

Produktionsplanering och produktionsoptimering

PM/arbetspapper inom projektet Tågplan2015

Martin Aronsson, Malin Forsgren
{martin,malin,sarag}@sics.se

SICS
Box 1263
164 29 KISTA

Version 1.1 2011-11-16

16 november 2011

Sammanfattning

Produktionsplanering syftar till att säkerställa leveransåtagandet som gjorts gentemot operatörer och andra sökanden. Detta skiljer sig gentemot leveransplaneringen vars syfte är att ta fram leveransåtagandet. Målet med produktionsoptimering är att optimera en avgränsad del av produktionen, dels med avseende på effektivitet, dels med avseende på robusthet. Avgränsningen är oftast gjord i tid, t.ex. ett dygns produktion eller en veckas produktion. Denna rapport beskriver och diskuterar produktionsplanering och -optimering inom järnvägssektorn vad avser tåglägen och överlämnandet av dem till driftledningen.

1 Inledning

Produktionsplanering syftar till att uppnå det åtagande som gjorts gentemot kund i tidigare processer, t.ex. vid kontraktsskrivning. Åtagandet utgör endast de (för kunden) viktiga egenskaperna hos leveransen av produkten, inte själva produktionen av produkten. För Trafikverket är åtagandet i detta sammanhang i huvudsak ankomster och avgångar till trafikutbytesplatser men även t.ex. sådant som maximal gångtid för tåget, förbindelser mellan tåg, lastprofil, maximal längd och vikt etc. Produktionsplanen är det huvudsakliga instrumentet för Trafikverket för att hålla dessa gjorda åtaganden (t.ex. att inte avgå tidigare än en viss tidpunkt samt inte ankomma senare än en viss tidpunkt). Produktionsplaneringsprocessen pågår från det att åtagandet har fastställts till dess att sista tåget i åtagandet har effektuerats, men det betyder inte att planeringen pågår hela tiden, och det betyder inte att hela periodens produktion har samma detaljeringsnivå i varje enskilt ögonblick av produktionsprocessen eller planeringsprocessen.

2 Terminologi

För att kunna beskriva hur produktionsplaneringsprocessen utförs behövs en viss begreppsapparat.

Vi definerar tågets *bastraversering* såsom den väg genom linjenätet och det gångtidsmönster tåget skulle ha haft givet att det var självt på banan. Inga "extra" tider finns i bastraverseringen, enbart de uppehåll som krävs för trafikutbyten samt de nödvändiga påslag som behövs för t.ex. större banarbeten (s.k. "PSB:er") och reglementsenliga kvalitetspåslag. Tågets *basgångtid* utgör 97% av tågets teoretiska högsta gångtid, för att jämma ut olika

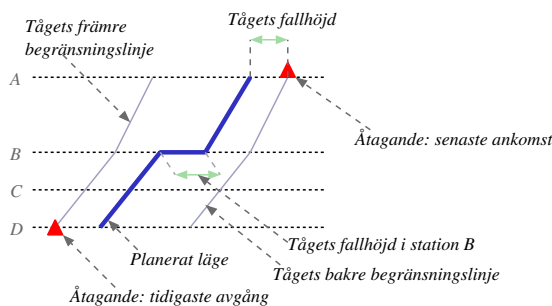
mindre skillnader i tågets framförande (bl.a. olika lokförarbeteende). Observera att tågets bastraversering inte innehåller några tidpunkter utan enbart gångtider och åtagna uppehållstider (tidsutdräkter). För att få tågets *bastidtabell* behövs en *förankringstidpunkt* ges till bastraverseringen, vilken förankrar tågets bastraversering vid någon plats som förekommer i bastraverseringen. För att få tågets tidtabell förankras tåget i en förankingspunkt samt förses med tidspåslag, *tidtabellteknisk tid*, för att klara av möten och förbigångar. De resulterande tidpunkterna vid trafikutbytesplatserna utgör det åtagande som trafikverket gör gentemot ansökanden och bildar ramen för produktionsplanering.

Utifrån tågets bastraversering och de utlovade tidigaste avgångarna i åtagandet fås en *främre begränsningslinje* i tid för mellanliggande stationer och linjesegment. Denna begränsningslinje kan tåget inte bryta utan att ha avgått för tidigt från en åtagandepunkt. På samma sätt fås en *bortre begränsningslinje* för tåget om tågets bastraversering förankras i tid med de åtagna senaste ankomsterna. Dessa begränsningslinjer utgör främre och bakre gränser för tåget utifrån tågets egna egenskaper samt tågets åtagna upphållsmönster. Vi kallar detta område för *tågets eget traverseringsutrymme*. Tågets basgångtid bör användas både för den främre och bortre begränsningslinjen samt av driftledningscentralen (DLC) då transporten genomförs. Tåget *planerade läge* ligger mellan det främre och bortre begränsningslinjerna.

Vid produktionsplanering antas alla tåg, genom en tidigare leveransplanering, ha erhållit åtaganden i ett antal punkter samt genom leveransplaneringen ha fått en viss mängd tidtabellteknisk tid tillagd till basgångtiden för att i leveransplaneringen kunnat konfliktreglera tågglägena. Denna tidtabelltekniska tid utgör den tid som skapa tågets främre och bakre begränsningslinjer.

Då tåget samverkar med övriga tåg och banarbeten under den avgränsade period som produktionsoptimeras begränsas tågets traverseringsutrymme av de möten och förbigångar som ingår i den perioden måste regleras. Detta utrymme kallar vi för *tågets indirekt begränsade traverseringsutrymme*. Möten och förbigångar kan möjligen göras på flera platser utan att åtagandet bryts, varvid en valsituation uppstår om var mötet eller förbigången skall göras. Dessa valsituationer utgör möjligheter att skapa olika tågplaner med olika egenskaper, såsom robusthet, plats för nyanordnade Ad Hoc-tåg, olika samhällsekonomiskt värderade planer mm. Vidare öppnas i produktionsplanen möjligheter att styra trafiken olika utifrån t.ex. prognosticerat väder, tågfullnad/beläggning mm. Produktionsplanering handlar således om att utnyttja detta utrymme för att säkerställa leverans av åtagandet.

