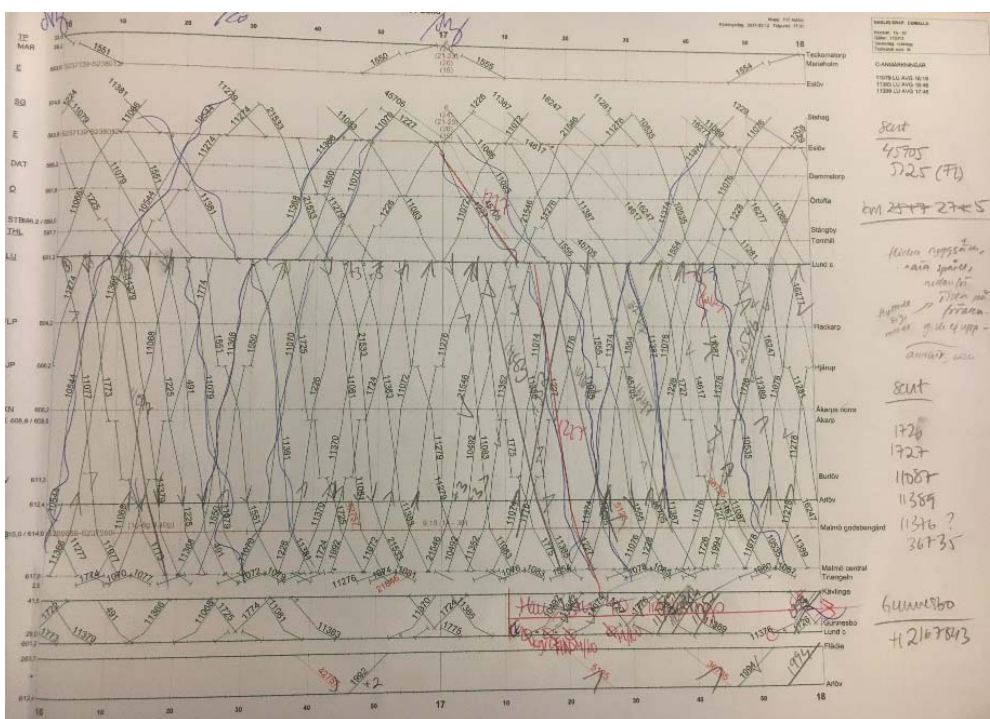


Slutrapport

För projektet "BLIXTEN förstudie" (Dnr: TRV 2017/116862)



Bildkälla: Trafikverket, används med tillstånd från Sandra Stefanovic, sektionschef vid tågtrafikledningen/DLC i Malmö.

1. Inledning

Att arbetsuppgifterna för svenska tågtrafikledare är mycket komplexa och tidvis enormt kognitivt belastande är de allra flesta överens om. Tågtrafiken i stora delar av det svenska järnvägsnätet har blivit alltmer intensiv de senaste åren, frekvensen av störningar har ökat och därmed även den extra arbetsbörda det medför att hantera dessa. Tillgängligheten till relevant information - som är viktig för beslutsfattandet, i synnerhet vid störningar - är också ofta bristfällig. Behoven av ändamålsenliga beslutstöd är därför uppenbara. Hur sådana bör utformas och användas beror naturligtvis på den aktuella kontexten och verksamhetens behov. Under flera år har den typ av frågor och metodutveckling som nämns ovan i huvudsak hanterats inom ett flertal olika typer av akademiska forskningsprojekt. Behoven av och nyttan med denna typ av forskning och utveckling av dylika system, har tidigare inte varit lika tydlig utifrån ett branschperspektiv, men sedan ett par år tillbaka har järnvägsförvaltare i bl.a Italien, Norge, Lettland och Sverige sett behoven av och potentialen i att använda mer avancerade beslutstödsystem. Ur såväl ett akademiskt som praktiskt perspektiv återstår dock många frågor att besvara inför ett införande av sådana i verksamheten.

Med anledning av ovan nämnda utmaningar och behov, initierades projektet "BLIXTEN förstudie" av Blekinge Tekniska Högskola (BTH) och utförs under perioden februari 2018 - januari 2019 på uppdrag av Trafikverket. Kontaktperson från Trafikverket är Göran Eskérs och projektet finansieras inom ramen för KAJT – www.kajt.org.

Projektet förväntas huvudsakligen bidra med:

