

Slutrapport för förstudien SOSE - Stationsutformning och Samhällsekonomi

Martin Aronsson

RISE Rapport : 2026:48

Slutrapport för förstudien SOSE - Stationsutformning och Samhällsekonomi

Martin Aronsson

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport : 2026:48

ISBN: 978-91-90109-77-9

Stockholm 2026

© RISE Research Institutes of Sweden

Innehåll

Innehåll.....	2
Förord.....	3
Sammanfattning	4
1 Bakgrund	5
2 Problemets komponenter	6
2.1 Samhällsekonomisk värdering	8
2.2 Kapacitet, produktivitet och effektivitet.....	10
2.2.1 Om begreppet kapacitet	10
2.2.2 Skillnaden mellan kapacitet och produktivitet	12
2.2.3 Lean inom logistik	13
2.3 Informationskedja för värderad kapacitet	13
2.4 Problemformulering.....	15
3 Area-baserat kapacitetsmått	16
4 Max-Plus algebra.....	18
5 Critical Path Method	19
6 Villkorsprogrammering	20
7 Ansats 1.....	21
7.1 Max-plus algebra och kapacitetsberäkning.....	21
7.2 Linje med flera mötesstationer	25
7.3 Samhällsekonomi	26
7.4 Resultat.....	27
8 Ansats 2	28
8.1 Sannolik väntekostnad	28
8.2 Tredje tåget.....	32
9 Ansats 3.....	33
9.1 Sannolika tågordningar	34
9.2 Sannolikheterarnas värden.....	38
9.3 Flera mötesstationer.....	39
9.4 Flera tåg och begränsad kapacitet	40
10 Diskussion och slutsatser.....	41

Förord

Upprinnelsen till projektet SOSE¹ var ett uttalat behov från Trafikverket att stärka infrastrukturförvaltarens förmåga att värdera olika utbyggnadsalternativ mot varandra där alternativen innehåller mindre driftplatser samt stärka förmågan att framtidssäkra investeringarna och därmed kostnadseffektiviteten i satsade statliga medel. Upplevelsen idag är att åtgärdsvalsstudierna inte i tillräckligt hög grad baserar sig på vetenskapligt underbyggda metoder. Det betyder inte att infrastrukturförvaltaren står utan metoder för att värdera utbyggnadsalternativ men att det som används idag är grövre och/eller enklare till sin karaktär. I en egen gap-analys² har ett antal områden identifierats som behöver belysas och utvecklas för att nå en bättre underbyggd värdering, inte minst vad gäller metoder för värdering över längre tidshorisonter. Kalkylperioden är 60 år vilket i sig är cirka 40 år längre än den prognoshorison som Trafikverket använder sig av i sin långsiktiga transportprognos. En stor del av SOSE har därför ägnats åt det långa tidsperspektivet och hur det påverkar både kapacitetsbedömningen samt den samhällsekonomiska värderingen.

¹ FoI-projektet SOSE - Stationsutformning och SamhällsEkonomi, med stöd från Trafikverkets FoI-program TRV 2024/76318 och del av forskningsprogrammet KAJT, se <https://kajt.org>

² Trafikverket 2021, Förstudie Utveckling av modell för kapacitetsberäkningar – Kartläggning av brister och utvecklingsbehov, intern rapport TRV2021/147548

Sammanfattning

Investering i järnvägsinfrastruktur görs med 60 års kalkylperiod. För att säkerställa en samhällsekonomiskt effektiv investering behöver både den nuvarande transportefterfrågan och framtida behov beaktas. För att kunna göra detta behöver inte bara nuvarande flaskhalsar och trångsektorer adresseras utan också framtida sannolika förändringar i efterfrågemönster och möjliga senare investeringar i infrastruktur beaktas. En viktig fråga blir då att framtidssäkra infrastrukturens utveckling. En generell regel i det sammanhanget är att möjliggöra effektiv användning av infrastrukturen för olika sannolika framtidsscenarios. Följande rapport beskriver resultatet av en förstudie i vilken tre olika ansatser har prövats: en ansats vilken baseras på att generera många olika trafikeringar och beräkning av transporttider vilka därefter utvärderas med Max-Plus algebra, en ansats baserad huvudsakligen på sannolikhetsberäkningar och en ansats där kombinatoriken för de möjliga framtida tidtabellerna (tågordningarna) "internaliseras" i sannolikhetsberäkningar och där en vägd skattning för framtida genomförandetid för en bestämd mängd tåg med avgångstider inom ett tidsfönster kan beräknas med Critical Path Method, CPM. Vi har funnit att den tredje ansatsen har förutsättningar att kunna utvecklas vidare medan den första ansatsens resulterar i ett ohanterligt stort antal fall att undersöka medan den andra ansatsen snabbt blir mycket komplex med ökande antal tåg. Vidareutveckling av den tredje ansatsen inbegriper introduktion av sannolika beroenden, vilket visas i rapporten med exempel. Utöver introduktionen av beroenden med sannolikheter återstår att utveckla en utökning av CPM med enklare resurshantering, till exempel hantering av flera tåg samtidigt. Detta bedöms som nödvändigt för att minska kombinatoriken och arbeta med sannolikheter för händelser snarare än att undersöka många olika trafikeringar för sig.

1 Bakgrund

I samband med kapacitetsförstärkning av järnvägsinfrastruktur behövs värdesatt framtida trafik för att bedöma nyttan med utbyggnaden och kunna ställa den mot andra förslag och deras kostnader, så kallade åtgärdsvalsstudier (ÅVS). Det är i dessa viktigt att kunna undersöka flera alternativa utbyggnader och utformningar liksom bedöma olika trafikeringar och deras sannolikheter för att säkerställa en effektiv användning av medlen såväl i närtid som på längre sikt. I samhällsekonomiska värderingar är restidsvinst (VOT, Value of Time eller VTTS, Value of Travel Time Savings) ett viktigt inslag nyttobedömningen, liksom möjligheten för tillkommande trafik.

Den metod som används idag för att utvärdera kapacitetsutnyttjandet på järnväg baseras på en av Trafikverket³ utvecklad version av standarden UIC406⁴. UIC406 utgår från en fast trafikering med fasta tågordningar och denna "komprimeras" därefter tidsmässigt ihop, med bibehållen tågordning, varvid eventuell bufferttid och obelagd tid som finns i schemat/tidtabellen friläggs ned till att en kritisk linje av beroenden mellan tågens olika resursbeläggningar har uppstått. Tågordningarna på infrastruktur-objekt (t.ex. spårkryss och växlar mm) är i UIC406 låsta. Detta gör att UIC406-metoden snarare mäter produktiviteten för en given plan än kapacitet hos infrastruktur. Idag används dock UIC406-metoden och utvecklingar av den i brist på annan metod i samband med tex. åtgärdsvalsstudier, så kallade ÅVS:er.

I tidigare arbeten^{5,6,7} har nyligen utvecklats ett kapacitetsmått⁸ för en friare kapacitetsbedömning av framtida trafik över en studerad infrastruktur. Måttet är frikopplat från tågordningen och har en direkt koppling till värdering av samhällsekonomisk nytta. Måttet utvecklades med målet att användas i TTR-processen⁹ och kommissionens förslag till ny förordning på området¹⁰. Detta mått och sättet att abstrahera bort från fasta tågordningar utgör en grund för det arbete som presenteras i denna rapport.

³ Magnus Backman et al, (2024), Järnvägskapacitet i samhällsekonomisk analys, Trafikverket 2024-02-14

⁴ UIC leaflet 406 Capacity, UIC International Union of Railways, Paris, 2013

⁵ Aronsson, M. (2023). Värdering av tågtrafik i TTRs förhandsplanering - Slutrapport från projektet TOT, Tjänsteutbud Och Transportkapacitetsförsörjning på järnväg. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-68679>

⁶ Aronsson, M., & Kjellin, M. (2022). Reservkapacitet i tilldelningsprocessen (RIT) – Slutrapport. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-61171>

⁷ Aronsson, M. (2024). Förhandsplanering i kapacitetstilldelnings-processen på järnväg. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-76985>

⁸ Aronsson, M. (2022). En not om att mäta kapacitet på järnväg. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-62046>

⁹ RailNetEurope, 2023, Description of the Timetabling and Capacity Redesign Process version 3.0, https://rne.eu/wp-content/uploads/2022/10/long_desc_of_the_TTR-Process-v3.0.pdf

¹⁰ Förslag till EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING om utnyttjande av järnvägsinfrastrukturkapacitet i det gemensamma europeiska järnvägsområdet, om ändring av direktiv 2012/34/EU och om upphävande av förordning (EU) nr 913/2010, <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/SV/ALL/?uri=CELEX%3A52023PC0443>

Flera arbeten^{11,12} har modellerat schemaläggning och kapacitetsberäkning överensstämmande med UIC406-metoden med hjälp av Max-Plus algebra¹³. Detta är en beräkningsmässigt effektiv metod baserat för att undersöka en trafikering av driftplatser och linjer. Metoden beräknar, för en given trafikering, minsta återupprepnings-tid, den s.k. minsta cykeltiden. Denna cykel kan sedan upprepas om och om igen. Om de tåg som man planerar för ryms inom vald tidsutsträckning så fungerar trafikering och infrastruktur tillsammans för att leverera den avsedda (krävda) mängden tåg medan om antalet tåg är färre än kravet så måste trafikering och/eller infrastrukturen ändras.

Förstudien SOSE har undersökt olika sätt att kombinera de två metoderna för att dels vinna en framtidssäkrad infrastruktur genom att många trafikeringar kan representeras genom det nya kapacitetsmåttet, dels att den undersökta linjens utformning möjliggör de trafikeringar som kan tänkas förekomma i framtida tågplaner givet linjekapaciteten uttryckt i det nya kapacitetsmåttet. Den samhällsekonomiska nyttan kan mätas dels genom den skillnader i cykeltiden för det upprepade trafikmönstret, dels som tillkommande trafik genom att fler cykler får plats inom samma undersökta tidsperiod.

2 Problemetts komponenter

Uppgiften består i att göra en samhällsekonomisk bedömning av infrastruktur-satsningar som beräknas ha en livslängd på 60 år. Ofta initieras denna som ett svar på att det uppstår trängsel och väntetider samt kvalitetsbrister (dålig punktlighet) på ett visst bansegment. Trängsel uppstår dels i planeringsskedet av trafik då det finns fler tåglägen under en tidsperiod än det finns kapacitet på banan att schemalägga dessa, eller till exempel som en konsekvens av regelbundet återkommande kvalitetsbrister (opunktlighet). I denna rapport koncentreras resonemangen kring kapacitetsstudier för planerad trafik, företrädesvis på lång sikt i samband med infrastrukturinvesteringar.

