

VTI notat xxx

# **Optimering och tidtabellläggning**

## **Slutrapportering av förstudie**

Jan-Eric Nilsson

Per-Olov Lindberg

Diarienummer:  
Omslagsbilder:  
Tryck: LiU-Tryck, Linköping 2016

---

## Referat

---

Skriv referatet här. Referat och abstract ska bara skrivas för rapporter. Bakgrund, syfte, metod och resultat. Din text och tabellen med uppgifter ska rymmas på denna sida.

Ange organisation och orc-id inom parentes efter varje författarnamn.

**Titel:**

**Författare:** Namn (org, <http://orcid.org/nr>)

**Utgivare:** VTI, Statens väg och transportforskningsinstitut  
[www.vti.se](http://www.vti.se)

**Serie och nr:**

**Utgivningsår:**

**VTI:s diarienummer:**

**ISSN:** 0347-6030

**Projektnamn:**

**Uppdragsgivare:**

**Nyckelord:**

**Språk:**

**Antal sidor:**

---

## Abstract

---

Skriv abstract här. Referat och abstract ska bara skrivas för rapporter. Bakgrund, syfte, metod och resultat. Din text och tabellen med uppgifter ska rymmas på denna sida.

Ange organisation och orc-id inom parentes efter varje författarnamn.

**Title:**

**Author:** Namn (org, <http://orcid.org/nr>)

**Publisher:** Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)  
[www.vti.se](http://www.vti.se)

**Publication No.:**

**Published:**

**Reg. No., VTI:**

**ISSN:** 0347-6030

**Project:**

**Commissioned by:**

**Keywords:**

**Language:**

**No. of pages:**

---

## Förord

---

Skriv förordet här.

Ort, månad år

*Namn*

*Projektledare*

---

## Kvalitetsgranskning

---

Granskningsseminarium genomfört (datum) där (namn) var lektor. (Förste författaren; namn) har genomfört justeringar av slutligt rapportmanus. Forskningschef (namn) har därefter granskat och godkänt publikationen för publicering (datum). De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarens/författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis myndigheten VTI:s uppfattning.

eller

Intern/extern peer review har genomförts (datum) av (namn). (Förste författaren; namn) har genomfört justeringar av slutligt rapportmanus. Forskningschef (namn) har därefter granskat och godkänt publikationen för publicering (datum). De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarens/författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis myndigheten VTI:s uppfattning.

---

## Quality review

---

Review seminar was carried out on (date) where (name) reviewed and commented on the report. (First author; name) has made alterations to the final manuscript of the report. The research director (name) examined and approved the report for publication on (date). The conclusions and recommendations expressed are the author's/authors' and do not necessarily reflect VTI's opinion as an authority.

or

Internal/external peer review was performed on (date) by (name). (First author; name) has made alterations to the final manuscript of the report. The research director (name) examined and approved the report for publication on (date). The conclusions and recommendations expressed are the author's/authors' and do not necessarily reflect VTI's opinion as an authority.

---

## Innehållsförteckning

---

<b>Sammanfattning .....</b>	<b>9</b>
<b>Summary .....</b>	<b>10</b>
<b>1. Här börjar rapporten .....</b>	<b>11</b>
<b>Referenser .....</b>	<b>17</b>
<b>Bilaga 1 .....</b>	<b>19</b>





---

## Sammanfattning

---

### **Titel**

av författare (organisation)

Skriv sammanfattningen här.

---

## Summary

---

**Title**

by author (organization)

Skriv summary här.

---

## 1. Projektets syfte

---

Trafikverket beviljade sommaren 2014 medel för en förstudie för att identifiera möjligheterna att utveckla ett optimeringshjälpmedel för tidtabellläggning. Förstudien skulle baseras på en uppsats som publicerades för tjugotalet år sedan och som kommit att bli en av de mest refererade inom det forskningsområde som behandlar tidtabellläggning av tåg; jfr. Brännlund et al. (1998).

Syftet med förstudien har varit att, med den idag aktuella litteraturen inom området som utgångspunkt, identifiera vilka möjligheter som finns att vidareutveckla den ursprungliga modellansatsen. Är det med andra ord möjligt att med en kombination av modern datorkapacitet och nya ansatser för att identifiera tillåtna och nyttomaximerande lösningar till grundproblemet, ta fram en arkitektur för, dvs. de grundläggande beståndsdelarna i utformningen av en praktiskt fungerande optimeringsalgoritm? Om svaret är jakande är det möjligt att i en fördjupning utveckla ett datorbaserat stöd för att lägga tidtabeller som säkerställer att existerande järnvägsinfrastruktur används så väl som möjligt?