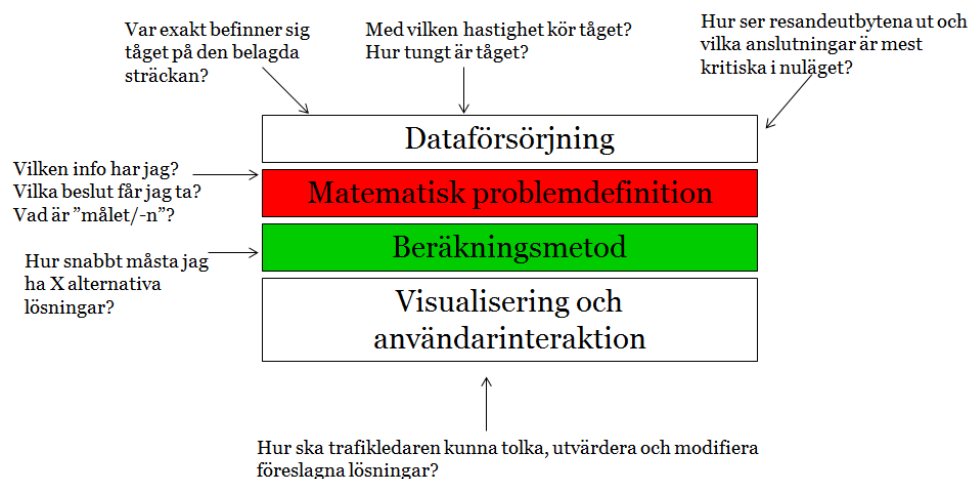
- En sammanställning av aktuellt kunskapsläge.
- En beskrivning av den metodutveckling som gjorts inom projektet.
- Resultat från en fallstudie som inkluderar en beskrivning av de scenarier som valts ut för djupare analyser och de villkor för konfliktdetektering och omplaneringen som definieras för utvalda scenarier.
- En rekommendation om fortsatt forskning inom området, kopplat till KAJTs fokusområden.

Denna rapport sammanfattar den forskning och de resultat som projektet bidragit till. Kapitel 2 ger en introduktion till forskningsområdet och sammanfattar aktuellt kunskapsläge. I kapitel 3 presenteras den metodutveckling som gjorts samt relevanta forskningsresultat från projektet och i kapitel 4 ges en kortfattad beskrivning av förslag på fortsatt arbete. I kapitel 5 ges en överblick av hur projektet och dess resultat har spridits. Slutligen ger kapitel 6 en övergripande ekonomisk redovisning av projektets intäkter och kostnader.

2. Sammanfattning av aktuellt kunskapsläge

Forskningen om beräkningsstöd för tågtrafikledning och hantering av trafikstörningar har ökat markant de senaste 20 åren, vilket kan ses tydligt på det antal forskningsartiklar som publiceras varje år, liksom de många kartläggningar av state-of-the-art som publiceras årligen. Dessa kartläggningar består oftast av en längre lista av olika publikationer och metodansatser, vilka sammanfattas mycket kort och klassificeras på ett vedertaget sätt. Kartläggningarna innehåller dessvärre sällan någon meta-analys eller reflektion av tidigare forskningsstudiers slutsatser och bidrar därför inte med några nya slutsatser som skulle kunna indikera viktiga, framtida forskningsinriktningar inom området. Vad man kan konstatera dock är att den stora majoriteten av den forskning som görs - baserat på de artiklar som publicerats - dessvärre inte sker i nära samarbete med potentiella avnämare i branschen. Detta medför att det blir svårt

för forskarsamhället att effektivt driva utvecklingen av ändamålsenliga algoritmer och beslutstöd framåt, eftersom förutsättningarna och relevanta praktiska krav inte är definierade samt aktuell data saknas. Å andra sidan kan man även observera att de experimentella utvärderingar av föreslagna algoritmer som görs i flera forskningsstudier ofta är mycket begränsade och analyserar endast ett fåtal aspekter, såsom beräkningstid och optimalitet i en dimension, när det trots allt är allmänt känt att det är många andra aspekter som måste beaktas i en bedömning av om en föreslagen omplaneringslösning är genomförbar och acceptabel eller inte. Begränsade tester och utvärderingsstudier medför därför svårigheter att övertyga såväl branschen som andra forskare om föreslagna metodansatsers potential. Intresset från branschens sida att utveckla och tillämpa avancerade beräkningsstöd för tågtrafikledning har delvis därför varit svalt fram tills för ett fåtal år sedan (mer om det lite senare i detta kapitel). En ytterligare orsak till detta svala intresse är naturligtvis även att det först måste finnas definierade behov av beräkningsfunktionalitet samt tekniska och organisatoriska förutsättningar att använda ett beräkningsstöd, dvs. underliggande system för att tillhandahålla statisk och dynamisk data om tågtrafiken och infrastrukturen krävs samt ett användargränssnitt som kan användas för att trafikledaren och kontrollsyste­men ska kunna interagera med beräkningsstödet på ett relevant sätt (se Figur 1). Efter slutförandet av utvecklingsprojekten NTL och ANDA bör Sverige ha tekniska förutsättningar att införliva mer avancerade beslutstödsystem och en ökad automation i trafikledningsprocessen, för att på så sätt skapa goda förutsättningar för en mer proaktiv trafikledning och hantering av störningar.



Figur 1. Illustration av de olika delarna och exempel på frågeställningar som ingår i utformningen av ett beräkningsstöd. Fokus i BLIXTEN förstudie ligger på de två mellanliggande delarna.

