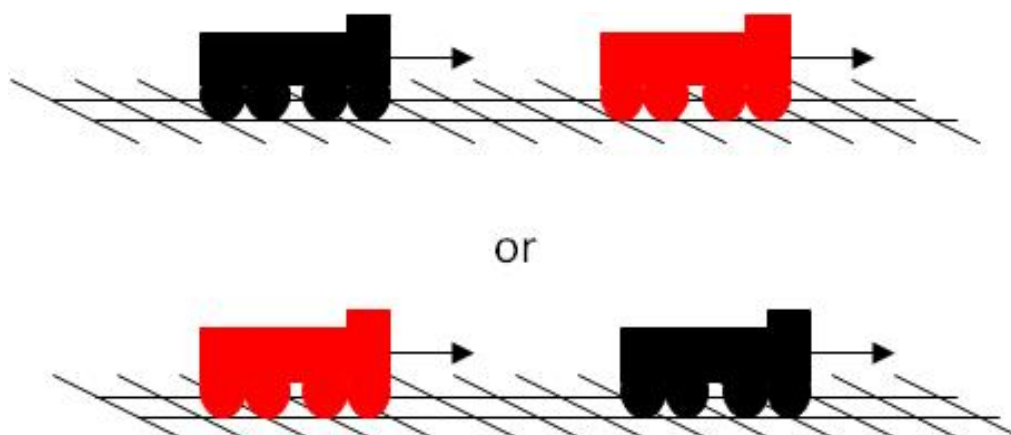


SLUTRAPPORT:

För projektet Omplanering Av Tåglägen: fortsättningsprojekt (OAT+) med Dnr HK 06-1501/AL50



**Johanna Törnquist Krasemann
Blekinge Tekniska Högskola
2009-11-07**

Förord

Detta projektarbete har i huvudsak utförts av projektledare Dr. Johanna Törnquist Krasemann med stöd av Prof. Paul Davidsson, Dr. Jan A. Persson och Prof. Håkan Grahn på Blekinge Tekniska Högskola.

Projektet har huvudsakligen finansierats av Banverket under 2007-2009 och vi vill passa på att tacka vår projektsponsor Björn Wahlström och vår kontaktperson Thomas Franzén för möjligheten att fortsätta bedriva vår forskning inom detta område.

Vi vill även rikta ett varmt tack till personer som indirekt deltagit i projektet och bidragit med tid, information och data och då framför allt Banverkspersonal från STEG/STRATEG-projektet såsom Jörgen Hwargård och Karl-Einar Jonsson samt Malin Forsgren och Martin Aronsson från SICS och DDTP-projektet. Ett stort tack även till Mats Lindqvist, Triona, och Göran Eskérs, Banverket, för att ni möjliggjorde och ledde samarbetet med den gemensamma demonstrationen av konceptet DDTP-STEg-OAT inför ITSVK2009 i Stockholm.

Sammanfattning

Denna rapport avser summera forskningsaktiviteter och -resultat från projektet *Omplanering Av Tåglägen: fortsättningsprojekt* (även benämnt *OAT+*) som bedrivits under tiden 2007-09-01 till 2009-10-31 och som huvudsakligen finansierats av Banverket.

OAT+ är en fortsättning på projektet *Omplanering Av Tåglägen* (OAT) och syftet med dessa projekt är att utreda och skapa möjligheter för att stödja den operativa omplanering av tågtrafiken vid störningar eller andra förändringar som gör att den ursprungliga tågplanen behöver modifieras.

I OAT studerade och utvecklade vi i huvudsak optimeringsbaserade modeller och metoder för den operativa omplaneringen. Vi utförde en experimentell studie av hur olika typer av störningar sprider sig samt hur de kan lösas med hjälp av de utvecklade metoderna. I merparten av scenarierna erhöll vi en lösning (dvs. ett förslag på en reviderad tidtabell) inom ett fåtal sekunder medan i mer komplicerade fall tog det längre tid att hitta en optimal lösning om en sådan överhuvudtaget kunde hittas. Målet är dock att en metod för operativ omplanering snabbt kan tillhandahålla en giltig, lämplig lösning även i de mest tidskritiska och mycket komplicerade situationerna. Arbetet i OAT+ har därför delvis syftat till att utveckla en optimeringsalgoritm - som komplement till att tillämpa optimeringsmjukvara såsom CPLEX - för att säkerställa att vi dels alltid hittar en giltig lösning, dels att vi hittar en tillräckligt god lösning inom relativt kort tid (inom 30 sekunder) och oberoende av vilken typ av störningssituation som uppträder. Den algoritm som utvecklats är en *s k Greedy* heuristik.

Vidare såg vi i OAT att det saknas en fullständig beskrivning av hur tågen och infrastrukturen interagerar operativt som är mer detaljerad än de riktlinjer för tidtabellsplanering som återges i föreskrifter såsom TF601. I ett omplaneringsskede kan marginaler vara viktiga och vissa tågvägar kan vara mer tidskonsumerande än andra och bör tas hänsyn till. Projektet har i huvudsak fokuserat på att studera vilka restriktioner och faktorer i tågföringen som bör modelleras, vilken data som krävs samt i vilken utsträckning den finns tillgänglig. Därför har vi valt att studera hur dessa delar av infrastrukturen kan modelleras i mer detalj och inom OAT+ har vi fokuserat på att studera vilka förutsättningar och restriktioner som gäller för den delen av det svenska järnvägsnätet som STEG-projektet fokuserar på.

Inom OAT+ har vi även gjort en experimentell studie av hur olika typer av störningar sprider sig samt hur de kan lösas med hjälp av de utvecklade optimeringsmetoderna. Vi har tillämpat vår Greedy-algoritm på tre olika typer av störningskategorier:

Kategori 1 innebär att ett tåg anländer trafikdistriktet med en viss försening eller att det får en temporär försening på ett segment inom distriktet.

Kategori 2 innebär att ett tåg har en mer ”kronisk” försening såsom nedsatt accelerationsförmåga vilket resulterar i ökade traverseringstider.

Kategori 3 syftar på ett infrastrukturfel som ger upphov till exempelvis en hastighetsnedsättning på en viss linjesträcka och som resulterar till att samliga tåg som passerar får ökade traverseringstider.

Vi har använt tidtabellsdata från Trainplan och simulerat att störningarna inträffar i rusningstrafik på eftermiddagen den 23 april 2009. Vi har omplanerat trafiken inom en tidshorisont på 90 minuter med utgångspunkt från då resp. störning inträffat samt vi har tillåtit en maximal beräkningstid på 30 s. En beskrivning av resp. scenario finns i Tabell 12 samt i Bilaga 2. Scenario 1-10 tillhör kategori 1 medan 11-15 tillhör kategori 2 och 16-20 tillhör kategori 3.

För att utvärdera algoritmens prestanda har vi även löst ett urval av scenarierna med motsvarande optimeringsmodell och tillämpat CPLEX 8.0 (med en maximal beräkningstid på 24 h). Vid en utvärdering av algoritmens prestanda och jämförelse med CPLEX kan vi först och främst se att CPLEX i merparten av fallen inte har kunnat generera en tillåten lösning trots tillåten söktid på 24 h. Vid en jämförelse med de lösningar som CPLEX genererat i de fall där ett optimum kunnat fastställas ser vi att CPLEX och algoritmen finner olika lösningar även om målfunktionsvärdena är snarlika. CPLEX tenderar att försena flertalet tåg innan de når sin slutdestination men ser till att de har en så liten slutlig försening som möjligt (dvs. i linje med målfunktionen). Algoritmens nuvarande sökstrategi, som har ett mer kortsiktigt perspektiv, undviker istället att försena ytterligare tåg såvida det inte verkligen medför en vinst. Vilken lösning som är den bästa från ett praktiskt perspektiv är svårt att säga generellt men det visar att det även finns fördelar med denna mer kortsiktiga sökstrategi. Det visar även hur komplicerat det kan vara att formulera en målfunktion som tar hänsyn till flera olika aspekter.

När det gäller algoritmens prestanda m a p de olika kategorierna kan vi se att för kategori 1 och 2 så presterar algoritmen förhållandevis bra. För kategori 3, däremot, har det varit svårt att finna bra jämförelsevärden men det till trots ser vi att algoritmen har svårt att hitta tillräckligt bra lösningar, se exempelvis scenario 18. Det indikerar återigen att en lösningsmetod kan behöva anpassa sin sökstrategi och målfunktion beroende på vissa egenskaper hos störningssituationen.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
2	Bakgrund.....	1
3	Syfte och omfattning.....	2
4	Modeller och metoder för planering av järnvägstrafik.....	4
5	Projektets modeller och algoritmer.....	7
5.1	Terminologi.....	8
5.2	Modellering av järnvägstrafik på linjesträckor.....	8
5.3	Modellering av järnvägstrafik på stationer.....	9
5.4	Metodutveckling – en ”Greedy”-algoritm.....	22
5.5	Simuleringsexperiment och utvärdering av algoritmen.....	26
5.6	Resultat och analys.....	27
6	Fortsatt arbete.....	30
7	Referenser.....	31
8	Bilaga 1. Optimeringsmodell.....	33
9	Bilaga 2. Tidtabell.....	34
10	Bilaga 3. Projektuppföljning (intern).....	35
10.1	Avstämning av tidsplan.....	35
10.2	Personalförändringar.....	35
10.3	Projektaktiviteter.....	35
10.4	Avrapportering och publicering.....	35
10.5	Kostnadsuppföljning.....	36

1 Inledning

Projektet *OAT+* (Omplanering Av Tåglägen: fortsättningsprojekt) har pågått under tiden 2007-09-01--2009-10-31 och detta dokument ämnar summera projektresultaten. Projektet har en hemsida www.bth.se/tek/OATplus där relevanta publika dokument finns tillgängliga.

Rapporten kommer att inleda med en presentation av bakgrunden till projektet samt dess syfte och omfattning. I Kapitel 4 följer en kortfattad analys och utvärdering av relaterad forskning medan Kapitel 5 ger en övergripande beskrivning av projektarbetet och dess resultat för att komplettera de vetenskapliga publikationer som berör projektet. Kapitel 6 diskuterar projektresultaten och fortsatt arbete.

2 Bakgrund

Ett attraktivt och hållbart järnvägssystem ska hålla hög säkerhet, vara miljövänligt, ha god tillgänglighet och erbjuda pålitliga transporttjänster som håller tillräckligt hög tidsprecision. Samtidigt ska bankapaciteten utnyttjas i möjligaste mån på ett kostnadseffektivt sätt. Detta kräver en kontinuerlig balans mellan att skapa ett högt banutnyttjande och att bibehålla en tillräckligt hög robusthet, dvs. liten känslighet för störningar. Många orsaker till störningar kan förebyggas och flertalet studier av detta har gjorts, men oförutsedda händelser som skapar störningar är ofrånkomliga och konsekvenserna ska då kunna approximeras, minimeras samt kommuniceras till användarna. Den information som ligger till grund för en konsekvensanalys och revidering av tågplan efter en störning finns dock inte alltid trafikledaren tillhanda och med nuvarande förutsättningar finns heller inte alltid en möjlighet att använda tillgänglig information. Vidare finns det inga konkreta sätt för trafikledaren att bedöma kvaliteten på omplaneringen, dvs. vad innebär omplaneringen för individuella tåg liksom för trafiksystemet på kortare resp. längre sikt. För att kunna uppnå de strategiska, trafikpolitiska och användarspecifika mål som satts upp, måste de kunna omsättas till praktiska, enkla, operativa riktlinjer och kunna mätas i tillräcklig utsträckning. Den huvudsakliga riktlinje, att rättidiga tåg har företräde, som tillämpas idag är logisk i den mening att den begränsar en störnings spridning genom att isolera den till ett fåtal tåg. Den är även enkel att tillämpa i de kritiska situationer som ofta uppstår, vilket är nödvändigt. Principen är dock inte effektiv i alla situationer, vilket trafikledaren ofta inser och frångår den för att styra trafiken på ett bättre sätt. Frågan kvarstår dock vad ”bättre” innebär i varje situation och hur trafikledaren kan mäta effekterna av sin trafikstyrning på ett objektivt sätt som ser till helheten men även hindrar att individuella trafikutövare kontinuerligt drabbas. Inom projektet *OAT* (Omplanering Av Tåglägen) som initierades mars 2005 och avslutades mars 2007, har vi utvecklat och utvärderat metoder som syftar till att stödja den operativa hanteringen av störningar. Dessa metoder är baserade på optimeringstekniker och syftar till att tillhandahålla förslag på hur tidtabellen för tågtrafiken bör revideras (dvs. de skapar en omplanerad tidtabell) utifrån de mål och riktlinjer som trafikstyrningen följer för att minimera konsekvenserna av störningarna. Vi har studerat vilka faktorer som påverkar flödet av trafiken och sett att det finns viktig information som inte alltid används i processen, t.ex. tågens verkliga egenskaper såsom längd, vikt, bromstal, och trafikutövarnas preferenser och kritiska lägen. Detta beror på att informationen inte alltid kommuniceras och/eller inte är hanterbar. Det krävs således en mer omfattande analys för att definiera vilken information som bör ligga till grund för beslutsfattandet och hur den ska bli tillgänglig och hanterbar. Det innefattar även att trafikutövaren bör kommunicera sina mål

och preferenser och i gengäld i god tid få tillgång till information om sina aktuella (eventuellt preliminära) omplanerade tåglägen.

Inom OAT har vi även gjort en experimentell studie av hur olika typer av störningar sprider sig samt hur de kan lösas med hjälp av de utvecklade optimeringsmetoderna. I merparten av scenarierna fås en lösning (dvs. ett förslag på en reviderad tidtabell) inom ett fåtal sekunder medan i mer komplicerade fall tar det längre tid att hitta en optimal lösning. Målet är dock att metoderna snabbt kan tillhandahålla en giltig, lämplig lösning även i de mest tidskritiska och mycket komplicerade situationerna. Metoderna bör därför vidareutvecklas till en sådan "anytime-algoritm".

Metoderna bör även eftersträva att trafikflödet styrs utifrån ett systemperspektiv och oberoende av organisationsstruktur, så att tåg inte omprioriteras på grund av distriktsgränserna. Infrastrukturen och förutsättningarna är olika mellan distrikten, men synsätt och mål bör konvergera och vara likartade för Sveriges distrikt och driftledningscentraler. Riktlinjer för trafikstyrningen kan vara delvis baserade på respektive trafikutövares akuta behov av prioritering och tågläge men att en trafikutövare är mer tolerant än en annan beror på att den har större marginaler och mer flexibilitet i sitt logistiksystem, och denna flexibilitet är, precis som förseningen, förenad med en kostnad. Exempelvis är godstransporterna ofta mer toleranta för förseningar (dvs. de har sina tidsfönster snarare än fixerade tidpunkter för ankomst) men till en intern kostnad medan passagerartrafiken kan ha snäva omloppsplaner utan samma tolerans för att maximera sin vinst. En analys av vilken leveransprecision och andra villkor som gäller för olika tilldelade tåglägen kan krävas för att inte skapa ogenomförbara riktlinjer utan är kopplade till de produkter som Banverket erbjuder sina kunder. I projektet DDTP som drivs av SICS och som syftar till att utveckla en ny princip för tilldelning av tåglägen där det centrala är de leveransåtaganden som BV och resp. operator enas om. Dessa leveransåtaganden anger sedan i operativ drift i större utsträckning än idag vilken betydelse olika förändringar av tåglägen har (dvs. om BV kan förändra ett tågläge utan att det påverkar leveransåtagandet). De modeller vi tar fram i projektet kommer därför att beakta dessa i den utsträckning som är möjligt.

Vi har även inom OAT gjort preliminära experiment för att utvärdera några olika målfunktioner för omplaneringen (dvs. om antalet försenade tåg ska minimeras, den ackumulerade störningen ska minimeras eller om förseningskostnaderna ska minimeras) och olika mått på omplaneringens effekter. Vad vi kunde se var exempelvis att fokus på minimering av den totala ackumulerade störningsmängden (i minuter) kan leda till att fler tåg försenas. I praktiken är dock målen och hänsynstaganden vid trafikstyrningen mer svårdefinierade och komplexa, men behöver kunna definieras och delvis spegla de trafikpolitiska mål som finns och de leveransåtaganden som de olika aktörerna har.

3 Syfte och omfattning

Detta projekt är en fortsättning på projektet OAT (Omplanering Av Tåglägen) som syftar till att vidareutveckla de modeller och metoder som skapats inom OAT för att stödja omplaneringen av tidtabellen vid störningar och andra förändringar i järnvägstrafiken. Dessa metoder har visat goda möjligheter att snabbt kunna föreslå en reviderad tidtabell som effektivt minimerar konsekvenserna när störningar i trafiken har skett och där

konsekvenserna av störningarna och den reviderade tidtabellen kan mätas utifrån olika lämplighetsmått (kostnad, antal försenade tåg, total försening, etc.).