---

## 2. Genomförande

---

Arbetet har koordinerats i en grupp som består av tre personer. PO Lindberg och J-E Nilsson var medförfattare till den ursprungliga studien. Dessutom har Martin Aronsson bidragit med både sin optimeringskunskap och genom att vara väl förtrogen med den information och de system som finns hos Trafikverket och som därmed kan stödja en framtida utveckling

Det praktiska arbetet har letts av PO Lindberg. I detta arbete har ett projektarbete, ett examensarbete och ett doktorandprojekt vid KTH genomförts för systemutveckling och programmering av de metodansatser som Lindberg utvecklat.

Projektet har använt data hämtat från TrainPlan och 2014 års tågplan. Efter diskussioner i projektgruppen, och med utgångspunkt från tidigare studier, valdes trafiken på Malmbanan, sträckan Narvik – Kiruna för T15 som tillämpningsexempel. Försöket omfattar 92 tåg, 29 stationer och ytterligare 103 signalblock. Information om samtliga blocksträckor, försignaler, förekomst av installationer för samtidig infart etc. har därför hämtats in liksom tågens gångtider på delsträckorna under olika förutsättningar avseende stopp och full fart.

---

### 3. Beskrivning av metoden

---

Järnvägsnätet är indelat i ett antal väl avgränsade delar, så kallade block. På varje block kan det finnas ett tåg eller noll tåg, ingenting annat. Det innebär att tidtabellägningsproblemet har en binär restriktion, vilket i sin tur eliminerar möjligheten att använda traditionella s.k. kontinuerliga optimeringsansatser för att kunna lägga en tidtabell som maximerar nyttan av tillgänglig infrastruktur.

Det projekt som avrapporterades för 20-talet år sedan, dvs. Brännlund et al. 1998, använde s.k. dual optimering. Detta är samma tillvägagångssätt som använts också i denna förstudie och som beskrivs nedan. Samma ansats har bland annat kommit att användas av ZIB<sup>1</sup> i Tyskland. Man ansåg att detta förhållningssätt överglänser det alternativa tillvägagångssätt som prövats för att angripa problemet, nämligen med standardprogram för heltaloptimering. I en avhandling från ZIB (Schlechte, 2012) och i de över 200 referenser som där ingår beskrivs hanteringen.

Metoden innebär att olika tåglägen initialt åsätts olika värden, priser eller intäkter. Dessutom diskretiseras både rum och tid, dvs. delas upp i ett antal väl definierade punkter eller intervall i stället för att representeras som kontinuerliga variabler.

Tågrörelser representeras som länkar mellan dessa noder/punkter. Processen måste kunna hantera det faktum att ett tåg kan ”bete sig” olika på varje delsträcka. Ett tåg kan således ankomma en punkt och passera sträckan till nästa punkt i full fart, alternativt stanna där. Ett tåg som t.ex. går från stillastående till full fart mellan två punkter tar också kortare tid på sig än ett tåg som ska stoppa på båda platserna; jfr Lindberg (2015a).

Tågen i detta system körs också i olika artificiella nät. Anledningen är att de inte bara kan ha olika gångtid mellan olika punkter i nätet, de kan också ha olika önskemål om avgångstid, obligatoriska stopp o.d. Elementära tågrörelser mellan två noder belägger således vissa block under vissa tidsintervall. För att processen ska fungera i praktiken måste självfallet samtliga uppgifter om både infrastruktur och gångtider uppfylla de säkerhetskrav med mera som samlats i TF601 (Lundberg, 2000). Det innebär till exempel att ett tåg inte bara belägger det block där det befinner sig, utan även kringliggande block; jfr Lindberg (2015b).