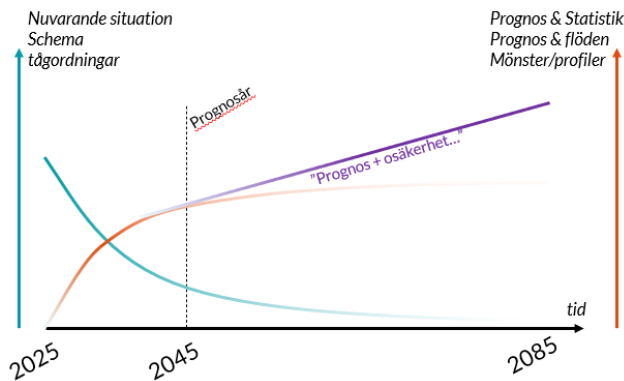
Givet en situation ett visst år är tågplanen för detta år känd, liksom det huvudsakliga kravet på trafik de närmaste åren. Men en infrastrukturinvestering har en kalkylperiod på 60 år och det är i stort okänt hur tidtabeller mm ser ut om 60 år. Trafikverkets långsiktiga prognoser tar fram årsflöden för alla transportslag gemensamt där järnvägs- trafik är ett av dessa transportslag. En kapacitetsbalansering utförs varvid genom- snittliga dygnsflöden kan beräknas. Detta ger upphov till en viss mängd tåg vilka ”rullas ut” som en trafik med en viss frekvens (dvs det är lika lång tidsperiod mellan alla tåglägen). Trafiken är således beräknad med en upplösning på dygn och därmed kan en frekvens över dygnet räknas ut.

¹¹ Goverde, R.M.P.: The Max-Plus Algebra approach to railway timetable design. In: B. Mellitt, R.J. Hill, J. Allan, G. Sciutto, and C.A. Brebbia, (eds.), Computers in Railways VI, (1998) 339–350. WIT Press, Ashurst

¹² Ekman, J. (2011). Kaban -- A tool for analysis of railway capacity. WIT Transactions on Modelling and Simulation, 693–702. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-23904>

Det mer formella namnet för ¹³ Max-Plus algebra är Tropical Semiring, se tex. https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_semiring

Sett som ett 60-årigt planeringsproblem så är säkerheten i underlaget hög för innevarande tågplan medan det finns stora osäkerheter 60 år framåt i tiden¹⁴. Målet med prognoserna på så lång sikt är att prognosticera huvud-flödena med viss säkerhet, vi är långt ifrån tidtabeller och prognosticerade tågplaner. Figur 1 illustrerar denna gradvisa övergång av bedömningen från detaljerade tidtabeller och tågordningar till prognosticerade transportflöden.



Figur 1 Olika komponenters betydelse för den samhällsekonomiska värderingen över tid.

Detta betyder att en god samhällsekonomisk värdering helst behöver kunna hantera flera olika komponenter samt sätta ihop dessa till ett sammanvägt resultat. I nuvarande situation kan tidtabeller, tågordningar och resande/godstransportunderlag användas medan på längre sikt övergår detta till prognosvärden med inneboende osäkerheter samt även osäkerheter vad gäller andra infrastrukturförändringar. Över tid blir då detaljerade tidtabeller mm inte adekvata att använda som underlag eftersom det med största sannolikhet inte kommer stämma med hur verkligheten kommer bli¹⁵.

Resultaten i denna rapport kommer från en studie¹⁶ med målet att lyfta de nuvarande metoderna för kapacitetsberäkning till att dels på ett tydligare sätt innefatta den samhällsekonomiska värderingen, dels möjliggöra ”framtidssäkring” av investeringen genom att tydligare hantera prognosen och dess mer generella beskrivning av transportbehovet med upp till 60 års framförhållning. Detta gäller framför allt de längre tidsperspektivet då Trafikverket idag har metoder för att värdera nyttan i ett nära perspektiv baserat på tidtabeller. Även om dessa metoder även de kan vidareutvecklas så är behovet för det längre tidsperspektivet än mindre täckt av bra metoder och metodik.

Målet med studien är att testa en metod baserad på huvudsakligen två komponenter:

- 1) Ett nyligen framtaget kapacitetsmått¹⁷ för kapacitetsbedömning i tidiga faser för kapacitetstilldelning i den nyligen beslutade överstatliga EU-förordningen¹⁸.

¹⁴ När detta skrivs är det 2026. 60 år tidigare (1966) var infrastrukturen väsentligen annorlunda, fordonen likaså t.ex. fanns inte X2000 och RC-loket var precis på väg att introduceras. ATC fanns ännu inte.

¹⁵ En återkommande kommentar är ungefär ”... det enda vi vet är att vi kommer ha fel i vår (detaljerade) trafik- och kapacitetsprognos över tid”.

¹⁶ FoI-projektet SOSE - Stationsutformning och SamhällsEkonomi, med stöd från Trafikverkets FoI-program TRV 2024/76318 och del av forskningsprogrammet KAJT, se <https://kajt.org/>

¹⁷ Aronsson, M. (2022). En not om att mäta kapacitet på järnväg. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-62046>

¹⁸ Då detta skrivs är förordningens innehåll färdigförhandlat, översättning till EUs alla officiella språk pågår och formellt undertecknande förväntas ske kvartal 2 2026. Den första tågplan som

Kapacitetsmättet är avsett att användas i förplaneringsskedet innan ansökan om kapacitet och specifikt anpassat till den s.k. kapacitetsmodellen. Mättet utgår från att kapacitet är den area som ett tåg upptar i en tids-rums-graf (Marey-graf). Denna kapacitet ”konsumeras” av tåget då det framförs på banan. Utöver detta ”konsumeras” kapacitet (area) då t.ex. tåg med olika hastighet schemaläggs efter varandra.

- 2) En sedan tidigare framtagen metod för att beräkna kapacitetsuttaget på en bandel eller driftplats genom att beräkna den minsta tiden för en upprepad trafik-cykel. Denna beräkning bygger på Max-Plus algebran¹⁹ och är en mycket effektiv metod att beräkna den kortaste genomförandetiden i en beroendegraf. Den minsta cykeltiden motsvarar den kritiska linjen vid projektplanering, med den skillnaden att cyklerna kan läggas efter varandra i ett återupprepat mönster.

I stycke 3 beskrivs både kapacitetsmättet och i stycke 4 beskrivs Max-Plus algebran. Tanken med ansatsen var att modellera framtida trafik i enlighet med area-baserade mättet för att därigenom beräkna de konfliktsituationer som kan uppstå på bandelen som undersöks. Dessa konfliktsituationer ger upphov till ett antal olika möjliga trafikeringar vilkas genomförandetid beräknas med hjälp av Max-Plus algebra för att undersöka om önskad trafikmängd är möjlig att realisera inom tidsramen.

2.1 Samhällsekonomisk värdering

Det finns flera ramverk framtagna för samhällsekonomisk värdering av infrastruktur, bl.a. ASEK²⁰ i Sverige och Vademecum²¹.

ASEK (Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden)²² är framtagen och förvaltas av Trafikverket tillsammans med flera andra svenska aktörer. ASEK är Trafikverkets rekommenderade metod och kalkylvärden för samhällsekonomiska analyser inom transportsektorn. Den används för att beräkna nyttan av infrastrukturprojekt som t.ex. väg- och järnvägsbyggen genom att värdera tidsvinster, trafik-säkerhet, buller, luftföroreningar och klimatpåverkan. ASEK ligger även till grund för tex. Prioriteringskategoriernas schablonvärden och är det de-facto värderingsverk som finns framtaget för att värdera transporttjänster i Sverige.

tas fram enligt det nya regelverket är tågplan 2031 och eftersom processen startar 5 år innan tågplanen tas i bruk startade processen för T31 i december 2025.

¹⁹ Goverde, R.M.P.: The Max-Plus Algebra approach to railway timetable design. In: B. Mellitt, R.J. Hill, J. Allan, G. Sciutto, and C.A. Brebbia, (eds.), *Computers in Railways VI*, (1998) 339–350. WIT Press, Ashurst

²⁰ Trafikverket (2026), *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden, ASEK*, <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/Samhallsekonomisk-analys-och-trafikanalys/samhallsekonomi/analysmetod-och-samhallsekonomiska-kalkylvardenasek/>

²¹ European Investment Bank (2025), *Economic Appraisal Vademecum 2021-2027 - General Principles and Sector Applications*, <https://jaspers.eib.org/knowledge/publications/economic-appraisal-vademecum-2021-2027-general-principles-and-sector-applications>

²² Trafikverket (2026), *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden, ASEK*, <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/Samhallsekonomisk-analys-och-trafikanalys/samhallsekonomi/analysmetod-och-samhallsekonomiska-kalkylvardenasek/>

Vademecum är framtagen av EU-kommissionen och European Investment Bank. Den innehåller riktlinjer för hur CBA-analyser kan och helst bör göras inom EU. Starkt sammanfattat så utgör antal resande och mängd gods tillsammans med sträcka och tid två viktiga faktorer i bedömningen av den samhällsekonomiska nyttan. Beräkningen av den s.k. *generella kostnaden* görs i de mer generella fallen som att varje resenär eller ton gods framförs ”när som helst” dvs. det är enbart genomförandetiden och -sträckan som räknas. För transporter med tåg tillkommer att enbart större diskreta enheter framförs så resande och gods behöver ”sammanföras” till dessa enheter, något som ger upphov till samordningskostnader då resande/gods behöver vänta på avgång eller byten.

Värdering av tillkommande trafik är svårare att fånga än tidsvärden / tidsbesparing för resande och gods. Jämförelsen skall göras mot andrahandsalternativet för den transport som skall ”attraheras”, således vad transportköparen / resande skulle valt om denne inte hade det högst önskade transportalternativet på järnväg (t.ex. det bättre alternativet på järnväg efter utbyggnad). Detta andrahandsalternativ är ofta både lokalt till individ och även hur annan infrastruktur kan komma att byggas ut samt även kommande fordonspark. Det finns också en tröghet i hur transportköparna betar sig då ett nytt alternativ läggs till. Icke desto mindre görs mycket infrastrukturutbyggnad med avseende på ökade trafikvolym, och denna nytto-post är viktig att fånga då tex. mycket godstågstrafik karakteriseras av att nyttan uppstår som en funktion av mängden trafik (flödets storlek) och att den sker, inte i samma utsträckning tidsvärdena som för resandetrafiken.