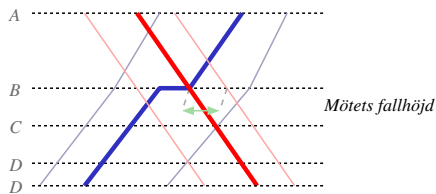
Om skärningspunkten mellan två tågs egna traverseringsutrymmen enbart innefattar endast *en* mötespunkt (station) kallas denna för *ett kritiskt möte (förbigång)*. Om däremot skärningspunkten mellan två tågs egna traverseringsutrymmen innefattar flera möjliga mötespunkter kallas dessa punkter för *alternativa möten (förbigångar)*. Om två tåg har alternativa möten men genom interferens med ytterligare andra tåg faller en eller flera mötesstationer bort kallas de kvarvarande möjliga mötena för *indirekt begränsade möten (förbigångar)*. De borttagna mötena kallas för *indirekt borttagna (omöjliga) möten*. Observera att ett kritiskt möte inte behöver vara fastställt i tid, mötet kan förskjutas i tid och de två tågens åtaganden kan fortfarande upprätthållas. Mötet förflyttas då i tidsled. Ett exempel på detta kan vara två långa godståg med begränsade mötesmöjligheter.



Figur 1: Egenskaper hos det enskilda tåget

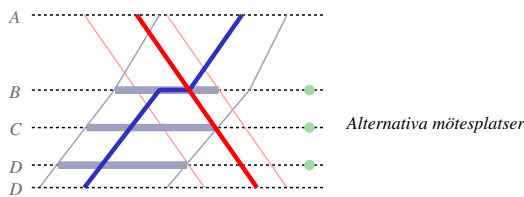
Ett tågs möjlighet att fördröjas (försenas i förhållande till sitt planerade läge) och ändå hålla åtagandet kallas för tågets *fallhöjd*. Fallhöjd definieras utifrån ett givet mötesmönster d.v.s. att samtliga möten/förbigångar är fixerade. *Tågets egen fallhöjd* definieras som sum-

man av den tidtabelltekniska tiden tåget har, eller annorlunda uttryckt, den tid tåget kan bli försenat utan att missa åtagandet (eller det tidigaste åtagandet, om det finns flera) vid slutstationen. Tågets *fallhöjd i en station* definieras med den största fördröjning tåget kan ha från planerat läge vid den stationen utan att missa sitt åtagande eller sitt möte med ett annat tåg. Ett *mötets fallhöjd* definieras som den tid som mötet kan försenas utan att något tågs bortre begränsningslinje bryts. Fallhöjd är således det utrymme i tid (X-axeln i en grafisk tidtabell) som tåget/mötet kan bli fördröjt utan att driftledningscentralen behöver ingripa och ändra möten/tågordningar. Fallhöjden påverkas av tågets personal (eller av yttre omständigheter som gör att tågets personal inte kan köra tåget som planerat) men egentligen inte av DLC.



Figur 2: Mötets fallhöjd

DLC kan ingripa och planera om mötesmönstret. Då de gör det ändra planen, och nya fallhöjder uppkommer (respektive försvinner). Detta görs för att minst ett tåg inte håller sitt planerade läge. DLC kan således förändra planen med de alternativa möten som finns i produktionsplanen (i Y-led i en grafisk tidtabell). Tågets personal påverkar inte mötesbilden (annat än indirekt genom sitt beteende).



Figur 3: Alternativa möten

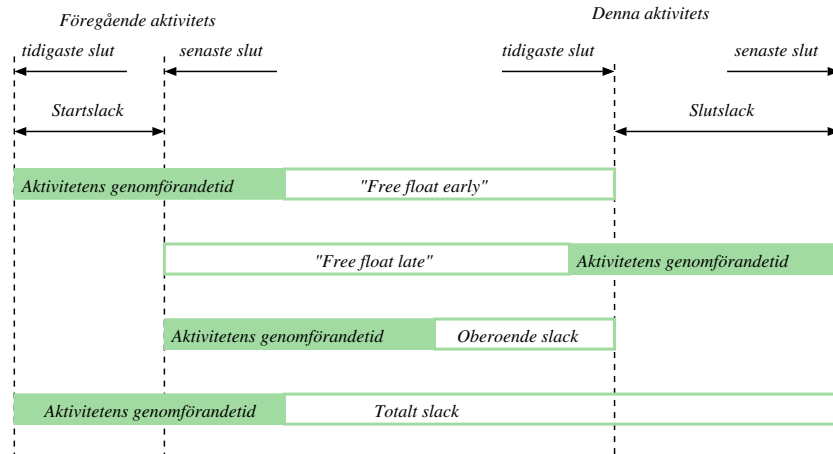
3 Syftet med produktionsplanering

Syftet med produktionsplanering är att göra valet mellan alternativa möten och dimensionera fallhöjden på de olika stationerna på ett sådant sätt att sannolikheten att åtagandet kan uppfyllas maximeras. Detta innefattar att effektivitet skall avvägas mot att det finns en robusthet kvar i planen om det inte går som planerat (t.ex. så att inte en liten försening gör att många åtaganden faller). Generellt kan sägas att om mötet (förbigången) mellan två tåg är ett kritiskt möte (enbart kan göras på en plats) så utgör detta möte en flaskhals i planen. Vidare borde detta möte tas så tidigt som möjligt, dvs tågen behöver "hållas fram" för att spara så mycket tid som möjligt i fallhöjd åt mötet. Ju mer fallhöjd som finns för det kritiska mötet, ju större är chansen att mötet hinner ske inom begränsningslinjerna för tågen.

Den leveransplanering som ligger till grund för åtagandet kan tjäna som grund för produktionsplaneringen men det är inte självklart att den skall användas eftersom syftet med produktionsplaneringen är ett annat än leveransplaneringen. Där leveransplaneringen tjänade till att ta fram åtagandet så skall produktionsplanen, förutom att leverera åtagandet, innehålla möjligheter till korrigerande åtgärder under produktionen för att driftledningen skall kunna vidta åtgärder då störningar inträffar. Större störningar är givetvis svårare att ta höjd för men mindre "själv-läkande" egenskaper skall helst byggas in i produktionsplanen i form av förebyggande åtgärder. Detta kan uttryckas som ett optimeringsproblem givet att en objektfunktion för att uppfylla åtagandena och premiera robusta planer kan beskrivas. Hur denna objektfunktion skall beskrivas är ett av huvudsyftena med detta dokument.