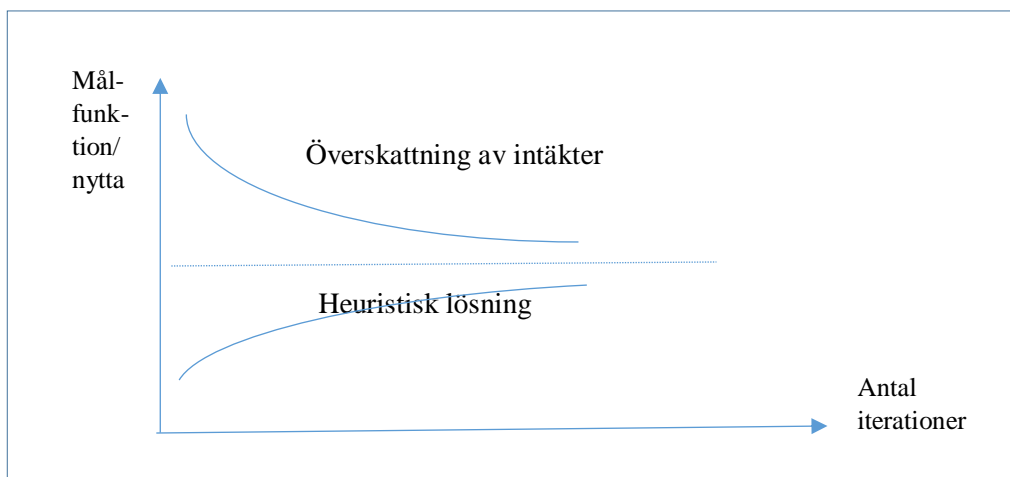
Den duala metoden för att lägga en tidtabell är en form av prisstyrning. För givna priser får varje transport välja sin tidtabell genom att hitta den billigaste vägen mellan start- och målpunkt. Detta leder till en överskattning av totala tågintäkter. Priserna justeras sen så att överbeläggningar av blockkapaciteter minimeras, dvs. höjning för överbelastade block, och vice versa. Detta sker genom att i det duala problemet minimera överskattningen. Detta kan leda till att vissa tåg kan bli olönsamma och utgår, medan andra tåg tvingas invänta mötande tåg o.s.v. Detta förfarande upprepas till man fått en tillräckligt minimal överskattning. Förfarandet exemplifieras av övre kurvan i fig. 1.

Den lösning – den tidtabell – som minimerar överskattningen uppfyller inte det binära kravet på att det får finnas noll tåg eller ett tåg på varje block. I stället består denna lösning av en deltalsmix av flera vägar genom respektive nät för ett givet tåg; de ingående proportionerna i mixen summerar sig till ett.

Det återstående problemet är att ur denna lösning få fram en heltalslösning, dvs. man väljer en enda rutt för varje tåg. I Brännlund et al. (1998) gjordes detta med s.k. heuristiker, dvs. att med ”sunt förnuft” och klurighet modifiera aktuell lösning. Dessa heuristiska lösningar ger underskattningar av optimalvärdet. Det exemplifieras av den undre kurvan i figuren.

---

<sup>1</sup> The Zuse Institute Berlin (ZIB) is an interdisciplinary research institute for applied mathematics and data-intensive high-performance computing. Its research focuses on modeling, simulation and optimization with scientific cooperation partners from academia and industry.



Figur 1: Illustration av ursprunglig algoritm för att identifiera värdemaximerande och tillåtna lösningar

I ovannämnda prisstyrningsproblem försöker man minimera sagda intäktsöverskattning, i syfte att komma nära maximal tågintäkt. Prisbestämningsproblemet är ett mycket stort problem med styckvis linjär målfunktion. De linjära avsnitten motsvaras av uppsättningar av rutter för aktuella tåg. För givna priser genereras nya rutter, och därmed linjära avsnitt. I prisbestämningsmetoden har man bara en partiell beskrivning av målfunktionen, given av hittills genererade rutter. Man försöker iterativt minimera denna partiella beskrivning, samtidigt som alltför stora steg undviks med en kvadratisk straffterm. För en beskrivning av denna s.k. ”bundle-metod” se (Lindberg 2016).

Det förfarande som nu beskrivits tar tid. Nästan all iterationstid i det ursprungliga arbetet gick åt till billigaste-väg-beräkningarna. För att snabba upp processen finns i huvudsak två möjligheter,

- (i) Effektivare metoder, som ger snabbare iterationer
- (ii) Smartare metoder, som ger färre iterationer

Båda möjligheterna har utnyttjats i projektet. Eftersom billigaste-väg-beräkningarna tar mest tid att beräkna har också stora ansträngningar lagts på att få snabba iterationer. Det är då att notera att de olika billigaste-väg-beräkningarna är oberoende av varandra. De kan därför parallelliseras, dvs. det är möjligt att utnyttja att moderna datorer har flera processorkärnor, något som också testats med framgång i projektet.