Metoderna ska även vidareutvecklas med målet att kunna generera tillräckligt bra lösningar (dvs. reviderade tidtabeller) inom kort tid även i situationer som vi inom OAT identifierat som typiskt komplexa och svårlösta. Det vill säga, vi vill skapa en ”anytime-algoritm” som kan garantera en tillåten, tillräckligt bra lösning inom en viss tid men som även fortsätter att söka efter den optimala lösningen om tid finns.

För att summera: I projektet OAT har vi huvudsakligen studerat och utvecklat metoder för omplanering av tåglägen vid störningar, men under projektets gång sett att det krävs ytterligare analyser av vissa aspekter för att kunna skapa praktiskt gångbara metoder och principer för effektiv tågföring. Detta fortsättningsprojekt, OAT+, syftar därför till att behandla dessa aspekter samt förbättra utvecklade metoder. Fortsättningsprojektet fokuserar på att:

- Studera vilken information som bör ligga till grund för beslutsfattandet i trafikstyrningsprocessen samt i vilken utsträckning denna information är eller kan göras tillgänglig och användbar.
- Definiera och utvärdera vilka långsiktiga och kortsiktiga mått på en reviderad tidtabells effekter som kan användas för att utvärdera och bedöma lösningens (dvs. tidtabellens) lämplighet och jämföra den med alternativa lösningar.
- Studera hur robusthet kan definieras, mätas och appliceras vid omplaneringen för att undvika att skapa lösningar som är störningskänsliga och inflexibla.
- Studera vilken effekt olika prioriteringsmodeller kan få i operativ drift och hur modellerna kan och bör återkopplas till de leveransvillkor som gäller för såväl operatörer som för Banverket.
- Utveckla och utvärdera en ”anytime-algoritm” som tillräckligt snabbt tillhandahåller lämpliga och giltiga lösningar men som samtidigt eftersträvar att hitta en optimal lösning.

Projektet har följt nedanstående arbets- och tidsplan.

Aktivitet	Startdatum	Slutdatum
Fas 1. Uppstart av projekt.	2007-09-01	2007-10-31
Fas 2a. Förberedelse inför simuleringsstudie: Del 1.	2007-10-31	2008-01-31
Fas 2b. Utförande av simuleringar: Del 1	2008-01-31	2008-05-31
Fas 2c. Analys av resultat ifrån Fas2b.	2008-03-31	2008-07-31
Fas 3. Kvalitetsmått och experimentell analys	2008-01-31	2008-10-31
Fas 4. Metodutveckling och –utvärdering.	2008-07-31	2009-01-31
Fas 5. Simuleringsstudie: Del 2.	2008-11-01	2009-09-30
Fas 6. Summering, presentation/demonstration och projektavslut.	2009-06-30	2009-10-31

Tabell 1. Tidsplan.

4 Modeller och metoder för planering av järnvägstrafik

Forskningsintresset för metoder för planering av järnvägstrafik- och transporter har ökat markant de senaste åren. Även om problematiken på ett övergripande plan är densamma världen över, dvs. att resurser såsom spårkapacitet ska allokeras till en mängd operatörer och dess fordon, så skiljer sig förutsättningarna åt på flera sätt. Vad som dock skiljer svensk järnvägstrafik från den internationella är att avregleringen är längre framskriden i Sverige än inom övriga EU vilket gett effekter som ett mer splittrat transportsystem med fler operatörer som ska samsas om kapaciteten och vars trafik ska styras av en neutral part (BVs driftledning). Vi har också en mer heterogen trafik där tåg med olika kapacitet (godståg, intercitytåg, snabbtåg och pendeltåg) använder samma spår samtidigt under allt längre perioder av dygnet. Många tågkoncept inom EU är periodiska (dvs. cykliska med t ex styva tidtabeller) och mer isolerade ifrån annan tågtrafik samt drivs av en och samma organisation, vilket gör att dessa länder i nuläget inte behöver hantera denna ytterligare komplexitet som svensk trafik har. Vidare är det svenska järnvägsnätet anpassat för trafik i båda riktningar medan europeiska system till stor del bedriver enkelriktad trafik på sina dubbelspår.

Skillnader som dessa medför att det förekommer en mängd olika sätt att beskriva problemet på. I detta sammanhang är ofta en sådan problembeskrivning en *matematisk modell* som anger vilka restriktioner (dvs. *villkor*) som gäller för problemet och vilken typ av lösningen som eftersöks (t ex att maximera antalet tåg som körs) och som då uttrycks av en *målfunktion*. För att lösa problemet väljer man sedan en *metod*. Det finns en mängd olika typer av metoder. I många fall är metoderna dock anpassade för att vara så effektiva som möjligt för den specifika variant av problemet som är i fokus. I Cordeau et. al. (1998) samt (Törnquist, 2005) finns en mer omfattande beskrivning av olika modeller och metoder för tilldelning av järnvägskapacitet. Mer nyligen har Zhou and Zhong (2007) presenterat en branch-and-bound algoritm för enkelspårstrafik medan D'Ariano et. al. (2007, 2009) beskriver en iterativ algoritm baserad på förutsättningarna i det nederländska järnvägsnätet.

Generellt sett så innehåller modeller för operativ omplanering av tågtrafik få detaljer och man särskiljer sällan på vilken tågväg ett tåg tar genom en station utan i bästa fall definierar man bara en mängd parallella spår varpå tåget väljer en. Dessa tågvägar är då inte i konflikt med varandra vare sig vid in- eller utfart. I praktiken är det dock annorlunda och i en störningssituation kan det vara viktigt att åskådliggöra vissa tågvägar i mer detalj och de marginaler som finns. Ett exempel är då ett X2000, som enligt plan ska köra på ner-spåret genom Strångsjö via spår 3, se Figur 5, utan uppehåll men tvingas istället gå in via spår 2 för en oplanerad förbigång av ett annat tåg som uppehåller sig på spår 3. X2000 måste då bromsa in för att köra genom en växel och förlorar märkbart med tid – något som då kan behöva beskrivas av en motsvarande matematisk modell som då kunde ha beräknat effekten av spårvalen för de båda tågen på stationen och istället gjort det omvända.

När vi vill skapa en modell över järnvägsnätet så måste vi alltså välja lämplig detaljnivå, dvs. vilka egenskaper hos tågen och trafiksystemet samt fysiska delar vi ska beskriva och inkludera i våra beräkningar. Radtke (2008) skiljer på olika detaljnivåer i de infrastrukturmodeller som används för järnvägstrafikplanering, där makromodeller har en grövre representation med mindre detaljer medan mikromodeller innehåller mer detaljer om hur infrastrukturen är uppbyggd och dess restriktioner. Makromodeller använder ofta en

aggregerad beskrivning av vissa resurser där exempelvis en station kan betraktas som en mängd parallella spår av begränsad eller oändlig kapacitet. I en mikromodell kan istället samma station ses som ett komplext nätverk av flera olika spårdelar som binds samman av signaler och växlar. Vilken nivå som är lämplig beror givetvis på syftet med modellen och i vilket avseende resultaten ska användas. Desto mer detaljerad en modell är, desto mer data och beräkningar krävs och för ett problem som ska lösas i real-tid kan det vara för tidskrävande att samla och bearbeta en stor mängd data. Dessutom ger en mer detaljerad modell potentiellt upphov till en större mängd alternativa lösningar att utvärdera. Desto mindre och enklare en modell är, desto lättare blir det att validera och verifiera den (dvs. att kontrollera om den är och beter sig korrekt och ger rimliga resultat) och egenskaper som inte påverkar resultatet (nämnvärt) bör därför inte inkluderas explicit i modellen. Likaså gäller då indata som krävs för att representera vissa egenskaper inte finns att tillgå eller är av för dålig kvalitet utan dessa måste då hanteras på annat sätt. Det kan därför vara effektivare att approximera vissa egenskaper så länge approximationerna ger tillräckligt tillförlitliga resultat.

Kartläggning som gjorts inom projektet och som till viss del presenteras i (Törnquist, 2005), visar att de flesta modeller för operativ omplanering av järnvägstrafik är makromodeller som inte inkluderar signaler eller växlar eller anger hur tåg färdas genom stationerna. I vissa fall, kan det dock vara nödvändigt att använda en mikromodell för t ex högtrafikerade områden kring storstäder och centrala nav i nätverket medan för andra mer glestrafikerade trafikområden kan det vara tillräckligt med en grov modell.

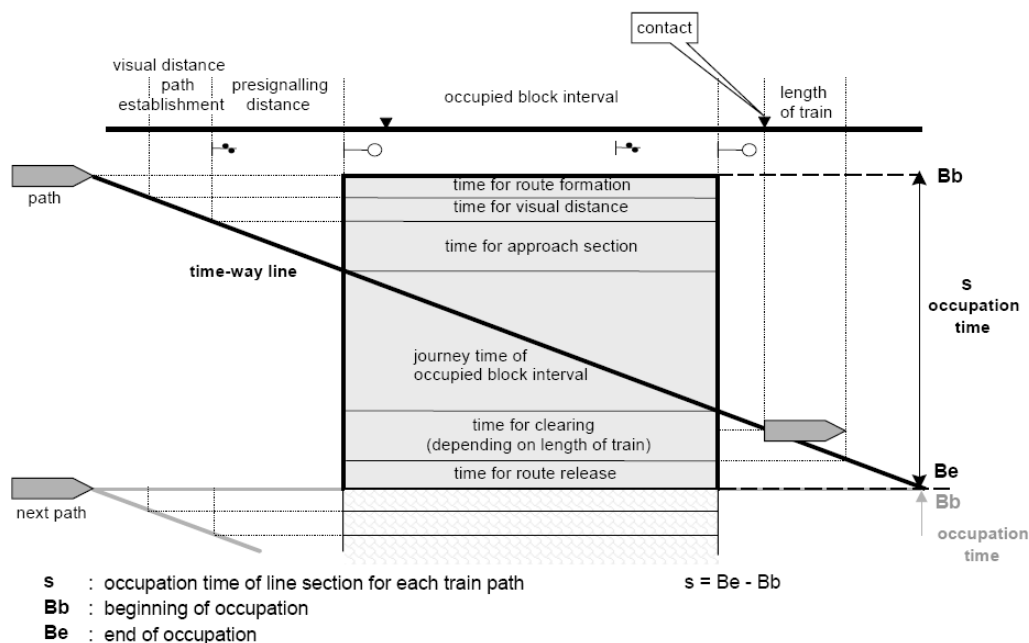
I projektet DisKon (*Disposition und Konfliktmanagement*) som är ett samarbete mellan de tre tyska universiteterna; RWTH Aachen, TU Dresden och Göttingens universitet, samt Deutsche Bahn AG. Projektet utvecklar en metod för att hantera den tyska problematiken kring operativ trafikledning med fokus på att minimera effekten av brustna anslutningar. Metoden använder två olika detaljnivåer i sin modell av trafiken och infrastrukturen men inte beroende på att man anser det finnas behov av olika detaljnivåer i samma modell utan man delar upp problemet i två nivåer. Man löser alltså problemet först grovt med en optimeringsmodell på makronivå och när den lösningen är fastställd, dvs. vissa variabler i problemet är fixerade, så löser man problemet på en mer detaljerad nivå med en mikromodell. För mer information om problematiken med fokus på anslutningar, se exempelvis (Schöbel, 2009).

I projektet OAT+ har det, genom diskussioner med deltagare från STEG/STRATEG-projektet, blivit uppenbart att det krävs olika detaljnivåer för det svenska järnvägsnätet beroende på vilken del av nätet som betraktas. I den del som projektet fokuserat på, se Figur 3, har det visat sig finnas flera stationer för vilka det krävs en explicit beskrivning av vilken tågväg som används och hur olika tågvägar är i konflikt i flera avseenden. Vi har följaktligen vidareutvecklat och anpassat villkoren för dessa stationer i vår matematiska modell men problemet är dock att det inte finns tillräckligt med data för att tillämpa vidareutvecklingen i nuläget, vilket diskuteras vidare senare i rapporten. Det existerar dock redan matematiska modeller som Banverket tillämpar (exempelvis i TrainPlan¹ och Banverkets gångtidsberäkningsverktyg) som beskriver hur man för svensk tågtrafik planerar tågvägar och tågs relationer till varandra. De modeller som finns i Trainplan är

¹ Mjukvara som utvecklats av Vossloh System-Technik York Limited.

dock utvecklade för tidtabellsplaneringen på en ganska grov nivå och tillhandahåller en relativt förenklad och aggregerad representation av tågtrafiken som inkluderar olika typer av marginaler, buffert mm för att skapa robusta tidtabeller och anger inte de verkliga restriktionerna eller tar hänsyn till vad som sker in till, inne på och ut från stationerna. De modeller som å andra sidan finns i gångtidsberäkningsverktyget innehåller en mycket detaljerad beskrivning av hur ett tåg med en viss körprofil rör sig genom på banan men detta verktyg är mycket beräkningsintensivt och inte anpassat för operativ drift.

Oavsett hur infrastrukturen är uppdelad i enskilda resurser för vilka man tilldelar tågen *slots*, dvs. tåglägen, så behöver de tidskomponenter som ingår i en slot beskrivas. I Figur 1 nedan ges UICs beskrivning av en slot för ett block på en linjesträcka, se Figur 5 i (UIC 2004) för en vidare beskrivning.



Figur 1. Illustration av tidskomponenterna i en tågslot enligt UICs beskrivning. Källa: Figur 5 i (UIC, 2004).

Om representationen som ges i Figur 1 skulle tillämpas för operativ omplanering av tågtrafik och explicit uttrycka ett tågläge (dvs. *occupation time*) som summan av de sju tidskomponenterna a) *time for route formation*, b) *time for visual distance*, c) *time for approach*, d) *journey time*, e) *time for clearing* samt f) *time for route release* så skulle en stor mängd beräkningar krävas enkom för att beräkna *occupation time* om tåget inte följer sin initiala tågplan eftersom tidskomponent b)-e) är beroende av tågets inkommande och utgående hastighet. Mängden variationer är således oändlig och svår att hantera. Ett alternativ är att diskretisera och approximera de olika möjliga scenarierna till en mindre, mer hanterbar mängd.

I den datastruktur som Banverket använder för att beskriva trafiken i en fastställd tidtabell (dvs. den tidtabellsdata som finns i Trainplan) så används inte den explicita beskrivning som ges i Figur 1 ovan. I stället använder man fyra olika scenarier för att beräkna

alternativa värden på *journey time* där tåget har antingen *full fart in* till linjesträckan/blocket eller *från stillastående start* på blocket resp. att tåget lämnar blocket med *full fart ut* eller som *stillastående*. Stillastående representeras med värdet '0' och full fart in/ut med värdet '1'. Ett tågs minsta möjliga *journey time* för ett visst block sker då tåget har full fart in och full fart ut från blocket, vilket representeras av '1 1'. Från stillastående till stillastående anges då som '0 0'. Dessutom tillkommer för varje av de fyra scenarierna ett värde på approach resp. clearance time. Dessa fyra alternativa scenarier kallas *timings loads, TLD*. Oberoende av TLD tillkommer fyra olika kompensationsvärden; *engineering allowance, pathing allowance, performance allowance* samt *adjustment*. Utöver approach resp. clearance time som beror på resp. TLD (dvs. tågets körprofil) så tillkommer ett statistiskt värde på *blockets approach resp. clearance time* (s k *network link approach* och *clearance time*). Körtider mm för tåglägen anges dock endast på detta sätt för linjesträckor (aktiviteten benämns då i Trainplan som *Train movement, TMV*) medan tider för aktivitet inne på stationssträckorna (*Train stop, TSP*) inte finns representerade alls utan anges som 0 sekunder. Undantaget gäller då tåget har ett planerat s k *kommersiellt uppehåll* då tiden som anges är den tid som krävs för att genomföra en viss aktivitet såsom trafikutbyten (släppa av och på passagerare), sammanfoga/koppla från tågset, byta lok mm snarare än tiden det tar för tåget att färdas en viss tågväg genom stationen. Tågens två olika aktivitetstyper, TSP samt TMV, har en starttid och en sluttid, och om tiden däremellan är större än den tid som beräknas för att traversera blocket/genomföra stationsaktiviteter som planerat, så blir resterande tid en buffert som kan användas för att hämta in en eventuell försening. Notera dock att ett tåg inte kan lämna en station tidigare än en eventuell annonserad avgångstid för påstigande passagerare. Ett tåg kan alltså ha tid inplanerad på en station för exempelvis ett s.k. tidtabellstekniskt möte/förbigång men om mötet/förbigången inte kan genomföras som planerat så behöver tågen inte göra något uppehåll på stationen.

Trainplan innehåller även information om relationer mellan tåg som har en gemensam aktivitet såsom passagerarutbyten och en sådan relation benämns *Train association, TAS*.

Vad som sker inne på stationer och bangårdar behandlas dock i mer detalj vid viss tidtabellsläggning, se exempelvis (Billionet, 2003), (Carey, 1994), (Carey och Carville, 2003) samt (Kroon et.al., 1997).