4 Olika typer av slack inom projektplanering

Inom projektplanering finns begreppet "slack" vilket definieras som den mängd tid som en aktivitet kan förskjutas inom planen. Det finns olika typer av slack, se 4. De olika typerna används på olika sätt för att göra planen tillförlitlig eller robust. En kedja av aktiviteter som går från projektstart till projektslut utan att ha något slack kallas för kritiska linjen.



Figur 4: Olika typer av slack för en aktivitet inom projektplanering

De olika slacken är användbara vid olika situationer. Det oberoende slacket visar hur mycket aktiviteten kan bli försenad, från sin senaste start, utan att påverka efterföljande aktiviteter. Det totala slacket visar hur mycket denna aktivitet kan bli försenad, från sin tidigast startpunkt, utan att försena projektets slut. "Free float early" är det som oftast kallas för slack, det visar hur mycket denna aktivitet kan bli försenad från sin tidigaste startpunkt utan att efterföljande aktivitet blir fördröjd (underförstått att normalplanen startar sina aktiviteter så tidigt som möjligt). "Free float late" visar på analogt sätt vilket slack aktiviteten har från sitt sena läge utan att förskjuta projektets slutdatum.

Aktivitetens tidiga respektive sena start- och sluttider kan kalkyleras med Critical Path Method, CPM. Metoden arbetar i två pass, ett framåt-pass och ett tillbaka-pass. I det första passet räknas alla tidiga start- och sluttider ut genom att följa beroendekedjorna för aktiviteterna, i pass två räknas alla sena start- och sluttider fram utifrån den i pass 1 framräknade sluttiden. Slacken räknas sedan ut som differenser mellan de olika start- och sluttiderna.

Slack i projektplaneringsmanus är mycket besläktat med begreppet fallhöjd i denna rapport. Givet en tågordning (inga möten byter station) så är begreppet "slack" och begreppet "fallhöjd" samma, om vi betraktar varje traversering av ett linjesegment som en aktivitet.

5 När sker produktionsplanering

Produktionsplanering kan ske löpande, då information som påverkar produktionen blir känd. Således startar produktionsplaneringsfasen så fort som åtagandet är fastställt. Därmed är det inte sagt att själva planeringen startar då, om man förutser förändringar och/eller att det finns stora kvarvarande osäkerheter som påverkar produktionen kan det vara bättre att vänta med den mer detaljerade planering till dess informationen är säkrare.

Parallellt med produktionsplaneringsprocessen sker AdHoc-processen i vilken tåg tas bort/ställs in samt ansökningar om nya tåg kommer in. Dessa tåg utgör förändringar i det samlade åtagandet, och därmed förändras det underlag som produktionsplanen har att utgå ifrån. Teoretiskt borde produktionsplanen planeras om efter varje sådan förändring men praktiskt låter detta sig inte göras. Av det skälet finns det anledning att dela upp produktionsplanen i olika perioder och löpande detaljera dessa då de närmar sig genomförandet, eller då stora förändringar i underlaget gjort stora delar av planen meningslös.

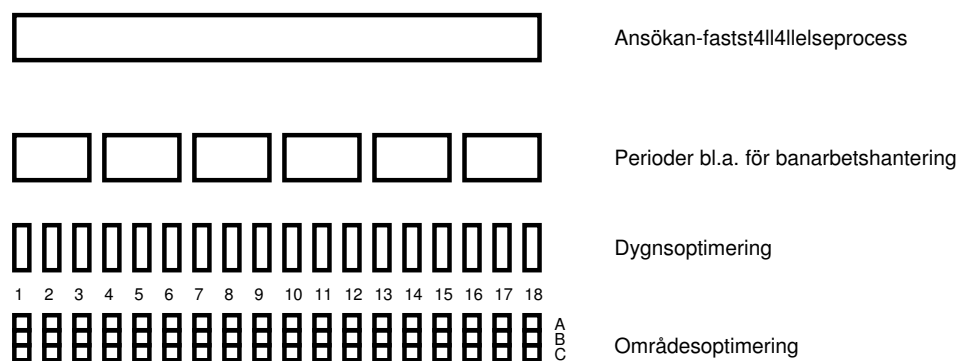
5.1 Produktionsplaneringens olika faser

I bild 5 finns en uppdelning av produktionsplaneringen i perioder, dygn och driftledningsområden. Syftet med perioderna är att fokusera på de i tid närmaste transporterna och banarbetena.

Banarbetsplaneringen för arbeten 8 veckor fram i tiden läses löpande varje vecka, de större operatörerna läser sina lokförarscheman cirka 4 veckor innan varje 4-veckors-period vilket även det betyder 8 veckor så en period om 8-12 veckor bör vara en lämplig avgränsning för den första uppdelningen av helårsplanen i perioder. Dessa perioder bör planeras omlott så att inte synkroniseringen dem emellan blir ett stort problem.

Vid något tillfälle lämnas produktionsplanen över till driftledningen, vilket ofta refereras till som att "planen fryses", "planen övergår i produktion", "planen driftsättes" eller liknande. Fram till denna punkt "ägs" planerna av planerarna, därefter ägs den av den faktiska produktionen/driftledningen. Fram till denna punkt då planen överlämnas kan den optimeras och hanteras över hela produktens (tågets) planerade produktion, därefter är den "utportionerad" på de olika driftsplatserna och förändringar blir svårare att genomföra då det omfattar flera olika driftsområden. Av det skälet bör varje dygns plan (eller den period som driftsättes) optimeras som sista steg innan den styckas upp på respektive driftledningscentral/region och överblicken över helheten går förlorad. I samband med detta fastställs ett antal överlämningspunkter på de platser där trafiken/tåg passerar över driftledningsområdesgränserna. Dessa tillkommande tidpunkter tillsammans med leveransåtagandet utgör det s.k. *produktionsåtagandet*, d.v.s. det åtagande som, om det uppfylls, garanterar att respektive produktionsplats (driftledningscentral) har förutsättningar att köra som planerat. Varje driftledningscentral kan omplanera trafiken inom sitt område så länge som produktionsåtagandet hålls. Däremot, om detta inte längre är genomförbart, så kommer de åtgärder som görs att påverka åtagandet (produktions eller leveransåtagande) gentemot operatör och/eller annan driftledningscentral.

