sammanhang är en sidoeffekt (det är tidtabellläggningen som fixerar tiderna).

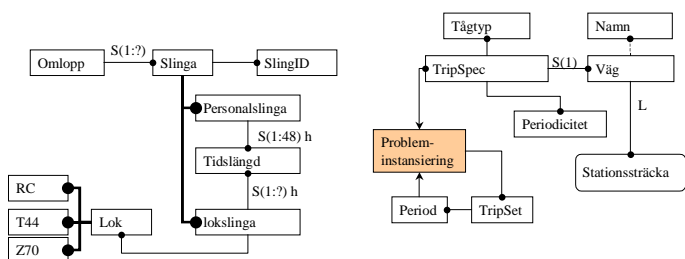


Figur 2 Planeringsprocesser – tåg. Begreppsmodell.

Varje slinga ingår i ett omlopp, och har en identifiering samt är av en viss typ (för personal hanteras endast lokförare vilka alla har samma utbildning och därför är av samma typ). En viktig skillnad mellan personalomlopp och lokomlopp är att lokslingor kan bli hur långa som helst, medan personalslingor har en viss maxlängd (i praktiken 2 dygn) eftersom personalens tjänstgöring inte får överskrida en viss tidsutsträckning.

Varje tripp innehåller de *slottar* som motsvarar den väg som har angetts i tripspecifikationen. Slottarna är ordnade i en lista vilket motsvarar den konsekutiva ordning som de skall utföras och som helt motsvarar listan av stationssträckor som bygger upp vägen (se nedan).

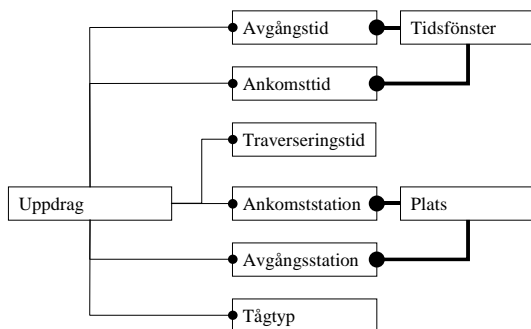
Produkt, slinga



Figur 3 Produkt, slinga – tåg. Begreppsmodell.

Det är viktigt att hålla isär periodicitet å ena sidan, som anger hur ofta en tripp går, och perioden som är den period som planeringen görs för. Specifikation av trafikering (dvs produkten) sker i TUFF genom s.k. tripspecifikationer (*TripSpec* nedan). Varje tripspecifikation specificerar egentligen flera enskilda tripper enligt den periodicitet som specifikationen har. Om periodiciteten t.ex. anger att ett tåg skall avgå varje måndag och torsdag varje vecka betyder det att om perioden vid probleminstansiering är en vecka fås två tripper i *tripset*:et, en på måndag och en på torsdag.

Uppdrag



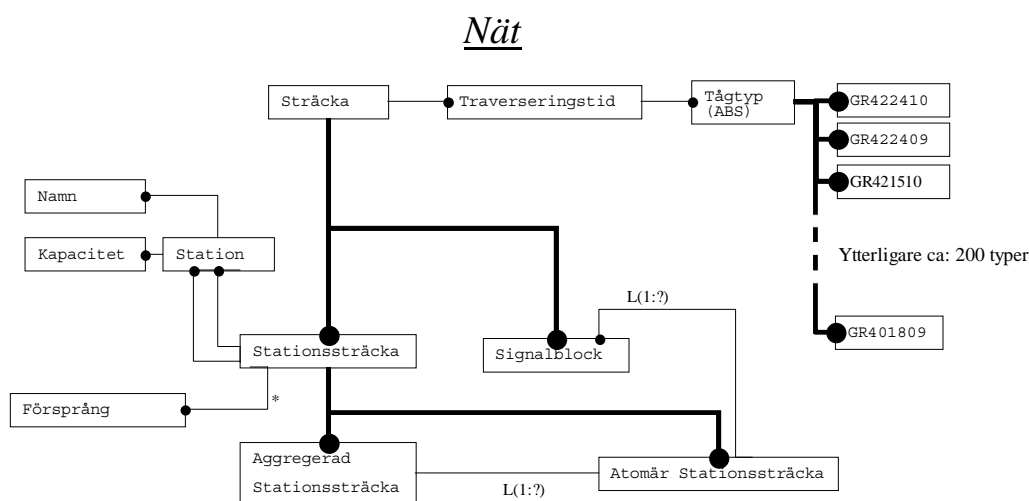
Figur 4 Uppdrag – tåg. Begreppsmodell.

*Avgångstid*, *ankomsttid* och *traverseringstid* motsvarar starttid, sluttid och genomförandetid för aktiviteter i projektplanering. Vi har valt att modellera traverseringstiden som en konstant, medan avgångstid och ankomsttid tillåts variera inom ett viss spann. Det som skiljer

uppdraget från en aktivitet i projektplaneringssammanhang är att uppdraget avgår från en station och ankommer till en annan station, således även förflyttar sig geografiskt.

Järnvägsnätet är modellerat som sträckor och stationer. Liksom för uppdrag finns flera hierarkier, dock inte direkt motsvarande varandra. De mest grundläggande sträckorna är *signalblocken*, vilka har en *traverseringstid* per tågtyp och går mellan två platser. TUFF använder inte signalblocken direkt, utan sätter samman signalblocken som finns mellan två stationer (med station menas här så fort någon slags förgreningspunkt uppträder, t.ex. en växel) för att få en *atomär stationssträcka*. Dessa bildar den mest grundläggande nivån som hanteras i TUFF. Varje stationssträcka har, förutom de två stationerna som avgränsar stationssträckan, två parametrar för varje tågtyp, en *traverseringstid* vilken används för tåg i motsatt körriktning och ett *försprång* som används för tåg i samma körriktning. Traverseringstiden är summan av samtliga ingående signalblock medan försprånget är traverseringstiden för det längsta signalblocket.

Processen kan upprepas och då fås *aggregerade* stationssträckor, vilka kan användas för att minska komplexiteten på bekostnad av detaljeringsnivå.



Figur 5 Spårnät – tåg. Begreppsmodell.

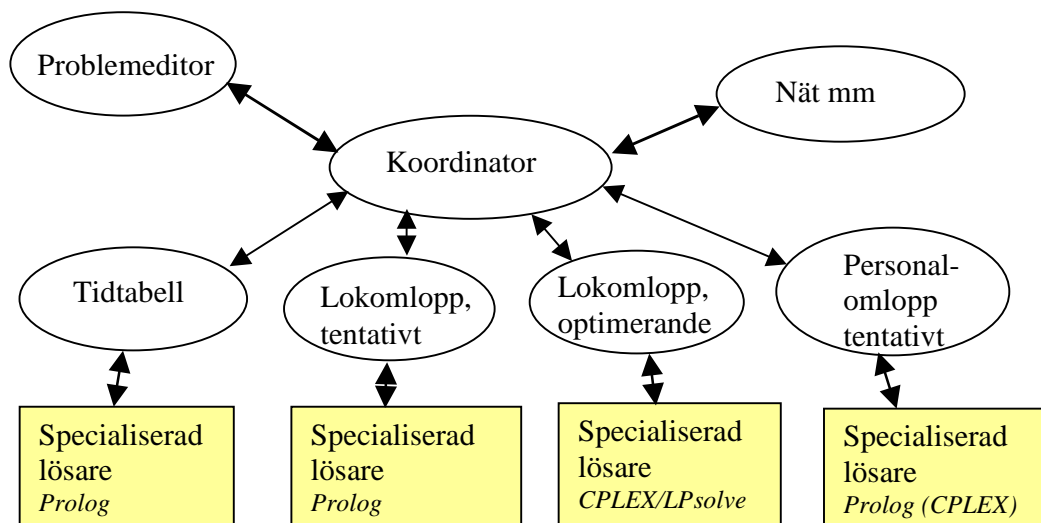
## 4 De olika systemen i TUFF

Såsom påpekats i inledningen löser TUFF ett antal delproblem i de tidiga planeringsfaserna. TUFF är implementerat som ett komponentsystem, med möjlighet att addera delsystem som egna komponenter. Vi kommer här att enbart kortfattat ge en introduktion till hur TUFF<sup>6</sup> är uppbyggt.