Vi har i denna rapport inte gått in mer i detalj på den samhällsekonomiska värderingens faktiska värden utan koncentrerat oss på mer generella resonemang såsom att det är möjligt att mäta restidsvinster och tillkommande trafik på ett systematiskt sätt, därigenom göra det möjligt att bygga på den samhällsekonomiska värderingen på det resultat som de nedan studerade ansatserna levererar. I princip kan dock sägas att byggandet av ny järnvägsinfrastruktur motiveras av främst tre faktorer:

- Tidsvinst för resande och gods (per ”individ”)
- Volym av resande och gods (summa ”individer”), både per tåg men också totalt (dvs fler antal tåg möjliggör mer transporter)
- Kvalitet, främst punktlighet, uppdelat i
 - individens ”upplevelse” av kvalitet vid leveransen
 - säkerhet i att både att resande- och godsvolymer levereras över tid (systemets förmåga att klara av planerade kapacitetsrestriktioner och störda situationer).

Således önskar vi kunna uppskatta den sannolika tidsvinsten per ton god och per resande före utbyggnad (JA) och efter utbyggnad (UA) samt sannolikheten för utökad trafik och därmed ökad volym resande och gods på sträckan. Kvalitetsbristkostnader brukar räknas som en faktor multiplicerat med VOT/VTTS, denna kräver dock att det görs simuleringar eller andra beräkningsmetoder för att kunna uppskattas för olika trafik och infrastruktur.

2.2 Kapacitet, produktivitet och effektivitet

Detta stycke introducerar några vanligt använda begrepp som ibland kan användas synonymt men som det lönar sig att hålla isär. Enheten som de kan mätas i sammanfaller i vissa domäner men betydelsen av dem är olika.

2.2.1 Om begreppet kapacitet

Kapacitet är en förmåga som kan användas till att producera något. Då detta "något" produceras så används kapacitet (tilldelas i planering eller konsumeras över tid under produktion). Kapaciteten hos en produktionsresurs är normalt sett begränsad och mäts i någon form av enhet som kan "användas" till att producera produkter eller tjänster. Ett exempel är en lastbil som har en lastkapacitet (uttryckt i ton och/eller kubikmeter) samt en förmåga att flytta sig mellan två punkter över tid. Lastbilens förmåga att bära last har en övre begränsning (restriktion) samt en övre begränsning på sträckan den kan förflytta sig per tidsenhet. Lastbilens kapacitet kan användas för att transportera (olika typer av) last mellan två punkter, varvid lastförmågan används under den tid som transporten pågår.

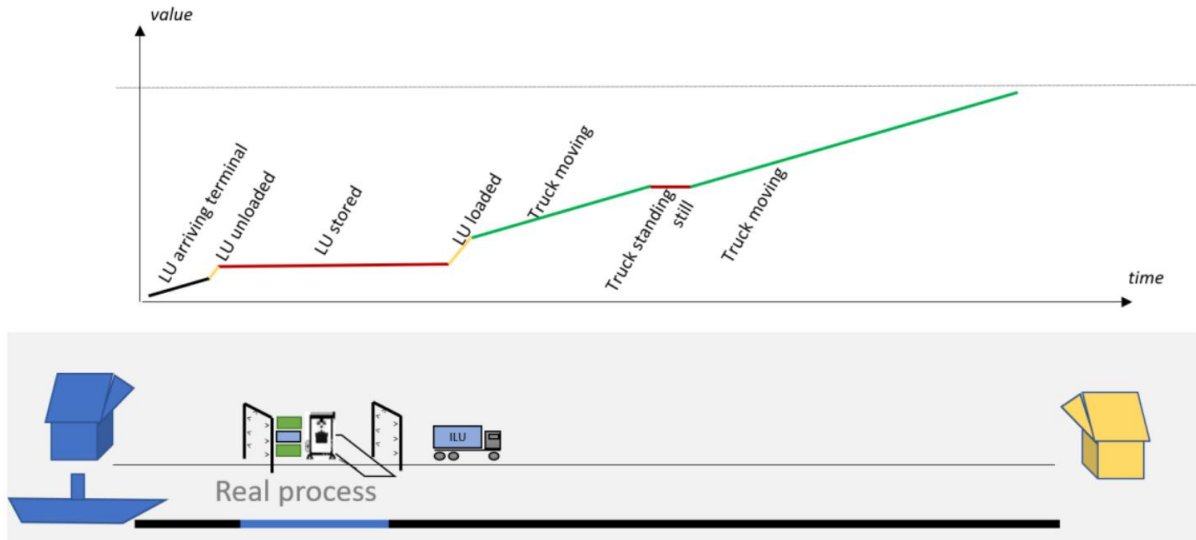
Kapacitet i samband med tjänsteproduktion är ofta nära kopplad till tidsåtgång och när i tiden den utförs, dvs. den finns tillgänglig att utnyttjas över tid. Utnyttjas den inte under en del av tiden så är den outnyttjad den tiden och skapar därmed inget värde, men den finns ändå tillgänglig: kapaciteten "är". Kapacitet åtgår inte bara för att producera tjänster eller stå outnyttjad, kapacitet kan också allokeras/används för tex. underhåll av produktionsresursen samt ställtid (dvs. ställa om resursen att producera något annat). Då lastbilen är på service så nyttjas inte kapaciteten till värdeskapande transporter utan lastbilen underhålls under viss tid på verkstad. Då lastbilen kör (delvis) tom mellan två platser uppstår ställtid eftersom förflyttningen är nödvändig för att lastbilen skall komma i position för att lasta. Tomtransporter kan alltså ses som ställtid att komma i position för att utföra värdeskapande arbete ("nödvändigt ont" som skall minimeras). Då lastbilen är lastad och kör utförs ett transportarbete då denna last förs från en position till en annan och således skapas då värde för transportköparen vilket denne är villig att betala en ersättning för. Denna ersättning är kopplad till ett antal kvalitetsegenskaper hos transporten av vilka punktlighet och effektivitet är två viktiga egenskaper.

Vi gör skillnad på värdeskapande användning av kapacitet, dvs. då resursen används för att producera en tjänst åt (extern) kund. Ej värdeskapande tid är sådan tid som åtgår till nödvändig omställning för att ändra tjänstetyp som produceras, tid för underhåll av resursen samt rent spill (outnyttjad kapacitet tex. då fordonet står still). Outnyttjad kapacitet har två underkategorier beroende på om efterfrågan på resursen som producent finns (någon skulle ha haft nytta av resursen om det varit känt att resursen finns tillgänglig) eller om ingen efterfrågan finns (dvs. det finns helt enkelt ingen avsättning för resursen).

Värdeskapande arbete i exemplet ovan är då lastbilen utför transport med last och kan till exempel modelleras med en metod som kallas "Value Stream Mapping", VSM²³. Värdeskapande arbete ses då som en funktion av kalendertid, en graf skapas där värde

²³ Se tex. Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Value-stream_mapping, hämtat 2022-10-30

finns längs Y-axeln och kalendertid löper längs X-axeln. Den graf som då uppstår redovisar hur värde adderas till tjänsten då transporten sker över tid. Ett exempel visas i Figur 2 där en transport av tex. en container utförs mellan en terminal (till vänster) och en kunds varumottagning (till höger).



Figur 2 VSM för en lastbil som kör mellan två terminaler.

Ofta används färgkodning för att skilja på de olika formerna av kapacitetsanvändning. Grön användning (tid) är sådan användning som skapar värde för kund, gul användning är ej värdeskapande användning men nödvändig för att komma i position för grön användning (tex. ställtider för att ändra tjänstetyp som produceras), samt röd användning vilket kallas för spill. Skillnad görs också här mellan röd ej efterfrågad användning och röd men efterfrågad användning, det senare är ofta en effekt av beroenden i schema mellan olika produktionsresurser som leder till oönskade "hål" i produktionen hos enskilda produktionsresurser, även om det finns efterfrågan på tjänsteproduktion.

Då produkter framställs så finns alternativet att producera till mellanlager vilket kan påverka både den gula ställtiden och det röda spillet²⁴, men för tjänster är detta svårt då tjänsten konsumeras i samma ögonblick som den produceras och därför går det inte att producera till lager på samma sätt. I viss mån kan man säga att ledtid motsvarar lager för tjänsten, dvs då en tjänst "stannar" i väntan på tex. en annan tjänst som just då produceras. I en VSM syns detta på att inget värde läggs till tjänsten vilket motsvaras av att en halvfärdig produkt ligger på ett lager i väntan på fortsatt produktion, i Figur 2 sker detta vid "Truck standing still" då lastbilen står still i tex. en kö.

²⁴ Detta syns tex. då produktionsresursen är dyr men där vinsten av att använda den inte tillfaller den organisatoriska enheten som investerar i utrustningen, det kan vara dyr apparatur i vården vars antal hålls lågt (minimera investering) och därmed schemaläggs nästintill 100%. Effekten blir köer för "produkterna" som skall "köras" genom apparaturen, dvs. patienterna, provsvar etc. Produktiviteten är hög men mängden "produkter i arbete", PIA, som anger påbörjade men ej färdigställda produkter är också hög vilket indikerar att det tar lång tid för varje produkt att bli färdig.

2.2.2 Skillnaden mellan kapacitet och produktivitet

Begreppet kapacitet blandas ibland ihop med begreppet produktivitet. Men där kapacitet berättar något om förmågan hos resursen att producera något så talar produktivitet om hur mycket tjänster eller produkter som har producerats. Till exempel kan en maskin ha en (nominell) kapacitet att producera 30 enheter av en viss produkt per timme medan under en viss timme produceras 20 stycken enheter (faktisk produktivitet). Man kan säga att kapacitet åtgår för att producera en produkt eller tjänst, medan produktivitet mäter antalet produkter eller tjänster som produceras, i förekommande fall även produktmix. Kapacitet kan också sägas vara en ”insatsvara” medan resultatet av ”insatsen” mäts i produktivitet. Effektivitet slutligen är hur väl kapaciteten (eller medlen) har använts för att åstadkomma produktiviteten.