Det är allmänt känt att det är svårt att snabbt, i realtid, lösa komplexa optimeringsproblem av den typ som operativ omplanering av tågtrafik motsvarar. I enlighet med illustrationen i Figur 1, så handlar det dels om att definiera och modellera problemet man vill lösa, dels välja lämplig lösningsmetod. Man skulle kunna, grovt förenklat, säga att det finns två olika grupper av tillvägagångsätt. Det första är att definiera en formell explicit matematisk optimeringsmodell och sedan lösa den direkt med existerande optimeringsmjukvara såsom CBC, SCIP, GLPK, Cplex, Gurobi eller andra lösare som finns tillgängliga i bibliotek tillhörande t ex Python eller Matlab. Det andra sättet, se (Lamorgese et. al., 2018), handlar om att anpassa problemformuleringen – "modellen" - på ett sätt som utnyttjar problemets struktur och egenskaper samt väljer alternativa lösningsmetoder som tidigare visat sig effektiva på dylika problemformuleringar.

Fördelen med det förstnämnda sättet är att det är förhållandevis enkelt att definiera, anpassa och förstå den matematiska modellen, eftersom villkoren och målen definieras explicit. Nackdelen är att det ofta – men inte alltid – är ganska tidskrävande för kommersiella lösare att lösa dessa matematiska modeller för större problem, även om intelligenta parameterinställningar görs. Exempelvis kan nämnas att i en studie fokuserad på Malmbanan som genomfördes inom FLOAT-projektet, se (Törnquist Krasemann, 2015), tog det den kommersiella kraftfulla lösaren CPLEX mellan 1.2 – 60.5 s att hitta optimum för det 4-timmars intervall som omplaneringen gjordes för i de 20 olika scenarierna. Ett beräkningsstöd bör ge någon form av svar inom ett fåtal sekunder i en praktisk kontext, men då efterfrågas kanske inte nödvändigtvis en optimal lösning, utan en lösning som är tillräckligt bra utifrån ett antal kriterier. I en senare studie, som genomförts inom detta projekt, utvärderades en annan kraftfull kommersiell lösare, Gurobi, på störningsscenarioer för sträckan Karlskrona-Hässleholm-Malmö och där tog det 3-10 s att hitta den optimala lösningen för omplanering av trafiken 60 minuter framåt, under rusningstrafik, samt det tog lösaren 7-35 s att hitta en optimal lösning när planeringshorisonten utökades till 90 minuter. I ett stort antal studier inom detta specifika område använder man dock en kommersiell mjukvara (ofta Cplex eller Gurobi) för att lösa problemen och då är dessa ofta definierade och modellerade som ett så kallat *MIP* (Mixed Integer Program) och med kontinuerlig tidsrepresentation (exempelvis i (Pelligrini et.al., 2014), där man tillåter en beräkningstid på 3 minuter). I andra studier - där man dock har modellerat det som ett MIP problemet med diskret tid – rapporteras det (se kap. 4.3 i Bettinelli et. al., 2017) att den kommersiella lösaren som de tillämpade initialt för att försöka lösa problemet, krävde åtskilliga timmar för att generera en första tillåten lösning i de scenarier av realistisk storlek som forskarna försökte lösa för att få ett referensvärde att använda i utvärderingen av deras föreslagna algoritm.

Resultaten från flera färskas studier presenterade i t ex (Bettinelli et. al., 2017), (Josyula et. al., 2018), (Gholami och Törnquist Krasemann, 2018), indikerar alltså att det krävs skraddarsydd, men flexibla algoritmer för att få de korta svarstider som krävs i detta tidskritiska sammanhang. Dessa algoritmer kan man sedan, om de utformas på rätt sätt, parallelliseras för att snabba upp beräkningarna ytterligare. Detta diskuteras i bl.a. (Iqbal et.al., 2013), (Bettinelli et. al., 2017) och (Josyula et. al., 2018).

I dagsläget finns det endast ett fåtal exempel på implementerade mer avancerade, optimerande beräkningsstöd för tågtrafikledning och omplanering vid störningar. Dessa sammanfattas i korthet nedan, baserat på (Lamorgese et. al., 2018):

- **Milano tunnelbanesystem, Italien, 2007-2008**

Detta system tillhandahölls av Bombardier Transportation och använde s.k. Branch&Bound för att lösa de definierade optimeringsproblemen. För att köpet av systemet skulle gå igenom krävde det milanesiska statligt ägda bolaget att systemleverantören skulle visa att systemet skulle prestera bättre än trafikledarna. Detta föranledde en veckolång utvärderingsstudie där man valde ut fyra snarlika trafiktimmar per dag och lät systemets optimerande algoritmer styra trafiken under två av dessa fyra timmar per dag och trafikledarna fick att styra trafiken de andra två timmarna som valts ut. Man mätte prestanda i form av avvikelser från tidtabellen och regularitet. Överlag presterade det optimerande systemet 8% bättre än trafikledarna, utifrån båda kriterierna. En mer omfattande beskrivning återfinns i (Mannino och Mascis,

2009) samt (Mannino och Mascis, 2010). Systemet togs ur drift efter ett år, i samband med att hela trafikledningssystemet skulle bytas ut och Bombardier Transportation vann inte den upphandlingen.