En funktionell struktur ges i Figur 6. Koordinatorn är den sammanhållande komponenten, med vilken brukaren av systemet kommunicerar, och som formaterar problem till de olika specialistkomponenterna. Dessa i sin tur löser var och en de problem som den är specialist på samt har förmåga att hantera inskränkningar som andra komponenter skapat tidigare, t.ex. kan tidtabellläggaren hantera relationer som lokomloppsplaneraren skapat i tidigare planeringsiterationer. Tanken är att brukaren av systemet skall kunna ta fram lösningsförslag på olika problem, kunna utvärdera dessa med t.ex. en simuleringskomponent, behålla de delar i planförslaget som är bra och därmed begränsa utrymmet för de delar som ännu inte är lösta, för att till slut ha tagit fram en väl fungerande total resursplan.

<sup>6</sup> För en närmare beskrivning av TUFF se *ACoor rapport 1, TUFF systemöversikt och arkitektur*, SICS Technical Report T2000:06. För en tekniksammanfattning se *ACoor rapport 1, TUFF systemöversikt och arkitektur*, SICS Technical Report T2000:07





Figur 6 Systemkomponenter i planeringsystemet TUFF

Att lägga till funktionalitet i TUFF är förhållandevis enkelt, det som behövs är en del klisterkod som beskriver för koordinatören vilka problem som den nya komponenten klarar av samt på vilket format den förväntar sig problemet.

En stor poäng med TUFF är de olika agenternas förmåga att hantera relationer som uppstått från lösningar från andra agenter, dvs planeringskomponenter ställer krav på andra planeringskomponenter för att mest effektiva totala plan skall kunna uppnås. Detta är i TUFF demonstrerat genom att det finns två försteg till tidtabellläggaren, en tentativ lokomloppsplanerare och en tentativ personalomloppsplanerare. Meningen med dessa är att de ställer krav på tidtabellläggaren så att denne inte i onödan tar bort bra omloppsalternativ. T.ex. så ställer de tentativa omloppskomponenterna (lok och personal) krav på tidtabellläggaren så att denne lägger en tidtabell anpassad till den efterföljande optimerande omloppsplaneraren. Det är dessutom så att det är olika aktörer som har det slutgiltiga ansvaret för att ta fram de olika planerna. Det är operatören som tar fram lok- och personalresursplaner medan det är Banverket Trafik som har ansvar för tidtabellframtagning. Det betyder att det finns orsak för operatören att ställa krav på tidtabellens utformning för att säkerställa möjligheten att genomföra de tänkta resursplanerna.

Fyra olika komponenter har använts i TUFF, vilka alla beskrivs kortfattat nedan. Många begrepp och sammanhang som beskrivs nedan återfinns och förtydligar Expressmodellerna givna i stycke 3.2. För samtliga system är det så att cyklisk tid är viktig egenskap, för t.ex. det optimerande lokomloppet är det en helt avgörande egenskap för att beräkningsmodellen skall vara tillämplig.

#### 4.1 Använda tekniker i TUFF

TUFF är implementerat som en agentarkitektur, med ett antal processer och aktörer som självständigt löser olika uppgifter. Den övergripande samordningskomponenten inklusive hantering av externa system och processer är implementerat med hjälp av objektorienterad teknik, med ett enkelt API för att integrera planeringskomponenter (se Figur 6). För de olika expertagenterna har andra system använts, framför allt s.k. villkorsprogrammering (engelska: constraint programming) använts samt system baserade på operationsanalytiska metoder, helt beroende på vilken beräkningsmodell som valts.

### 4.1.1 Villkorsprogrammering

Två huvudbyggstenar/komponenter bygger upp villkorsprogram, domänvariabler och villkor<sup>7</sup> <sup>8</sup>. Domänvariabler är variabler som varierar över en domän, dvs i en lösning skall värdet till en domänvariabel ligga inom domänen. Villkor relaterar olika domänvariabler till varandra, och dessa villkor måste upprätthållas. Det finns olika slags villkorssystem, sådana som arbetar på rationella tal, flyttal, boolska system och ändliga domäner. Vi kommer här endast att använda oss av ändliga domäner, i praktiken heltalsdomäner.

Villkor kan vara av enkel karaktär, t.ex.  $X + 4 = Y$  där  $X$  och  $Y$  är domänvariabler, eller de kan vara komplexa, t.ex.  $\text{alldifferent}([X, Y, Z])$  vilket skall förstås som att domänvariablerna  $X$ ,  $Y$  och  $Z$  alla skall vara olika.

Exekveringen av ett villkorsprogram kan delas upp i två faser, en första fas där själva problemet byggs upp genom att domänvariabler skapas tillsammans med villkor som relaterar dem. Att lägga till villkor kallas i detta sammanhang för att *post*a villkoren. När villkor postas kan *propagering* ske, vilket betyder att domäner till variabler kan komma att beskäras (värden tas bort från domänen). Därigenom måste andra villkor kontrolleras att de fortfarande är giltiga, vilket i sin tur kan komma att leda till ytterligare propagering. Då alla domänvariabler och villkor har postats, och ingen ytterligare propagering sker, återstår att söka efter en lösning (tilldelning av värden till domänvariablerna) till det uppställda villkoren, vilket är den andra fasen. Olika sökstrategier kan användas här, och det är mycket här som effektiviteten avgörs.

Ett exempel på ett litet villkorsprogram är följande:

$$\begin{cases} X \neq Y \\ X + Y = 6 \\ X \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \\ Y \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \end{cases}$$

Efter att ha postat problemet har variablerna  $X$  och  $Y$  domänerna  $\{1, 2, 4, 5\}$ . 6 har skurits bort från båda domänerna eftersom det inte finns något tal i den andra variabelns domän som uppfyller det andra villkoret ( $X + Y = 6$ ), och värdet 3 har skurits bort eftersom  $X$  och  $Y$  inte kan anta samma värde. Vid sökning i fas 2 kan nu olika lösningar fås, t.ex.  $X = 1$  och  $Y = 5$ .