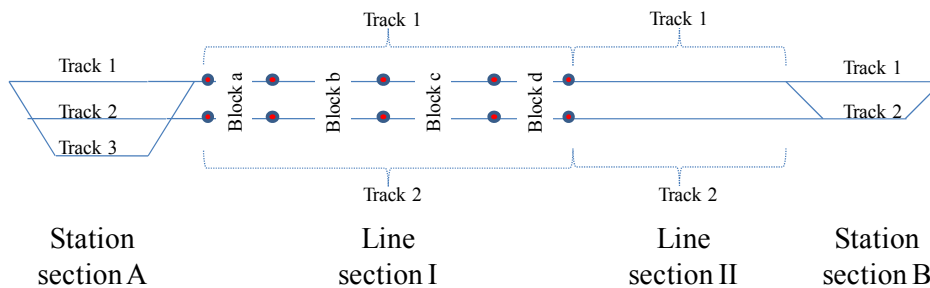
5 Projektets modeller och algoritmer

I ett omplaneringsskede kan marginaler vara viktiga och vissa tågvägar kan vara mer tidskonsumerande än andra och bör tas hänsyn till. Därför har vi valt att studera hur dessa delar av infrastrukturen kan modelleras i mer detalj och inom OAT+ har vi fokuserat på att studera vilka förutsättningar och restriktioner som gäller för den delen av det svenska järnvägsnätet som STEG-projektet fokuserar på, se Figur 3. Vi har tagit del av material från STEG-projektet och diskuterat med projektdeltagare och trafikledare i Norrköping. Vi har även tagit del av dokumentation gällande Trainplan samt forskrifter för tidtabellsplanering (främst TF601). Utifrån det har vi vidareutvecklat optimeringsmodellen som beskrivs i slutrapporten för OAT-projektet, www.bth.se/tek/oat. Merparten av de parametervärden som krävs för att tillämpa modellen saknas dock (det finns ingen komplett indata hos Banverket ännu, något som även påpekas i materialet från STEG-projektet). Som diskuterats tidigare i rapporten är det inte säkert att alla de villkor som tillkommit är

nödvändiga att explicit inkludera men eftersom det i nuläget saknas information för att utvärdera detta så har vi valt att inte inkludera alla vid utvecklingen och tillämpningen av vår lösningsmetod (dvs. vår *any-time algorithm*) utan endast de mest väsentliga.

5.1 Terminologi

Vi har använt en terminologi och nätverksmodell där ett *segment* är en sträcka från en punkt till en annan och kan vara en station (anges som *station section* i Figur 2) liksom en sträcka mellan två stationer (anges som *line section*). Vad som karakteriserar ett segment är att det består av ett eller flera parallella spår (anges som *track*). Varje spår kan vara uppdelat i ett eller flera blocksträckor. Ett tågs traverseringstid på ett segment kallas *event*. När ett tåg lämnar ett segment (dvs. avslutar den event) så påbörjar tåget omedelbart ett annat segment (dvs. påbörjar en annan event).



Figur 2. Vår nätverksmodell.

5.2 Modellering av järnvägstrafik på linjesträckor

Utöver de villkor som beskrivits i OATs slutrapport så har vi två tillägg gällande restriktioner för trafik på linjesträckorna. Dessa tillägg beror på Banverkets datastrukturer för den tidtabellsdata som finns i Trainplan och som vi huvudsakligen brukat under projektet.

När ett tåg har två direkt efterföljande TMV måste tåget använda samma spår på båda linjesträckorna. Detta blir aktuellt för enkelspårsträckorna Tystaberg-Sjösa, Ålberga-Kolmården samt dubbelspårsträckan Åby-Norrköping och beror på att linjesträckan är indelad i två blocksträckor utan växel emellan och anges som enskilda resurser i Trainplan. Det krävs dock bara villkor då det sker på dubbelspår:

$$i \in T, k \& (k+1) \in K_i, j, \hat{j} \in B, k \in L_j, (k+1) \in L_{\hat{j}}, t \in P_j : k = TMV \& (k+1) = TMV \& p_j = p_{\hat{j}} \& p_j > 1$$

$$q_{kt} = q_{k+1,t}$$

5.1

På sträckan Katrineholm-Strångsjö-Simonstorp-Åby finns det även mer än en blocksträcka per linjesträcka men de anges inte som separata resurser i Trainplan och måste då hanteras lite annorlunda än alla andra linjesträckor. För dessa finns därför en s_k *headway* angiven för tåg i samma riktning (i TF601 används en headway på tre minuter). För vilka situationer

som villkoren GV9-GV12 i OATs slutrapport då gäller måste revideras och *inte* inkludera de där headway-villkoren ska tillämpas (se villkor 8.10 och 8.11 i Bilaga 1). Parametern dir_k anger riktningen för tåget i det läget och nrB_j anger antalet blocksträckor som segmentet j innehåller. H är parametern som anger hur stort värde på headway som är aktuellt.

$$x_k^{begin} - x_k^{begin} \geq H\gamma_{kk} - M(1 - \gamma_{kk}) \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k} \ \& \ dir_k = dir_{\hat{k}} \ \& \ nrB_j > 1 \quad 5.2$$

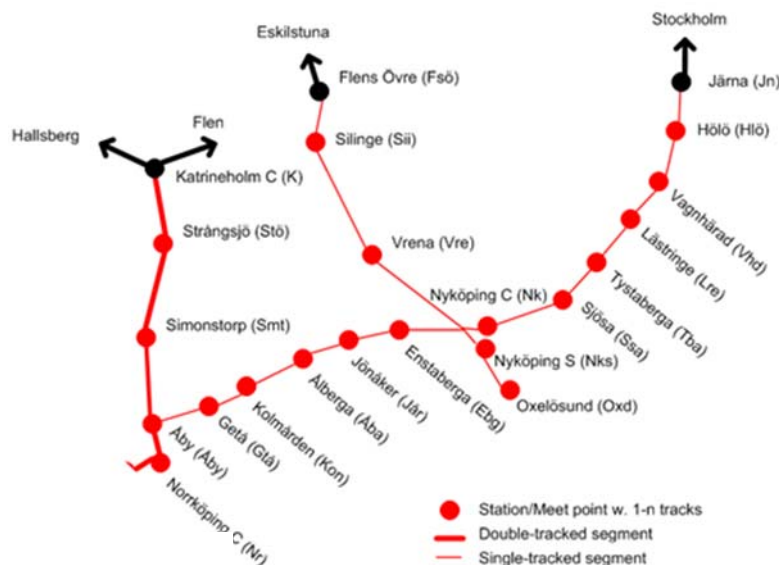
$$x_k^{end} - x_k^{end} \geq H\gamma_{kk} - M(1 - \gamma_{kk}) \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k} \ \& \ dir_k = dir_{\hat{k}} \ \& \ nrB_j > 1 \quad 5.3$$

$$x_k^{begin} - x_k^{begin} \geq H\lambda_{kk} - M(1 - \lambda_{kk}) \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k} \ \& \ dir_k = dir_{\hat{k}} \ \& \ nrB_j > 1 \quad 5.4$$

$$x_k^{end} - x_k^{end} \geq H\lambda_{kk} - M(1 - \lambda_{kk}) \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k} \ \& \ dir_k = dir_{\hat{k}} \ \& \ nrB_j > 1 \quad 5.5$$

5.3 Modellering av järnvägstrafik på stationer

Den enkelspåriga delsträckan Åby-Järna samt den dubbelspåriga delsträckan Norrköping-Katrineholm ingår i STEG-projektet och på dessa två delsträckor finns i huvudsak fem olika typer av stationer, se nedan.



Figur 3. Del av det svenska järnvägsnätet som modelleras exkl. svartmarkerade delar och Norrköpings station.

Tågrörelserna genom dessa typer av stationer och de restriktioner som finns för att separera tågen behöver därför modelleras på olika sätt. Vi kommer nedan att gå igenom och föreslå en matematisk modell över de fem stationstyper och de anges med stigande komplexitet.

Vi har huvudsakligen utgått ifrån dokument från STEG-projektet (dokumentet² anges fortsättningsvis som *STEG-rapporten*) samt haft kontakt med framför allt Jörgen Hwargård,

² Förstudierapport BT 05016 2005-11-15 ifrån STEG, Jörgen Hwargård.

Banverket, för att få mer information om stationernas begränsningar och hur de används i tågtrafiken. Vi utgår ifrån existerande modeller som vi har utvecklat inom OAT(+) (www.bth.se/tek/oatplus) och förfinat dessa för att inkludera en ökad detaljnivå för vissa stationer. I STEG-rapporten presenteras relationer mellan olika tågvägar för en station i en matris. Vi har valt att använda en liknande representation men modifierat den för att explicit kunna se vilka spår som nyttjas och hur dessa regleras av våra matematiska villkor i olika situationer. Följande villkor för resp. station är tillägg till redan definierade grundläggande villkor, se Bilaga 1, för att inkludera vissa detaljer i högre grad än tidigare som kan ha en märkbar effekt i vissa omplaneringsscenarier.

För vissa stationer är det nödvändigt att separera infarter och även utfarter. Vi introducerar därför de binära variablerna in_{kk} och out_{kk} . in_{kk} syftar till att separera två tågs infart till angiven station och där tåg k inkommer först medför att $in_{kk} = 1$. out_{kk} fungerar på samma sätt fast syftar till att separera utfarter. För enkelhetens skull använder vi i denna beskrivning även två parametrar för att avgöra vilket håll tåget för event k kommer ifrån (dir_k^{in}) samt åt vilket håll det ska (dir_k^{out}). Parametern ∇_j används ofta för att representera tid för clearance av blocksträckor och tågvägar i konflikt för segment j i olika situationer men i praktiken kan det krävas en parameter för samtidiga infarter och en annan för samtidig infart/utfart och beroende på vilka spår som används men vi har inte särskiljt dessa här då värdena inte är kända ännu. Notera även att det finns andra relationer som också behöver separeras än de som uttryckligen beskrivs men de täcks då redan av andra villkor för t ex närliggande linjesträckor.

1. ESIK/ESIL - Enkelspårsstation som tillåter samtidig infart

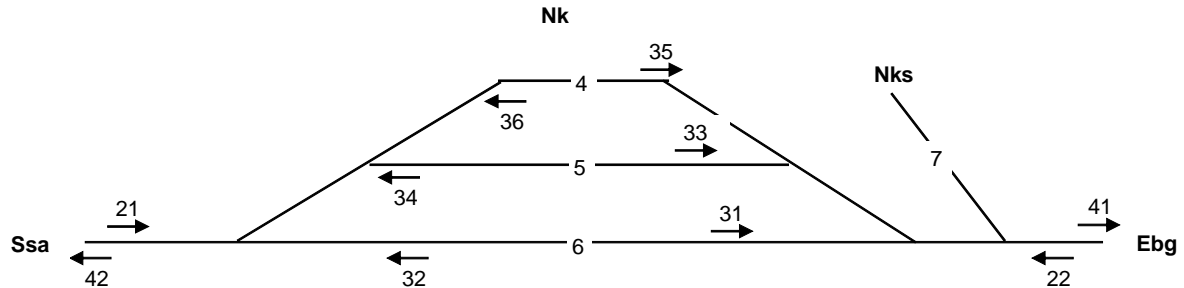


Figur 4. Getå station³.

Inga ytterligare villkor utöver de som nämns i Bilaga 1 krävs för att separera tågrörelser genom en ESIK/ESIL-station förutsatt att längden på stationsspåren är tillräckligt långa för respektive tåg. Om spåren är för korta för t ex vissa godståg hanteras detta genom att man infogar en längre ”clear time” för tåget som kompenserar att spåret används delvis simultant som ytterligare spår vid in- och utfart.

³ Excel-filen ”Testdata tågvägar mm MK”, STEG.

2. Enkelspårsstation som ej tillåter samtidig infart eller samtidig infart/utfart



Figur 5. Nyköping station².

Exempel på en sådan station är Nyköping och som alltså inte tillåter samtidig infart eller samtidig infart/utfart medan samtida utfarter (åt olika håll naturligtvis) är tillåtet.

Eftersom villkor som hanterar enkelspårsdriften in till och ut från Nyköping redan beskrivits i tidigare dokument inom OAT så är det endast villkor för att separera samtidigt infart/utfart för tåg åt samma håll samt samtida infarter ifrån olika håll (förutsatt att gällande ”release times” är snarlika, annars måste vissa ytterligare villkor som för Åby nedan inkluderas).

Separerar samtidig infart från olika håll:

$$x_k^{begin} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * in_{k\hat{k}} - K(1 - in_{k\hat{k}}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Nk : k < \hat{k}, dir_k^{in} \neq dir_{\hat{k}}^{in} \quad 5.6$$

$$x_k^{begin} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j (1 - in_{k\hat{k}}) - K * in_{k\hat{k}} \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Nk : k < \hat{k}, dir_k^{in} \neq dir_{\hat{k}}^{in} \quad 5.7$$

Separerar samtidig infart/utfart när tågen kommer ifrån/ska åt samma håll:

$$x_k^{end} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * (1 - \gamma_{k\hat{k}}) - K\gamma_{k\hat{k}} \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Nk : k < \hat{k}, dir_k^{out} \neq dir_{\hat{k}}^{in} \quad 5.8$$

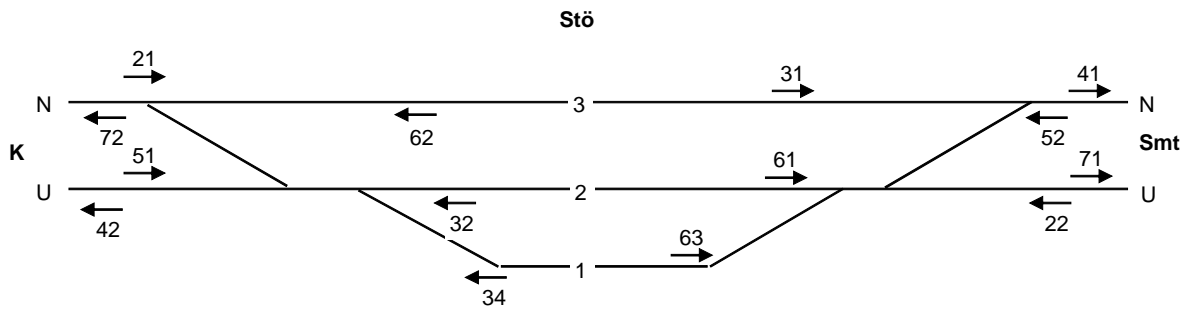
$$x_k^{end} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * (1 - \lambda_{k\hat{k}}) - K\lambda_{k\hat{k}} \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Nk : k < \hat{k}, dir_k^{out} \neq dir_{\hat{k}}^{in} \quad 5.9$$

$$\lambda_{k\hat{k}} + in_{k\hat{k}} \leq 1 \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Nk : k < \hat{k} \quad 5.10$$

$$\gamma_{k\hat{k}} \leq in_{k\hat{k}} \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Nk : k < \hat{k} \quad 5.11$$

3. Strångsjö (Stö)

De specialrestriktioner som råder på Stö beror dels på att det saknas en fysisk länk mellan vissa spår in på/ut från Stö som vi kan se i figuren nedan, dels är vissa tågvägar i konflikt såsom 21-31—61-41. De villkor som behövs för att modellera dessa restriktioner är:

Figur 6. Strångsjö station⁴.