För att kunna uttrycka att kapacitet åtgår för att producera en produkt eller tjänst är det nödvändigt med ett mått, ”kapacitetsenheter”, som avspeglar konsumtionen av kapacitet, ”kapacitetskonsumtionen”, under tillverkningen av produkten eller tjänsten. Detta mått skall avspegla insatsen som behöver göras för de olika produkter eller tjänster som är aktuella, inklusive eventuell tid som åtgår för att ändra i tillverkningen mellan de olika produkterna (tjänsterna). För att genomföra ett visst antal (olika) tjänster eller producera en viss mängd (olika) produkter behöves en ”kapacitetsbudget” som svarar på om detta är möjligt eller inte.

Denna sammanblandning av kapacitet och produktivitet gäller även då tågtrafik planeras. Antal tåglägen (per timme) är egentligen ett produktivetsmått. Det finns givetvis ett produktivitetstak, en maximal mängd tåg (per tidsenhet) som kan produceras, under de bästa förhållandena och då hastighet mm anpassats så att maximalt antal tåglägen planerats in. Men som kapacitetsmått hjälper inte detta produktivitetstak oss att förstå hur en blandad trafik kan produceras, med olika hastighet och andra egenskaper, där det åtgår tid mellan tågen med olika hastighet / prestanda. Kapacitet bör i stället mätas som en förmåga att producera olika tåglägen anpassade efter ett tänkt produktionsmål för verksamheten. Kapacitetsmättet skall hjälpa planeraren att fatta beslut om andelar av olika transportslag (tjänste-mix) och kunna tjäna som mått för reservationer etc.

Förutom till själva tågsläget så åtgår kapacitet också för att ändra ”inställning” hos produktionsresursen för att producera olika typer av produkter eller tjänster. För tågplanen så betyder detta att olika tåglägen har lika tidsmässiga prestanda på banan och därmed uppstår behov av ställtid, dvs sådan tid som är en effekt av att blanda olika hastigheter varvid kapacitet åtgår för denna omställning och därmed inte kan nyttjas till andra tåglägen (möjligen kan annan verksamhet nyttja tiden t.ex. enklare underhållsinsatser såsom inspektioner). Ställtid i industrin uppstår ofta då maskinen skall konfigureras om, tex. byte av valsar i ett stålverk. I tågslägesplaneringen uppstår ställtid då tåg med olika prestanda blandas eller då riktningen ändras på en enkelspårsbana.

Kapacitet konsumeras vidare för tex. underhåll samt i olika fördröjningar och ”spill” då tåglägen inte alltid kan läggas direkt efter varandra tex. beroenden som uppstår vid korsande tågvägar eller förgreningar i nätet.

2.2.3 Lean inom logistik

Spill (Waste) i Lean definieras som verksamhet ("action") som inte adderar värde till kund. Inom Lean-metodologin anger man ett antal olika typer av spill, syftet med typerna är att eliminera, så långt möjligt, det som inte leder till värde för (betalande) kund. Inom logistiken har motsvarande principer för olika typer av spill tagits fram. Dessa kan sammanfattas i följande områden:

- Överproduktion, att leverera varor före utsatt tid
- Väntan, att vänta på nästa uppdrag/aktivitet
- Ineffektiv befordran, onödig transporter t.ex. genom längre färdväg än nödvändigt
- Onödig rörelse, onödig (extra) rörelse som inte leder till förflyttat gods/person
- Defekter, t.ex. gods som förstörs under transporten
- Dåligt resursutnyttjande, t.ex. fordonsfyllnad men även dålig planering av infrastruktur

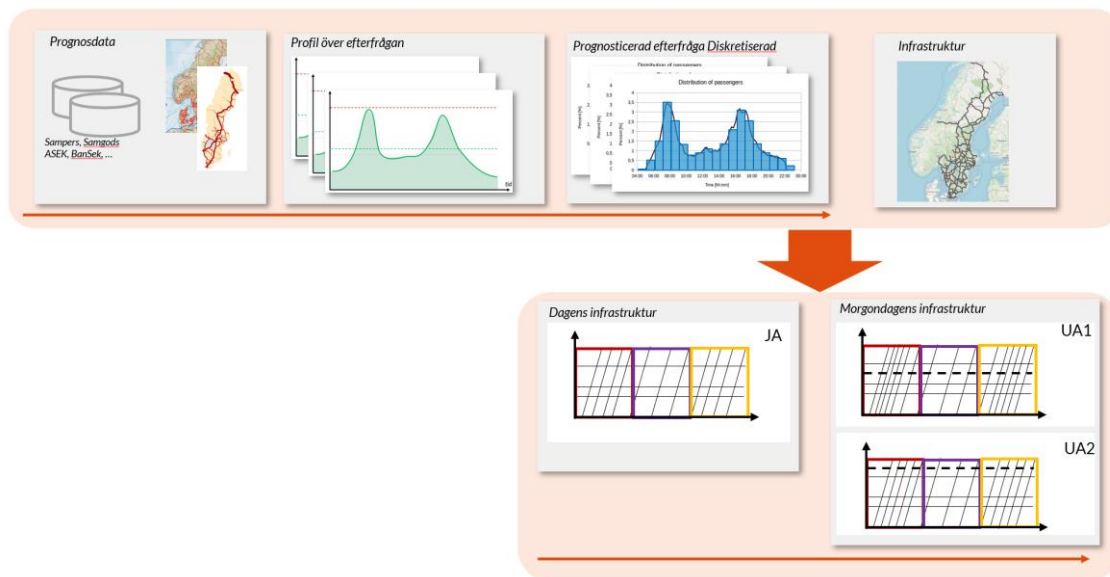
Dessa principer gäller den faktiska verksamheten som planeringen av transporter avser utföra på ett effektivt sätt. I denna rapport är vi dock mer intresserade av själva planeringsprocessen i sig, att den är effektiv och har rätt verktyg.

2.3 Informationskedja för värderad kapacitet

De långsiktiga prognoserna som tas fram på Trafikverket sträcker sig cirka 20-25 år framåt i tiden. Kalkylperioden för infrastrukturinvesteringar sträcker sig 60 år framåt i tiden. Redan här introduceras en stor osäkerhet i värderingen av investeringen då knappt 2/3 ligger utanför prognosens horisont²⁵. För de närmaste 20-25 åren finns en prognos vilken bland annat baseras på körningar i systemen Samgods och Sampers, se Figur 3. Resultatet från dessa är transportarbete och transportflöden mellan orter i termer av årsvolymer vilka i sin tur kan fördelas på dygnsvolymerna mellan orterna, så kallad OD-par. Byts detta transportarbete upp i diskreta delvolymerna så kan dygnsfrekvenser skapas för tex. tåg²⁶.

²⁵ Då detta skrivs 2026 så är det således de infrastrukturinvesteringar som gjordes 1966 som kalkylperioden nu är slut.

²⁶ Detta är lite mer komplicerat då tex. transportarbetet för godsvolymer räknas ut i 16 olika varugrupper var för sig, så dessa behöver för järnvägen aggregeras och slås ihop till större enheter lämpliga att forma tåg.



Figur 3 Steg i värderingen av olika utbyggnadsalternativ. Från prognosdata och skattade belastningsprofiler över typdygnet (eller typveckan) kan den över tid varierande trafiken för olika perioder beräknas. Givet infrastrukturen kan dels dagens trafiksituation värderas, dels kan olika framtidsscenarios utvärderas (UA) och ställas dels mot dagens situation, dels gentemot varandra.

Dock är dessa jämnt utspridda över dygnet och för vissa av dessa, notabelt för regionaltrafik, finns i praktiken tydliga efterfrågetoppar och -dalar. Genom att applicera skattningar av dygnsprofiler för efterfrågorna i OD-relationerna kan dessa jämna frekvenser fördelas på ett för efterfrågan mer anpassat sätt. Vi får efterfrågekurvor för tåg baserat på prognosens transportvolym där efterfrågad kapacitet utgörs av toppen på skattningen.

En sådan skattning kan göras genom att ta dygnsvolymen och fördela den jämnt över dygnets 24 timmar. Därefter omformas arean under den jämna 24-timmarsförbrukningen i enlighet med efterfrågeprofilen för denna typ av transport och stationssträcka ("bandel"), med bibehållande av areans storlek. Vi kan därefter avläsa erforderlig produktivets-maximum som är den högsta punkten på kurvan. Den kapacitet som erfordras av infrastrukturen skall kunna producera som det högsta värdet på produktivets-diagrammet (ha den produktiviteten). Detta motsvarar den övre delen i Figur 3.

Vi har nu fått ett underlag för att undersöka om tillgänglig kapacitet räcker till eller om förstärkningsåtgärder behövs. Det är vid denna punkt som förstudien SOSE ansluter sig till. Antal tåg och deras frekvens är givna inom en viss tidsperiod och det som skall undersökas är dels om trafiken kan produceras, dels om det är samhällsekonomiskt lönsamt att bygga ut infrastrukturen så att den prognosticerade trafiken på ett effektivare sätt kan produceras, dvs är det värt investeringen att förkorta restider och/eller möjliggöra mer trafik eller trafik med andra egenskaper under den/de undersökta tidsperioderna, i figuren markerat med UA1 och UA2 (utvecklingsalternativ 1 och 2).

Möjligen finns det i stället för utbyggnaden alternativa sätt att producera transportvolymerna dvs. andra vägar genom nätet och/eller tillåta erbjuden trafik att "missmatcha" efterfrågan en del i tid.

2.4 Problemformulering

Givet en periodisk frekvenstidtabell så kan ett upprepat trafikmönster skapas (som längst ett dygn, vilket är resultatet från prognosarbetet). Målet med metoden är att kunna värdera effektiviteten i nuvarande situation (jämförelsealternativ, JA) och en framtida infrastrukturutbyggnad (utvecklingsalternativ, UA) och därmed kunna värdera skillnaden i nytta (generaliserad kostnad). Denna skall ställas dels mot utbyggnadens kostnad för att därefter kunna värdera vilken utbyggnad som är samhälls-ekonomiskt mest lönsam.

Utgångspunkten för den metod vi söker är ett antal tåglägen vars avgångs- och ankomsttider är omgivna av tidsfönster som antingen är bedömda eller som kan räknas ut från de dygnsfrekvenser som kommer från den långsiktiga prognosen. Tidsfönstren representerar det tidsintervall inom vilket denna transporttjänst attraherar den avsedda transportuppgiften. Utanför tidsfönstret så kan det mycket väl finnas avsättning för en liknande transport, men det är inte samma transportuppgift som attraheras då och därmed inte samma utbud. Således, blir inte denna transport av så missas denna transportuppgift (eller har ett sämre utbud).