### 4.1.2 Operationsanalys

Operationsanalys är ett förhållandevis gammalt forskningsområde, och faktiskt ett av ursprungen till modern datalogisk forskning. Inom operationsanalysen har ett antal olika klasser av optimeringsproblem studerats, och olika algoritmer tagits fram som används i olika sammanhang. Förenklat kan man säga att alla linjäroptimeringsproblem består dels av en problemformulering i ett linjärekvationssystem bestående av linjära ekvationer innehållande (problem)variabler, samt en linjär kostnadsfunktion vilken "mäter" en framräknad lösningsvärde, där en lösning består av en giltig tilldelning av värden till variablerna. Inom fältet gör man skillnad på linjärprogrammering, som studerar linjäroptimeringsproblem där alla variabler är kontinuerliga variabler, och heltalsprogrammering där kravet på variablerna är att de skall anta heltalsvärden. Mellan dessa två finns blandade problem, där en del av variablerna är kontinuerliga, och en del av dem är heltalsvariabler. Ett specialfall av heltalsprogrammering är då kravet på variablerna är att de skall anta boolska värden, dvs. 0 eller 1.

Den mest använda algoritmen för att lösa linjärprogrammeringsproblem är den s.k. simplexalgoritmen. Algoritmen är iterativ, och består av ett ändligt antal steg. Innan algoritmen

<sup>7</sup> För en allmän introduktion se *The SICStus users manual*, <http://www.sics.se/sicstus/>

<sup>8</sup> För en teknisk beskrivning av hur villkorsprogrammeringspaketet i SICStus är realiserat, se Carlsson, M., Ottosson, G. och Carlson, B. *An open-ended finite domain constraint solver*. In Proc. Programming Languages: Implementations, Logics, and Programs, 1997

startar löses ekvationssystemet en första gång och denna lösnings kostnad beräknas. Därefter avgörs om optimum har nåtts, eller vilken förändring av vilken av problemvariablerna som leder till störst positiv förändring av kostnads måttet. Denna förändring genomförs och resten av ekvationssystemet löses varefter algoritmen återigen avgör om optimum har uppnåtts. Om inte fortsätter iterationen till dess att optimum har uppnåtts och den framräknade tilldelningen av värden beskriver den optimala lösningen<sup>9</sup>. Den framräknade lösningen är, i allmänhet, kontinuerlig. Heltalsprogrammeringsproblem löses t.ex. med en s.k. branch-and-bound-algoritm. Denna algoritm kräver lösning av många olika linjärprogrammeringsproblem som konstrueras systematiskt. En heltalslösning kan alltid hittas efter ett ändligt antal steg, oftast ett stort antal. Det är ofta heltalskraven som leder till att det tar tid att hitta lösningar, så att problemformuleringen skall helst vara sådan att heltalskraven minimeras.

Det finns en uppsjö av olika påbyggnader av simplexalgoritm, bl.a. Lagrangerrelaxering, användandet av det s.k. duala problemet, mm. Många av dessa syftar till att hantera stora problem, ibland med upp till flera hundra tusen problemvariabler. Det finns också många specialfall som har effektiva algoritmer men samtidigt är begränsade i hur problemet måste modelleras. En sådan kategori är s.k. nätverksflöden, en klass av problem som det finns mycket effektiva algoritmer för, och som används i det optimerande lokomloppet.

## 4.2 Tidtabelläggen

Denna komponent lägger en tidtabell utifrån en specifikation av tripper (tåg). Varje tripp består av ett antal konsekutiva slottar, som beskriver den väg som trippen tar genom spårnätet mellan stationerna. Varje tripp har även en begränsad tidsrymd då det kan avgå, och begränsningar på vilka stationer som det kan göra uppehåll på. Uppdelningen av trippen i de stationssträckor den passerar kallas för trippens sekvens av slottar (se stycke 3.2, Expressmodell). Varje slot har begränsningar på avgångstider samt ett sekvensieringsvillkor på föregående slot (efterföljande slot måste avgå efter det att föregående slot ankommit), baserat på trippens avgångstid och övriga restriktioner (stationsuppehåll mm). Till detta kommer att varje station har en begränsad kapacitet, som inte får överskridas. Kapaciteten anges förenklat i TUFF som det antal tåg som samtidigt kan befinna sig på stationen.

Tekniken som används av TUFFs tidtabelläggen är villkorsprogrammering, och som beskrivits tidigare används två parametrar för att styra hur spåret nyttjas, försprång och traverseringstid, beroende på om två tripper som skall schemaläggas på spårresursen kör åt samma håll eller olika håll. Om de kör åt olika håll så krävs att den första trippen helt har lämnat stationssträckan innan nästa tåg får nyttja stationssträckan, och då används parametern traverseringstid. Om de kör åt samma håll måste ett säkerhetsavstånd upprätthållas (som oftast inte är lika stort som om tripperna går åt olika håll), och då används försprångsparametern. Dessa två parametrar modelleras som en aktivitet med s.k. ”setup-time”, dvs försprånget är aktivitetens utsträckning i tiden och för alla tripper som går i motsatt riktning så krävs en ytterliggare tidsutsträckning som motsvarar trippens hela traverseringstid för stationssträckan minus försprånget (dvs hela traverseringstiden). I villkorsprogrammeringssammanhang kallas dessa villkor för icke-överlappande villkor (serievillkor), dvs alla aktiviteter måste läggas i sekvens för att en giltig lösning skall ha hittats.

Stationer är modellerade som s.k. kumulativa villkor. Detta villkor kan bäst beskrivas som en större rektangel, vars X-axel motsvarar tid och Y-axel beläggning. Höjden är begränsad och motsvarar maximal kapacitet på denna station. Då tåg ankommer till stationen beläggs stationen, och då tåget lämnar stationen slutar stationen vara belagd av tåget, vilket modelleras med en mindre rektangel med höjd 1 och vänster kant som ankomsttid och höger kant som avgångstid. Kravet är att det inte finns någon tidpunkt  $X_i$  sådan att kapaciteten är överskriden (Y-värdet större än kapaciteten på stationen) med alla tåg som skall passera stationen inlagda.

<sup>9</sup> F. S. Hillier, G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill, 1995

Man kan jämföra tidtabellläggningen med ett nät bestående av lager och transportband mellan lagren. Banden kan gå åt båda hållen och ibland finns det två band mellan två lager. Lager motsvarar stationer och transportbanden stationssträckor. Då bandet går åt ett håll så kan vi lägga på paket i en ström, vilket motsvarar försprågs-begreppet, medan bandet måste bli tomt innan vi kan vända håll på bandet och transportera paket åt andra hållet.

### 4.3 Tentativt lokomlopp

Ett av huvudsyftena med TUFF har varit att förbättra planeringen i tidiga faser, för att skapa tidtabellspecifikationer (se Figur 1) som tar hänsyn till att det skall gå att generera effektiva resursplaner i efterföljande steg. Ett av de bättre exemplen på hur detta kan gå till utgör komponenten för tentativa omlopp som tagits fram inom TUFF-projektet. Denna komponent skapar tentativa omlopp från en tidtabellspecifikation (avgångs- och ankomsttider med tidsfönster), vilka sedan används för att ställa krav på tidtabellläggningen genom att de tentativa slingorna skall bibehållas, och således kunna återskapas i det senare lokomloppet. Det betyder att om tidtabellläggaren upprätthåller de slingkrav som det tentativa lokomloppet skapat, så är det garanterat att det optimerade lokomloppet inte blir sämre än vad det tentativa lokomloppet skapade.

Det tentativa omloppet kan inte använda samma teknik som det optimerande lokomloppet kan, eftersom tidtabellen inte är given (tågen har inte fasta avgångstider), utan det tentativa omloppet är istället implementerat som ett villkorsprogram med en avancerad heuristik som skapar slingorna.