Fysiska begränsningar gällande otillåtna tågvägar (U-spår anges som spår '1', och N-spår som spår '2'):

$$q_{k1} + q_{k+1,3} \leq 1 \quad k, (k+1) \in K_i, i \in T, k \in L_j : j = Stö \quad 5.12$$

$$q_{k1} + q_{k+1,3} \leq 1 \quad k, (k+1) \in K_i, i \in T, (k+1) \in L_j : j = Stö \quad 5.13$$

För samtliga tåg gäller att deras infarter måste separeras i tid såvida inget av tågen anländer spår 3 på Stö:

$$x_{\hat{k}}^{begin} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * in_{\hat{k}\hat{k}} - K(1 - in_{\hat{k}\hat{k}}) - K(q_{k3} + q_{\hat{k}3}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Stö : k < \hat{k} \quad 5.14$$

$$x_{\hat{k}}^{begin} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j(1 - in_{\hat{k}\hat{k}}) - K * in_{\hat{k}\hat{k}} - K(q_{k3} + q_{\hat{k}3}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Stö : k < \hat{k} \quad 5.15$$

Utfarter åt samma håll måste separeras i tid såvida inget av tågen kommer ifrån spår 3 på Stö:

$$x_{\hat{k}}^{end} - x_{\hat{k}}^{end} \geq \nabla_j * out_{\hat{k}\hat{k}} - K(1 - out_{\hat{k}\hat{k}}) - K(q_{k3} + q_{\hat{k}3}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Stö : k < \hat{k}, dir_k^{out} = dir_{\hat{k}}^{out} \quad 5.16$$

$$x_{\hat{k}}^{end} - x_{\hat{k}}^{end} \geq \nabla_j(1 - out_{\hat{k}\hat{k}}) - K * out_{\hat{k}\hat{k}} - K(q_{k3} + q_{\hat{k}3}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Stö : k < \hat{k}, dir_k^{out} = dir_{\hat{k}}^{out} \quad 5.17$$

Infart/Utfart för tåg åt samma håll måste separeras i tid såvida inget av tågen kommer ifrån spår 3 på Stö eller att det senare avgående tåget kommer ifrån spår 2:

$$x_{\hat{k}}^{end} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * (1 - \gamma_{\hat{k}\hat{k}}) - K\gamma_{\hat{k}\hat{k}} - K(q_{k3} + q_{k2} + q_{\hat{k}3}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Stö : k < \hat{k}, dir_k^{out} \neq dir_{\hat{k}}^{in} \quad 5.18$$

$$x_{\hat{k}}^{end} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * (1 - \lambda_{\hat{k}\hat{k}}) - K\lambda_{\hat{k}\hat{k}} - K(q_{\hat{k}3} + q_{\hat{k}2} + q_{k3}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Stö : k < \hat{k}, dir_k^{out} \neq dir_{\hat{k}}^{in} \quad 5.19$$

Infart/Utfart för tåg åt olika håll måste separeras i tid såvida inget av tågen använder spår 3 på Stö:

$$x_{\hat{k}}^{end} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * (1 - \gamma_{\hat{k}\hat{k}}) - K\gamma_{\hat{k}\hat{k}} - K(q_{k3} + q_{\hat{k}3}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Stö : k < \hat{k}, dir_k^{out} = dir_{\hat{k}}^{in} \quad 5.20$$

$$x_{\hat{k}}^{end} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * (1 - \lambda_{\hat{k}\hat{k}}) - K\lambda_{\hat{k}\hat{k}} - K(q_{\hat{k}3} + q_{k3}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Stö : k < \hat{k}, dir_k^{out} = dir_{\hat{k}}^{in} \quad 5.21$$

⁴ Excel-filen "Testdata tågvägar mm MK", STEG.

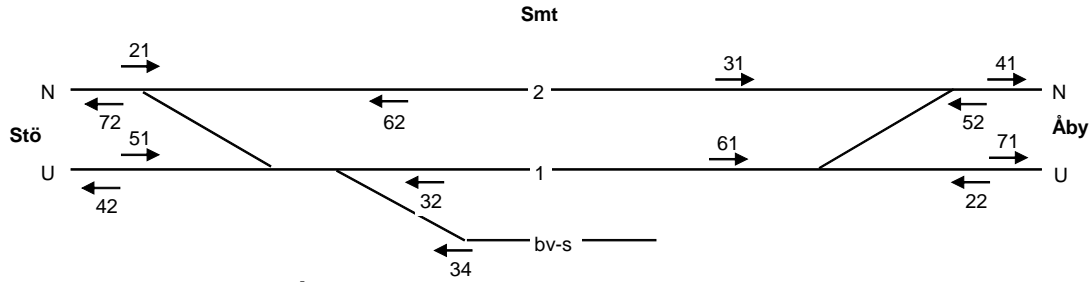
$$\lambda_{k\hat{k}} + \hat{i}n_{k\hat{k}} \leq 1 \quad k, \hat{k} \in L_j, j = St\ddot{o} : k < \hat{k} \quad 5.22$$

$$\lambda_{k\hat{k}} + \hat{o}ut_{k\hat{k}} \leq 1 \quad k, \hat{k} \in L_j, j = St\ddot{o} : k < \hat{k} \quad 5.23$$

$$\gamma_{k\hat{k}} \leq \hat{i}n_{k\hat{k}} \quad k, \hat{k} \in L_j, j = St\ddot{o} : k < \hat{k} \quad 5.24$$

$$\gamma_{k\hat{k}} \leq \hat{o}ut_{k\hat{k}} \quad k, \hat{k} \in L_j, j = St\ddot{o} : k < \hat{k} \quad 5.25$$

4. Simonstorp



Figur 7. Simonstorp station⁵.

Fysiska begränsningar gällande otillåtna tågvägar (U-spår anges som spår '1', och N-spår som spår '2'). Vi hänvisar till spåret *bv-s* som spår 3.:

$$q_{k1} + q_{k+1,2} \leq 1 \quad k, (k+1) \in K_i, i \in T, k \in L_j : j = Smt \quad 5.26$$

$$q_{k1} + q_{k+1,2} \leq 1 \quad k, (k+1) \in K_i, i \in T, (k+1) \in L_j : j = Smt \quad 5.27$$

$$q_{k3} = 0 \quad k, (k+1) \in K_i, i \in T, k \in L_j, (k+1) \in L_j : j = Smt, \hat{j} = Smt - \hat{A}by \quad 5.28$$

$$q_{k+1,3} = 0 \quad k, (k+1) \in K_i, i \in T, k \in L_j, (k+1) \in L_j : j = Smt - \hat{A}by, \hat{j} = Smt \quad 5.29$$

Om tåg B ska förbigå tåg A där tåg A kommer in på N-spåret till spår 2 och tåg B kommer in på U-spåret och båda ska ut på N-spåret fast i omvänd ordning så är tåg A:s infart i konflikt med tåg B:s utfart pga. för kort skyddsavstånd⁶. $io_{k\hat{k}}$ är binär och avgör huruvida villkor som syftar till att separera ett tågs infart till Smt från ett annat tågs utfart ska vara aktivt (=1) eller inte (=0):

$$q_{k1} + q_{k+1,2} \leq 1 + io_{k\hat{k}} \quad k, (k+1) \in K_i, i \in T, k, \hat{k} \in L_j : j = Smt, k < \hat{k} \quad 5.30$$

$$q_{\hat{k}1} + q_{\hat{k}+1,2} \leq 1 + io_{k\hat{k}} \quad \hat{k}, (\hat{k}+1) \in K_i, i \in T, k, \hat{k} \in L_j : j = Smt, k < \hat{k} \quad 5.31$$

$$x_k^{end} - x_{\hat{k}}^{begin} \geq \nabla_j * (1 - \gamma_{k\hat{k}}) - K\gamma_{k\hat{k}} - K(1 - io_{k\hat{k}}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Smt : k < \hat{k}, dir_k^{out} = dir_{\hat{k}}^{out} \quad 5.32$$

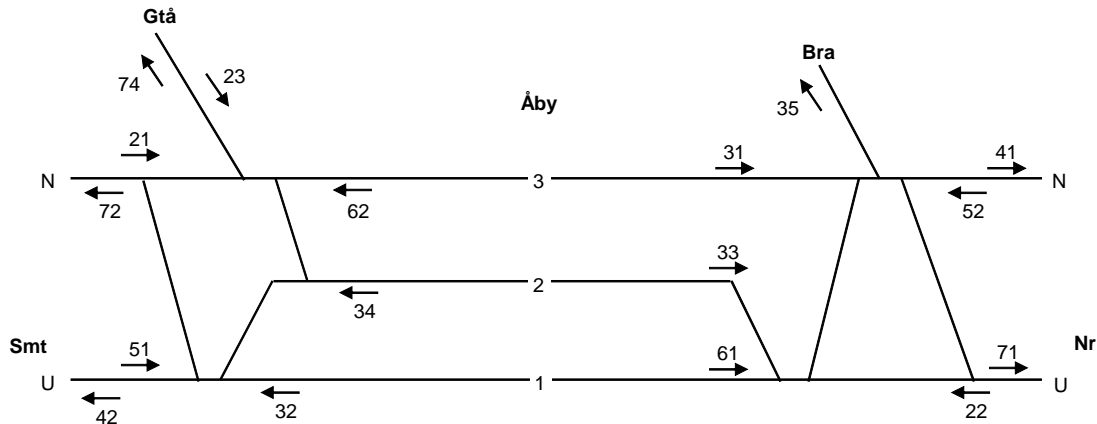
$$x_{\hat{k}}^{end} - x_k^{begin} \geq \nabla_j * (1 - \lambda_{k\hat{k}}) - K\lambda_{k\hat{k}} - K(1 - io_{k\hat{k}}) \quad k, \hat{k} \in L_j, j = Smt : k < \hat{k}, dir_k^{out} = dir_{\hat{k}}^{out} \quad 5.33$$

⁵ Excel-filen "Testdata tågvägar mm MK", STEG.

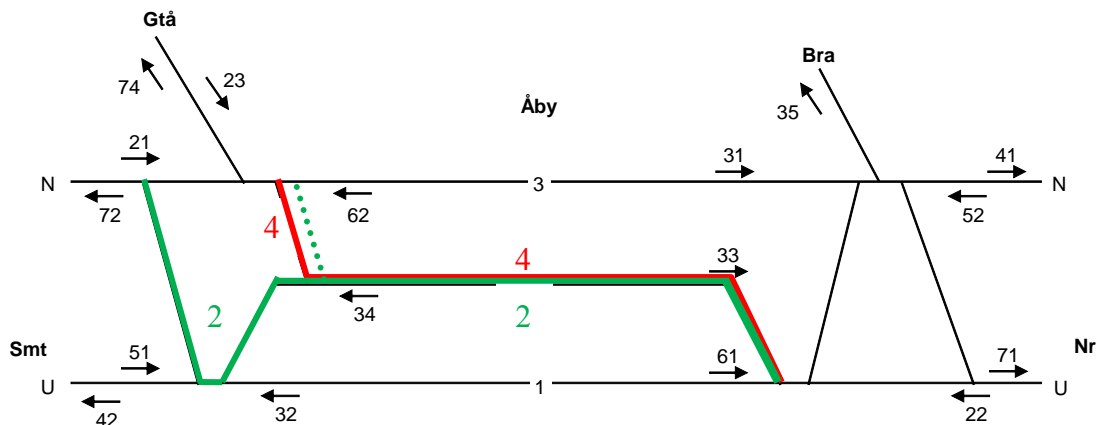
⁶ Se s. 21 i STEG-rapporten.

5. Åby

Åby utgör en förgrening/sammanslutning av de båda delsträckorna och fortsättningen på Södra stambanan söder ut mot Norrköping (Nr) och vidare ner mot Malmö.



Figur 8a. Åby station/trafikplats⁷.



Figur 8b. Modell av Åby station. Den streckade gröna linjen visar att tåg ifrån/till Getå kan nå spår 2/4 medan tåg kommande ifrån Smt på N-spåret bara kan nå spår 4 den vägen och spår 2 bara via U-spåret, dvs. den heldragna gröna linjen.

Vi har valt att representera spår 2 på Åby och dess utfartsvägar mot Simonstorp (Smt) genom att ha två olika resurser (som naturligtvis dock ej kan användas simultant). Skälet till detta är att utfarten från Åby spår 2 till U och N-spåret mot Smt och dess villkor för tågvägar är komplicerade. Det finns en mängd parvisa relationer mellan tågvägar som är tillåtna i sig men som ej kan existera tillsammans med andra par och att uttrycka vilka parvisa relationer som ej kan samexistera blir onödigt komplext. Istället väljer vi att (i vår modell) dela upp spår 2 i två olika resurser där det modifierade spår 2 (SP2) utgörs av den gröna linjen som förbinder spår 2 på Åby med U-spåret mot Smt och vidare upp mot N-spåret via den vänstra linjen. Det fiktiva nya spåret 4 (SP4) löper sedan parallellt med SP2 fram tills den övre förbindelselinjen med N-spåret mot Smt börjar. Då får man en explicit allokering av tågväg ut från det verkliga spår 2 eftersom SP4 bara förbinder N-spåret och är

⁷ Excel-filen "Testdata tågvägar mm MK", STEG.

i konflikt med tågvägen ifrån/till Getå. SP2 är således strikt i konflikt med tågväg ut ifrån spår 1 mot Smt. Tidigare hade vi exempelvis tre parvis tillåtna tågvägsrelationerna:

- A. 23-31--34-72 (i praktiken via den vänstra förbindelsen med N-spåret men det specificeras inte)
- B. 23-31--32-42 (via spår 1)
- C. 32-42--34-72 (i praktiken via den högra förbindelsen med N-spåret, annars korsande tågväg, men det specificeras inte)

Däremot kan inte 23-31, 32-42 och 34-72 existera samtidigt då den senare i praktiken/implicit måste välja en fysisk väg som antingen korsar den första eller andra men vilken väg som väljs anges inte explicit och kan därför inte hanteras av den matematiska modell vi använder som bygger på parvisa relationer mellan tåg. Med den nya modellen av Åby kan vi dock allokeras explicit utfartsväg och då tillämpa vår matematiska representation även på Åby station. Resultatet blir då följande för exemplet ovan:

- A. 23-31--34-72 (via SP2 eller SP4, men SP4 i konflikt med infart från Getå)
- B. 23-31--32-42 (via SP1)
- C. 32-42 (via SP1)--34-72 (via SP4 eller SP2, men SP2 i konflikt med utfart från SP1)

Vi ser då att endast en av A)-C) kan existera åt gången om vi samtidigt specificerar de begränsningar som gäller. Vi kompletterar våra villkor i vår MILP-modell (Mixed-Integer Linear Program) och anger att;

- SP2 och SP4 kan inte nyttjas samtidigt:

$$q_{kt} + q_{\hat{k}t} + q_{\hat{k}(t+2)} + q_{k(t+2)} \leq \lambda_{\hat{k}k} + \gamma_{\hat{k}k} + 1 \quad k, \hat{k} \in L_j, t = 2, j = \text{Åby}: k < \hat{k} \quad 5.34$$

- vissa spårförbindelser inte är fysiskt möjliga:

Då $k, (k+1) \in K_i, i \in T, k \in L_j, (k+1) \in L_j$:

$$q_{k3} + q_{k+1,1} \leq 1 \quad j = \text{Åby}, \hat{j} = \text{SmtÅby} \quad 5.35$$

$$q_{k4} + q_{k+1,1} \leq 1 \quad j = \text{Åby}, \hat{j} = \text{SmtÅby} \quad 5.36$$

$$q_{k+1,3} + q_{k,1} \leq 1 \quad j = \text{SmtÅby}, \hat{j} = \text{Åby} \quad 5.37$$

$$q_{k+1,4} + q_{k,1} \leq 1 \quad j = \text{SmtÅby}, \hat{j} = \text{Åby} \quad 5.38$$

$$q_{k+1,1} = 0 \quad j = \text{ÅbyGetå}, \hat{j} = \text{Åby} \quad 5.39$$

$$q_{k,1} = 0 \quad j = \text{Åby}, \hat{j} = \text{ÅbyGetå} \quad 5.40$$

För Åby och segmentet mellan Åby och Smt finns alltså två förbjudna par; (3,1) samt (4,1), dvs. från spår 3 och 4 på Åby kan man ej nå U-spåret mot Smt. För förbindelser mellan Getå och Åby (dvs. $\hat{j} = \text{ÅbyGetå}$) gäller (1,1) men eftersom segmentet endast har ett spår (och således ingen variabel $q_{(k+1)t}$) så blir villkoret för $t = \{1\}$ istället $q_{kt} = 0$.

Vi har valt att även här benämna U-spår och N-spår på segment mellan stationer som spår 1 resp. spår 2.

Vilka tågvägar ut från/in på station som är i konflikt och måste separeras i tid (t ex ut från/in mot SP1 och SP2 mot Smt är i konflikt liksom ut från/in mot SP3 och SP4) måste specificeras för stationen som helhet inkl. spår 4. Vi har, i likhet med STEG, valt att använda matriser för att illustrera vilka konflikter som finns mellan olika tågvägar och som inte regleras av tidigare villkor utan som måste definieras.

Vi har ett antal olika relationer beroende på var tågen kommer ifrån och ska till och huruvida de separeras (vice versa mellan A och B listas ej här men måste givetvis även formuleras och specificeras). Vi beaktar dessa utifrån om tågen har samma eller olika riktning. Helmörka (klarröda och svarta) fält i matrisen innebär att motsvarande relationer är förbjudna av olika skäl och hanteras av redan existerande villkor. Skuggade fält med angivna tågvägar är konflikter medan vita fält med angivna tågvägar är tillåtna relationer.

Vi har ett antal variabler för tågrörelserna genom Åby;

in_{kk} är binär och avgör huruvida ett villkor som syftar till att separera två tågs infart till Åby ska vara aktivt (=1) eller inte (=0).

io_{kk} är binär och avgör huruvida ett villkor som syftar till att separera ett tågs infart till Åby från ett annat tågs utfart ska vara aktivt (=1) eller inte (=0).

out_{kk} är binär och avgör huruvida ett villkor som syftar till att separera två tågs utfart till Åby ska vara aktivt (=1) eller inte (=0).

x_{kk} är binär och avgör om tåget associerat med event k ska ankomma Åby före tåget associerat med k' (=1) eller vice versa (=0). Betydelsen av variabelns värde är irrelevant då $in_{kk} = 0$. Den ska inte förväxlas med x_k^{begin} och x_k^{end} .

y_{kk} är binär och avgör om tåget associerat med k ska avgå från Åby före tåget associerat med k' (=1) eller vice versa (=0). Betydelsen av variabelns värde är irrelevant då $out_{kk} = 0$.