Metoden behöver ta fram den sannolika genomförandetiden för tåglägena baserat på de möjliga scheman som kan skapas inom ramen för de tidsfönster som angetts. Vidare behöver metoden värdera tillkommande trafik i enlighet med prognosens krav på ökade flöden (som kanske inte får plats i JA). Följande beräkningar utgör grunden för den samhälls-ekonomiska beräkningen av nyttan med utbyggnaden:

- Summa värderad sannolik genomförandetid i UA subtraherat med summa värderad genomförandetid i JA ger den restidsvinst som sker i varje cyklisk trafikperiod.
- Den sannolika periodlängden för trafikupprepning i UA subtraherat med periodlängden i JA anger hur många fler cykler som kan genomföras och därmed hur många fler tåglägen och deras värde som kan produceras

Den föreslagna metoden innehåller flera kombinatoriska element, såsom flera scheman (tågordningar) är möjliga realiseringar inom ramen för tidsfönstren för de prognosticera "frekvens-tåglägena", tex. på lång sikt är deras ankomsttider till det studerade området inte kända, således går det inte att anta att en viss tågordning gäller. Detta ger upphov till sannolikheter i flera nivåer, tex. olika sannolika ankomsttider för de studerade framtida frekvens-tåglägena, stationer där det är mer sannolikt att möten kommer ske i framtiden, etc.

Vi har således ett kombinatoriskt problem blandat med sannolikheter för olika komponenter och händelser. Till exempel är inte tågordningarna avgjorda för trafiken på längre sikt. Uppgiften är att skatta det samhälls-ekonomiska värdet för JA och UA nu och över en period på 60. För att göra detta krävs dels en värdering av produktiviteten nu och dels för varje år 60 år framåt i tiden. Detta ställer krav på kapacitet hos anläggningen vilket i sin tur ställer krav på infrastrukturens utformning.

En viktig aspekt rör samordningseffekter. Om det finns en dimensionerande sträcka, vilket därmed kan utgöra en flaskhals i systemet, så är det inte säkert att det är på

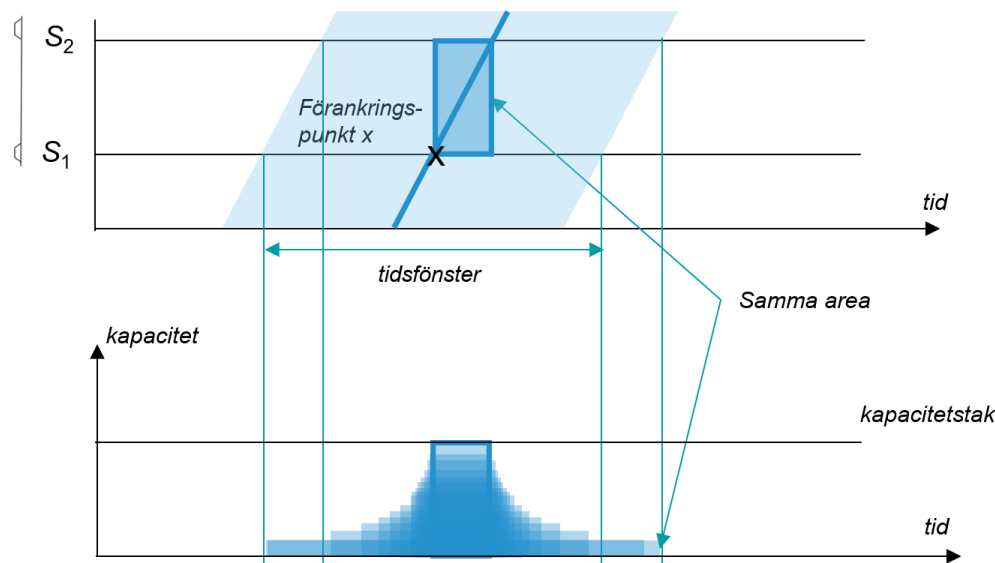
denna lokalt som analysen skall utföras. Det kan vara så att en förändring på närliggande infrastruktur kan effektivisera användandet av flaskhalsen.

Ett exempel på detta kan vara en utbyggnad till tre spår på en närliggande mötesstation snarare än en ny mötesstation på den dimensionerande sträckan. Trespårsstationen möjliggör både möte och förbigång samtidigt, inom ramen för samma "punkt" i tidtabellen, medan med tvåspårs-stationer så behövs tre "punkter" i tidtabellen för att åstadkomma samma operation. Nackdelen är en större synkronisering vid trespårsstationen, och om denna inte är sannolik över 60 års kalkylperiod så kan en ny mötesstation ändå vara att föredra än en trespårsstation (som i närtid kan te sig som det bästa alternativet). Generellt gäller att ju fler möjligheter till planeringslösningar som kan skapas, desto fler framtida efterfråge-möjligheter har täckts in.

3 Area-baserat kapacitetsmått

Det area-baserade kapacitetsmättet har tidigare utvecklats av RISE²⁷. Kapacitetsmättet är tänkt att kunna användas i de tidiga faserna av planeringsprocessen när det ännu inte är känt exakt vid vilken tidpunkt i schemat (tidtabellen) som prognosticerade tåglägen och andra kapacitetsobjekt kommer att planeras in.

Grunden för detta mått utgår från att betrakta arean i en tidtabellgraf som ett (framtida) tågläge eller annat kapacitetsobjekt belägger som kapacitetskonsumtion, inklusive säkerhetsavstånd, ställverkets utlösningstid och andra faktorer som gör att en spårresurs är belagd, se Figur 4. Måttet innebär generellt att ett tåg (tågläge) av en viss kategori som belägger ett signalblock eller annan spårresurs konsumerar en kapacitet motsvarande produkten av avståndet d mellan signalblockets ändpunkter och belägningstiden t , där t är skillnaden mellan avgångstiden från den först passerade ändpunkten på signalblocket och ankomsttiden till den andra. Arealen motsvarar då den kapacitet som tågläget konsumerar.



Figur 4: Fördelning av kapacitetskonsumtionen för ett tåg över ett tidsfönster

²⁷ Aronsson, M. (2022). En not om att mäta kapacitet på järnväg. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-62046>

Då avgångstid och ankomsttid är bestämda färdas tåget mellan areans hörn och de vertikala sidorna från utgångspunkten till destinationspunkten, se Figur 4, är detta blocksignalerna S_1 till S_2 . Men eftersom tidpunkterna för avgång (ankomst) ännu inte är kända under förplaneringsfasen finns det en period, benämnd tidsfönster i figuren, inom vilken det är rimligt att anta att detta tågläge kommer att schemaläggas (marknadsmässigt kan detta betraktas som den period inom vilken just den här tåglägesprodukten ”fångar” den marknadsandel som den är tänkt att attrahera). Det som benämns ”förankringspunkt” är den prognosticerade framtida avgångstiden för tågläget²⁸.

För enkelhets skull kan vi anta att sannolikheten för var någonstans inom tidsfönstret som tågläget kommer att tilldelas är likformigt fördelad (troligen är sannolikheten olika fördelad inom perioden, tex. triangelformad, men för resonemangen i denna rapport är det enklare att se fördelningen som likformig). Det framtida tågläget har inte konsumerat någon kapacitet före tidsfönstrets start och det har konsumerat all kapacitet efter tidsfönstrets slut. Det är under förplaneringen inte känt exakt var tågläget kommer att planeras in inom tidsfönstret, men förankringspunkten utgör den prognosticerade placeringen. Av detta skäl blir den närmaste approximationen av kapacitetskonsumtionen att fördela tågets (sannolika) behov av kapacitet över hela perioden (likformigt vid likformig fördelning av sannolik avgångstid från S_1). I tidtabellgrafen kan detta illustreras av att rektangeln som representerar kapacitetskonsumtionen behåller den beräknade arean men ändrar form och blir större i horisontell led (tid) tills den når tidsfönstrets storlek och därmed blir mindre i vertikal led (sträcka), vilket illustreras i den nedre delen av Figur 4²⁹.

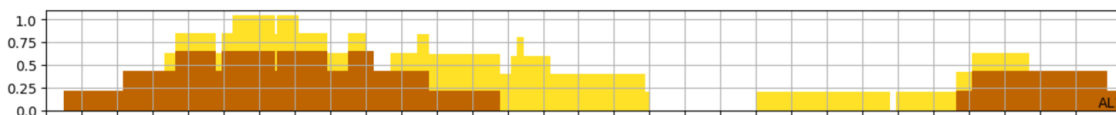
Notera att y-axeln inte längre representerar de geografiska platserna utan andelar av tillgänglig kapacitet och att beläggningen av flera prognosticerade tåglägen, fördelade längs tidsfönstret, läggs in kumulativt på varandra och då formar en beläggningskurva över tid. Varje tågläge kommer därmed över tid att uppta en viss andel, och ju större tidsfönster desto lägre ”höjd” på beläggningen.

För varje tidpunkt kan man addera de resulterande höjderna för samtliga tåg vilkas tidsfönster innefattar tidpunkten och på så sätt beräkna en trolig total kapacitetskonsumtion för tågen. Figur 5 visar på ett sådant exempel, framtaget vid en tidigare studie³⁰.

²⁸ Förankringspunkten kan ses som den prognosticerade avgångstiden ända fram till att tågläget faktiskt avgått. Det är ju den faktiska trafiken som all trafikplanering försöker schemalägga och förutse, och målet är att planeringen skall överensstämma med hur trafiken i praktiken genomförs.

²⁹ Egentligen är inte denna area kvadratisk formad utan innehåller en period av ökande höjd i början och en avtagande höjd på slutet eftersom den sannolika beläggningen i ändpunkterna av tidsfönstret är avtagande mot noll. Full höjd nås vid utrymmet mellan de inre vertikala begränsningslinjerna i figuren.

³⁰ M. Aronsson, E. Broman, K. Odolinski, *Final report – Feasibility study on using Socio-Economic Cost Criteria in Case of Capacity Shortages*, <https://rne.eu/wp-content/uploads/2024-11-05-final-report-%E2%80%93-Feasibility-study-on-using-Socio-Economic-Cost-Criteria-in-Case-of-Capacity-Shortages.pdf>



Figur 5 Exempel på graf över beläggningen för ett typdygn med två olika tågtyper, totalt 17 prognosticerade tåglägen. Gult representerar segmentet årlig tågplan och brunt Rolling Planning-segmentet. Skala på y-axeln är andelar av tillgänglig kapacitet.