### 4.4 Optimerande lokomlopp

Denna komponent använder s.k. flödesoptimering från OR. Uppgiften är att skapa ett antal slingor av tripper, vilka mer generellt benämns uppdrag. Det finns idag kommersiell teknik tillgänglig som löser problemet att ta fram optimala slingor från en tidtabell (dvs med fasta avgångar). Dessa programvaror bygger ofta på s.k. nätverksoptimering (flödesoptimering), och använder sig av mycket effektiva algoritmer från operationsforskningen OR (Operations Research). Modellen bygger på att en stor matris byggs upp med varje tripp som både rad och kolonn ( $n$  tripper ger en  $n \times n$ -matris). Rader är tripper som ankommer, kolonner är tripper som avgår. Varje position i matrisen bestämmer hur många lok som går från den ankommande trippen till den avgående, dvs om det står en 1:a i positionen som utgör skärningen mellan rad  $i$  och kolonn  $j$  så fortsätter loket med tripp  $j$  efter det att det avslutat tripp  $i$ . Det är förstås så att många positioner är kända på förhand, t.ex. är det 0 i alla positioner där ankommande och avgående tåg inte på ett rimligt sätt kan använda samma lok (t.ex. för att de ligger långt ifrån varandra geografiskt).

### 4.5 Optimerande personalomlopp (för resande personal)

Personalplanering för resande personal är mer komplicerad än ”normal personalplanering”. Detta eftersom personalen förflyttar sig under sina arbetspass, och skall komma tillbaka till utgångspunkten inom viss tid. För den optimerande personalplaneringen gäller att tidtabellen måste vara lagd, så att det går att avgöra lokalt för varje par av tåg om det är möjligt att göra en vändning eller ej.

Den idag mest framgångsrika modelleringstekniken är uppdelad i två steg. Det första steget genererar massor med möjliga slingor bestående av uppdrag (ben), där varje slinga är korrekt med avseende på arbetslagstiftning och fackliga avtal. Steg 2 väljer sedan ett optimalt urval av mängden genererad i första steget, och som täcker alla uppdrag. Denna teknik är mycket generell, och kan utökas till att hantera tidsfönster.

## 5 Modell för byggdomänen

### 5.1 Byggplanering – introduktion

Inom tågdomänen har vi sett att planeringsproblemet koncentreras kring resursplanering, inte minst samordning mellan resursslagen, för ett givet spårnät och en specificerad beställd trafik. Planeringshorisonten är ca ett år, men planeringen utförs för en typvecka vilken sedan upprepas. Planeringsproblemet karaktäriseras dessutom av cyklicitet – både i trafikmönstret som upprepas med jämna mellanrum och genom att personal och vagnar måste återställas till sina respektive utgångspunkter enligt givna villkor. Varken sättet att genomföra trafiken eller konfigurationen av resurser för ett visst uppdrag behöver däremot räknas fram.

Byggdomänen har delvis lika och delvis skilda karaktäristiska:

- Uppdraget – byggnaden är ofta definierad före produktionen men inte fullständigt.
- Normalt tillåter uppdraget alternativa resurskonfigurationer i delar av produkten.
- Uppdragets storlek innebär en planeringshorisont av liknande omfattning som i tågdomänen – storleksordningen är ofta 1-2 år.

Till skillnad från tågtrafiken är däremot byggresurserna inte knutna till projektet i förväg utan kan i stor utsträckning handlas upp i samband med det enskilda uppdraget. Därmed blir sättet att tackla planeringsproblemet annorlunda. Det innebär att produktens detaljkonfiguration och resursanskaffning sker parallellt. Att hitta lämpliga byggmetoder (med tillhörande resurskonfiguration) för olika delar av produkten är ett viktigt moment i byggplaneringens inledande moment. En analogi med transportdomänen skulle vara att det är transporten som är huvudmålet och att beslutet att det ska ske på järnväg lämnas till mycket senare. Andra transportmedel är aktuella som alternativ långt in i planeringsprocessen.

När byggnadsmetoden och resurskonfigurationen är bestämd kommer vi till resursplaneringen. Nu finns återigen likheter mellan ”bygg” och ”tåg”. Byggobjektet är ofta det begränsande rent fysiskt, det går inte att använda hur mycket resurser som helst samtidigt. Detta liknar kapacitetsbegränsningen hos spårnätet. Aktiviteterna måste köas – både av produktions-tekniska skäl och av utrymmesskäl.

Byggprojektet planeras naturligt som en sekvens av aktiviteter. Vissa av dessa är repetitiva i den meningen att de liknar varandra t.ex. återkommande gjutningar, men de är individuella i den meningen att de inte återkommer varje dygn eller vecka på samma ställe och på samma sätt. Det finns således cyklicitet i sak men inte på samma plats som på tågsidan.

Inom både tåg och bygg räknar man med att resurser har en viss effektivitet – hastighet och dragförmåga hos ett visst tågsätt, respektive en viss produktionstakt för byggnadslag med viss maskinell utrustning. Om man fördjupar sig något är resursernas effektivitet något variabel, t.ex. olika personer arbetar olika fort. Inom byggsektorn planerar man också med inlärnings-effekter, dvs att en viss mängd arbete går fortare senare i bygget än i början eftersom personalen lär sig hur produktionen skall gå till. Detta betyder att en viss mängd produceras fortare i slutet på bygget än i början. Å andra sidan kan man även i tågdomänen resonera med start och bromssträckor med annorlunda hastighet än den genomsnittliga för raksträckorna.

### 5.2 Byggdomänen – intressanta frågor

De intressanta frågorna i byggdomänen handlar om att utifrån en given beskrivning av det efterfrågade resultatet (d.v.s. den byggnad eller anläggning som ska utföras), hitta ett (möjligt/bra/bästa) sätt att genomföra projektet.

Vilka är då sambanden mellan resultat, process och resurser? Var ligger svårigheterna?

Det finns åtminstone två nivåer i byggplanering – generering respektive värdering av planer.

För att generera en plan krävs att man

1. åsätter (åtminstone) ett sätt att tillverka varje resultatenhet samt
2. ordnar de olika resultatenheternas tillkomst i förhållande till varandra

Helst ska man kunna generera alternativa planer. Det kan ske genom att det finns alternativa tillverkningsmetoder på olika nivåer.

För att utvärdera planerna krävs att

1. man åtminstone resurssätter planen
2. resursutnyttjandet ska vara inom tillåtna gränser
3. man skapar en tidsatt plan som beaktar villkoren mellan aktiviteterna.

Helst ska man resurssätta flera planer och jämföra dessa.

En rikare utvärdering tar hänsyn till flera aspekter:

- den totala kostnaden i planen
- den totala tiden för planen (kan uttryckas som kostnad)
- den totala känsligheten för störningar (vid resursbrist)
- Peka ut hur kritiska olika aktiviteter/resurser är (kan ev uttryckas som kostnad för alternativa utföranden, viten, kostnad för tidsförlängning, etc)

### 5.2.1 Karaktäristiskt för byggplaner

Resultat

- enstaka resultat/byggdelar
- upprepade byggdelar, dvs identiska eller likartade byggdelar på nya platser. (För att upprepningen ska bli rytmisk – vilket är fördelaktigt - krävs att traverseringstiden för olika grupper av byggdelar är lika. Det är ofta OK att välja ”satsstorleken”, dvs att ”balansera” planen genom att t.ex. välja storleken på gjutetapperna så att det uppstår en jämn beläggning på personal och gjutformar.)