- **Regionala linjer, Italien 2011-**

Även detta system har utvecklats av Bombardier Transportation och den italienska infrastrukturhållaren, RFI, krävde att den optimerande funktionen skulle ta hänsyn till de strikta affärsmässiga riktlinjer som gäller och inte enbart planera efter en definierad målfunktion. Så därför använder systemet inte optimering fullt ut, utan använder en heuristik. Trafikledarna anropar heuristiken vid behov, och den föreslår ett urval alternativa lösningar som rankas baserat på en kostnadsfunktion. Trafikledaren väljer själv om hen vill implementera någon av de föreslagna lösningarna och enligt mätningar så väljer trafikledarna i 94% av fallen den första lösningen som heuristiken föreslår. Se (Mannino, 2011) för ytterligare information.

- **Stavanger trafikledningsområde, Norge Februari-December 2014**

Inom ramen för ett utvecklingsprojekt som involverade Jernebanverket, NSB mfl och forskare från bl.a SINTEF, utvecklades ett optimerande beslutstödsystem som också togs i drift under 2014 av trafikledningscentralen som ansvarar för linjen Stavanger-Moi, innehållande 16 stationer. Systemet använder en exakt optimeringsmetod (dvs. ingen heuristik) och där trafikledaren föreslås ett antal lösningar och väljer vilken som ev. ska implementeras. Systemet togs emot väl, men lades sedan på is pga. en upphandling av ett helt nytt signal- och trafikledningssystem. Se (Lamorgese och Mannino, 2015) samt (Lamorgese et.al., 2016) för ytterligare information.

- **Automatiserad godstrafikstyrning på vissa linjer, Lettland 2017-**

Ganska nyligen togs en ny version av Bombardiens optimerande trafikledningssystem i drift för att automatiskt styra framför allt godstågen på sträckorna Daugavpils-Eglaine, Daugavpils-Krustpils, Rezekne-Krustpils, Zilupe-Krustpils och Karzava-Rezekne som innehåller 52 stationer totalt. Precis som tidigare är det en heuristik som optimerar trafiken, baserat på de affärsmässiga prioriteringsregler som gäller.

- **ALSTOMS optimerande trafikstyrningsfunktion i ICONIS**

Alstom tillhandahåller sedan flera år avancerade signalsystem och trafikledningssystem, däribland produkten ICONIS. Funktionalitet för realtidsoptimering av tågtrafik är under utveckling, i nära samarbete med ett italienskt forskarteam. Denna funktionalitet har ännu inte, så vitt vi vet, tagits i drift men utvärderats på relevanta scenarier och instanser och visat god prestanda i dessa utvärderingsstudier. Den optimerande algoritmen beskrivs förhållandevis detaljerat i (Bettolini et. al., 2017). Algoritmen är en heuristik och mer specifikt en s.k. girighetsalgoritm, som prioriterar att snabbt försöka konstruera en första tillräckligt bra lösning mha intelligent sortering av tåg, för att sedan "girigt" förbättra lösningen iterativt inom de tidsramar som medges, med hjälp av ett flertal olika strategier. Vad som utmärker denna algoritm är att den under lösningsförfarandet inte strikt förbjuder vissa tåginteraktioner som ofta annars anses hårda trafikeringsvillkor (t ex linjeblockering), men däremot straffas dessa typer av konflikter mycket hårt och därmed uppstår denna typ av konflikter med stor sannolikhet inte i en föreslagen lösning. De konflikter som trots allt kan finnas med i föreslagna lösningar, redovisas tydligt och lösningarna rankas och presenteras därefter för trafikledaren.

Algoritmen omplanerar baserat på en mängd aspekter och försöker minimera den totala kostnaden som är associerad med dessa aspekter (tidsavvikelser, missade anslutningar, trafikkonflikter, etc). Metodansatsen utnyttjar även parallellisering av algoritmen. Studien som presenteras i (Bettelini et. al., 2017), rapporterar att metoden levererar mycket bra lösningar inom 2 s för instanser bestående av 151 tåg och en planeringshorisont på 2h.

3. Metodutveckling och utvärdering

I slutfasen av FLOAT-projektet (dvs. oktober 2016-mars 2017) påbörjades utvecklingen en grafbaserad beräkningsmetod som i andra schemaläggningssammanhang har visat sig effektiv. Denna har vi vidareutvecklat inom BLIXTEN förstudie. Metoden utgår från tidigare problemformulering där vi tillåter (1) justering av ankomst- och avgångstider ink. köra in tid och hoppa icke-kommersiella uppehåll, (2) förflyttning av förbigångar och möten samt (3) plattform- och spårbyte på linjen vid behov. Metoden löser problemet genom att bygga upp en graf av riktade länkar mellan de olika s.k. "tågevents" som ska schemaläggas, och använder en av sex alternativa girighetsalgoritmer för att hitta en bra sekvens av dessa riktade länkar. Dessa alternativa girighetsalgoritmer kan liknas vid sex alternativa prioriterings- och konfliktlösningstrategier som används för att förebygga och lösa tågkonflikter i omplaneringen. Strategi 1 - 6 (benämns Dispatching rule, DR, i Tabell 2) har följande prioritering för att lösa identifierade parvisa konflikter, i kronologisk ordning:

- Strategi 1 (DR1): Tåget som var planerat att köra först, enligt ordinarie tidtabell, ges företräde, såvida inte det finns risk för "deadlock".
- Strategi 2 (DR2): Tåget som har störst försening ges företräde.
- Strategi 3 (DR3): Tåget med minst "lokal" marginaltid, enligt reviderad tidtabell, ges företräde.
- Strategi 4 (DR4): Tåget med minst "lokal" marginaltid, enligt ordinarie tidtabell, ges företräde.
- Strategi 5 (DR5): Tåget med minst återstående marginaltid, enligt ordinarie tidtabell, ges företräde.
- Strategi 6 (DR6): Tåget med den kortaste restiden, enligt ordinarie tidtabell, ges företräde.