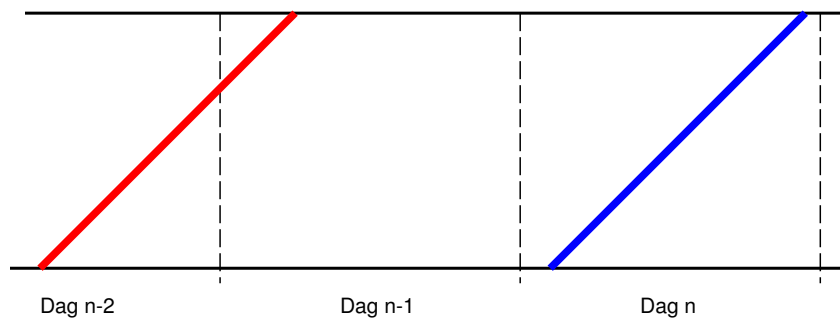
Stämmer antalet veckor? Det ligger någonstans i detta område! De olika aktörerna kan också tänkas få acklimatisera sig till dessa perioder!



Figur 5: Olika faser för produktionsplanering

5.1.1 När måste produktionsplanen vara klar

Produktionsplanen måste vara klar före första tåget i planen avgår, annars uppstår problem med hur status för det tåg som redan avgått skall nå planerarna, samt hur den informationen på ett korrekt sätt skall införas i planen. Det är då lätt hänt att det uppstår ett "race condition": planerarna försöker rätta upp planen i förhållande till hur tågen går utan att någonsin hinna ifatt den faktiska situationen. Man brukar dra gränsen för planering och operativ (om)planering så att då planeringen omfattar objekt som är i produktion är det en operativ fråga att styra produktion och omplanera. Vi kommer inte att närmare gå in på det operativa, således drar vi gränsen för produktionsplanering på så sätt att alla tåg som planeringen omfattar ännu inte har gått i produktion. Praktiskt betyder detta att planen, då den är klar, har minst ett dygn innan första tåget går i produktion eftersom det tåg som just gått i produktion måste hinna fram till sin slutdestination innan "vår" produktionsplan genomförs (se figur 6, där rött tåg som startat i $n - 2$ slutar i dag $n - 1$ vilket betyder att de tåg som kan planeras kan starta tidigast i dag n).



Figur 6: Minsta avstånd mellan tåg i produktion och tåg i planering

Idag överlämnas en veckas produktionsplaner onsdag kl. 15:00 onsdagen innan. Detta är delvis olyckligt eftersom då planerna överlämnas så finns det fortfarande tid att arbeta vidare med produktionsplanerna. Målet bör vara att då produktionsplanerna överlämnas är de fastställda och inte föremål för förbättring, dvs de är slutprodukten som leveras från planeringsavdelning. Därefter skall övriga förändringa betraktas som operativa åtgärder för att säkerställa produktionen.

Är det så fortfarande? Organisationen ändrades väl så att planen överlämnas dygn för dygn...

6 Produktionsoptimering

Produktionsoptimering syftar till att skapa ett färdigt material som kan överlämnas till driftledningen för “produktionssättning”.

6.1 “Dygnspassning”/synkronisering mellan perioderna

I långtidsplaneringen planeras ett helt års trafik och syftet (i ST) är att ta fram leveransåtagandet och skapa “rum” för korrigeringar. Produktionsplaneringen under AdHoc-processen syftar till att hantera de förändringar som sker gentemot långtidsplanen och leveransåtagandet medan produktionsoptimeringen syftar till att optimera planen inför genomförandet.

Produktionsoptimeringen görs på ett fåtal dygn, från ett dygn upp till 7 dygn beroende på hur överlämnandet definieras mellan planeringsprocessen och driftledningsprocessen och om optimeringen görs på rullande plan eller inte. Genom att ett utsnitt i tid görs av vad som skall optimeras tillkommer hantering av tåg som träder in i den utsnittade perioden samt ut ur perioden. Det finns flera varianter hur dessa tåg och deras beteende utanför den utsnittade perioden skall hanteras:

1. Ingen förskjutning får ske utanför perioden
2. Förskjutning får ske utanför “utträdet” ur perioden
3. Fördröjning av tåg får ske före inträdet i perioden

Den första punkten motsvarar hur planering sker vid uppdelning i flera geografiska regioner i t.ex. långtidsplaneringen. Vadhelst som optimeras inom perioden passar ihop med omgivande perioder (regioner i långtidsplaneringen). Dessutom så kan optimeringen göras med enbart det material som ligger inom perioden.

Andra punkten motsvarar vad som ofta gäller då föregående period “gått i produktion”: tidigare material ändras inte utan bara framförliggande material optimeras. Planeringsmaterialet utökas då med alla tågs “svansar” dvs den del av transporten som fortsätter ut ur den valda perioden

För punkt tre så gäller att även det material som ligger före den utvalda perioden måste hanteras i planen.

För punkt två och tre tillkommer hur materialet utanför perioden skall konflikt hanteras. Eftersom antalet tåg i omkringliggande perioder gradvis tunnas ut ju längre från den valda perioden man kommer (eftersom enbart tåg som slutar, startar eller går igenom perioden tas med) så betyder konfliktregleringen inte att en lösning för omgivande perioder egentligen har skapats. Å andras sidan, om ingen konfliktreglering görs alls så kan en “lösning” med

konfliktreglering enbart inom den utvalda perioden i själva verket inte vara en lösning då en oregerad konflikt precis utanför perioden inte kan regleras med den valda "lösningen".