För att få en fullständig bild av kapacitetskonsumtionen räcker det inte med att man beräknar konsumtionen för de enskilda tågen, utan man måste också ta hänsyn till att en del kapacitet oundvikligen kommer att förbrukas som ställtid, nödvändig tid mellan tåg som har olika hastighet samt på enkelspår även kan ha olika riktning, och spilltid som uppstår när tågen schemaläggs och som beror på hur tidtabellen konstrueras eller att det helt saknas efterfråga på kapacitet.

4 Max-Plus algebra

Max-Plus algebra är en så kallad ”Tropical semiring”³¹ och åstadkoms genom att formulera två operationer \otimes och \oplus enligt följande:

$$x \oplus y = \max(x, y) \quad \text{Max-Plus “addition”}$$

$$x \otimes y = x + y \quad \text{Max-Plus “multiplikation”}$$

Identitet ε för \oplus är $-\infty$, dvs $x \oplus -\infty = -\infty \oplus x = x$ (för Min-Plus algebra är identiteten för operationen $\oplus +\infty$)

Identitet ε för \otimes är 0 , dvs $x \otimes 0 = 0 \otimes x = x$

Med två $n \times n$ dimensionella matriser \mathbf{X} och \mathbf{Y} kan dessa multipliceras till en ny $n \times n$ matris \mathbf{Z} genom följande matris-multiplikation där z_{ij} refererar till elementet på rad i och kolumn j :

$$\forall i, j \leq n : z_{ij} = \max_{k \leq n} (x_{ik} + y_{kj}) = (x_{i1} + y_{1j}, \dots, x_{ik} + y_{kj}, \dots, x_{in} + y_{nj})$$

I denna rapport används Max-Plus algebra till att beräkna kortaste genomförandetiden för ett antal ”aktiviteter” i Ansats 1, se avsnitt 7. För n stycken aktiviteter skapas den initiala matrisen av genomförandetiden för samtliga aktiviteter där beroendet går från rad i till kolumn j om aktiviteten har ett beroende från sig själv till aktivitet j .

Initialmatrisen visar på start-tiden för varje aktivitet för en beroendekedja i ett hopp. Om det inte finns något sådant beroende ansätts $-\infty$. Vi låter k beteckna antalet iterationer som initial-matrisen har multiplicerats med sig själv. Genom att iterera matris-multiplikationen av initial-matrisen med resultatet från föregående iteration, $k-1$, enligt max-plus-algebran fås genomförandetiden i k iterationer vilket täcker in samtliga vägar (acykliska beroendekedjor) i matrisen.

Då inga nya värden uppstår vid iterationen av matrismultiplikationen har samtliga beroendekedjor påverkat den tidigaste sluttiden för samtliga aktiviteter, representerade i den resulterande matrisen. Den längsta kedjan utgör den kortaste genomförandetiden.

³¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_semiring

Notera att samtliga beroenden är ”hårda”, dvs de måste vara uppfyllda. Notera vidare att denna operation fungerar för en acyklisk graf, vilket i princip alla beroendegrafer över tidshändelser med genomförandetid större än 0 är. Det betyder för ”vår” tillämpning av Max-Plus algebra att samtliga tågordningar måste vara fixerade.

Ett flertal rapporter och artiklar med tillämpning inom schemaläggning av tåglägen som använde Max-Plus algebra finns publicerade^{32 33 34}.

5 Critical Path Method

Critical Path Method, CPM³⁵, är en metod för att beräkna kritiska linjen i en plan, ofta använd i samband med projektplanering. Metoden är en av de äldsta inom området och utvecklades under 1950-talet. Metoden beräknar dels kortaste genomförandetiden, dels olika typer av slack för de aktiviteter som inte ligger på kritiska linjen.

Metoden bygger på att ett antal aktiviteter skall genomföras. Dessa har beroenden mellan varandra vilket leder till att aktiviteterna och beroendena kan formuleras som ett nätverk av noder och bågar, där aktiviteterna är noderna och har en tidsutsträckning medan beroendena är bågarna i grafen. Om det inte finns en unik startnod skapas en sådan och på motsvarande sätt en slutnod.

I metoden ingår ingen resurshantering. Om resurserna antingen kan hantera mer än en aktivitet åt gången, eller om flera resurser antingen kan användas för att korta genomförandetiden eller om det behövs flera resurser för att utföra en aktivitet, så måste detta vara bestämt i förväg, annars är inte tidsutdräkten på aktiviteten känd och då kan inte CPM användas. Det är då möjligt att iterera CPM med någon form av metod för resursallokering för att tex. utföra resursutjämning (”resource levelling”) och därefter köra CPM igen.

Algoritmen har två pass, först ett framåt-kedjande pass från startnod till slutnod och därefter tillbaka. I framåt-passet så väljs en nod vars samtliga noder som föregår den har fått sina tidigaste starttider beräknade. Den valda nodens tidigaste startvärde är det maximala värdet av samtliga föregående noders tidigaste färdigställandetid (tidigaste startvärde plus genomförandetid). Iterationen pågår så länge det finns noder med oberäknade tidigaste starttider. Kravet på att alla aktiviteter har en tidsutsträckning och att bågar bara får gå framåt i tiden garanterar att det alltid finns minst en nod att välja då algoritmen itererar och skall välja nästa nod. Då samtliga noder fått en tidigaste starttid (vilket är det numeriskt största värdet av alla tidigaste sluttider för de föregående aktiviteterna) har den minsta genomförandetiden beräknats.

³² Goverde, R.M.P.: The Max-Plus Algebra approach to railway timetable design. In: B. Mellitt, R.J. Hill, J. Allan, G. Sciutto, and C.A. Brebbia, (eds.), *Computers in Railways VI*, (1998) 339–350. WIT Press, Ashurst

³³ Ekman, J. (2011). Kaban - A tool for analysis of railway capacity. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 693–702. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-23904>

³⁴ A. F. de Kort, B. Heidergott, H. Ayhan, A probabilistic (max, +) approach for determining railway infrastructure capacity, *European Journal of Operational Research* 148 (2003), pp 644–661.

³⁵ Se tex. https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_path_method

Bakåt-passet fungerar analogt som framåt-passet med den skillnaden att utgångspunkten är den beräknade minsta genomförandetiden för hela projektet, att det istället är de senaste start- och sluttiderna som beräknas och beräkningen görs baklänges längs beroendekedjorna från slut-noden till start-noden.

De aktiviteter där den tidigaste och senaste starttiden (lika för sluttiden) sammanfaller ligger på den kritiska linjen. Dessa aktiviteter får inte förskjutas alls, då kommer sluttiden för hela projektet att försenas. Övriga aktiviteter har skilda tidigaste och senaste starttider (sluttider), dessa aktiviteter har ett slack (mellan tidigaste och senaste starttid) inom vilket de kan förskjutas utan att påverka hela projektets sluttid.

Det finns varianter på CPM, tex. Critical Chain Project Management (CCPM) i vilken det inte är den faktiska genomförandetiden som används utan en till störningskänslighet anpassad genomförandetid, tex. kalkylerad som $(b+a+4*m)/6$ där a är en optimistisk uppskattning av genomförandetiden, b en pessimistisk uppskattning och m det skattade medelvärdet. Noteras kan att om a och b ligger på samma avstånd från m så fås samma värde som m .

En aktivitet motsvaras av en traversering av en spåränk signalblock) då en tidtabell skapas. Beroenden kan vara av två slag: dels tåglägets interna beroenden, sekvensen av traverseringar på spåränkar, dels beroenden mellan tåglägen som i sin tur kan vara av två slag: 1) associationer mellan tåglägena som är krav utifrån för att åstadkomma tex. byten, och 2) beroenden som uppstår då tåglägena skall använda samma spår-resurs vilket leder till att de måste ordnas. I stycke 9 kommer vi gå in mer i detalj på detta. Beroenden av kategori 2) är en funktion av både hur tågen förväntas ankomma till det undersökta området och den schemalösning som undersöks.

6 Villkorsprogrammering

Constraint Programming, eller Villkorsprogrammering³⁶ på svenska, är en form av generaliserad ekvationslösning. Ett villkorsprogram består av ett antal restriktioner på variabler över en viss domän, vanligen heltal. En lösning till programmet är en variabeltilldelning som satisfierar restriktionerna. Det som skiljer villkorsprogrammering från annan matematisk programmering är det sätt som systemet arbetar. I stället för att identifiera en första lösning och därefter förbättra denna så söker villkorsprogrammet skära bort värden ut variablernas domäner till dess att alla variabler bundits till ett värde. Sökning går så till att en variabls domän minskas (tex. genom att helt enkelt ansätta ett värde, eller att lägga till ett villkor som skär bort värden tex. genom att ta bort halva värdedomänen). Detta får som konsekvens att andra variablers värdedomäner påverkas genom de olika restriktionerna som programmet består av, och dessa variabler kan nu minskas. Detta leder i sin tur att ytterligare andra variablers värdedomäner att minskas. Denna process kallas för ”propagering”. Vid något tillfälle slutar propageringen, om då samtliga variabler tilldelats ett värde är sökningen klar, annars väljs en variabel bland de som ännu inte fått ett värde (tilldelning) och vars domän minskas på motsvarande sätt varvid propageringen sätter fart igen. Om det under processen visar sig att minst en variabls värdedomän blir tom kan inte denna variabel tilldelas något värde, och sökningen måste ”backa” och göra ett nytt val av hur någon variabls värdedomän skall minskas.

³⁶ En bättre översättning hade varit ”restriktionsprogrammering”

Restriktionerna i villkorsprogrammering kan vara både på en enkel form men även på en mycket generell form. Detta gör att villkorsprogrammeringsmodeller ofta kan vara mer anpassningsbara och närmre själva problemets naturliga formulering. I matematisk programmering (matematisk optimering) måste allt kunna uttrycks som linjära ekvationer och oftast med heltalsvillkor, i villkorsprogrammering kan mycket avancerade restriktioner över stora vektorer av variabler programmeras upp, till exempel en restriktion för hela handelsresande-problemet eller en restriktion för en hel händelse- och beroendegraf. Dessa specialiserade algoritmer är ofta baserade på olika typer av graf-algoritmer.