En mer detaljerad beskrivning av nämnda strategier och hur tågtrafiken modellerats återfinns i (Gholami and Törnquist Krasemann, 2018), se Bilaga 1.

Vi testade ovan beräkningsmetodik på Blekinge Kustbana och dess anslutning till Skånebanan i Kristianstad samt söderut på Södra Stambanan i Hässleholm. Trafiken under utvalda vardagar i T15 studerades och de fiktiva scenarierna vi genererade innehöll tre olika typer av störningar:

- Kategori 1 avser enskilda initiala störningar hos vissa tåg (som sedan ev. sprider sig till andra tåg).
- Kategori 2 avser signifikanta hastighetsnedsättningar hos enskilda tåg.
- Kategori 3 avser infrastrukturfel på linjen som medför att alla passerande tåg får en signifikant hastighetsnedsättning på utsatt linjesträcka.

Information om vilken typ av störning som genererades i resp. scenario, dess omfattning och var i nätverket den uppstod finns sammanställt i Tabell 1 nedan.

Scenario		Disturbance		Problem Size: #Events ¹	
Category: ID	Location	Initially Disturbed Train	Initially Delay (min)	1 h Time Window	1.5 h Time Window
1:1	Karlshamn-Ångsågs mossen	1058 (Eastbound)	10	1753	2574
1:2	Bromölla Sölvesborg	1064 (Eastbound)	5	1717	2441
1:3	Kristianstad-Karpalund	1263 (Southbound)	8	1421	2100
1:4	Bergåsa-Gullberna	1097 (Westbound)	10	1739	2482
1:5	Bräkne Hoby-Ronneby	1103 (Westbound)	15	1393	2056
1:6	Flackarp-Hjärup	491 (Southbound)	5	1467	2122
1:7	Eslöv-Dammstorp	533 (Southbound)	10	1759	2578
1:8	Burlöv-Åkarp	544 (Northbound)	7	1748	2572
1:9	Burlöv-Åkarp	1378 (Northbound)	4	1421	2100
1:10	Höör-Stehag	1381 (Southbound)	10	1687	2533
2:1	Karlshamn-Ångsågs mossen	1058 (Eastbound)	40%	1753	2574
2:2	Bromölla Sölvesborg	1064 (Eastbound)	20%	1717	2441
2:3	Kristianstad-Karpalund	1263 (Southbound)	20%	1421	2100
2:4	Bergåsa-Gullberna	1097 (Westbound)	40%	1739	2482
2:5	Bräkne Hoby-Ronneby	1103 (Westbound)	100%	1393	2056
2:6	Flackarp-Hjärup	491 (Southbound)	100%	1467	2122
2:7	Eslöv-Dammstorp	533 (Southbound)	50%	1759	2578
2:8	Burlöv-Åkarp	544 (Northbound)	80%	1748	2572
2:9	Burlöv-Åkarp	1378 (Northbound)	40%	1421	2100
2:10	Höör-Stehag	1381 (Southbound)	40%	1687	2533
3:1	Karlshamn-Ångsågs mossen	All trains passing through	4	1753	2574
3:2	Bromölla Sölvesborg	All trains passing through	2	1717	2441
3:3	Kristianstad-Karpalund	All trains passing through	3	1421	2100
3:4	Bergåsa-Gullberna	All trains passing through	6	1739	2482
3:5	Bräkne Hoby-Ronneby	All trains passing through	5	1393	2056
3:6	Flackarp-Hjärup	All trains passing through	3	1467	2122
3:7	Eslöv-Dammstorp	All trains passing through	4	1759	2578
3:8	Burlöv-Åkarp	All trains passing through	2	1748	2572
3:9	Burlöv-Åkarp	All trains passing through	2	1421	2100
3:10	Höör-Stehag	All trains passing through	2	1687	2533

¹ The size of the generated graph G is the squared size of number of events.

Tabell 1. Sammanfattning av studerade scenarier.

I Tabell 2 nedan presenteras de experimentella resultat från tillämpningen av de sex beskrivna prioriteringsstrategier i de definierade scenarierna och med en planeringshorisont på 60 minuter. Dessa kan även jämföras med resultaten från när den kommersiella optimeringsmjukvaran Gurobi tillämpas för att lösa motsvarande störningsscenarioer. I samtliga fall utvärderas lösningarna baserat på den totala förseningen för samtliga tåg vid deras resp. slutstation och som överstiger tre minuter (TFD+3).