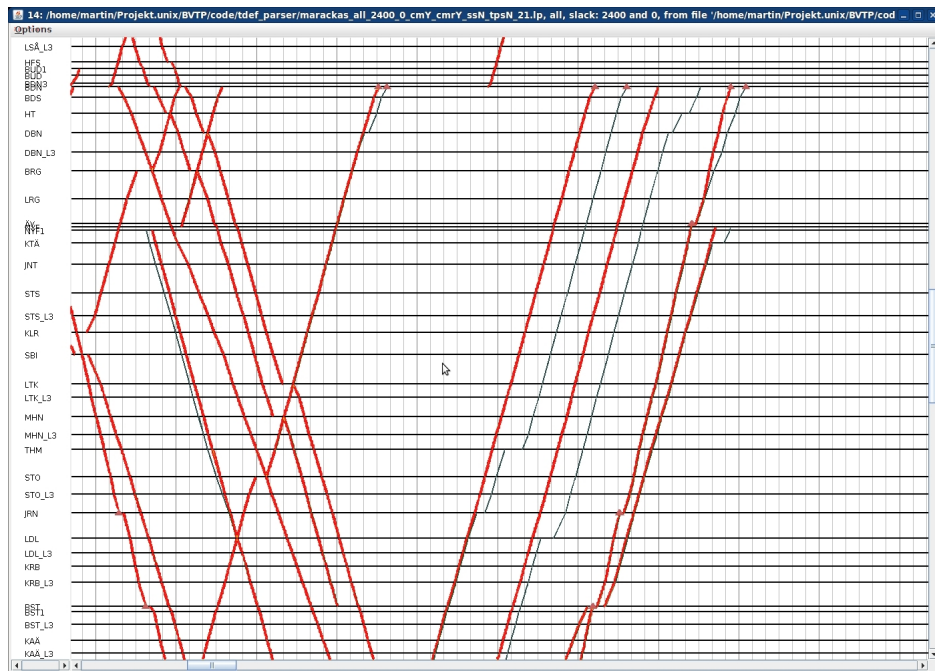
Vi förespråkar punkt 2 ovan samt konfliktreglering av hela det materialet även efter den utvalda perioden. Om man vill få bättre hantering av konfliktbehandlingen efter den utvalda perioden så läggs ett eller ett par dygn till efter den utvalda perioden i enlighet med vad som just då är känt om dessa dygn. Detta gör att de utökade perioderna kommer att ligga omlott men fördelen är att varje period, då den optimeras, kommer att vila på säkrare planer *efter* den som just då optimeras. Denna teknik med omlottliggande planer, s.k. rullande planering, används i stor utsträckning i produktionssammanhang för att undvika suboptimeringar för den plan som man just gör.

Skall tåg som passerar dygnsgränsen/periodgränsen låsas? De som går in i efterföljande period borde inte låsas, medan de som kommer från föregående period ju har gått i produktion och borde låsas

6.2 Gångtidsoptimering

Inom ramen för projektet Marackasen utvärderades möjligheten att optimera dagliga grafer med avseende på gångtid. Marackasen är ett beräkningsstöd och innehåller en modell för tågplanekonstruktion som överensstämmer med gällande reglemente (TF601 samt den ej fastställda men ändå använda TH601). Marackasen håller även reda på kapaciteten på samtliga stationer i termer av antal samtidiga tåg. Testet genomfördes på all trafik norr om Bräcke upp till Narvik (ej mot Östersund). Då data inte kunde erhållas från korttidsprocessen simulerades dagliga grafer genom att ta ut enskilda dagar ur den fastställda årsplanen. Åtagandet simulerades genom att de fastställda ankomsterna och avgångarna från de stationer där kommersiella aktiviteter fanns användes. Vidare begränsades Marackasen så att inga möten fick flyttas, d.v.s. Marackasen tilläts enbart nyttja fallhöjden för att optimera gångtiden för samtliga tåg. Notera att ingångsdata liksom utdata är en konfliktreglerad tågplan.

I figur 7 nedan visas de effekter som Marackasen åstadkommer. Genom att skjuta ihop tidtabellteknisk tid för möten som inte genomförs den aktuella dagen (vilket ofta beror på att alla tåg inte har samma gångdagar men delar vissa gångdagar) så kan gångtiden för ett antal tåg kortas.



Figur 7: Effekten av att optimera gångtid i Marackasen. Röda streck är efter optimeringen.

I följande tabell finns jämförande data för en enskild dag, dag 200, och för hela tågplanen T10 (tidtabellteknisk tid i sekunder).

	Dag 200	Hela T10
Original	280 420	89 218 787
Optimerat	246 004	85 347 726
Skillnad	34 416 12%	3 871 061 4.3%
Skillnad inkl. färre accelerationer och decelerationer	38 251	5 146 350
Exekveringstid (laptop: Lenovo T60)	1.65 sekunder	3.71 sekunder

Att bara mäta den tidtabelltekniska tiden (den tid tåget står still på station i väntan på mötet) leder inte till att hela vinsten med att ta bort stoppet summeras eftersom inbromsningen och accelerationen inte räknas in, av det skälet finns den raden i tabellen med.

Att det finns 4.3% i den fastställda årsplanen beror på flera faktorer, bl.a. att det sker en suboptimering av helheten då planeringen delas upp på flera planerare (motsvarande finns i industrin, t.ex. kan ett stålverk optimera sin produktion medan efterföljande valsning då får många "ställ" och därmed inte blir effektivt). Däremot är skillnaden i procentsatserna, 8%, enbart tidtabellteknisk tid som inte utnyttjas under dag 200 då dessa möten inte finns den dagen. Vi har även provat andra dagar och skillnaden ligger i ungefär samma område.

Observera att vi har behållit tågordningen och enbart nyttjat fallhöjden, det garanterar genomförbarheten. Om optimeringen tillåts ändra mötesbilden så kan ytterligare vinster göras, i storleksordningen lika mycket till. Detta medför dock vissa kostnader och osäkerheter, dels blir exekveringstiderna längre för Marackasen, dels kan inte längre lösningen garanteras om inte Marackasen tillförs information om villkor på att möten tas på vissa ställen, kännedom om t.ex. elförsörjning och andra driftkrav som kan finnas. Detta är fullt möjligt att lägga till men finns f.n. inte med i Marackasen.

Utöver att optimera på antal möjliga alternativa möten/förbigångar samt på fallhöjd önskar vi optimera på effektivitet för transportererna. Det finns olika möjliga effektivitetsmått, vi koncentrerar oss f.n. på att tåg har så kort total gångtid som möjligt innanför leveransåtagandet.

6.3 Robusthetsoptimering

Liksom för varje optimering så gäller det att optimera på "rätt sak". För produktionsoptimeringen vill vi maximera möjligheterna att leverera leveransåtagandet.