Processer

- processer som kan rymmas i samma utrymme/byggdel och sådana som hindrar varandra. Man kan starta med att anta att alla processer ska ha ensamrätt till sin byggdel och relaxera därefter.
- processer som kan avbrytas för omkörning (sidospår) och sådana som inte kan/bör stoppas. Man kan starta med att alla processer ska ske oavbrutna samt räkna på kostnaden för avbrott därefter.

Resurser är av flera sorter. Åtminstone två typer är intressanta

- inbyggda resurser (varor, material).
- drivande resurser (människor, maskiner). Kan ev jämföras med inbyggda resurser genom omformulering till ”mantimmar” och ”Maskintimmar”.

Metod

- tillåten, giltig ordning mellan aktiviteter

## 5.3 Modellering av byggdomänen - IFC modellen

### 5.3.1 Översikt

IFC-modellen är ett schema för beskrivning av byggdomänen framtagen av en branschorganisation, IAI. Modellen är baserad på STEP-arbetet i så måtto att den är objektorienterad, den är definierad med hjälp av EXPRESS-språket och överföringsformatet är en ASCII-fil med samma semantik som inom STEPs övriga produktmodeller. IFC modellens framtagande är dock inte en del av STEP-arbetet.

### 5.3.2 Modellens struktur

Huvudgrenarna i schemat är:

- En projektmodell under ett genensamt "Root"-objekt, dvs objekt som förekommer i projekt t.ex. byggnader, byggdelar, resurser, byggutrustning, tidplaner...
- Några geometrihierarkier, dvs fördefinierade geometridefinitioner, t.ex. kurvor, polyline, bounding box, extruderad form (bottenform som "dras" rakt upp) ...
- Många oberoende (utan hierarki) "resurser", dvs sammansatta klasser för t.ex. klassifikationstabell, datum, material, skikt, SI-enheter... .

### 5.3.3 Lagervy

Projektmodellen kan vidare betraktas som lager (layer).

- Resurslager
- Core lager
- IfcKernel
- Extensions vilka förutsätter Kernel
- IfcModelingAidExtension
- IfcProcessExtension
- IfcProductExtension
- IfcControlExtension
- IfcProjectMgmtExtension
- Interoperability lager

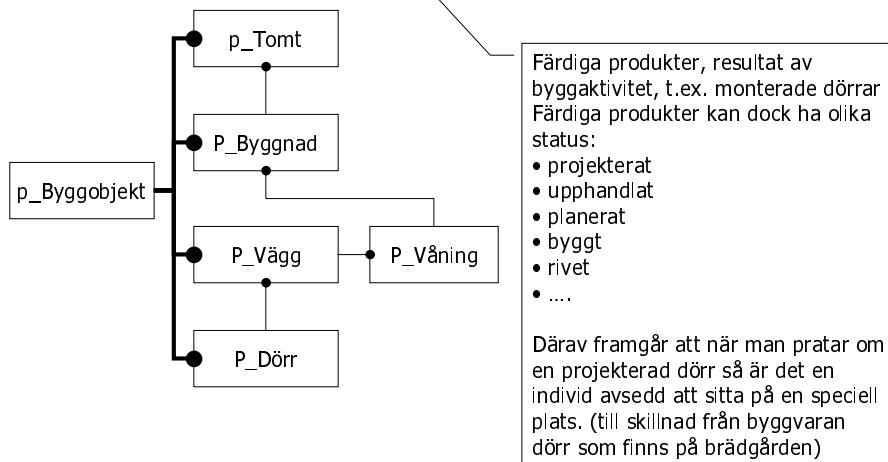
Domänlager definierar delmängder av modellen som bör hanteras av programvaror inom delbranscher. Domänen används bl.a. för att underlätta certifiering av programvaror – de flesta, om någon, förväntas inte hantera hela modellen. Domänen är:

- IfcArchitectureDomain
- IfcConstructionMgmtDomain
- IfcFacilitiesMgmtDomain
- IfcHvacDomain

## 5.4 En anpassad byggmodell

IFC modellen är alltför detaljerad för syftet i vår undersökning. Därför har vi tagit fram några förenklade modeller.

# Byggprodukter

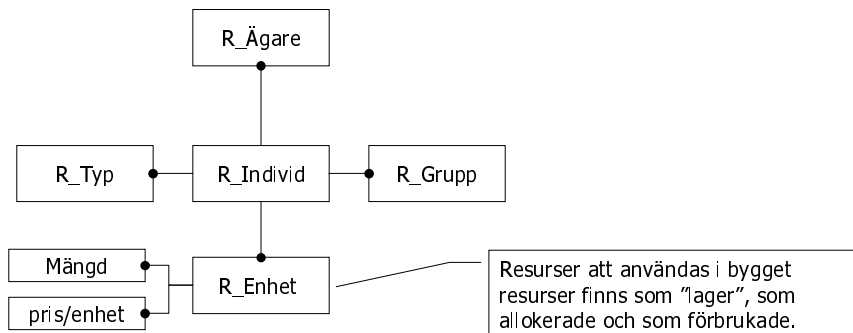


Figur 7 Produktmodell bygg. Begreppsmodell.

Karakteristiskt för byggmodellen är att det finns en struktur för olika objekt på olika detaljeringsnivåer. Den ger möjlighet att instansiera objekt på olika nivåer och definiera relationerna mellan dem.

Denna modell liknar i mycket spårmodellen.

# Byggresurser

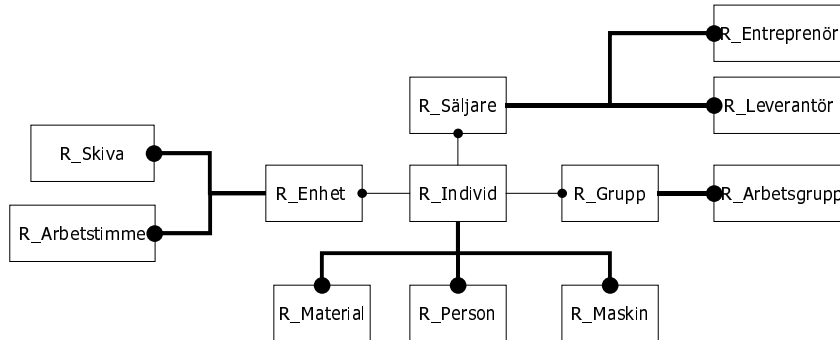


Figur 8 Resursmodell – bygg.

Till skillnad från tågdomänen modelleras här resursernas tillhörighet, inte bara egenskaper och kapacitet. Olika resurser hör till olika aktörer, t.ex. underentreprenörer, leverantörer etc..



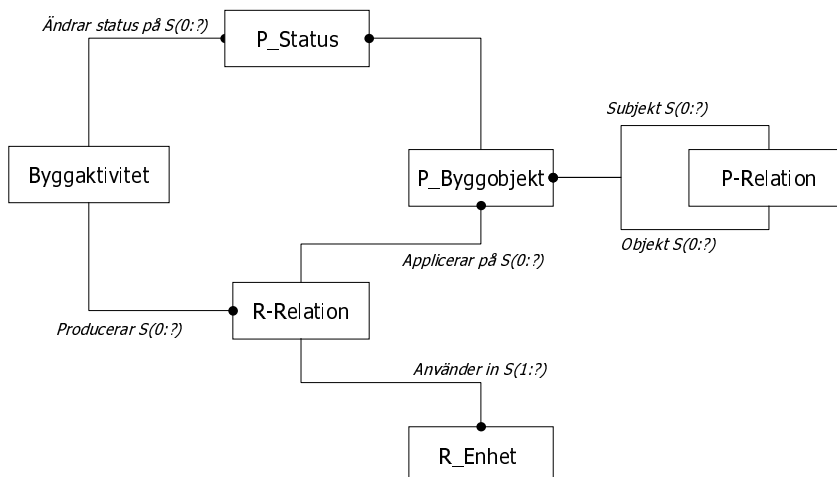
# Byggresurser II



Figur 9 Byggresurser – fördjupad modell.