λ_{kk} och γ_{kk} syftar, precis som tidigare, till att separera tågen och vid värdet '1' kommer det ena tåget både ankomma och lämna stationen innan nästa tåg ankommer.

Vi använder ovannämnda variabler i villkoren för konflikthanteringen vid infarter och utfarter. Vilka värden variablerna sedan kommer att anta beror på resp. relationen mellan tågen och anges därför specifikt för varje typ av infarts-/utfartsrelation. Alla relationer behöver inte samtliga variabler, men dessa fall beskrivs inte explicit utan det är underförstått för de relationer där resp. villkor inte är aktuella, t ex som för utfarter åt olika håll behöver tågvägarna inte hanteras mer än om det finns direkt konflikter och då hanteras detta av redan definierade villkor och variabler.

Då $k, \hat{k} \in L_j : j = \text{Åby} \& k < \hat{k}$ gäller att :

$$x_{\hat{k}}^{\text{begin}} - x_k^{\text{begin}} \geq \nabla_j x_{k\hat{k}} - K(1 - x_{k\hat{k}}) - K(1 - in_{k\hat{k}}) \quad 5.41$$

$$x_k^{\text{begin}} - x_{\hat{k}}^{\text{begin}} \geq \nabla_j (1 - x_{k\hat{k}}) - Kx_{k\hat{k}} - K(1 - in_{k\hat{k}}) \quad 5.42$$

$$x_{\hat{k}}^{\text{end}} - x_k^{\text{begin}} \geq \nabla_j (1 - \gamma_{k\hat{k}}) - K\gamma_{k\hat{k}} - K(1 - io_{k\hat{k}}) \quad 5.43$$

$$x_k^{\text{end}} - x_{\hat{k}}^{\text{begin}} \geq \nabla_j (1 - \lambda_{k\hat{k}}) - K\lambda_{k\hat{k}} - K(1 - io_{k\hat{k}}) \quad 5.44$$

$$x_{\hat{k}}^{\text{end}} - x_k^{\text{end}} \geq \nabla_j y_{k\hat{k}} - K(1 - y_{k\hat{k}}) - K(1 - out_{k\hat{k}}) \quad 5.45$$

$$x_k^{\text{end}} - x_{\hat{k}}^{\text{end}} \geq \nabla_j (1 - y_{k\hat{k}}) - Ky_{k\hat{k}} - K(1 - out_{k\hat{k}}) \quad 5.46$$

$$\gamma_{k\hat{k}} \leq x_{k\hat{k}} \quad 5.47$$

$$\gamma_{k\hat{k}} \leq y_{k\hat{k}} \quad 5.48$$

$$\lambda_{k\hat{k}} + x_{k\hat{k}} \leq 1 \quad 5.49$$

$$\lambda_{k\hat{k}} + y_{k\hat{k}} \leq 1 \quad 5.50$$

$$in_{k\hat{k}}, io_{k\hat{k}}, out_{k\hat{k}} \geq (\lambda_{k\hat{k}} + \gamma_{k\hat{k}}) \quad 5.51$$

Tåg i och î med infart från Nr

Från spår		1	2	1	2	1	2
	Till spår	1		2		3	
1	1				2232-5234		2232-5262
2				5232-2234		5232-2262	
1	2		2234-5232				2232-5262
2		5234-2232				5234-2262	
1	3		2262-5232		2262-5234		
2		5262-2232		5262-2234			

Tabell 2. Båda tågen har infart från höger (Nr). Om något av tågen kommer från spår 2 (N-spåret) in på spår 3 så är tågvägarna inte i konflikt men om ingen använder spår 3 eller någon använder spår 3 kommande från spår 1 så måste rörelserna separeras i tid. Se villkor nedan. I tabellen har vi sammanfogat spår 2 och 4 eftersom det inte påverkar villkoret.

Då $(k-1) \& k \in K_i, (\hat{k}-1) \& \hat{k} \in K_{\hat{i}}, i \& \hat{i} \in T, (k-1) \& (\hat{k}-1) \in L_j, k \& \hat{k} \in L_{\tilde{j}} : k < \hat{k}$

$$(1 - q_{k3}) + (1 - q_{\hat{k}3}) \leq 1 + in_{k\hat{k}} \quad j = Nr\text{Åby}, \tilde{j} = \text{Åby} \quad 5.52$$

$$q_{k3} + q_{(k-1)1} \leq 1 + in_{k\hat{k}} \quad j = Nr\text{Åby}, \tilde{j} = \text{Åby} \quad 5.53$$

$$q_{\hat{k}3} + q_{(\hat{k}-1)1} \leq 1 + in_{k\hat{k}} \quad j = Nr\text{Åby}, \tilde{j} = \text{Åby} \quad 5.54$$

Tåg i och î med infart från Smt/Getå

Från spår	Till spår	1	2	1	2	Getå	1	2	Getå	1	2	Getå
		1		2			4		3			
1	1				5161-2133	5161-2333		5161-2133	5161-2333		5161-2131	5161-2331
2				2161-5133		2161-2333			2161-2333			2161-2331
GTÅ												
1	2		5133-2161								5133-2131	5133-2331
2		2133-5161										2133-2331
GTÅ		2333-5161	2333-2161								2333-2131	
1	4											
2		2133-5161										2133-2331
GTÅ		2333-5161	2333-2161								2333-2131	
1	3											
2		2131-5161		2131-5133		2131-2333			2131-2333			
GTÅ		2331-5161	2331-2161	2331-5133	2331-2133			2331-2133				

Tabell 3. Båda tågen har infart från vänster (Smt eller Getå). Om ett tåg använder spår 3 och det andra spår 1 eller 2 på stationen så är tågvägarna inte i konflikt, men om ingen använder spår 3 eller någon använder spår 3 och den andra spår 4 (eller kommer ifrån Getå) så måste rörelserna separeras i tid. Se villkor nedan.

$$Då \quad (k-1) \& k \in K_i, (\hat{k}-1) \& \hat{k} \in K_{\hat{i}}, i \& \hat{i} \in T, (k-1) \in L_{j1}, (\hat{k}-1) \in L_{j2}, k \& \hat{k} \in L_{\tilde{j}} : k < \hat{k}$$

$$(1 - q_{k3}) + (1 - q_{\hat{k}3}) \leq 1 + in_{kk} \quad j1, j2 = Smt\hat{A}by / Get\hat{a}\hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}by \quad 5.55$$

$$q_{k3} + q_{\hat{k}4} \leq 1 + in_{kk} \quad j1, j2 = Smt\hat{A}by / Get\hat{a}\hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}by \quad 5.56$$

$$q_{\hat{k}3} + q_{k4} \leq 1 + in_{kk} \quad j1, j2 = Smt\hat{A}by / Get\hat{a}\hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}by \quad 5.57$$

$$q_{k3} \leq in_{kk} \quad j1 = Smt\hat{A}by, j2 = Get\hat{a}\hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}by \quad 5.58$$

$$q_{\hat{k}3} \leq in_{kk} \quad j2 = Smt\hat{A}by, j1 = Get\hat{a}\hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}by \quad 5.59$$

Tåg i och î med utfart mot Nr

Från spår	Till spår	1		2		3	
		1	2	1	2	1	2
1	1				6171-3341		6171-3141
	2			6141-3371		6141-3171	
2	1		3371-6141				3371-3141
	2	3341-6171				3341-3171	
3	1		3171-6141		3171-3341		
	2	3141-6171		3141-3371			

Tabell 4. Båda tågen har utfart mot höger (Nr). Om något av tågen kommer från spår 3 och ut på spår 2 (N-spåret) så är tågvägarna inte i konflikt men om ingen använder spår 3 eller någon använder spår 3 för att köra ut på spår 1 så måste rörelserna separeras i tid. Se villkor nedan. I tabellen har vi sammanfogat spår 2 och 4 eftersom det inte påverkar villkoret.

$$Då \quad k \& (k+1) \in K_i, \hat{k} \& (\hat{k}+1) \in K_{\hat{i}}, i \& \hat{i} \in T, k \& \hat{k} \in L_j, (k+1) \& (\hat{k}+1) \in L_{\tilde{j}} : k < \hat{k}$$

$$(1 - q_{k3}) + (1 - q_{\hat{k}3}) \leq 1 + out_{kk} \quad j = \hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}byNr \quad 5.60$$

$$q_{k3} + q_{(\hat{k}+1)} \leq 1 + out_{kk} \quad j = \hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}byNr \quad 5.61$$

$$q_{\hat{k}3} + q_{(k+1)} \leq 1 + out_{kk} \quad j = \hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}byNr \quad 5.62$$

Tåg i och î med utfart mot Smt/Getå

Från spår	Till spår	1		2			4			3		
		1	2	1	2	GTÅ	1	2	GTÅ	1	2	GTÅ
1	1				3242-3472	3242-3474		3242-3472	3242-3474		3242-6272	3242-6274
	2			3272-3442		3272-3474			3272-3474			3272-6274
	GTÅ											
2	1		3442-3272								3442-6272	3442-6274
	2	3472-3242										3472-6274
	GTÅ	3474-3242	3474-3272								3474-6272	
4	1											
	2	3472-3242										3472-6274
	GTÅ	3474-3242	3474-3272								3474-6272	
3	1											
	2	6272-3242		6272-3442		6272-3474			6272-3474			
	GTÅ	6274-3242	6274-3272	6274-3442	6274-3472			6274-3472				

Tabell 5. Båda tågen har utfart mot vänster (Smt eller Getå). Om båda tågen använder något av spår 1 och 2 (men inget ska mot Getå) samtidigt eller av spår 3 och 4 samtidigt så måste rörelserna separeras i tid. Om ett av tågen ska mot Getå medan andra tåget ska mot spår 2 via spår 2, så ska tågen också separeras. Se villkor nedan.

Då $k \& (k+1) \in K_i, \hat{k} \& (\hat{k}+1) \in K_{\hat{i}}, i \& \hat{i} \in T, k \& \hat{k} \in L_j, (k+1) \in L_{\tilde{j}1}, (\hat{k}+1) \in L_{\tilde{j}2} : k < \hat{k}$ gäller att:

$$q_{k3} + q_{\hat{k}3} + q_{k4} + q_{\hat{k}4} \leq 1 + out_{kk} \quad j = \text{Åby}, \tilde{j}1, \tilde{j}2 = \text{ÅbySmt} / \text{ÅbyGetå} \quad 5.63$$

$$q_{k1} + q_{\hat{k}1} + q_{k2} + q_{\hat{k}2} \leq 1 + out_{kk} \quad j = \text{Åby}, \tilde{j}1, \tilde{j}2 = \text{ÅbySmt} \quad 5.64$$

$$q_{k3} \leq out_{kk} \quad j = \text{Åby}, \tilde{j}1 = \text{ÅbySmt}, \tilde{j}2 = \text{ÅbyGetå} \quad 5.65$$

$$q_{\hat{k}3} \leq out_{kk} \quad j = \text{Åby}, \tilde{j}2 = \text{ÅbySmt}, \tilde{j}1 = \text{ÅbyGetå} \quad 5.66$$

Tåg i infart från Smt/Getå och tåg î med utfart mot Nr

Från spår	Till spår	1		2		4		3	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1			5161-3371	5161-3341	5161-3371	5161-3341	5161-3171	5161-3141
2				2161-3371	2161-3341	2161-3371	2161-3341	2161-3171	2161-3141
GTÅ									
1	2	5133-6171	5133-6141					5133-3171	5133-3141
2		2133-6171	2133-6141					2133-3171	2133-3141
GTÅ		2333-6171	2333-6141					2333-3171	2333-3141
1	4								
2		2133-6171	2133-6141					2133-3171	2133-3141
GTÅ		2333-6171	2333-6141					2333-3171	2333-3141
1	3								
2		2131-6171	2131-6141	2131-3371	2131-3341	2131-3371	2131-3341		
GTÅ		2331-6171	2331-6141	2331-3371	2331-3341	2331-3371	2331-3341		

Tabell 6. Tåg associerad med event k med infart från Smt/Getå och k^ från höger (Nr). Om inget av tågen använder spår 3 eller om tåg k använder spår 3 samtidigt som tåg k^ ska ut på spår 2, så måste tågvägarna separeras i tid. Se villkor nedan.

Då $(k-1) \& k \in K_i, \hat{k} \& (\hat{k}+1) \in K_{\hat{i}}, i \& \hat{i} \in T, k \& \hat{k} \in L_j, (k-1) \in L_{j1}, (\hat{k}+1) \in L_{\tilde{j}} : k < \hat{k}$ gäller att:

$$(1 - q_{k3}) + (1 - q_{\hat{k}3}) \leq 1 + io_{kk} \quad j1 = \text{GetåÅby} / \text{SmtÅby}, j = \text{Åby}, \tilde{j} = \text{ÅbyNr} \quad 5.67$$

$$q_{k3} + q_{(\hat{k}+1)2} \leq 1 + io_{kk} \quad j1 = \text{GetåÅby} / \text{SmtÅby}, j = \text{Åby}, \tilde{j} = \text{ÅbyNr} \quad 5.68$$

Det omvända förhållandet ska på liknande sätt även modelleras, dvs. om tåg \hat{i} har infart från Smt/Getå och tåg i har utfart mot Nr.

Tåg i med utfart mot Smt/Getå och tåg \hat{i} infart från Nr

Från spår		1	2	1	2	1	2	1	2
	Till spår	1		2		4		3	
1	1			3242-2234	3242-5234	3242-2234	3242-5234	3242-2262	3242-5262
	2			3272-2234	3272-5234	3272-2234	3272-5234	3272-2262	3272-5262
	GTÅ								
2	1	3442-2232	3442-5232					3442-2262	3442-5262
	2	3472-2232	3472-5232					3472-2262	3472-5262
	GTÅ	3474-2232	3474-5232					3474-2262	3474-5262
4	1								
	2	3472-2232	3472-5232					3472-2262	3472-5262
	GTÅ	3474-2232	3474-5232					3474-2262	3474-5262
3	1								
	2	6272-2232	6272-5232	6272-2234	6272-5234	6272-2234	6272-5234		
	GTÅ	6274-2232	6274-5232	6274-2234	6274-5234	6274-2234	6274-5234		

Tabell 7. Tågen är i konflikt om tåg i ska mot Getå samtidigt som tåg \hat{i} använder spår 3 eller då tåg i använder spår 2 i riktning mot Smt samtidigt som tåg \hat{i} använder spår 1.

Då $(\hat{k} - 1) \& \hat{k} \in K_{\hat{i}}, (k + 1) \& k \in K_i, i \& \hat{i} \in T, k \& \hat{k} \in L_j, (\hat{k} - 1) \in L_{j1} \& (k + 1) \in L_{\hat{j}}, : k < \hat{k} :$

$$q_{k2} + q_{\hat{k}1} \leq 1 + io_{\hat{k}\hat{k}} \quad j1 = Nr\hat{A}by, j = \hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}bySmt / \hat{A}byGetå \quad 5.69$$

$$q_{\hat{k}3} \leq io_{\hat{k}\hat{k}}, \quad j1 = Nr\hat{A}by, j = \hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}byGetå \quad 5.70$$

Det omvända förhållandet ska på liknande sätt även modelleras.

Tåg i med infart från Smt/Getå och tåg \hat{i} infart från Nr

Från spår		1	2	1	2	1	2	1	2
	Till spår	1		2		4		3	
1	1			5161-2234	5161-5234	5161-2234	5161-5234	5161-2262	5161-5262
	2			2161-2234	2161-5234	2161-2234	2161-5234	2161-2262	2161-5262
	GTÅ								
2	1	5133-2232	5133-5232					5133-2262	5133-5262
	2	2133-2232	2133-5232					2133-2262	2133-5262
	GTÅ	2333-2232	2333-5232					2333-2262	2333-5262
4	1								
	2	2133-2232	2133-5232					2133-2262	2133-5262
	GTÅ	2333-2232	2333-5232					2333-2262	2333-5262
3	1								
	2	2131-2232	2131-5232	2131-2234	2131-5234	2131-2234	2131-5234		
	GTÅ	2331-2232	2331-5232	2331-2234	2331-5234	2331-2234	2331-5234		

Tabell 8. Tågen har infart från olika håll, dvs. från vänster (Smt eller Getå) eller från höger (Nr). Om inget av tågen använder spår 3, eller om tåg \hat{i} ej använder spår 3 kommande ifrån spår 2 samt då tåg \hat{i} använder spår 3 och tåg i kommer från Getå så måste infarterna separeras i tid. Se villkor nedan.