I driftledningssituationen vill man således veta om tåget går efter plan, om det ligger inom ramen för att kunna leverera åtagandet eller om vi närmar oss ett läge där åtagandet inte längre kan hållas. I princip önskar vi se de begränsningslinjer som utgör det område som tåget har att röra sig inom. Dessutom finns det flera begränsninglinjer, dels de som baseras enbart på tågets egna egenskaper, dels det begränsningsområde som det får i samband med interferens med andra tåg (se begreppsdiskussionen i 2). Dessa områden kan ritas ut i en graf såsom det område kring tågets "streck" som utgör begränsningen. I någon allmän mening kan man säga att ju större området är, desto större förmåga har planen att svälja störningar och ändå leverera åtagandet.

I första hand skall leveransåtagandet hållas genom att skapa robusta planer. Det finns många faktorer som påverkar robustheten hos en plan. Allmänt gäller att den skall inrymma korrigeringsmöjligheter för störningar som uppkommer under genomförandet (om inga störningar uppkommer så går ju allt enligt plan och då behövs ingen robusthet). Möjligheter till styrning och återställning kan ges genom

1. fallhöjd
2. förändring i mötes- och förbigångsmönster.

Fallhöjden fungerar som en återställningsmöjlighet för tåget. Så länge som inga tågordningar ändras så kan tåget "falla" så långt att det inte försenar något annat tåg mer än att de båda fortfarande kan hålla sitt leveransåtagande, dvs båda tågen håller sig inom sina respektive bakre begränsningslinjer.

Att förändra mötes- och förbigångsmönstret är det enda verktyg som tågklararen kan använda sig av för att aktivt själv påverka tågföringen. Att ha så många sådana möjligheter som möjligt borde således vara bra för att maximera möjligheterna att styra utfallet, men det spelar också roll hur stort avståndet är mellan de möjliga mötesstationerna (förbigångsstationerna). Noteras kan att det krävs att ett tåg blir försenat för att det ett behov att

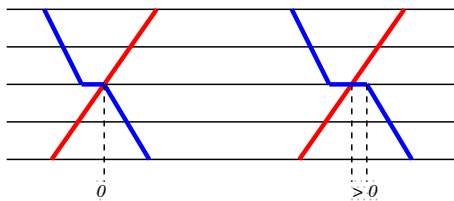
ändra tågordning skall uppkomma (så länge som tågplanen är reglerad och vi räknar bort “problemet” med tåg som går före sin tidtabell).

Således så gäller det för produktionsoptimeringen att tåg i princip bör gå så tidigt som möjligt för att därigenom bibehålla den eventuella fallhöjden så länge som möjligt. Denna fallhöjd kan användas då eventuella störningar uppkommer, antingen som ren återställningstid eller för att möjliggöra ändrade tågordningar, givet att fallhöjden räcker för att ändra tågordningen.

Det finns flera varianter, t.ex. kan samtliga möten och förbigångar bibehållas vilket bibehåller den “strategiska” strukturen i problemet. Att behålla mötena såsom i grundmaterialet gör att den optimerade planen bevarar samtliga egenskaper vad gäller t.ex. att tågens längder får plats på mötesstationer, specialtransporternas olika krav på möten mm. Då automatisk optimeringen tillåts flytta på möten tillkommer att optimeraren måste “veta” att det nya/flyttade mötet är genomförbart.

Men att enbart optimera på att samtliga tåg skall gå så tidigt som möjligt betyder inte att den robustaste planen har skapats. Om det finns möjlighet att optimera bort kritiska möten ur den ursprungliga planen så att det inte längre är kritiskt så har ökade möjligheter skapats för styrning och återställning. Om det gick att enumerera (räkna upp) alla giltiga lösningar (m.a.p. alternativa möten) så skulle den plan som kan “transformeras” till flest andra planer under genomförandet vara en bra kandidat att överlämna till driftledningen. Men att beräkningsmässigt enumerera alla giltiga planer låter sig (säkerligen) inte göras. Däremot kan vi skapa en optimeringsmodell som maximerar antalet samtidigt möjliga parvisa alternativa möten/förbigångar.

Vissa typer av möten är mer känsliga än andra. “Spetsmöten”, dvs där tåg möts utan uppehållstid, tenderar att vara såra att genomföra i praktiken. Av detta skäl önskar vi fördela om (delar av) påslagstiden till spetsmöten så att förutsättningarna ökar att mötet går som det är tänkt. Det är egentligen beroendet av den gemensamma resursen (spåret, se 8) och osäkerheten när resursen blir ledig som gör att det är fördelaktigt om en del av fallhöjden kan fördelas till sådana möten.

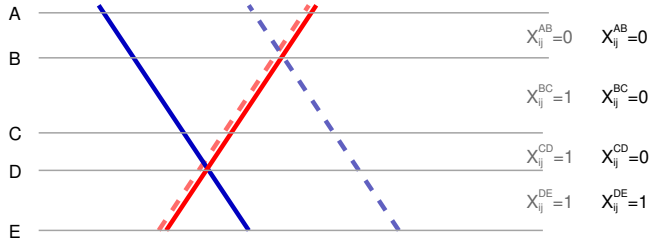


Figur 8: Två olika möten, ett med ingen bufferttid och ett möte där viss bufferttid skapats.

6.4 Att mäta antalet alternativa möten

Det är svårt att mäta antalet möjliga alternativa planer eftersom det i praktiken inte går att enumerera dem. Däremot kan vi skapa två lösningar (s.k. tvillinglösningar) och räkna antalet “parvisa alternativa mötesbilder” (med mötesbild menas här att ett möte eller en förbigång tas på olika stationer) som finns “emellan” dem. Med parvisa alternativa möten (och förbigångar) avses det antal möten som två tåg kan ha inom ramen för tågens leveransåtagande. Genom att maximera antalet olika mötesbilder så skapas två lösningar som skiljer sig maximalt från varandra vad gäller antalet olika sätt det finns att mötas/förbigå varandra. Detta maximerar antalet mötesmöjligheter i planen, men är inte detsamma som att de två lösningarna spänner upp den maximala mängden genomförbara planer som finns eftersom ett val av möte mellan två tåg inte med säkerhet är kombinerbart med ett annat val av möte mellan två andra tåg. Icke desto mindre kan detta vara en metod som generaliserar den egentliga uppgiften att skapa en “plan” som innehåller så många alternativa genomförbara planer som möjligt.