I en översiktlig plan tar man inte hänsyn till individer - varken personer eller insatsvaror utan man planerar med förbrukning av enheter i form av arbetstimmar resp materialslag. Det finns alltså en distinktion mellan resurser som förbrukas (t.ex. timmar och bränsle), och sådana som byggs in (t.ex. gipsskivor och kylskåp). I båda fallen måste det dock finnas en "leverantör" – en byggnadsarbetare respektive en tillverkare. Deras kapacitet kan i tidiga skeden ofta betraktas som obegränsad men måste givetvis bindas upp för att planen ska gå att genomföra.

# Produktion



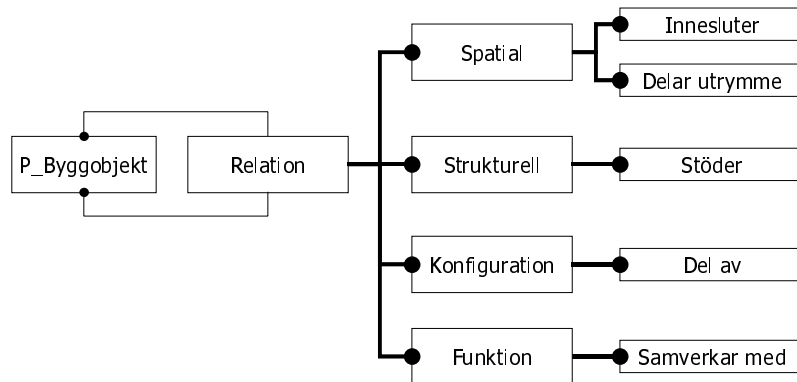
Figur 10 Produktionsprocess – bygg.

Den stora skillnaden mellan transportproduktion och byggproduktion är främst hur man beskriver resultatet. I tågfallet har man förflyttat en "massa" eller en mängd personer i rummet mellan två punkter (eller snarare har man planerat för att det ska finnas transportkapacitet för de önskade förflyttningarna). I byggsammanhang kan man se det på

olika sätt. Givetvis kan man betrakta byggprocessen som ett logistikproblem. Med hjälp av ett antal resurser har byggvaror förflyttats och konfigurerats till en byggnad.

Det vanliga är dock att man betraktar byggproduktionens resultat som en statusförändring – en planerad (projekterad och beställd) produkt har blivit verklig. Anledningen är sannolikt att den förändringen är grunden för upphandlingar, betalningsplaner mm och har affärsmässiga konsekvenser.

## Produktionsvillkor - produkt



Figur 11 Produktionsvillkor – bygg

Produktionsvillkoren är att betrakta som en mängd villkor som kan riktas till den planerade samordningen av de aktiviteter som är resultatet av en viss konfiguration av byggmetoder. Vissa villkor härrör från generell metodkunskap (som att man inte kan måla och lägga golv samtidigt i ett utrymme) medan andra härrör från det speciella byggnadens definition – t.ex vilka delar som vilar på vilka andra.

Den närmaste jämförelsen med tågdomänen skulle vara att spårnätet och tågsättet avgör hur det kan köras generellt medan specifika önskemål beträffande omstigningar kan utgöra ytterligare ”lokala” begränsningar.

## 6 Jämförelse

Utgångsdata i tågdomänen utgör en specifikation av ett antal tåg. I byggdomänen utgör utgångsdata en specifikation av en mängd byggdelar. Byggdelarna skall följa de krav som finns på ritningar mm för att forma avsedd byggnad, vilket ställer krav på hur huset kan byggas. På motsvarande sätt skall tåg köras så att uppställda krav från kunder och andra följs.

### 6.1 Ett antal likheter och olikheter mellan modellerna

Att skapa slingor som beskriver vilka uppdrag som utförs av vilka resurser sker i viss utsträckning på byggsidan, dock inte i slingformat utan snarare som en sekvens av uppdrag för hela eller stora delar av projektet, för vissa kritiska stora resurser (t.ex. kranar). Vidare så hanteras den största mängden resurser (t.ex. personal) vid byggprojektplanering mest som hur många som behövs, dvs som en resursgraf som beskriver hur många som är aktiva samtidigt. Underentreprenörer hanteras som en resurs av entreprenören, men denna resurs är delbar i mindre enheter genom diskussion med underentreprenören. Ju mer resurser som tillsätts ju fortare går det (upp till en viss gräns), vilket skiljer sig från planeringen inom järnvägssektorn där resurser ofta är odelbara och en resurs räcker (t.ex. lok och lokförare).

Det finns ingen uppenbar och direkt motsvarighet i byggdomänen till personalschemaläggning för resande personal såsom den utförs inom tågdomänen, men

tekniken kan vara användbar i andra sammanhang. T.ex. skulle det kunna vara möjligt att använda denna teknik för att med ett antal byggdelar skapa alternativa aktivitetssekvenser med hjälp av alternativa metoder och sedan optimera över dessa skapade sekvenser. En liknande ansats skulle kunna vara att undersöka olika etappindelningar. Ytterligare ett alternativ är att undersöka olika förflyttnings-sekvenser för underentreprenörer och montörer. Det är oftast ett komplext samband mellan dessa, och många möjligheter finns.

Att lägga en tidtabell kan närmast jämföras med att schemalägga en projektplan för ett bygge. En motsvarande modellering i byggdomänen är utnyttjande av maskiner, eller andra resurser, som är unika på byggarbetsplatsen, givet att alla aktiviteter med beroenden är ”skapade” och det är känt att aktiviteten nyttjar resursen. Vid schemaläggning kommer då resurserna att schemaläggas tillsammans med aktiviteterna på ett sådant sätt att resursen inte överallokeras under något tillfälle. Följande tabell sammanfattar några begreppsöversättningar, begrepp för begrepp, utan att ta hänsyn till en helhetsöversättning. Senare i detta avsnitt ges två försök att skapa mer heltäckande konceptuella översättningar.