Analysen av resultaten visade att för en planeringshorisont på 60 minuter krävdes en beräkningstid på max 10 sekunder och för 90 minuters planeringshorisont krävdes en beräkningstid på max 20 sekunder. Beräkningstiden för algoritmerna står i paritet med beräkningstiden för den kommersiella lösaren Gurobi. Som framgår av tabellen, där de bästa lösningarna är markerade i grått, så finns det ingen strategi som dominerar de andra i alla scenarier, vilket indikerar vikten av att ha ett beslutstöd som kan tillämpa parallella anrop till de alternativa strategierna för att på så sätt uppnå en mer stabil prestanda. Notera att endast ett mått har beaktats i de resultat och analyser som återfinns i Tabell 2, medan i praktiken är det en kvalitetsbedömning i flera dimensioner som är nödvändig vilket diskuteras nedan.

I samband med att utvärderingen av den graf- och algoritmbaserade beräkningsmetoden slutfördes, så inleddes en litteraturstudie som syftade till att kartlägga och analysera vilka kriterier och mått som kan vara lämpliga att tillämpa för bedömning av alternativa lösningsförslag. Sådana kriterier och mått är centrala för att dels ta fram det urval av lösningsförslag som föreslås till trafikledaren, dels för att på ett lättförståeligt sätt kommunicera alternativa lösningars egenskaper och potentiella konsekvenser. Ett urval av identifierade mått och kriterier som använts i tidigare studier ges nedan:

- Tidsrelaterade mått:
 - Summerad avvikelse från nominell tidtabell vid definierade mätpunkter.
 - Summerad förseningar till slutstation (med olika tröskelvärden, t ex 3 minuter).

- Summerad försening till kommersiella uppehåll.
- Summerad merförsening och största merförsening
- Summerade passagerarförseningsminuter
- Tågrelaterade mått:
 - Antalet försenade tåg till slutstation (med olika tröskelvärden, t ex 3-5 minuter).
 - Antalet prioriteringar som ej följer riktlinjerna
 - Antalet missade anslutningar med eventuell viktning
- Tågvägsrelaterade mått:
 - Antalet spårändringar inkl. oplanerade förbigångar, flyttade möten och plattformsbymten.
 - Antalet extra uppehåll/möten för godståg.
- Robusthetsrelaterade mått:
 - Robusthet/Sårbarhet: Exempelvis vilka tidskritiska beroende som finns i den omplanerade tidtabellen, såsom korsande tågvägar eller oplanerade förbigångar/möten, i kombination med små tidsmarginaler.
 - Återhämtningstid (dvs. när trafiken förväntas kunna köra enligt tidtabellen igen).

Flera av ovan nämnda mått är positivt korrelerade medan vissa av dem kan stå i konflikt med varandra. Exempelvis kan nämnas att i tidigare experimentella studier har vi kunnat se att - vilket inte är så överraskande – att ju större tolerans för spårändringar modellen har, desto mer kan (mer)förseningarna reduceras. Men att göra spårändringar kan även medföra en mer komplicerad trafikeringsbild och skapa sårbarhet i systemet eftersom planen i betydande utsträckning baseras på en mängd antaganden och approximationer rörande t ex faktiska körtider, faktiska uppehållstider mm. Vidare så är vissa plattformsbymten mindre lämpliga att genomföra pga. t ex planerade trafikbyten eller att det leder till ökad trängsel när pendlare tvingas ta sig från en plattform till en annan på kort tid. Denna typ av överväganden behövs göras när vi i framtida projekt definierar regler, riktlinjer och preferenser vid trafikledning och omplanering i olika typer av kontexter och situationer.

Vidare så finns det även andra viktiga, mer kvalitativa, indikatorer som beskriver en lösnings förutsättningar och förväntade effekter. Låt oss ta ett enkelt fiktivt exempel där en föreslagen "optimal" omplaneringslösning med kostnaden C^* förväntas leda till att ett fåtal specifika tåg försenas tillfälligt, till förmån för att tåg 309 ska kunna invänta en viktig specifik anslutning till tåg 103. Detta kräver dock att tåg 103 gör en oplanerad förbigång av tåg 101 genom parallelldrift på sträcka X samt förutsätter att specifikt tåg 102 ombeds köra i maxhastighet på sträcka X. Denna information bör då på något enkelt, tydligt och snabbt sätt kommuniceras av beslutsstödet till berörda trafikledare.