I figur 9 visas principen för maximal isärskjutning av två simultana olika lösningar, den ena är streckad och den andra heldragen. Variablerna x_{ij}^{AB} betecknar vilket av tågen i (blått) och j (rött) som kör först på sträckan $A - B$. Om $x_{ij}^{AB} = 0$ så kör i i detta fall blått tåg före rött, och om $x_{ij}^{AB} = 1$ så kör rött före blått.



Figur 9: Maximera antalet samtidigt olika möten mellan två lösningar

Eftersom två lösningar skapas så finns två x_{ij}^{AB} , en för varje lösning, vi kallar dessa två \hat{x}_{ij}^{AB} respektive \tilde{x}_{ij}^{AB} . Vi introducerar en variabel s_{ij} som binder ihop \hat{x}_{ij}^{AB} och \tilde{x}_{ij}^{AB} på det sättet att om de är olika (ordningen mellan tågen på sträckan AB är olika) är $s_{ij} = 1$, annars är $s_{ij} = 0$, d.v.s. $\hat{x}_{ij}^k - \tilde{x}_{ij}^k = 0 \rightarrow s_{ij}^k = 0$ och $\hat{x}_{ij}^k + \tilde{x}_{ij}^k = 1 \rightarrow s_{ij}^k = 1$. Utryckt som linjära ekvationer för linjesträckan (länken) k får vi

$$\begin{aligned}\hat{x}_{ij}^k + \tilde{x}_{ij}^k + s_{ij}^k &\geq 1 \\ \hat{x}_{ij}^k + \tilde{x}_{ij}^k - s_{ij}^k &\leq 1 \\ \hat{x}_{ij}^k - \tilde{x}_{ij}^k - s_{ij}^k &\geq -1 \\ \hat{x}_{ij}^k - \tilde{x}_{ij}^k + s_{ij}^k &\leq 1\end{aligned}$$

där \hat{x}_{ij}^k och \tilde{x}_{ij}^k är binärer (antar antingen värdet 0 eller 1).

Notera att s_{ij}^k inte behöver vara binärdeklarerad så länge som den ingår i objektfunktionen och minimeras, eftersom \hat{x}_{ij}^k och \tilde{x}_{ij}^k båda är binärdeklarerade och s_{ij}^k därmed antingen är 0 eller 1 (egentligen 1 eller större, men minimeringen av s_{ij}^k kommer att ansätta s_{ij}^k till högst 1). Notera också att då $\forall k : \sum_k s_{ij}^k = 0$ för två tåg i och j så finns inga alternativa möten dem emellan dvs mötet/förbigången (givet att det finns ett sådant mellan i och j) är ett kritiskt möte.

För att inte de två tvillinglösningarna skall "vävas" ihop blandat så kan extra villkor läggas till så att den ena lösningens tåg alltid skall ligga före den andra lösningens motsvarande tåg, d.v.s. $\hat{d}_i^k \leq \tilde{d}_i^k, \forall i$ på samtliga länkar k . Detta leder dock till en del oönskade effekter, mer om det i 6.4.2.

En kostnadsfunktion, kalla denna (A), kan uttrycks som $\min \sum_{ijk} C_{ij}^k s_{ij}^k$ där C_{ij}^k är t.ex. det geografiska avståndet i km mellan begränsningsstationerna för linjesegmentet k för att få med betydelsen av att skapa fler valmöjligheter kring de sträckor som är längre och därmed viktigare att ha alternativ vid.

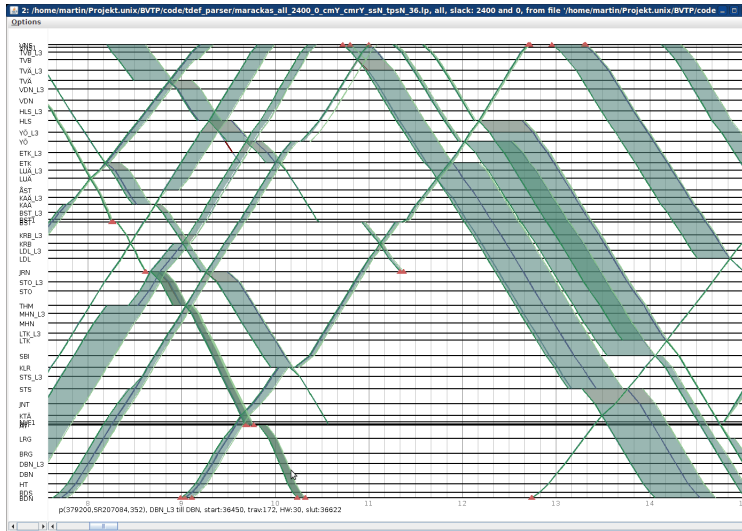
En annan kostnadsfunktion, (B), kan uttryckas som den största tidsdifferens som kan skjutas in mellan samtliga avgångar \hat{d}_i och \tilde{d}_i . Låt $df_i = \tilde{d}_i^k - \hat{d}_i^k$, då fås kostnadsfunktionen $\min \sum_{ik} df_i^k$.

Kostnadsfunktionen (A) leder dock oönskade effekter för upphinnande trafik, se 6.4.1 nedan. Av det skälet introduceras en variant av (A). Denna variant räknar inte antalet olika tågordningar direkt mellan de två tvillinglösningarna utan introducerar två "skuggor" av de två tågen men enbart för den sträcka där tågordningen kan bytas, således inte för hela tågets sträckning. Kravet på tiderna för dessa skuggor är att de skall ligga mellan de två tvillinglösningarna. Poängen är att räkna antalet möjliga olika tågordningar utan att dessa tågordningar egentligen begränsar varandra. Detta gör att vi kommer runt en del problem som redovisas i 6.4.1 och 6.4.2, men nackdelen är att vissa av dessa tågordningar inte är kompatibla med andra, dvs det är möjligt att de inte ingår i någon lösning. Ekvationerna för skuggorna ges nedan, där skuggorna använder versaler i ekvationerna.

$$\begin{aligned}\hat{d}_i^k &\leq \hat{D}_i^k \leq \hat{d}_i^k, \forall i \text{ och } \hat{d}_i^k \leq \hat{D}_i^k \leq \hat{d}_i^k, \forall i \\ \hat{D}_i^k + \hat{t}_i^k - \hat{D}_j^k - M \hat{X}_{ij}^k &\leq 0 \text{ och } \hat{D}_j^k + \hat{t}_j^k - \hat{D}_i^k - M(1 - \hat{X}_{ij}^k) \leq 0\end{aligned}$$

Motsvarande för \tilde{D}_i . s_{ij}^k mäts mellan \hat{X}_{ij}^k och \tilde{X}_{ij}^k , inte \hat{x}_{ij}^k och \tilde{x}_{ij}^k .