<b>Resursplanering järnvägssektorn</b>	<b>Projektplanering byggsektorn</b>
Transport (”tåg”)	Sammanfattande aktivitet
Ben	Sammanfattande aktivitet (lägre nivå)
Slot	Atomär aktivitet
Spår	Resurs av något slag; maskin, person etc
Avgångstid	Starttid
Ankomsttid	Sluttid
Traverseringstid	Genomförandetid
Försprång	Överlapp (egentligen komplementet till överlapp)
Väg genom spårnätet	Produktionsmetod
Lokvändning	Beroende (mellan aktiviteter)

Såsom påpekats tidigare är en viktig skillnad mellan domänerna vad som är modellerat i detalj. För byggprojektet är produkten och specifikationen av den viktig, och mycket energi ägnas åt att bryta sönder den i beståndsdelar, mäta och ta reda på beroenden mm. På tågsidan är det resurserna som modelleras i stor detalj, såsom egenskaper hos spår och stationer. Det är genom att nyttja dessa resurser på ett bra sätt som bra tidtabeller kan skapas. Tåg rör sig geografiskt, vilket ger upphov till ett antal hårda restriktioner på resursernas (spårens) förhållande till varandra, något som inte förekommer i samma utsträckning i byggdomänen. Där är det istället objektet som skall produceras som restriktioner kopplade till i vilken ordning som de skall produceras. Vid en rak översättning (spår mot ”gubbe”, tripp/transport mot byggdela) betyder det att de styrande restriktioner vad gäller resursernas utnyttjande inom transportplaneringen inte återfinns på byggsidan, och vice versa, de styrande restriktioner som finns på byggsidan ordning mellan byggdelar och hur dessa kan/får produceras) återfinns inte i samma grad på tågsidan (synkronisering mellan transporter/utbyte av passagererare/rangering av vagnar).

På ett bygge finns det vissa planeringsuppgifter som innehåller repetitioner, t.ex. vid byggande av stomme då sekvensen formsättning, armering, gjutning, härdning (brinning), formrivning återfinns. Dock är det så att varje byggdela är olik den föregående, man bygger inte samma bjälklag om och om igen. När det gäller tågdomänen så kan man visserligen säga att det är olika transporter vecka 2 och 3, men ur planeringsperspektiv inom tågdomänen så betraktar man tiden som cyklisk och det är samma transport som upprepas. Denna skillnad förstärks ytterligare genom att man på byggsidan planerar för inläringseffekter, dvs det går

snabbare att producera bjälklag 2 än bjälklag 1 eftersom man är mer samövad inför bjälklag 2. Denna kunskap om inlärning utnyttjas i planeringen.

Uppdelning i operatörer och banverk finns inte på samma sätt inom byggsidan, och det är inte alls lika klart vilken planeringsprocess som påverkar vilken, i den mån som det är olika planeringsprocesser.

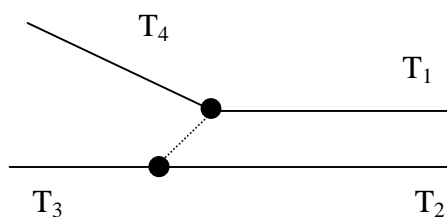
## 6.2 Försök till täckande konceptuell översättning mellan byggdomänen och tågdomänen

Vi försöker här översätta olika koncept ur respektive domän. Syftet är att hitta en översättning som visar dels på likheter mellan domänerna och, om detta lyckas, gör det naturligt att undersöka tillämpligheten av de resultat som tagits fram i projektet TUFF på byggprojektplanering, framför allt tidtabelläggaren som bedömdes vara den intressantaste komponent.

### 6.2.1 Alternativ 1 – utgår från att söka använda planeringsverktyg framtagna för tågdomänen också inom byggdomänen

I detta alternativ är den grundläggande översättningen mellan domänerna att stationssträckor motsvarar typaktiviteter. En typaktivitet är en mall för aktiviteter, med beskrivning av vad aktiviteten utför och hur lång tid den tar i termer av t.ex. omfattning på det som skall produceras. En station motsvarar då en form av tillstånd, vilket måste uppnås för att det skall vara aktuellt att starta en aktivitet av den angivna typen.

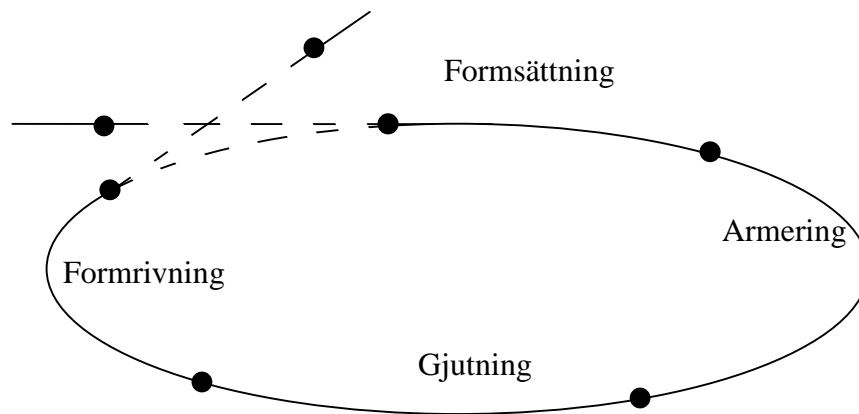
När ett tåg kör längs ett spår motsvarar det att ett team av arbetare utför en aktivitet av den typ som typaktiviteten har. Då typaktiviteten har utförts har ett visst tillstånd nåtts. De olika tågtyperna motsvarar olika mängder inbyggnadsmaterial och annat som gör att det tar olika lång tid att genomföra typaktiviteten.



Ovanstående figur visar ett spårnät som motsvarar fyra typaktiviteter,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  och  $T_4$ . För att  $T_1$  skall kunna genomföras så krävs ett resultat som antingen kan uppnås genom resultat från  $T_3$  eller  $T_4$ . För  $T_2$  gäller däremot att  $T_3$  måste ha genomförts, det räcker inte med  $T_4$ . I figuren så motsvaras det av den streckade "växeln" vilken bara kan användas om tåget skall från spår  $T_3$  till  $T_1$ , dvs inte från  $T_4$  till  $T_2$ .

En metod i byggsammanhang är flera typaktiviteter kopplade till varandra, antingen som sekvens av handlingar eller i en partialordnad struktur (ett enkelt exempel på en partialordnad struktur är  $A < B < D$  samt  $A < C < D$  och där  $B$  och  $C$  är orelaterade, ' $<$ ' anger ordningen mellan objekten  $A$ ,  $B$ ,  $C$  och  $D$ ). Denna struktur kan då översättas till stationssträckor och stationer/växlingspunkter.

Mer utvecklat så kan "spår" kopplas ihop i rundslingor, vilket är nödvändigt för att samma typaktivitet skall kunna användas igen, t.ex. i flera våningsplan. Följande figur visar ett sådant exempel.



Inom byggnadsplanering skapas olika etapper, dels för att det är naturligt att dela upp objektet i flera olika delar, men dels också för att kunna bygga olika delar parallellt. I denna översättning så motsvaras etappindelningar att de olika spåren har kapacitet snarare än exklusivt utnyttjande.

Inom byggplanering är vissa tillstånd speciellt viktiga, och har ibland fått benämningar. Ett sådant är "tätt hus", dvs då husets stomme är uppförd och klimatskiljande delar har uppförts. Det är då möjligt att starta många olika typer av installationsarbeten parallellt i huset. Medan stommen uppförs till största delen som en löpande sekvens (hus byggs ju nerifrån och upp) så kan installationsarbeten utföras i hela det stomfärdiga huset. Det skapar stora möjligheter att planera effektivt. Detta motsvarar en central station i nätet dit samtliga "stom-tåg" skall anlända innan "installationstågen" kan avgå på de olika spår som motsvarar typaktiviteter för respektive installation.

För ett specifikt bygge går det att välja olika vägar genom nätet för att alla delar i objektet skall vara färdigställda. Varje byggdel måste brytas ner i aktiviteter som färdigställer byggdelen eller de delbyggdelar som byggdelen består av. Sedan måste varje byggdel schemaläggas på de typaktiviteter som realiserar den.