Då $(k-1) \& k \in K_i, (\hat{k}-1) \& \hat{k} \in K_{\hat{i}}, i \& \hat{i} \in T, (k-1) \in L_{j1}, (\hat{k}-1) \in L_{j2}, k \& \hat{k} \in L_j : k < \hat{k}$

$$(1 - q_{k3}) + (1 - q_{\hat{k}3}) \leq 1 + in_{kk} \quad j1 = Smt\text{Åby} / Getå\text{Åby}, j2 = Nr\text{Åby}, j = \text{Åby} \quad 5.71$$

$$(1 - q_{\hat{k}3}) + q_{(\hat{k}-1)2} \leq 1 + in_{kk} \quad j1 = Smt\text{Åby} / Getå\text{Åby}, j2 = Nr\text{Åby}, j = \text{Åby} \quad 5.72$$

$$q_{\hat{k}3} \leq in_{kk} \quad j1 = Getå\text{Åby}, j2 = Nr\text{Åby}, j = \text{Åby} \quad 5.73$$

Det omvända förhållandet ska på liknande sätt även modelleras.

Tåg i infart från Smt/Getå och tåg \hat{i} med utfart mot Smt/Getå

Från spår	Till spår	1		2			4			3		
		1	2	1	2	Getå	1	2	GTÅ	1	2	GTÅ
1	1				5161-3472	5161-3474		5161-3472	5161-3474		5161-5262	5161-6274
2				2161-3442		2161-3474			2161-3474			2161-6274
GTÅ												
1	2		5133-3272								5133-5262	5133-6274
2		2133-3242									2133-6274	
GTÅ		2333-3242	2333-3272								2333-5262	
1	4	2133-3242										2133-6274
2		2333-3242	2333-3272								2333-5262	
GTÅ												
1	3	2131-3242		2131-3442		2131-3474			2131-3474			
2		2331-3242	2331-3272	2331-3442	2331-3472			2331-3472				
GTÅ												

Tabell 9.

Då $(k-1) \& k \in K_i, (\hat{k}+1) \& \hat{k} \in K_{\hat{i}}, i \& \hat{i} \in T, k \& \hat{k} \in L_j, (k-1) \in L_{j1} \& (\hat{k}+1) \in L_{j2}, : k < \hat{k}$: gäller att:

$$q_{\hat{k}3} + q_{\hat{k}4} + q_{k3} + q_{k4} \leq 1 + io_{kk} \quad j1 = Smt\text{Åby} / Getå\text{Åby}, j = \text{Åby}, \tilde{j} = \text{ÅbySmt} / \text{ÅbyGetå} \quad 5.74$$

$$q_{\hat{k}1} + q_{\hat{k}2} + q_{k1} + q_{k2} \leq 1 + io_{kk} \quad j1 = Smt\text{Åby}, j = \text{Åby}, \tilde{j} = \text{ÅbySmt} \quad 5.75$$

$$q_{k3} \leq io_{kk} \quad j1 = Smt\text{Åby}, j = \text{Åby}, \tilde{j} = \text{ÅbyGetå} \quad 5.76$$

$$q_{\hat{k}3} \leq io_{kk} \quad j1 = Getå\text{Åby}, j = \text{Åby}, \tilde{j} = \text{ÅbySmt} \quad 5.77$$

Det omvända förhållandet ska på liknande sätt även modelleras.

Tåg i infart från Nr och tåg \hat{i} med utfart mot Nr

Från spår	Till spår	1		2		3	
		1	2	1	2	1	2
1	1				2232-3341		2232-3141
2				5232-3371		5232-3171	
1	2		2234-6141				2234-3141
2		5234-6171				5234-3171	
1	3		2262-6141		2262-3341		
2		5262-6176		5262-3371			

Tabell 10. Samma restriktioner som för samtidiga utfarter mot Nr gäller här, dvs. om något av tågen använder spår 3 och in/ut från spår 2 (N-spåret) så är tågvägarna inte i konflikt men om ingen använder spår 3 eller någon använder spår 3 från/till spår 1 så måste rörelserna separeras i tid. Se villkor nedan. I tabellen har vi sammanfogat spår 2 och 4 eftersom det inte påverkar villkoren.

Då $(k-1) \& k \in K_i, (\hat{k}+1) \& \hat{k} \in K_{\hat{i}}, i \& \hat{i} \in T, k \& \hat{k} \in L_j, (k-1) \in L_{j1} \& (\hat{k}+1) \in L_{\hat{j}}, k < \hat{k}$: gäller att:

$$(1 - q_{k3}) + (1 - q_{\hat{k}3}) \leq 1 + io_{k\hat{k}} \quad j1 = Nr\hat{A}by, j = \hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}byNr \quad 5.78$$

$$q_{k3} + q_{(k-1)1} \leq 1 + io_{k\hat{k}} \quad j1 = Nr\hat{A}by, j = \hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}byNr \quad 5.79$$

$$q_{\hat{k}3} + q_{(\hat{k}+1)1} \leq 1 + io_{k\hat{k}} \quad j1 = Nr\hat{A}by, j = \hat{A}by, \tilde{j} = \hat{A}byNr \quad 5.80$$

Det omvända förhållandet ska på liknande sätt även modelleras.

Tåg i utfart mot Smt/Getå och tåg i med utfart mot Nr

Från spår	Till spår	1		2		4		3	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1			3242-3371	3242-3341	3242-3371	3242-3341	3242-3171	3242-3141
	2			3272-3371	3272-3341	3272-3371	3272-3341	3272-3171	3272-3141
	GTÅ								
2	1	3442-6171	3442-6141					3442-3171	3442-3141
	2	3472-6171	3472-6141					3474-3171	3474-3141
	GTÅ								
4	1								
	2	3472-6171	3472-6141					3474-3171	3474-3141
	GTÅ	3474-6171	3474-6141					3474-3171	3474-3141
3	1								
	2	6272-6171	6272-6141	6272-3371	6272-3341	6272-3371	6272-3341		
	GTÅ	6274-6171	6274-6141	6274-3371	6274-3341	6274-3371	6274-3341		

Tabell 11. Samtidiga utfarter åt olika håll är tillåtna för Åby.

Samtidiga utfarter åt olika håll (mot Smt/Getå resp. Nr) är tillåtna och behöver ej separeras.

Villkoren har modellerats i AMPL, använts i beräkningar med CPLEX och validerats både visuellt och numeriskt. Vilka värden på Δ_j som är aktuella i praktiken är oklart men i STEG-rapporten nämns 90 sekunder som är ett standardvärde för den s.k. stoppanmälanstiden⁸. I samma rapport anges det dock att i vissa relationer kan värdet vara större eller mindre men de exakta värdena har vi ingen kunskap om i nuläget och det finns inte heller ännu kartlagt och dokumenterat hos BV vad vi vet.

5.4 Metodutveckling – en ”Greedy”-algoritm

En s k “greedy” algoritm är en sorts heuristik. Det centrala för heuristiker är att de tillämpar (Reeves, 1995):

“a technique which seeks good (i.e. near-optimal) solutions at a reasonable

⁸ Steg-rapporten s. 26.

computational cost without being able to guarantee either feasibility or optimality, or even in many cases state how close to optimality a particular feasible solution is.”

Poängen är alltså att hitta en tillräckligt god lösning på relativt kort tid dock till bekostnad av att algoritmen *kan* missa den optimala lösningen. Vissa heuristiker, såsom *Greedy lokalsökning* (eng. Greedy local search, se (Pardalos and Resende, 2002) för mer information) kan för vissa problem ha svårt att utföra en tillräckligt bra och omfattande sökning och fastna i s k *lokala optimum* och inte kommer vidare. En *meta-heuristik*, vilken är en strategi som guidar andra heuristiker genom att tillämpa olika typer av regler och rutiner för att undvika detta problem (Glover and Laguna, 1997), kan därför vara mer effektiv. Exempel på meta-heuristiker är *Tabu Search* och *Simulated Annealing*, där den sistnämnda tillämpar slumpmässighet och accepterar vissa tillfälliga försämringar av lösningen för att undvika att fastna i lokala optimum.

Som beskrivits tidigare så är syftet med att utveckla en optimeringsalgoritm som komplement till att tillämpa mjukvara såsom CPLEX, att säkerställa att vi dels alltid hittar en giltig lösning, dels att vi hittar en tillräckligt god lösning inom relativt kort tid (inom 30 sekunder) och oberoende av vilken typ av störningssituation som uppträder.

Algoritmen tar hänsyn till de restriktioner som motsvarar de som specificeras av villkor 5.1-5.5, 5.12,5.13, 5.26-5.29, 5.35-5.40 samt villkoren i Bilaga 1. För samtliga linjesträckor har vi antagit $\Delta_j = 0$ s och för stationssträckor $\Delta_j = 30$ s. Värdet på H är tre minuter.

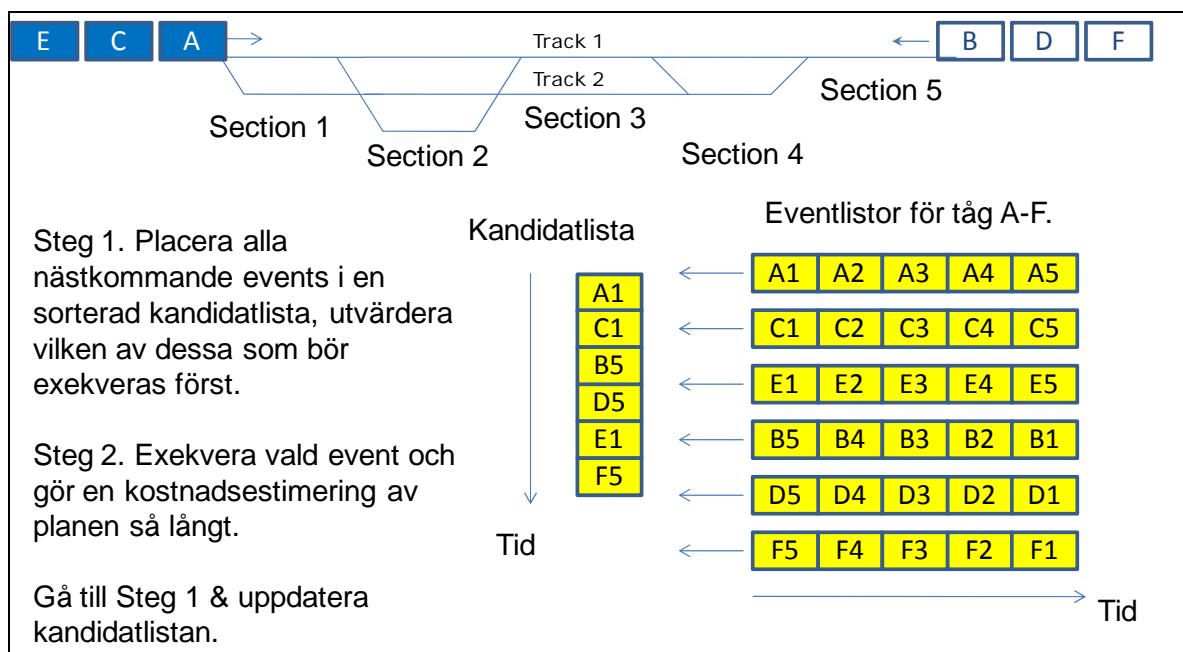
Algoritmen söker iterativt efter nästa event att exekvera utav den mängd events som utgörs av nästkommande event i resp. tågs tidtabell. Det vill säga, finns det n tåg som har events som ej ännu är exekverade är det n events som undersöks i varje steg för att välja den som är bäst lämpad att exekveras näst i det steget. De events som exekveras bygger upp ett träd där varje exekverad event är en nod och där den första noden, roten, är den första eventen som exekverats. Den sista eventen, lövet, är den som exekverats senast. Hela trädet sparas inte utan endast den bästa lösningen samt den aktiva gren i trädet som sökningen utgår ifrån. Varje nod har ett värde som är en kostnadsestimering (en nedre gräns) av den lösning som finns i den aktiva grenen ovan noden. Värdet på noder efter nod i är därmed alltså lika eller större.

Algoritmen har tre olika faser. Fas 1 är en startfas (pre-processing phase), medan i fas 2 utförs en djupgående sökning (depth-first search) för att snabbt hitta en giltig och förhoppningsvis tillräckligt bra lösning, dvs. skapa den första kompletta grenen i trädet. I fas 3 använder algoritmen den tid som återstår (av de 30 s i detta fall) för att gå tillbaka till noder med ett lägre kostnadsvärde än det för den bästa funna lösningen i trädets första gren och expandera grenen på bästa sätt för att hitta en bättre lösning än den första.

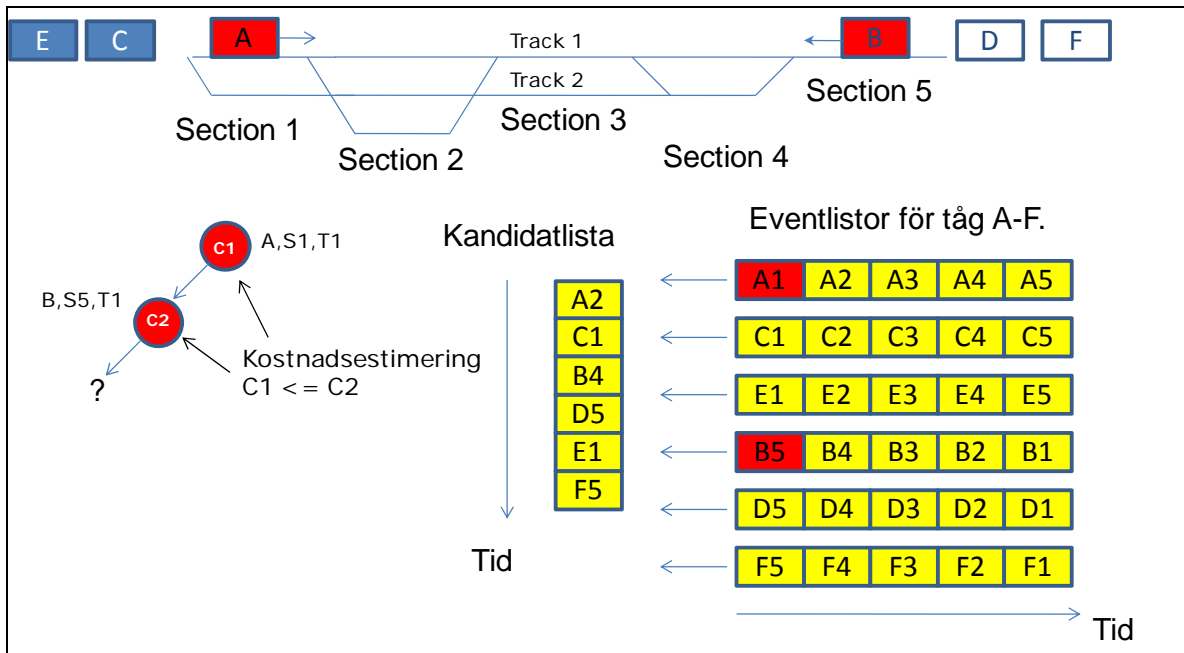
I fas 1 exekveras först de events som är aktiva när störningen inträffar och starttiden för dem samt allokerat spår blir som planerat. Den första ej exekverade eventen i varje tågs kronologiskt sorterade eventlista läggs i en kandidatlista sorterad efter maxvärdet av 1) den tidigaste möjliga starttiden och 2) dess planerade starttid. Kandidaten med den tidigaste starttiden utvärderas först.

Först kontrollerar algoritmen om det finns något ledigt spår för eventen och om inte så fortsätter den istället att utvärdera nästa event i kandidatlistan. Om tillgängligt spår finns utförs en *deadlock-analys* samt en analys av om det föreligger *intressekonflikt* gällande tillgång till spår på just det segmentet. Om intressekonflikt finns mellan två eller fler events (dvs. tåg) som är planerade för det segmentet (dessa events måste dock inte finnas i kandidatlistan) upptäcks, beräknas kostnaden för de olika konfliktalternativen. Det vill säga, om tåg A är under utvärdering för att få ett spår allokerat före tåg B och om detta potentiellt skulle försena tåg B, så beräknas en nettominimikostnadsökning (*net minimum expected cost increase*) som tar hänsyn till aktuell försening och relevanta bufferttider. Om värdet är positivt, indikerar det att på kort sikt skulle tåg B drabbas mer än vad tåg A skulle vinna på att få tillgång till ett spår först och följaktligen att det skulle vara mest kostnadseffektivt att prioritera tåg B. Vilken eventuell ytterligare merförsening valet skulle kunna innebära för ett tredje tåg ingår dock inte i analysen.