10 visar en optimering utförd på T11 dag 200, sträckan Boden-Vännäs, där de båda tvillinglösningarna till båda ovanstående kostnadsfunktionerna (A) och (B) finns inlagda (således 4 olika förslag till tågplaner, två tidiga och två sena). Varje tåg har lästs fast vid ankomst till respektive avgång ur området (dvs de får inte avgå in i området Boden-Vännäs före det att de ankommit till gränsstationen för området, och analogt då de går ut ur området).

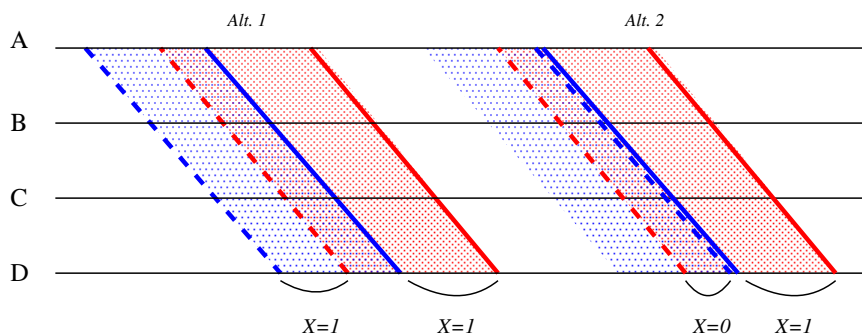


Figur 10: Exempel på fallhöjder och mötesmöjligheter Boden - Vännäs T11

Notera att en del tåg har större förskjutningsmarginaler, andra har mindre eller nästan inget alls. Notera också att det uppstår och försvinner fallhöjd inom området. Detta sker ofta då tåget har ett reglerat möte med ett annat tåg som inte går den undersökta gångdagen men då det når ett möte som genomförs den undersökta dagen så blir tåget stående och väntande.

6.4.1 Tid och tågordningsval, upphinnande trafik

Maximera tidsdifferens är inte samma sak som att maximera antalet olika tågordningar mellan två lösningar. Betrakta följande figur:



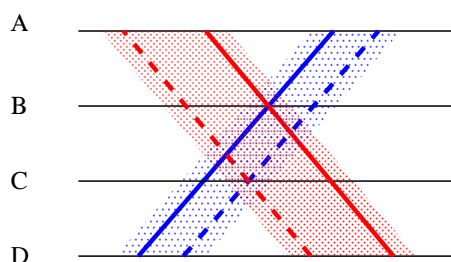
Figur 11: Minskad skillnad mellan tvillinglösningarna ger fler ändrade ordningar

I denna figur finns två olika tåg som är medriktade. Beroende på vilken kostnadsfunktion som används så skjuts de två olika lösningarna isär olika mycket. I alternativ 1 så optimeras de två olika lösningarna så att de två varianterna av varje tåg tidsmässigt skjuts isär så mycket som möjligt. I alternativ 2 optimeras de två lösningarna så att antalet olika tågordningar maximeras, dvs ordningen mellan blått och rött tåg på så många länkar som möjligt skall vara olika. Egentligen är lösningen i alternativ 2 innehållen i 1 (givet att inte något utanför den visade grafen påverkar detta), så för medgående trafik så ger inte kostnadsfunktionen $\min \sum_{ij} C_{ij}^k s_{ij}^k$ riktigt det förväntade resultatet.

6.4.2 Tid och tågordningsval, mötande trafik

Vidare så finns det ett problem med att kräva att den ena lösningens tåg skall vara strikt tidigare än den andra lösningen. Nedanstående figur illustrerar två möjliga möten, där båda

mötena bygger på att det ena tåget är “det tidiga tåget” medan det andra tåget är “det senare tåget”:



Figur 12: Ordna tvillinglösningarna i en tidig och en sen leder till att olika mötesmöjligheter inte upptäcks dem emellan

Dessa två mötesmöjligheter kan inte upptäckas om kravet är att streckad tågplansvariant skall avgå strikt före heldragen tågplansvariant.

6.4.3 Sammanställning av tester Vännäs - Boden

Följande tabell sammanfattar tester gjorda på Vännäs-Boden, dag 200 i T11. Det finns 943 par av tåg där tågordningen inte är bestämd då tågen tidigaste respektive senaste varianter jämförs med varandra.

Variant	Sekunder	Antal förändrade tågordningar
Maximerat antal olika tågordningar, kostnadsfunktion (A)	338 503	107
Maximerat summa tid mellan tvillinglösningarna, kostnadsfunktion (B)	813 481	68
Maximerat antal tågordningar, tvillinglösningarna ej ordnade i en tidig och en sen	336 649	123
Mellan de två tvillinglösningarna, ordnade i en tidig och en sen, maximerat antalet par av olika tågordningar utan hänsyn till att dessa två är kombinerbara med övriga par	464 972	113
Som ovan, men objektfunktionen inkluderar isärskjutning av tvillinglösningarna ((B) en del av kostnadsfunktionen)	813 479	111

De två första varianterna lider av problemen beskrivna i 6.4.1 och 6.4.2. Den tredje varianten har inte problemen beskrivna i 6.4.2, men det är tveksamt vad som mäts då de två tvillinglösningarna vävs ihop. Variant 4 och 5 har inte problemen från 6.4.2 och 6.4.1, däremot är de sammanräknade olika tågordningarna inte längre en del av en giltig lösning till planeringen, de parvisa tågordningarna visar bara att ordningen kan ändras (“får plats”) inom ramen för de två tvillinglösningarna, för de två tågen.