Nedantående tabell sammanfattar översättningen av koncept.

<i><b>Namn Bygg</b></i>	<i><b>Namn Tåg</b></i>	<i><b>Kommentar</b></i>
Resursteam	Tågset	
Byggdelar	Transport	Varje byggdel åstadkoms då "spårsträckan" traverseras.
En metod	En väg	En väg är består av flera spårsträckor
Typaktivitet	Spår (stationssträcka)	
Tillstånd	Station	

Tidtabellägaren i TUFF schemalägger tripper (tåg) för typveckor (cyklisk tid), uppdelade i slotter, på de spår som enligt specifikationen trippen skall traversera. Varje spår motsvarar en resurs som kan beläggas exklusivt under den tid som försprånget varar, och med en traverseringstid om det är mötande trafik. I ovan beskrivna översättning försvinner de flesta av de unika egenskaper som tidtabellägaren i TUFF har. Det finns t.ex. ingen mötande trafik (vi tänker oss att våra resursteam endast rör sig åt ett håll), vi har ingen cyklisk tid, sekvensialiseringen av de olika tåg som skall passera spåret (vilket motsvaras av de resursteam som skall utföra instanser av typaktiviteten) återfinns inte på byggplaneringssidan i denna översättning (vi har ansatt kapacitet på typaktiviteterna/spåren för att kunna ha flera team igång samtidigt, t.ex. flera etapper vilket är vanligt då byggen projektplaneras). Så det

finns ingen naturlig användning av tidtabellläggaren i denna modell, något som vi givetvis hade väntat oss då vi skapade översättningen.

## 6.2.2 Alternativ 2 – ett försök att översätta de dominerande planeringsförutsättningarna i respektive domän på varandra

Bärande i detta alternativ är idén att översätta spår till byggdelar. Orsaken till detta var att ta fasta på de delar av planeringsprocessen som styr respektive domäns planering. För tåg så är det hur spårresurserna och stationerna utnyttjas och på byggsidan är det hur byggnadens konstruktion ställer krav på hur produktionen kan ske.

Spår utnyttjas exklusivt eller har ett försprång, vilket också gäller för många aktiviteter på byggdelsobjekt (rum är också objekt i den meningen att många rum skall målas etc.). T.ex. kräver golvläggning exklusivt utnyttjande av ett rum, medan isolering av mellanvägg kräver exklusiv tillgång till väggen men inte till hela rummet. Vid produktion av en gipsvägg krävs att reglarna är uppsatta innan första sidans gips sätts fast, men hela väggen behöver inte vara på plats utan det räcker med ett försprång. Ett rum är färdigt då samtliga resursteam som har arbete att utföra i rummet har passerat rummet, vilket motsvarar att alla planerade tåg har passerat spåret dvs alla transporter är utförda på spåret. Den byggnad som skall produceras, specificerad i termer av byggdelar, motsvarar då att skapa ett spårnät, och de tåg/transporter som skall genomföras motsvarar de underentreprenörer/bygglag som utför arbete på respektive byggdel.

<i>Namn Bygg</i>	<i>Namn Tåg</i>	<i>Kommentar</i>
Resursteam	Tågset	
Aktivitet	Transport	Bygge av en vägg eller bjälklag är en spårsträcka som ska passeras.
Metod	Tripspec	Metoden innebär att man beställer ett ”projekteringståg” som ska passera vissa stationer, ett målningståg som ska passera andra osv.
Byggnad i termer av byggdelar	Spårnät	Byggdelstyper blir allmängiltiga. Man blir tvungen att lägga ett nytt spår för varje objekt.

Att dela upp ett bygge i flera etapper för att kunna köra dessa parallellt skulle motsvara att skapa flera parallella spår, på vilka flera tåg kan ta sig fram parallellt.

Jämförelsen börjar halta då vi tittar på stationer, och vad de skulle motsvara. Närmaste motsvarigheten skulle vara någon form av mellantid, men egenskapen att tåg kan köra om respektive mötas på stationer återfinns inte naturligt i denna översättning till byggdomänen.

Vidare måste aktiviteterna som färdigställer en byggdel (det som motsvarar metodvalet) komma i en viss ordning (vägg före målning av väggen), medan denna typ av relation inte återfinns i tågdomänen vad gäller vilken ordning som tågen måste köra på ett spår, endast kravet på ett tåg åt gången på varje spår. Däremot finns det krav på omstigningar/synkronisering av tåg på stationer, men detta har ingen direkt översättning till byggdomänen i denna översättning (det skulle motsvara synkronisering av arbetslag, vilket inte förekommer i någon större utsträckning).

De nyckelegenskaper som finns i tidtabellläggaren återfinns inte i det som skall planeras i byggdomänen med denna översättning. Tidtabellläggaren hanterar inte ordningar av tåg på samma spår, annat än att högst ett åt gången. Försprångsbegreppet återfinns visserligen, men inte travseringstid för mötande tåg. Eftersom ingen naturlig översättning av stationer finns heller försvinner denna komponent vilket gör att tidtabellläggarens specifika egenskaper inte utnyttjas.

## 7 Slutsatser

Vi har genomfört en jämförelse mellan resursplanering inom järnvägssektorn och projektplanering inom byggsektorn med avseende på problemdomäner och på verktyg använda i projektet TUFF. Slutsatsen är att de två domänerna är ur planeringssynpunkt förhållandevis olika. Det finns givetvis aspekter som återfinns i båda domänerna, t.ex. slingor återfinns i både byggprojektplaneringen och i tågplaneringen, men i tågplaneringen är det en nyckelgenskap medan på byggsidan finns bara vissa processer som kan beskrivas som slingor. Vi har dock funnit att ett antal nyckelgenskaper skiljer väsentligt:

- Cyklicitet och sekvens: medan i princip alla resursplaner inom järnvägssektorn är cykliska i typveckor, är planer i byggbranschen sekventiella. Detta påverkar de metoder och tillämpningar som används inom respektive sektor
- Produktens beskrivning skiljer: Byggnadens beskrivning är mycket detaljerad, och mycket viktig för hur produktionen kan ske. Att ändra på produkten så att den bättre passar resurserna är inte heller enkelt. Transportprodukten är i kontrast enkel att beskriva, och styr inte på samma sätt hur transportproduktionen går till, och i viss mån ändras produkten om resurserna så kräver (t.ex. genom att ta andra vägar genom spårnätet).
- Resursernas komplexitet skiljer sig åt. Spårnätet har en välavgränsad och fast struktur, vilken måste behärskas och utnyttjas på ett bra sätt för att nå effektiva planer. Det går heller inte att skaffa sig ytterligare resurser på ett enkelt sätt, t.ex. extra spår, om det skulle behövas. Resurserna på byggsidan är mer flexibla, de definieras för varje uppdrag och handlas upp på en entreprenad- och varumarknad och det är alltså möjligt att i planeringen utgå från att det är möjligt att skaffa sig lämpliga resurser för att nå målet.

Mot bakgrund av detta kan vi konstatera att de tekniker som tagits fram i TUFF inte har en omedelbar och rättfram användning inom byggprojektplaneringen. Däremot så har förståss byggentreprenörer och andra aktörer på byggmarknaden behov av avancerade planerings- och schemalägningsstöd som på ett adekvat sätt underlättar planeringen av byggen och anläggningar, inte minst tillverknings- och leveranskedjorna för projektunika förtillverkade komponenter.