Scenario		TFD_j^{+3} Objective Function (hh:mm:ss)						Computational Time (hh:mm:ss)	
Category: ID	Optimal Results	Dispatching Rules (DR)						MIP Model	Heuristic Algorithm
		1	2	3	4	5	6		
1:1	0:01:03	00:01:14	00:01:14	00:01:14	00:15:22	00:15:22	00:24:05	00:00:04	00:00:06
1:2	0:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	01:16:47	00:00:04	00:00:05
1:3	0:00:00	00:02:09	00:02:09	00:02:09	00:36:33	00:36:33	00:26:32	00:00:04	00:00:03
1:4	0:01:02	00:02:28	00:02:28	00:02:28	00:12:40	00:12:40	00:08:11	00:00:06	00:00:06
1:5	0:07:01	00:16:15	00:16:15	00:16:15	00:19:49	00:19:49	00:13:14	00:00:05	00:00:03
1:6	0:00:23	00:05:46	00:05:46	00:05:46	00:05:46	00:05:46	00:05:46	00:00:04	00:00:03
1:7	0:05:05	00:06:24	00:06:24	00:06:24	00:06:24	00:06:24	00:14:45	00:00:04	00:00:05
1:8	0:01:34	00:12:01	00:12:01	00:12:01	00:12:01	00:12:01	00:13:40	00:00:04	00:00:06
1:9	0:00:00	00:14:01	00:14:01	00:14:01	00:13:02	00:13:02	00:14:01	00:00:04	00:00:03
1:10	0:00:00	00:01:18	00:01:18	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:01:33	00:00:04	00:00:05
2:1	0:05:24	00:45:37	00:45:37	00:06:42	00:06:42	00:06:42	00:08:16	00:00:04	00:00:06
2:2	0:02:43	00:03:29	00:39:53	00:03:29	00:03:29	00:03:29	01:06:56	00:00:05	00:00:05
2:3	0:01:01	00:01:47	00:20:06	00:20:06	00:01:47	00:01:47	00:20:14	00:00:03	00:00:03
2:4	0:15:12	00:22:12	00:22:50	00:22:50	00:22:12	00:22:12	00:55:54	00:00:05	00:00:05
2:5	0:42:09	00:43:24	00:58:03	00:58:03	01:05:08	01:05:08	00:59:16	00:00:04	00:00:03
2:6	0:01:24	00:02:44	00:02:44	00:02:44	00:02:44	00:02:44	00:02:44	00:00:06	00:00:04
2:7	0:05:27	00:08:09	00:08:09	00:08:09	00:08:09	00:08:09	00:09:43	00:00:04	00:00:10
2:8	0:21:12	00:43:37	00:38:42	00:38:42	00:43:37	00:43:37	00:40:16	00:00:06	00:00:06
2:9	0:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:05	00:00:03
2:10	0:00:08	00:05:09	00:05:09	00:05:09	00:05:09	00:05:09	00:06:43	00:00:04	00:00:06
3:1	0:01:00	00:01:00	00:01:00	00:01:00	00:01:00	00:01:00	00:25:05	00:00:04	00:00:06
3:2	0:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:19	00:00:19	00:25:54	00:00:04	00:00:06
3:3	0:00:00	00:03:49	00:21:38	01:05:52	00:01:17	00:15:40	00:54:14	00:00:05	00:00:03
3:4	0:12:21	00:16:59	00:20:13	00:20:13	00:16:59	00:16:59	00:20:22	00:00:07	00:00:06
3:5	0:05:20	00:05:25	00:57:34	00:15:58	00:05:25	00:05:25	00:16:12	00:00:03	00:00:03
3:6	0:00:00	00:21:04	00:21:04	00:21:04	00:23:12	00:23:12	00:28:42	00:00:05	00:00:03
3:7	0:00:09	00:07:42	00:14:11	00:14:11	00:14:11	00:14:11	00:15:45	00:00:10	00:00:05
3:8	0:00:00	00:00:00	00:05:06	00:05:06	00:00:00	00:00:00	00:07:54	00:00:04	00:00:05
3:9	0:00:00	00:00:00	00:00:41	00:00:41	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:04	00:00:04
3:10	0:00:00	00:04:53	00:04:53	00:03:35	00:01:04	00:01:04	00:02:38	00:00:03	00:00:05

Tabell 2. Sammanfattning av resultaten från experimenten där en planeringshorisont på 60 minuter tillämpades.

4. Fortsatt arbete

Baserat på diskussionen i kapitel 2 och 3, så finns det ett tydligt behov av att fortsätta arbetet med att vidareutveckla och utvärdera koncept och metoder för effektiva beräkningsstöd i den operativa tågtrafikledningen, med svenska förutsättningar i fokus. I dagsläget pågår ett flertal utvecklings- och forskningsprojekt inom området, t ex NTL, X2Rail2, FR8Rail2 samt flertalet KAJT-projekt. För att använda tillgängliga resurser (dvs. forsknings- och utvecklingsmedel samt experter och medarbetare i linjen) på bästa sätt och sprida kunskapen inom branschen, så borde en ökad samordning ske och gränssnittet mellan dessa projekt beskrivas tydligare. En sådan samordning och diskussion skulle med fördel initieras av Trafikverkets FoU-ansvariga och ske i samarbete med KAJT.

Förslag på fortsatt forskning med utgångspunkt från resultaten i detta projekt, BLIXTEN förstudie, samt projektet TRANSFORM¹ finns beskrivet i ett förslag på fortsättningsprojekt, benämnt BLIXTEN II. Avsikten är att i detta fortsättningsprojekt fokusera på i huvudsak tre aspekter:

- (1) Kvalitetsmått på föreslagna omplaneringsåtgärder
- (2) Beräkningseffektivitet
- (3) Stabilitet

¹ <https://www.bth.se/eng/research/computer-science-and-engineering/transform/>

Med kvalitetsmått avser vi definierade indikatorer som gemensamt illustrerar och kortfattat beskriver en lösnings förutsättningar och förväntade effekter, vilket diskuterades i kapitel 3. Med beräkningseffektivitet avser vi algoritmens prestanda över tid och med stabilitet avser vi hur algoritmens prestanda varierar beroende på typ och omfattning av störning.