För att få färre iterationer gäller det också att utnyttja den information som fås från billigaste-väg-beräkningarna så effektivt som möjligt. Detta har gjorts genom att modifiera bundle-metoden till en ”disaggregerad” bundle-metod, se Lindberg (2016). I denna har vi inte en total, utan en styckvis linjär överskattning för varje tåg. Rutterna för de enskilda tågen ger, som ovan, linjära stycken för respektive tågs överskattning.

Mycket arbete ägnas således åt att med så få iterationer som möjligt genomföra billigaste-väg-beräkningar. När detta gjorts blir tiden för att åstadkomma en heltalslösning relativt sett viktigare att minska. För detta ändamål har en metod framtagen av gruppen på ZIB, Rapid Branching, se Borndörfer, et al. (2010) utnyttjats. Ovanstående prissättningsmekanism leder, som nämnts, till en icke-binär, deltalig lösning. I Rapid Branching skapar man bra heltalslösningar genom att successivt gynna nära heltaliga variabler, genom intäktspåslag.

---

## 4. Resultat

---

### 4.1. Parallellisering av billigaste-väg-beräkningarna

Denna projektdel har utförts som ett projektarbete inom kursen SF2568 (*Parallel Computations for Large-Scale Problems*) vid KTH. Projektarbetarna Alain Kaeslin och Tobias Gurdan (K&G) har använt information om Malmbanan och dess tåg. Med detta som utgångspunkt har billigaste-väg-beräkningar genomförts såväl oparallelliserat som parallelliserat. Billigaste-väg-problemen omfattar ca 100 önskemål om tåglägen i nätverk med närmare 200 000 noder.

Resultaten visar att tidsåtgången för de stora sub-problem som studerats minskat linjärt med antalet processorer. Se Gurdan och Kaeslin (2015), Fig. 8a. 10 processorer ger alltså en uppsnabbning med en faktor 10, i jmf med 1 processor. Som nämnts ovan är detta viktigt, eftersom tiden för billigaste-väg-beräkningarna är den dominerande delen av total körtid.

K&G körde på en parallelldator med många processorer. Kraftfulla PC:s har idag ända upp till 16 kärnor per processorchip, och kan dessutom ha flera chip. Detta innebär att parallelliseringstekniken torde fungera också i en PC-miljö. Vid en fullskalig tillämpning vore det också möjligt att hyra in sig på en parallelldator.

### 4.2. Disaggregerad bundle-metod

Denna projektdel bedrivs som ett doktorandarbete av Abderrahman Ait Ali. Här finns tyvärr ännu ingen slutrapport. Ett slutresultat kommer att levereras inom en snar framtid.

### 4.3. Rapid Branching

Denna del har bedrivits som ett examensarbete i Optimeringslära, KTH, och redovisas i Andersson (2016). Där framkommer att för realistiska problem är Rapid Branching (RB) effektivare än standardiserade heltalslösare, trots att de senare består av kompilerad kod, medan RB är skriven i MatLab, som är interpreterande, vilket normalt gör en dylik kod avsevärt långsammare.

### 4.4. Indata

De gångtidsdata som erhållits från Trafikverkets system uppvisar kvalitetsbrister. Bland annat är gångtiden för flera tågtyper uppenbart inkonsistenta, vilket också meddelats Trafikverket. Det kan exempelvis innebära att ett tåg som accelererar från stopp till full fart ges kortare gångtid än motsvarande tåg som passerar i full fart. Vår bedömning är att dessa konsistensproblem hanteras manuellt av Trafikverkets personal i samband med tidtabelläggningsen.

Denna typ av brister får till följd till att tidtabeller som tagits fram i projektarbetet kan vara logiskt inkonsistenta. De är därför inte möjligt att jämföra den tidtabell som tagits fram i förstudien med den tidtabell som Trafikverket en gång i tiden fastställde. Varje framtida datorbaserat stöd förutsätter att indata av denna typ har kvalitetssäkrat.

---

## 5. Förslag till fortsatt arbete

---

Förstudien har visat att den modellansats som utformades och testades för tjugotalet år idag har ännu bättre förutsättningar för att vidareutvecklas mot praktisk tillämpning. Den begränsade budgeten i förstudien har inneburit att arbetet kommit att använda studenter och en doktorand för att djupborra i delar av detta komplexa problem. Det finns skäl att ytterligare utveckla delar av denna helhet för att ytterligare effektivisera genomförandet av processen. Exempelvis finns ännu inga ansatser för att skapa kopplingar mellan olika tåg med anslutningar i ett nätverk. Inte heller har problem där tåg från olika avgångsstationer helt eller delvis överlappar med andra tåg studerats. Ingenting har emellertid framkommit som talar mot en fullskaletillämpning.