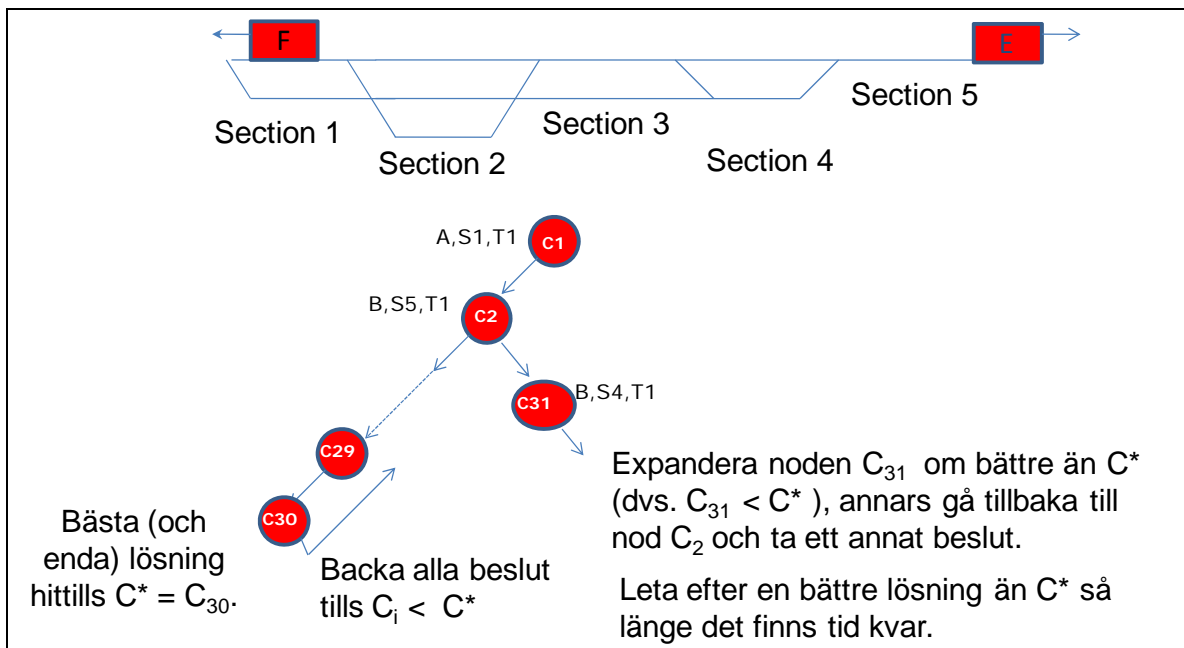
När den bästa eventen i kandidatlistan har identifierats så exekveras den (dvs. den blir aktiverad) och allokeras en starttid och ett spår i linje med gällande restriktioner. Eventuell föregående event för det berörda tåget avslutas följaktligen när den nya aktiveras och den resurs som var allokerad frigörs. En nod som representerar att den nyaktiverade eventen allokerats ett visst spår bygger på trädet och nodens ”förälder” (dvs. dess *parent node*) lagrar i sitt minne vilka direkt underliggande noder (dvs. *child nodes*) den har haft. En kostnadsestimering för den nya ej ännu kompletta lösningen beräknas genom att den samtliga tågs minsta möjliga försening summeras. Se Figur 9a-c för en illustration av algoritmens arbetsprocess.



Figur 9a.



Figur 9b.



Figur 9c.

När samtliga events har exekverats (och avslutats) och lagts till som noder i trädet har en första komplett och giltig lösning hittats och den sista nodens värde är den verkliga kostnaden för lösningen. Kostnaden kan vara angiven på valfritt sätt men vi har valt att i dessa scenarier summera samtliga tågs försening till dess slutdestination inom angivet trafikområde och tidshorisont (dvs. den sista eventen i eventlistan).

Algoritmen använder sedan resterande beräkningstid för att expandera trädet och söka vidare efter en bättre lösning. Undantaget är (dvs. då sökningen avbryts) om värdet på rotnoden är detsamma som den funna kompletta lösningens värde. Att värdena är lika innebär att det inte finns någon bättre lösning eftersom principen om att alla noder under en nod i är lika bra eller sämre gäller. När algoritmen går upp i trädet (s k *back-tracking*) för att för första gången välja en lämplig nod att expandera vidare från så väljs en nod vars värde är lägre än gällande övre gräns (dvs. *upper bound*). Den övre gränsen är då kostnadsvärdet för den hittills bästa funna kompletta lösningen. Algoritmen fortsätter att expandera den aktiva grenen tills den hittar en ny komplett bättre lösning (som då sparas) eller en intermediär nod som har ett värde som är större eller lika med den övre gränsen. När back-tracking sker på nytt så väljs återigen en nod med ett värde som är lägre eller samma som den övre gränsen. För att undvika att samma nod väljs åter och åter igen så får varje nod inte följas av en annan nod (dvs. en viss event allokerad ett visst spår) mer än en gång.

Algoritmen har implementerats i Java där en vektor med fördefinierad storlek har använts för att lagra den aktiva grenen av sökträdet. En andra vektor används för att spara den bästa funna kompletta lösningen (dvs. motsvarande gren)

5.5 Simuleringsexperiment och utvärdering av algoritmen

I diskussion med Banverket har vi fokuserat på trafiken i området för Norrköpings distrikt (se Figur 10) dock med en mer detaljerad modell av den sträcka som anges i Figur 3. Alla spår tillåter trafik i båda riktningar och sträckan Katrineholm-Åby-Mjölby är dubbelspårig medan övriga linjer är enkelspåriga. Stationerna har mellan två och 14 spår med undantag från Norsholm (Nh) som bara har ett. Linjesträckorna mellan Katrineholm och Åby innehåller sju konsekutiva blocksträckor vardera medan sträckan mellan Åby och Norrköping innehåller två konsekutiva linjesträckor precis som sträckorna Ålberga-Kolmården samt Linköping-Lingham. För stationerna Åby, Simonstorp samt Strångsjö är endast tillåtna tågvägarna inkluderade medan för övriga stationer där modellen inte innehåller denna information så antar vi att alla tågvägar in till och ut från stationerna är tillåtna. Vi har tillämpat algoritmen på tre olika typer av störningskategorier:

Kategori 1 innebär att ett tåg anländer trafikdistriktet med en viss försening eller att det får en temporär försening på ett segment inom distriktet.

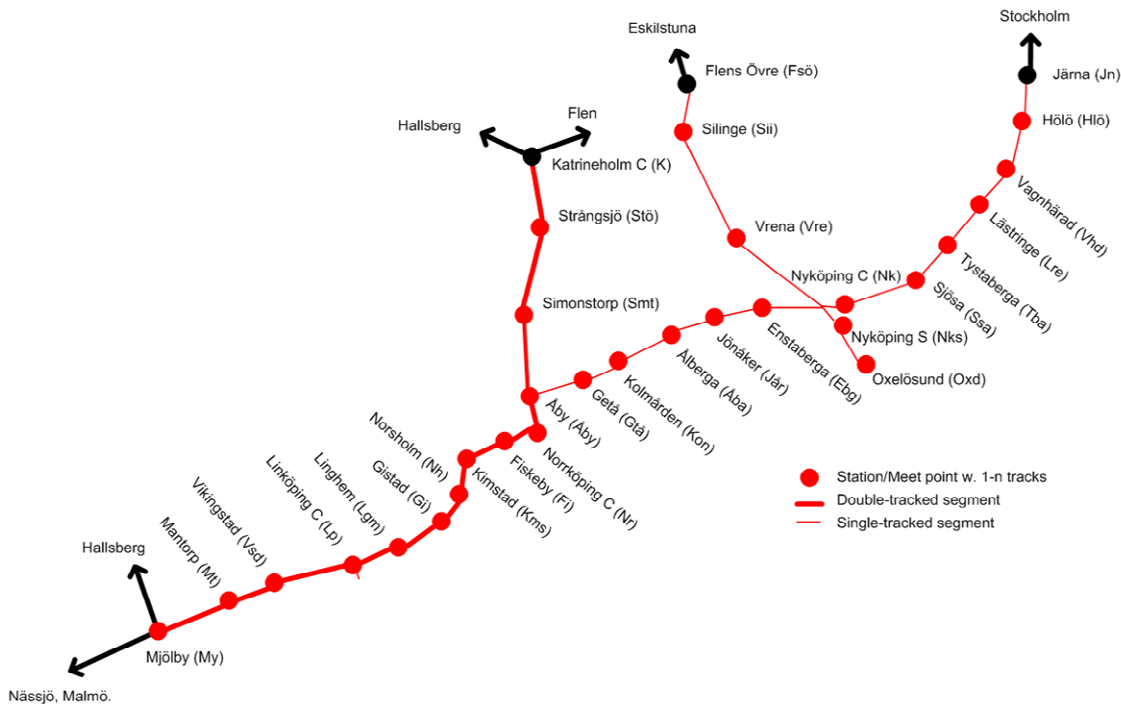
Kategori 2 innebär att ett tåg har en mer ”kronisk” försening såsom nedsatt accelerationsförmåga vilket resulterar i ökade traverseringstider.

Kategori 3 syftar på ett infrastrukturfel som ger upphov till exempelvis en hastighetsnedsättning på en viss linjesträcka och som resulterar till att samliga tåg som passerar får ökade traverseringstider.

Vi har använt tidtabellsdata från Trainplan men först kalibrerat tidtabellsdatan för att göra den konfliktfri och sedan simulerat att störningarna inträffar i rusningstrafik på eftermiddagen den 23 april 2009. Vi har omplanerat trafiken inom en tidshorisont på 90 minuter med utgångspunkt från då resp. störning inträffat samt vi har tillåtit en maximal

beräkningstid på 30 s. En beskrivning av resp. scenario finns i Tabell 12 nedan samt i Bilaga 2. Scenario 1-10 tillhör kategori 1 medan 11-15 tillhör kategori 2 och 16-20 tillhör kategori 3.

För att utvärdera algoritmens prestanda har vi även löst ett urval av scenarierna med den optimeringsmodell som består av villkor 5.1-5.5, 5.12,5.13, 5.26-5.29, 5.35-5.40 samt villkoren i Bilaga 1 och tillämpat CPLEX 8.0 (med en maximal beräkningstid på 24 h). För samtliga linjesträckor har vi antagit $\Delta_j = 0$ s och för stationssträckor $\Delta_j = 30$ s. Värdet på H är tre minuter.



Figur 10. Nätverket som använts i simuleringsstudien.

5.6 Resultat och analys

Algoritmen finner i samtliga scenarier snabbt en första och även en andra giltig lösning men är sedan inte så effektiv i att hitta förbättringar. Eftersom det är enormt tidskrävande att lösa scenarierna till optimalitet och ibland även inte möjligt att hitta en tillåten lösning med CPLEX så har vi ännu inte lyckats göra en utvärdering för samtliga scenarier. I Tabell 12 nedan ges en överblick av scenarierna och utfallet. I kolumn 4 presenteras kostnadsvärdet för de lösningar som algoritmen hittar inom 30 s och det högsta värdet är således för den första funna kompletta lösningen. I den sjätte kolumnen anges först den bästa tillåtna lösning som CPLEX hittat (anges inget värde har CPLEX inte lyckats hitta en heltalslösning inom 24 h). Det andra värdet anger maxvärdet av de undre gränsvärden som CPLEX resp. algoritmen har hittat. Om CPLEX hittat en optimal lösning så är det optimala värdet detsamma som det undre gränsvärdet. I den femte kolumnen beräknas den största möjliga skillnaden mellan ett optimalt värde och den bästa lösningen som algoritmen hittat. Dessa värden ger dock mycket litet information i de fall där CPLEX har hittat en lösning

med ett stort gap (dvs. det är stor skillnad mellan dess undre gräns och bästa lösningsvärde) eller inte kunnat hitta en giltig lösning alls.

Vid en utvärdering av algoritmens prestanda och jämförelse med CPLEX kan vi först och främst se att CPLEX i merparten av fallen inte har kunnat generera en tillåten lösning trots tillåten söktid på 24 h. Vid en jämförelse med de lösningar som CPLEX genererat i de fall där ett optimum kunnat fastställas ser vi att CPLEX och algoritmen finner olika lösningar även om målfunktionsvärdena är snarlika. CPLEX tenderar att försena flertalet tåg innan de når sin slutdestination men ser till att de har en så liten slutlig försening som möjligt (dvs. i linje med målfunktionen). Algoritmens nuvarande sökstrategi, som har ett mer kortsiktigt perspektiv, undviker istället att försena ytterligare tåg såvida det inte verkligen medför en vinst. Vilken lösning som är den bästa från ett praktiskt perspektiv är svårt att säga generellt men det visar att det även finns fördelar med denna mer kortsiktiga sökstrategi. Det visar även hur komplicerat det kan vara att formulera en målfunktion som tar hänsyn till flera olika aspekter.

När det gäller algoritmens prestanda m a p de olika kategorierna kan vi se att för kategori 1 och 2 så presterar algoritmen förhållandevis bra. För kategori 3, däremot, har det varit svårt att finna bra jämförelsevärden men det till trots ser vi att algoritmen har svårt att hitta tillräckligt bra lösningar, se exempelvis scenario 18. Det indikerar återigen att en lösningsmetod kan behöva anpassa sin sökstrategi och målfunktion beroende på vissa egenskaper hos störningssituationen.

Nr	Scenario	# tåg/events/binära variabler	Funna lösningar (s)	Maxdiff (min)	Best solution (s)/LB(s)
1	Tåg 538 (norrgående X2000), försenat 12 min Linköping-Linghem.	48/560/7304	1489,1175	9,8	-/586
2	Tåg 538 (norrgående X2000), försenat 6 min Linköping-Linghem.	48/560/7304	751,437	3,5	-/226
3	Tåg 2138 (södergående intercity), försenat 12 min Katrineholm-Strängsjö	48/558/7245	1150,781	3,5	-/570
4	Tåg 2138 (södergående intercity), försenat 6 min Katrineholm-Strängsjö	48/558/7245	790,421	3,5	-/210
5	Tåg 80866 (norrgående intercitytåg), försenat 12 min Linköping-Linghem.	49/575/7521	1014, 930	10,3	-/315
6	Tåg 80866 (norrgående intercitytåg), försenat 6 min Linköping-Linghem.	49/575/7521	68, 53	0,9	0/0
7	Tåg 8764 (norrgående intercitytåg), försenat 12 min Mjölby-Mantorp.	50/567/7534	568, 499	0,2	-/486
8	Tåg 8764 (norrgående intercitytåg), försenat 6 min Mjölby-Mantorp.	50/567/7534	276, 207	1,4	-/126
9	Tåg 539 (södergående X2000), försenat 12 min Katrineholm-Strängsjö	50/570/7490	869, 800	5,7	-/458
10	Tåg 539 (södergående X2000), försenat 6 min Katrineholm-Strängsjö	50/570/7490	338, 269	2,9	-/98
11	Tåg 538 (norrgående X2000) med kronisk hastighetsnedsättning som medför 50% ökade körtider på alla linjesektioner med start Linköping-	48/560/7304	1547,1233	3,5	-/1022
12	Tåg 2138 (södergående intercity) med kronisk hastighetsnedsättning som medför 50% ökade körtider på alla linjesektioner med start Katrineholm-	48/558/7245	1049, 680	3,5	-/469
13	Tåg 80866 (norrgående intercity) med kronisk hastighetsnedsättning som medför 50% ökade körtider på alla linjesektioner med start Linköping-	49/575/7521	2329,2245	5,3	2148/1930
14	Tåg 8764 (norrgående intercity) med kronisk hastighetsnedsättning som medför 50% ökade körtider på alla linjesektioner med start Mjölby-	50/567/7534	1617,1455	6,6	1112,5/1062
15	Tåg 539 (södergående X2000) med kronisk hastighetsnedsättning som medför 50% ökade körtider på alla linjesektioner med start Katrineholm-	50/570/7490	1728,1659	1,0	1598,5/1598,5
16	Hastighetsnedsättning för alla tåg mellan Strängsjö och Simonstorp (alla tåg får en körtid på 27 min, jmf. 5-10 min planerad körtid) med start för det södergående godståget 43533.	46/508/5999	13850	0,0	-/13850
17	Hastighetsnedsättning för alla tåg mellan Åby och Simonstorp (alla tåg får en körtid på 20 min) med start för tåg 2138.	51/570/7646	7786,7767,7765,7746	8,9	-/6910
18	Hastighetsnedsättning för alla tåg mellan Åby och Norrköping (alla tåg får en körtid på 8 min) med start för tåg 2138.	49/565/7364	5457,5125	42,2	4756/2594
19	Hastighetsnedsättning för alla tåg mellan Mjölby och Mantorp (alla tåg får en körtid på 20 min) med start för tåg 8764.	50/567/7534	28883	318,1	-/9795
20	Hastighetsnedsättning för alla tåg mellan Linköping och Linghem (alla tåg får en körtid på 15 min) med start för tåg 538.	48/560/7304	23609,22967,22954	265,9	-/6999

Tabell 12. Simuleringsresultat. Tidshorisonten är 90 minuter för samtliga scenarier och algoritmen har haft en max tillåten beräkningstid på 30 s. Den sista kolumnen anger den bästa tillåtna lösning som vi kunnat finna med CPLEX 8.0 och en maximal beräkningstid på 24h. LB avser "lower bound" och anger den undre gräns för vilket lösningsvärde resp. scenario kan ha utan att förtälja huruvida det finns en tillåten lösning med detta värde eller bättre än ett som algoritmen eller CPLEX hittat.