I projektet TRANSFORM har effektiva metoder för att parallellisera en sekventiell sökalgoritm studerats, vilka medför dels en betydande uppsnabbning, dels en ökad stabilitet eftersom beräkningarna distribueras. Resultaten är mycket lovande och vi avser därför att fortsätta utveckla och utvärdera den parallelliserade algoritmen.

5. Kunskapsspridning och publikationer

Presentationer och media

Under KAJT-dagarna i Dala Storsund den 16-17 april 2018 presenterade Omid Gholami pågående och planerat arbete i projektet.

Under konferensen EURO/ALIO2018 (EURO, European Operational Research Societies) i juni 2018 i Bologna, Italien presenterade Omid Gholami ett urval av projektets resultat.

BTHs Kommunikationsavdelning gjorde under hösten 2018 en kortfilm om forskningen:
<https://www.facebook.com/BTHofficiell/videos/270567130317421/>

Blekinge Läns Tidning (BLT) publicerade den 21 december 2018 ett reportage om BTHs forskning inom området: <http://www.bl.se/karlskrona/tagforseningar-ett-hett-problem-sa-kan-det-bli-battre-i-framtiden/>

Sveriges Television (SVT) sände den 23 december 2018 ett inslag om BTHs forskning:
<https://www.svt.se/nyheter/lokalt/blekinge/ny-forskning-ska-fa-tagen-att-komma-i-tid>

Forskningspublikationer

Gholami, O., Törnquist Krasemann, J. (2018), "[A Heuristic Approach to Solve the Train Traffic Re-scheduling Problem in Real-time](#)", *Algorithms*, Vol. 11 (special issue on "Algorithms for scheduling problems") doi:10.3390/a11040055, MDPI.

Lamorgese, L., Mannino, C., Pacciarelli, D., & Törnquist Krasemann, J., (2018), *Train Dispatching*, In (eds.) Borndörfer, R., Klug, T., Lamorgese, L., Mannino, C., Reuther, M., Schlechte, T., *Handbook of Optimization in the Railway Industry*, International Series in Operations Research & Management Science 268, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-72153-8_12.

6. Redovisning av upparbetade projektmedel

Projektarbetet har utförts av Johanna Törnquist Krasemann samt Omid Gholami under perioden 1 januari 2018 - 31 januari 2019 och har finansierats av Trafikverket med 0.5Mkr. Se nedan för en sammanställning av upparbetade projektmedel. I Bilaga 2 återfinns en mer detaljerad redovisning av projektets intäkter och kostnader.

Kostnadsslag	Kostnad (kr)
Resor	1 761
Lönekostnader inkl. LKP	361 043
Gemensamma kostnader (OH)	137 196
Summa	500 000

Tabell 3. Summering av projektets kostnader.

7. Referenser

Bettinelli, A.; Santini, A.; Vigo, D (2017). A real-time conflict solution algorithm for the train rescheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological* 2017, 106, pp. 237-265.

Gholami, O., Törnquist Krasemann, J. (2018), "A Heuristic Approach to Solve the Train Traffic Re-scheduling Problem in Real-time", *Algorithms, Vol. 11* (special issue on "Algorithms for scheduling problems") doi:10.3390/a11040055, MDPI.

Iqbal, S.M.Z, Grahn, H., Törnquist Krasemann, J. (2013) "Multi-strategy-based train scheduling during railway traffic disturbances", In proceedings of [RailCopenhagen](#) 2013, Copenhagen Denmark, May 13-15.

Josyula, S., Törnquist Krasemann, J., Lundberg, L., (2018). "A Parallel Algorithm for Train Rescheduling", *Transportation Research Part C Vol. 95*, pp. 545-569.

Lamorgese, L., Mannino, C., (2015). An exact decomposition approach for the real-time train dispatching problem. *Operations Research*, 63(1):48–64.

Lamorgese, L., Mannino, C., Piacentini, M. (2016) Optimal train dispatching by Benders'-like reformulation. *Transportation Science*, 50(3):910–925, 2016.

Lamorgese, L., Mannino, C., Pacciarelli, D., Törnquist Krasemann, J., (2018), *Train Dispatching*, In (eds.) Borndörfer, R., Klug, T., Lamorgese, L., Mannino, C., Reuther, M., Schlechte, T., *Handbook of Optimization in the Railway Industry*, International Series in Operations Research & Management Science 268, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-72153-8_12.

Mannino, C., Mascis, A. (2009). Optimal real-time traffic control in metro stations. *Operations Research*, 57:pp. 1026–1039.

Mannino, C., Mascis, A (2010). Fast track to fixing rail delays: Award-winning automated rail re-routing system saves time and money. *OR MS Today*, 37(2):28.

Mannino, C., (2011) Real-time traffic control in railway systems. *ATMOS2011 - 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, Volume 20, OpenAccess Series in Informatics (OASICs), pages 1–14, Dagstuhl, Germany, 2011. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik.

Pellegrini, P., Marlière, G., Rodriguez, J., (2014). Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 59C:58-80.

Törnquist Krasemann, J. (2015) "Computational decision-support for railway traffic management and associated configuration challenges: An experimental study", *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Elsevier, Volume 5, Issue 3, November 2015, pp.95–109.

8. Bilagor