Vidare finns de så kallade ”reifierade villkoren”, villkor över logiska variabler vilka uttrycker sanningsvärdet hos logiska villkor. Dessa villkor består i sin tur av villkor över tex. aritmetiska villkor. I avsnitt 7 har vi använt reifierade villkor för att bygga logiska villkor över ordningar för tåglägen där de delar infrastrukturobjekt. Genom att söka tilldelningar över dessa villkor samt därefter lösa ut (tilldela) de kvarvarande aritmetiska variablerna med hänsyn till deras restriktioner så avgörs om denna tilldelning av de reifierade variablerna leder till en giltig tågordning inom ramen för de tidsfönster som angetts. För samtliga tågordningar som är giltiga beräknas därefter den minsta cykeltiden. Eftersom tågordningen i varje sådant fall är bestämd kan den minsta cykeltiden beräknas på flera sätt, antingen som ett minimeringsproblem över de aritmetiska villkoren, med CPM-metoden från stycke 5 eller med Max-Plus algebra från stycke 4.

7 Ansats 1

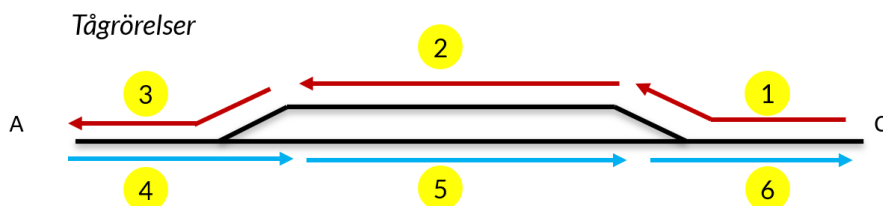
Ansats 1 är den metod som planerades att undersökas i förstudien SOSE. Den är baserad på Max-Plus algebra med det area-baserad kapacitetsmättet för generering av alla trafikeringar som kan förekomma på det undersökta spåravsnittet och som skall undersökas.

7.1 Max-plus algebra och kapacitetsberäkning

Spåravsnittet delas upp i objekt vilka enbart kan nyttjas av ett tåg åt gången, så kallat ”single resource allocation”. Varje allokering (beläggning) av ett tågläge till ett sådant resursobjekt ger upphov till en ”händelse”. Denna händelse tar en viss tid att genomföra vilket beräknas som tiden för friläggande av resursen subtraherat med tiden då resursen tas i anspråk av tågläget. Detta leder till att antalet händelser enkelt kan beräknas och det är för varje tågläge summan av samtliga beläggningar som utgör den kortaste genomförandetiden för tågläget, innan det har konfliktreglerats med andra tåglägen. Genom konfliktreglering skapa tågordningar, eftersom enbart ett tågläge åt gången kan belägga en resurs, och därmed uppstår väntetider vilka adderas till beläggningstiderna. Notera att ett tågläge alltid befinner sig på minst ett spårobjekt.

Betrakta infrastruktur och trafikering i enlighet med Figur 6 nedan. Den är förenklad i så mening att vi aggregerat objekten till en nivå där varje del av bangården enbart kan

beläggas med ett tågläge åt gången. För en modellering med finare geografisk representation se tidigare utvecklat verktyg KABAN³⁷.



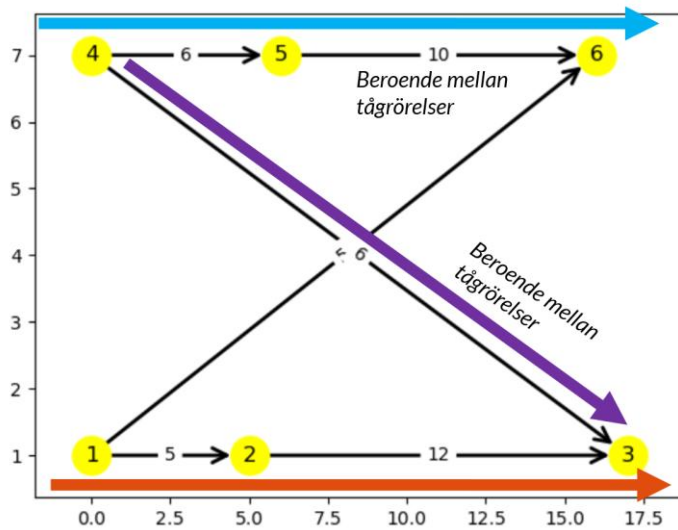
Figur 6 Enkel mötesstation uppdelad i tre beläggnings-zoner, med två tåglägen och därmed 6 händelser.

Vi har fyra sådana objekt: linjen inklusive växel (två sådana objekt på ömse sida om driftplatsen) samt två parallella spår mellan dessa vilka kan beläggas parallellt. Eventuella tidsvillkor mellan beläggningsarna hanteras genom att tid adderas till de beroende rörelserna.

I exemplet ovan finns två tåg, ett rött tåg och ett blått tåg. På det studerade området delas dessa tågs rörelser upp i tre olika delrörelser 1-2-3 samt 4-5-6, där rörelse 1 och 6 delar infrastruktur, rörelse 2 och 5 delar inte infrastruktur (de går på parallella spår) samt rörelse 3 och 4 delar infrastruktur. Notera att vi har bestämt vilket av de parallella spåren som varje tågläge tilldelats, detta är nödvändigt för beräkningen i Max-Plus algebran.

Om de två tågen möts på denna driftplats uppstår beroenden mellan tågen, beroende på i vilken ordning de ankommer och regleras på driftplatsen. Betrakta Figur 7. Varje horisontell rad av noder och bågar i figuren är ett tågläge, numrerat som i Figur 6. Beläggningsarna för varje tåg kommer i sekvens, således 1-2-3 samt 4-5-6. Beroende på regleringen uppstår en ordningsrelation mellan tågen, i Figur 7 skall blått tågläge ha passerat in på mötesspår och frilagt växeln innan rött tågläge får belägga växeln vilket har markerats med den lila pilen i figuren. På motsvarande sätt finns det ett beroende från rörelse 1 till rörelse 6 i den andra änden av driftplatsen (ej inritat).

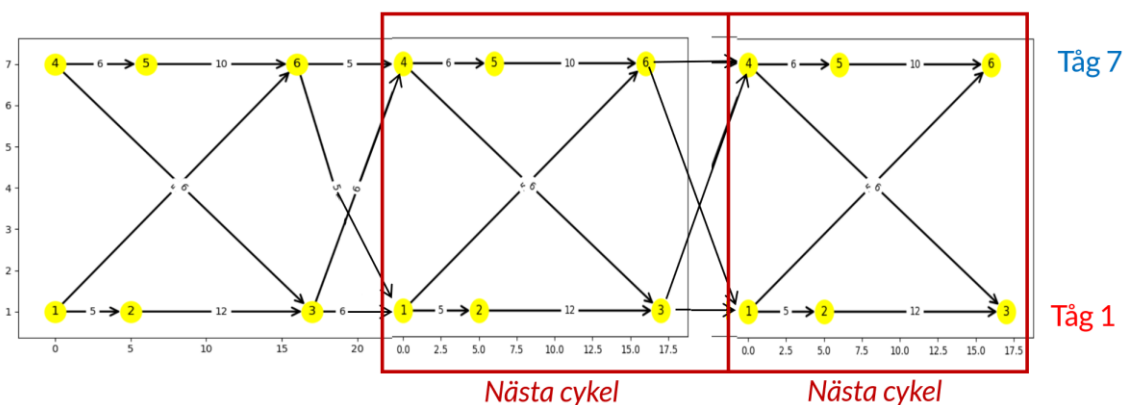
³⁷ Ekman, J. (2011). Kaban -- A tool for analysis of railway capacity. WIT Transactions on Modelling and Simulation, 693–702. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-23904>



Figur 7 Beroendegraf mellan de olika beläggningarna från tidigare, med tider för respektive beläggning. Lila pil visar på ett av de två beroendena mellan de två tågrörelserna.

Grafen representerar samtliga beroenden som finns för trafikeringen med två tåglägen. Genom att summera alla händelsenoder före en viss händelsenod kan dess starttid beräknas relativt den (de) initiala noden (noderna). Om flera bågar går in till en händelsenod tas det maximala värdet av de två inkommande beroendenas summor. Noterar att enbart icke-cykliska traverseringar är tillåtna, detta är dock inte ett problem i normala händelse-grafer då beroenden inte kan "gå baklänges i tiden". Vi kommer dock att generalisera dessa grafer i stycke 9 då vi försöker internalisera sannolikheter i denna beräkning och då blir det viktigt att hålla ordning på icke-cyklicitet.

Då hela grafen har "exekverats" och alla noder försetts med sina tidigaste starttider (som är de största värdena på inkommande beroenden) så är driftplatsområdet fritt och en ny trafikering kan påbörjas. Genom att lägga en kopia av samma graf efter den första fås två iterationer, se Figur 8 nedan. På detta sätt kan trafikeringen upprepas ett antal gånger inom ett visst tidsintervall inom vilket en viss mängd trafik skall genomföras.



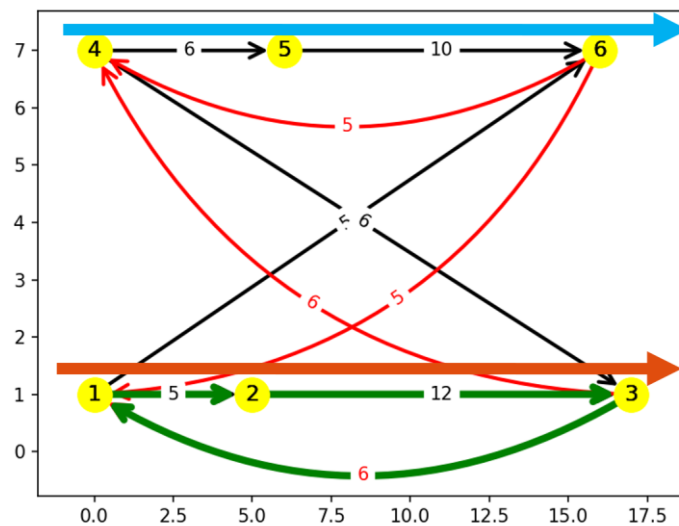
Figur 8 Itererad beroendegraf ger upprepade trafik där antalet upprepningar måste vara tillräckligt för att rymma tillräckligt antal tåg (av rätt slag) inom periodgränsen för tågfrekvensen i prognosen.