Förstudien har med andra ord identifierat strategiska delar av en arkitektur för att ta fram en praktiskt fungerande algoritm för att lägga tidtabeller i järnvägsnätet. Inte minst de brister i kvalitén på indata som konstaterats gör att det knappast är lämpligt att föreslå ett nästa steg i form av att direkt påbörja en huvudstudie. Kombinationen av höga krav på grunddata och behovet att stegvis vidareutveckla och pröva de koder som byggs för att hantera modellens många komponenter gör det lämpligt att låta nästa steg utgöras av en pilotstudie. Med detta avses en tillämpning av den metodik som nu förfinats i en del av järnvägsnätet.

Förslaget är därför att pröva optimeringsalgoritmen parallellt med att tidtabellen tas fram i en skarp tillämpning. I ett sådant pilotarbete blir det också möjligt att ytterligare precisera de arbetsinsatser som krävs om tillvägagångssättet ska kunna tas till en framtida fullskalig tillämpning.

Förstudien har inte problematiserat de vikter som åsätts varje tåg som utgångspunkt för att söka efter en värdemaximerande lösning. En viktig startpunkt för optimeringen är således att överväga vilket utgångsvärde dessa vikter bör ges. Den ursprungliga avsikten med studien var att också diskutera hur detta kan göras. Det har emellertid visat sig mindre meningsfullt att lägga resurser på detta arbete till följd av de brister med gångtidsdata etc. som beskrevs ovan.

Denna fråga har emellertid hanterats i ett antal tidigare studier. En sammanfattning av flera aspekter på detta så kallade värderingsproblem formuleras i Nilsson (2002). Utgångspunkten för dessa resonemang är att operatörernas värdering av, eller betalningsvilja för att köra respektive tåg ger grunden för att åsätta dessa värden. En sådan ansats (en *Trassenbörse*) studeras för övrigt också av institutet ZIB.<sup>2</sup> Avsikten är att i en pilotstudie fördjupa kontakterna med denna forskargrupp och att utveckla hanteringen av dessa vikter i optimeringen.

---

<sup>2</sup> <http://www.zib.de/projects/slot-allocation-railways>



---

## Referenser

---

- Andersson, Jerker (2016), Solving the Train Timetabling Problem by using Rapid Branching, Examensarbete, Avd. för Optimeringslära och Systemteori, KTH
- Borndörfer, R, T Schlechte & S Weider (2010), Railway track allocation by rapid branching, in Erlebach & Lubbecke, (Eds.) *Proceedings of the 10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, vol. 14 of Open Access Series in Informatics (OASISs), pp. 13-23, Dagstuhl, Germany. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik. ISBN 978-3-939897-20-0. doi: <http://dx.doi.org/10.4230/OASISs.ATMOS.2010.13>. URL: <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2010/2746> .
- Brännlund, U., P.O. Lindberg, J-E. Nilsson & A Nöu (1998). Railway Timetabling Using Lagrangian Relaxation. *Transportation Science*, Vol. 32, No. 4, November 1998.
- Gurdan, Tobias and Alain Kaeslin (2015), Parallelised Shortest Path Algorithm for Railway Timetable Construction, Projektarbete inom kursen SF2568 Parallel Computations for Large-Scale Problems Inst. Matematik, KTH
- Lindberg, PO (2016), Mathematical Model for Train Timetabling/Track Allocation, Math8, Technical Note, TEK/VTI
- Lindberg, PO (2015), Blockeringsregler, Technical Note, SEK/VTI
- Lundberg (2000), Föreskrift TF601 Riktlinjer för Tidtabellskonstruktion för tåg på statens spåranläggningar, Tågtrafikledningen
- Nilsson, J-E. (2002). Towards a Welfare Enhancing Process to Manage Railway Infrastructure Access. *Transportation Research, Part A*, 36 2002, pp. 419-436.
- Slechte T (2012), Railway Track Allocation: Models and Algorithms, PhD Thesis, Technische Universität, Berlin

---

6. Här börjar rapporten

---

---

## Bilaga 1

---

Infoga eventuella bilagor här.