6 Fortsatt arbete

Som vi har sett finns det viss förbättringspotential gällande lösningsmetoden generellt sett men framför allt gällande dess applicerbarhet vid hantering av störningar av kategori 3. En vidareutveckling av metoden skulle primärt syfta till att få sökalgoritmen mer effektiv så att den dels blir snabbare vid expansionen av trädet (dvs. att den kan undersöka fler noder per tidsenhet vilket kan uppnås genom förbättringar av koden samt genom att parallellisera sökprocessen med hjälp av multi-core processorer), dels att dess sökstrategi förbättras och att den oftare väljer ”rätt” noder att expandera. Att i större utsträckning undersöka skillnaderna mellan de lösningar CPLEX producerar med de från algoritmen skulle kunna ge ytterligare värdefull information om vilka avvägningar som bör göras i det kortsiktiga perspektivet för att uppnå samma lösningar som CPLEX genererar. Att använda multi-core processorer, se (Emer 2007), för att snabba upp sökningen innebär att flera grenar i trädet skulle kunna expanderas parallellt.

Det är många faktorer och restriktioner som påverkar hur trafiken flyter och hur tågen påverkar varandra och därmed även hur tågtrafiken vid en störning kan omplaneras på ett optimalt sätt. Huruvida dessa faktorer och restriktioner explicit ska modelleras och vilket inflytande de har och tillåts ha är en viktig frågeställning. I nuläget finns dessvärre inte data tillgängligt för att utvärdera detta men inom projektet STEG/STRATEG finns planer på att göra en noggrann kartläggning och beskrivning av en del av nätet.

Slutligen så ser vi att det finns ett behov av att i större utsträckning än tidigare kunna omsätta forskningsresultaten från OAT och OAT+ och utvärdera dem i samverkan med Banverket i en mer praktisk kontext. Som en del av fortsättningsprojektet OAT+ och inför ITS Världskongressen 2009 har ett samarbete med två andra forskningsprojekt finansierade av BV (DDTP som drivs av SICS och STEG/STRATEG som drivs av BV i samverkan med Uppsala Universitet) skett på initiativ av BV. Samarbetet har syftat till att påvisa nyttan och effekten av ett koncept som kombinerar dessa tre projekt. DDTP syftar till att utveckla en ny princip för tilldelning av tåglägen där det centrala är de leveransåtaganden som BV och resp. operator enas om. Dessa leveransåtaganden anger sedan i operativ drift i större utsträckning än idag vilken betydelse olika förändringar av tåglägen har (dvs. om BV kan förändra ett tågläge utan att det påverkar leveransåtagandet). För att kunna använda denna information i operativ drift vid en omplanering och därmed öka handlingsfriheten behöver dock trafikledaren beräkningsmässigt stöd baserade på den typen av metoder som utvecklats inom OAT+. I STEG/STRATEG-projektet har man även sett behovet av sådant beräkningsstöd och har utvecklat ett digitalt gränssnitt för trafikstyrningen som visar en interaktiv tidtabellsgraf för trafikledaren. Detta gränssnitt saknar dock matematiska modeller och algoritmer för att identifiera vissa typer av konflikter i grafen och ge förslag på hur de kan lösas på ett optimalt sätt. Vi önskar därför i ett fortsatt arbete intensifiera samarbetet med framför allt projektet kring utvecklingen och implementeringen av STEG-grafen och utvärdera hur våra utvecklade metoder skulle kunna fungera i en praktisk kontext och hur lämpliga omplaneringsförslagen bedöms vara.

7 Referenser

Banverket (Tågtrafikledningen), *Föreskrift TF601*, 2000-08-14.

Banverket, *Appendix 1 till STEG-projektets rapport BT 05016 2005-11-15*, 2005.

Billionnet, A., "Using integer programming to solve the train-platforming problem", *Transportation Science*, Vol. 37, No. 2, pp. 213–222, 2003.

Carey, M. "Extending a Train Pathing Model From One-Way to Two-Way Track", *Transportation Research B* 28, pp.395-400, 1994.

Carey, M., Carville, S., "Scheduling and Platforming Trains at Busy Complex Stations", *Transportation Research A* 37, pp.195-224, 2003.

Cordeau, J-F., Toth, P., Vigo, D., "A survey of optimization models for train routing and scheduling", *Transportation Science*, Vol. 32, No. 4, INFORMS, 1998, p. 380-404.

D'Ariano, A., Pacciarelli, P., Pranzo, M., "A branch and bound algorithm for scheduling trains on a railway network", *European Journal of Operational Research*, Vol. 32, No. 2, Elsevier Science Ltd, 2007, p. 643–657.

D'Ariano, Pranzo, M., "An advanced real-time train dispatching system for minimizing the propagation of delays in a dispatching area under severe disturbances", *Network Spatial Economy* 9, p. 63-84, 2009.

Ekman, J., *Slutrapport för projektet Beslutstöd för Operativ Omplanering*, SICS, Mars 2008.

Emer, J., Hill, M., Patt, Y., Yi, J., Chiou, D., Sendag, R., "Single-threaded vs. multithreaded: Where should we focus?" *IEEE Micro*, 27(6):14–24, Nov/Dec 2007.

Glover, F., Laguna, M., *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1997.

Jacobs, J., "Rescheduling", in: Hansen and Pachl (Eds.): *Railway Timetable & Traffic. Analysis, Modelling, Simulation*, Hamburg: Eurailpress, 2008.

Kroon, L., Huisman, D., Maróti, G., "Optimization models for railway timetabling", in: Hansen and Pachl (Eds.): *Railway Timetable & Traffic. Analysis, Modelling, Simulation*, Hamburg: Eurailpress, 2008.

Kroon, L., Romeijn, E., Zwaneveld, P., "Routing trains through railway stations: complexity issues", *European Journal of Operational Research*, No. 98, pp. 485-498, 1997.

Pardalos, P.M., Resende, G.C., *Handbook of applied optimization*, Oxford University Press, N.Y, USA, 2002.

Reeves, C.R. (ed.). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, McGraw-Hill, London, UK, 1995.

Radtke, A. “Infrastructure modelling”, in: Hansen and Pachl (Eds.): *Railway Timetable & Traffic. Analysis, Modelling, Simulation*, Hamburg: Eurailpress, 2008.

Schöbel, A, “Capacity constraints in delay management”, *Public Transport*, SpringerLink, 2009.

Törnquist, J., “Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms”, *Proceedings of ATMOS2005*, Palma de Mallorca, Spain, October 2005, Published within the Dagstuhl Research Online Publication Server (DROPS) <http://drops.dagstuhl.de/portals/ATMOS/>, 2005.

Törnquist, J., Persson, J.A., “N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances”, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, No. 3, Elsevier Science Ltd, 2007, p. 342-362.

Törnquist, J., “Railway traffic disturbance management: An experimental analysis of disturbance complexity, management objectives and limitations in planning horizon”, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, No. 3, Elsevier Science Ltd, 2007, p. 249-266.

Törnquist, J., Slutrapport för projektet *Omplanering Av Tåglägen (OAT)*, 2007.
www.bth.se/tek/oat.

UIC International Union of Railways, *UIC leaflet 406 Capacity*, France, 2004.

Zhou, X., Zhong, M., “Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds”, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, No. 3, Elsevier Science Ltd, 2007, p. 320-342.

8 Bilaga 1. Optimeringsmodell

Målfunktion

$$\text{Minimera } \sum_{i \in T} z_{n_i} \quad 8.1$$

Tågrestrukturer

$$x_k^{end} = x_{k+1}^{begin} \quad i \in T, k \in K_i : k \neq n_i \quad 8.2$$

$$x_k^{end} \geq x_k^{begin} + d_k \quad k \in E \quad 8.3$$

$$x_k^{begin} \geq b_k^{initial} \quad k \in E : h_k = 1 \quad 8.4$$

$$x_k^{begin} = b_k^{static} \quad k \in E : b_k^{static} > 0 \quad 8.5$$

$$x_k^{end} = e_k^{static} \quad k \in E : e_k^{static} > 0 \quad 8.6$$

Tekniska infrastrukturella restriktioner

$$\sum_{t \in P_j} q_{kt} = 1 \quad j \in B, k \in L_j \quad 8.7$$

$$\sum_{t \in P_j} t * q_{kt} = r_k^{track} \quad j \in B, k \in L_j : r_k^{fixed} = 1 \text{ (dvs. då } b_k^{static} > 0) \quad 8.8$$

$$q_{\hat{k}t} + q_{kt} - 1 \leq \lambda_{\hat{k}k} + \gamma_{\hat{k}k} \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k}, t \in P_j \quad 8.9$$

$$x_{\hat{k}}^{begin} - x_k^{end} \geq \Delta_j \gamma_{\hat{k}k} - M(1 - \gamma_{\hat{k}k}) \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k} \ \& \ (dir_k \neq dir_{\hat{k}} \ \parallel \ nrB_j = 1) \quad 8.10$$

$$x_k^{begin} - x_{\hat{k}}^{end} \geq \Delta_j \lambda_{\hat{k}k} - M(1 - \lambda_{\hat{k}k}) \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k} \ \& \ (dir_k \neq dir_{\hat{k}} \ \parallel \ nrB_j = 1) \quad 8.11$$

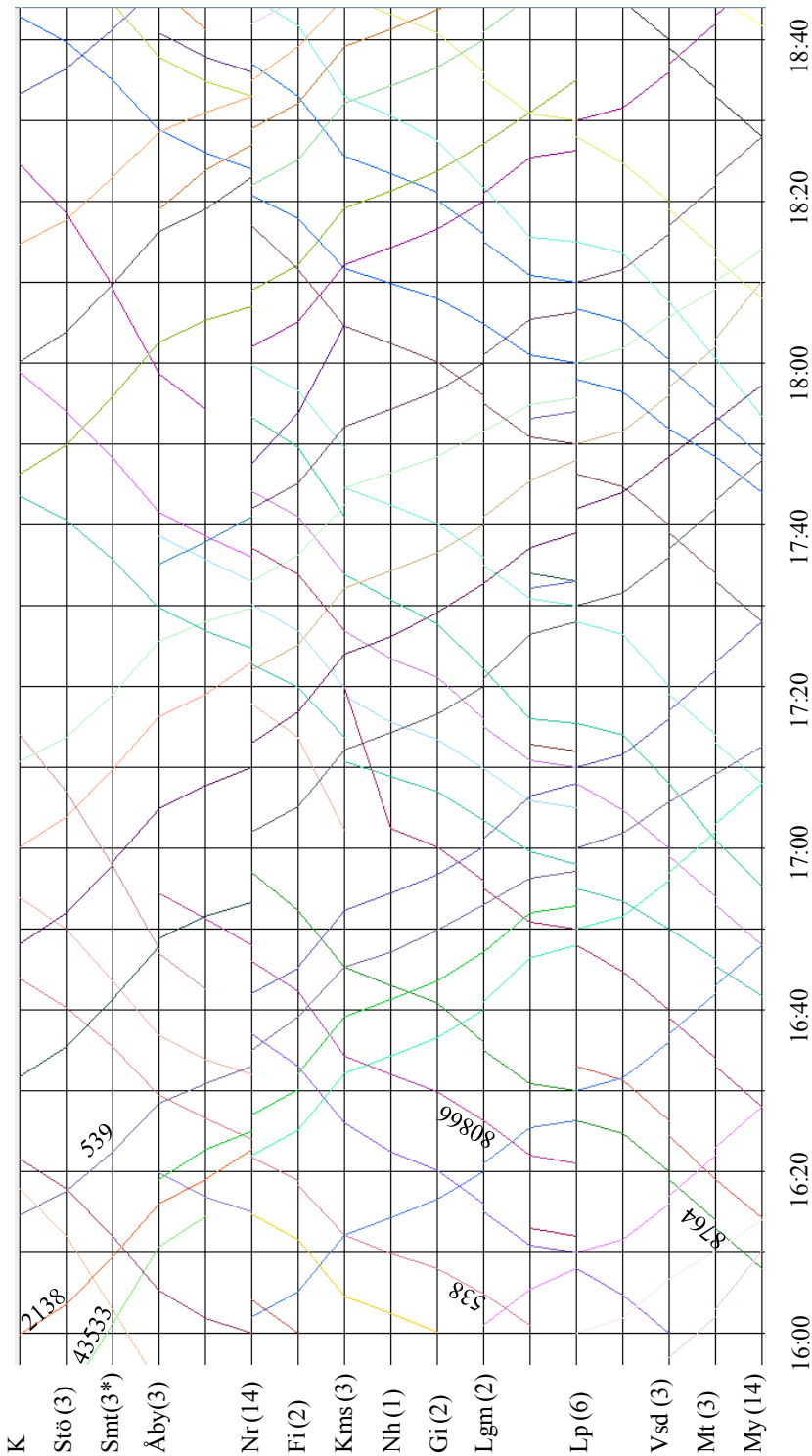
$$\lambda_{\hat{k}k} + \gamma_{\hat{k}k} \leq 1 \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k} \quad 8.12$$

$$x_k^{begin}, x_k^{end} \geq 0 \quad k \in E \quad 8.13$$

$$\gamma_{\hat{k}k}, \lambda_{\hat{k}k} \in \{0, 1\} \quad j \in B, k, \hat{k} \in L_j : k < \hat{k} \quad 8.14$$

$$q_{kt} \in \{0, 1\} \quad j \in B, k \in L_j, t \in P_j \quad 8.15$$

9 Bilaga 2. Tidtabell



Figur 11. Tidtabellen över den dubbelspåriga sträckan Katrineholm-Mjölby som användes i simuleringsexperimenten. Övriga sträckors trafik är inte lika intensiv.

10 Bilaga 3. Projektuppföljning (intern)

10.1 Avstämning av tidsplan

Inga förändringar av projekts tids- och arbetsplan har gjorts.

10.2 Personalförändringar

Inga förändringar av projektgruppen har skett.

10.3 Projektaktiviteter

Projektet har delvis synkroniserats med projekten DDTP, STEG och BOO. Samarbeta kring tillgång till indata har framför allt gjorts med DDTP och via STEG har viktiga kontakter inom Banverket Trafik etablerats. OAT+ har även ingått i en arbetsgrupp med fokus på att göra en gemensam presentation och demonstration av forskningsresultat från FUD-projekten STEG, DDTP och OAT+ på ITS WC 2009 i Stockholm (se www.its-sweden.org för mer information). Samarbetet har letts av Göran Eskérs, Banverket och Mats Lindqvist, Triona AB, och intensifierades under vår, sommar och höst 2009.

Projektet har presenterats under ett flertal tillfällen under 2008 och 2009 däribland:

- IARORs/TRAILS första internationella forskningskurs inom järnvägsplanering där Törnquist Krasemann var inbjuden gästföreläsare. Tekniska Universitetet i Delft, Nederländerna, Juli 2008.
- Bankapacitetsseminarium i Stockholm/Oslo, Oktober 2008
- För STRATEG-projektets projektgrupp i Borlänge.
- Under ett forskningsseminarium inom SOAF på Campus Norrköping, LiU.
- Under ett forskningsseminarium inom BESQ på BTH i Ronneby.
- Under ett forskningsseminarium inom KTS-avdelningen vid LiU.
- I grundutbildningskurserna TNTL02 samt TNSL02 på Campus Norrköping, LiU.
- ITSWC2008 i New York, USA, November 2008.
- EURO2009 i Bonn, Tyskland, Juli 2009.
- ITSWC2009 i Stockholm, September 2009.

10.4 Avrapportering och publicering

Inom projektet har fyra lägesrapporter till Banverket gjorts utöver denna slutrapport. För information om dessa eller annat projektmaterial, kontakta projektledaren via johanna.tornquist@bth.se.

Vidare har följande vetenskapliga artiklar presenteras och/eller publicerats under projekttiden vilka finns på projektets webbsida www.bth.se/tek/oatplus:

Törnquist Krasemann, J., “Dynamic railway traffic management during disturbances: Focus on the complexity imposed by deregulation”, *ITSWC2008 Conference Proceedings*, New York, USA, November 2008.

Törnquist Krasemann, J., “Pros and cons of increased complexity in re-scheduling strategies for railway traffic disturbances: A Swedish case”, *ITSWC2009 Conference Proceedings*, Stockholm, September 2009. Utökad version under granskning för *IET Intelligent Transport Systems*, November 2009.

Törnquist Krasemann, J., “Design of an effective algorithm for fast response to the re-scheduling of railway traffic during disturbances”, Presenterad på EURO2009 i Bonn samt under granskning för *Transportation Research Part C*, September 2009.

10.5 Kostnadsuppföljning

Följer på nästa sida.