För en iteration som tar t.ex. 13 minuter och ger 4 tåg så får 4 iterationer plats inom en timme och således $4 \cdot 4 = 16$ tåg inom en timme. Om kravet från prognosen var 14 tåg så

är resultatet att infrastrukturen, med denna trafikering, kan realisera den tänkta volymen tåg, med viss marginal. Om däremot kravet var tex. 17 tåg per timme (med de tågtyper som undersökts) så är detta ett tåg mer än vad som garanterat får plats. Observera dock att 4 iterationer ger $13 \cdot 4 = 52$ minuter, således finns det 8 minuter som inte täcks av undersökningen, det är således möjligt att det skulle kunna få plats ett tågläge till³⁸. Således beräknar detta förfaringssätt att det finns tillräckligt med kapacitet för att producera en viss i förväg bestämd mängd tåg, men det optimerar inte kapacitetsanvändandet.

Notera dock att den sammansatta kedjan av komprimerade delgrafer i vissa fall kan göras med kortare genomförandetid. Detta uppstår om startnoden består av ett visst tågläge och som belägger en viss infrastrukturel medan slutnoden består av ett annat tågläge som belägger en annan infrastrukturel. Därigenom kan det uppstå "hål" i bågarna mellan delgraferna, i beroendena som uppstår mellan händelser med samma infrastrukturel.

Genom att koppla ihop höger och vänster sida i Figur 7 genom att skapa bågar som går från tåglägets utträde ur området (längst till höger) till startpunkterna i grafen där samma infrastrukturel delas (vänster sida i grafen), se Figur 9 nedan där dessa bågar är röda, skapas en kollapsad graf av skeendet visat i Figur 8. Den längsta vägen genom grafen som slutar med en returbåge anger den minsta cykeltid som trafikeringen har (minsta övre gräns i grafen), markerat med gröna bågar. Det är detta som Max-Plus algebran räknar fram givet beroendegrafen (svarta och röda bågar). Det finns dock andra alternativa algoritmer som beräknar samma resultat, en sådan är Critical Path Method, CPM³⁹, se stycke 5.



Figur 9 Kollapsad graf med "retur-bågar" vilka markerar nästa iteration.

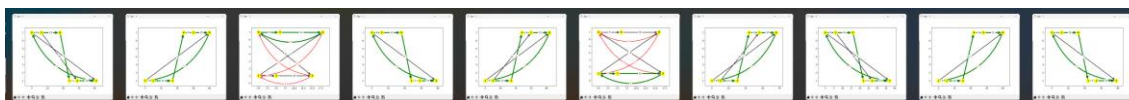
³⁸ Man kan förlänga perioden som undersöks till dess att antalet iterationer antingen slutar med ett precist antal timmar, eller så länge att endast en liten tidsdifferens finns kvar. I exemplet ger 23 iterationer 4 timmar och 59 minuter, således i princip 5 timmar. Kravet på 18 tåg per timme ger $17 \cdot 5 = 85$ tåg, 23 iterationer ger $23 \cdot 4 = 86$ tåg. Det är dock troligt att man vill att mönstren inom en timme är liknande, således är inte det troligtvis inte önskvärt att "rulla" iterationerna under 5 timmar för att teoretiskt få in fler tåglägen.

³⁹ CPM utvecklades under 60-talet i samband med byggandet av de första atomubåtarna för att hantera den stora komplexiteten i projektet.

Denna beräkning kan göras för varje bestämd trafikering, inklusive spårval på driftplatsen. För att denna beräkning skall kunna göras behöver samtliga beläggningar ha ett bestämt infrastrukturobjekt för att beroendegrafen skall kunna ställas upp entydigt. Beroendegrafen abstraheras så länge som varje resurs kan beläggas med enbart ett tågläge åt gången samt kan göras godtyckligt detaljerad ned till delade skydd, sken-isolatorer och spårledning samt med godtyckliga formler för acceleration/deceleration, tåglängd etc⁴⁰.

7.2 Linje med flera mötesstationer

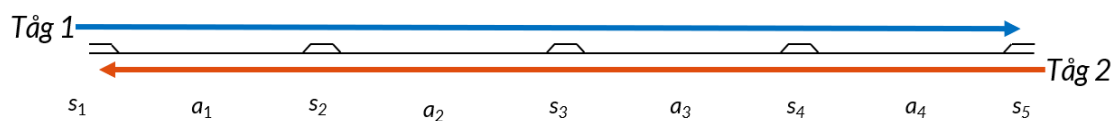
Eftersom det inte är bestämt vilken tågordning som gäller, och ej heller vilka infrastrukturobjekt som används (tex. vilket av de två parallella spåren som respektive tågläge använder) så visare det sig att antalet möjliga trafikeringar att undersöka blir väldigt många och utgör ett bekymmer. Nedan ges samtliga trafikeringar som behöver undersökas för två tåglägen och en driftplats enligt Figur 6 där samtliga möjligheter och val är öppna, tågordningar samt val av infrastrukturobjekt där sådant val finns (tex. spår 1 eller två vid en mötesstation).



Figur 10 Samtliga trafikeringar för driftplatsen i Figur 6.

För två mötande tåglägen och en mötesstation fås 10 möjliga trafikeringar, för tre tåglägen (ett i den ena riktningen och två i den andra riktningen) fås 92 trafikeringar, för två tåglägen i vardera riktningen fås 1088 trafikeringar att undersöka.

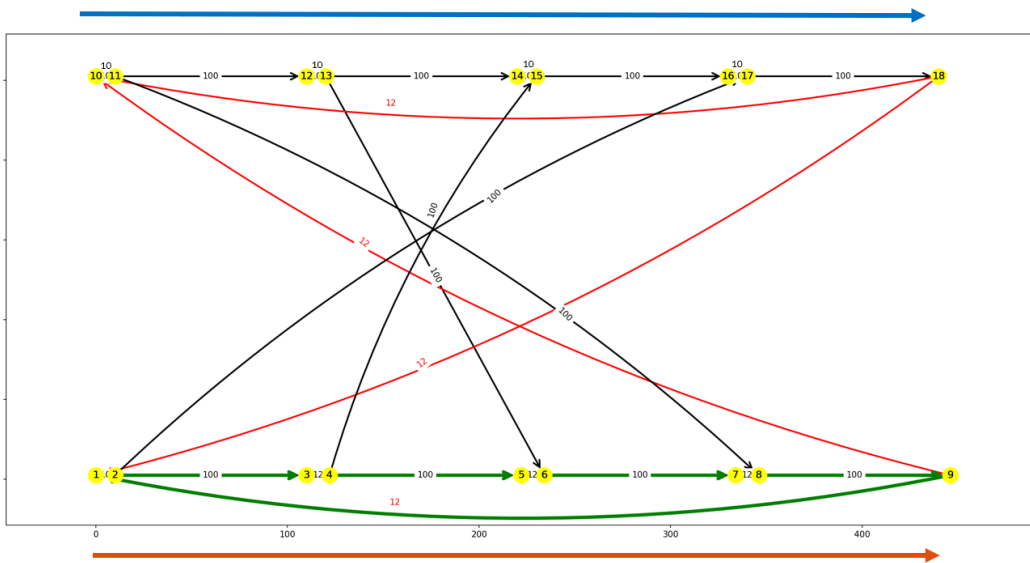
För en sträcka med 3 mötesstationer och möjlighet för två tåglägen att mötas på samtliga tre mellanliggande driftplatser (se Figur 11 nedan) blir antalet möjliga trafikeringar 224 stycken. Alla dessa varianter är inte aktuella i operativ drift, tex. att passera sidospåret om inget möte skall ske, men det ger en fingervisning om att antalet trafikeringar med bestämd väg genom det undersökta området är stort.



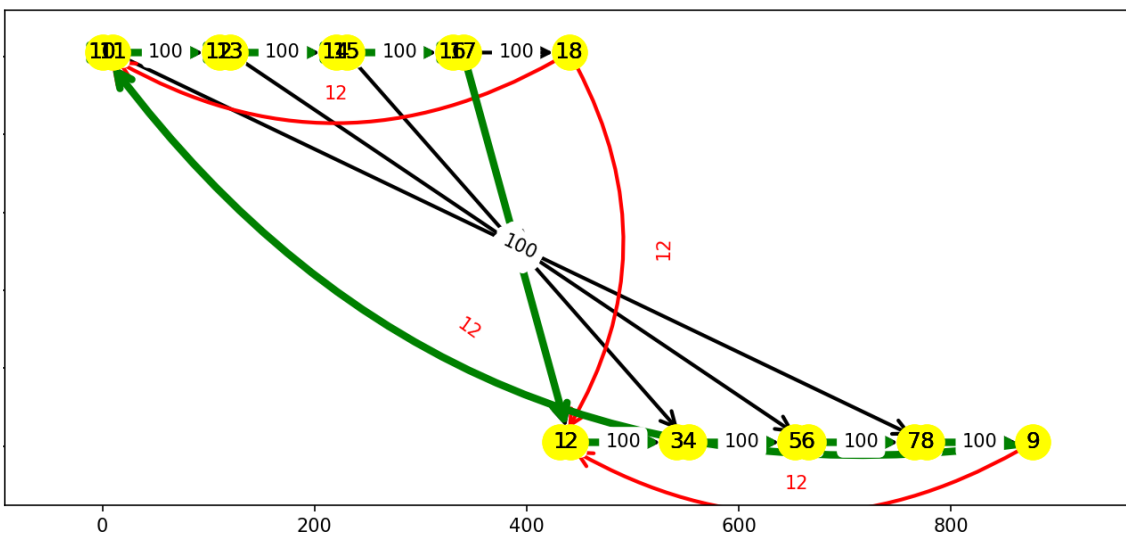
Figur 11 Bandel med tre mellanliggande mötesstationer.

Ett exempel på händelsegraf ges i Figur 12 nedan, med den kortaste upprepningstiden (cykeltiden) inritade med gröna bågar. Ett annat visas i Figur 13.

⁴⁰ Ekman, J. (2011). Kaban -- A tool for analysis of railway capacity. WIT Transactions on Modelling and Simulation, 693–702. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-23904>



Figur 12 En trafikering för två tåg på en bandel med tre mötesstationer



Figur 13 En annan trafikering för två tåg på en bandel med tre mötesspår

7.3 Samhällsekonomi

Ovanstående modellering, samt andra versioner med användning av Max-Plus algebra⁴¹, är ofta refererade för att göra kapacitetsbedömningar. Man undersöker då om minsta cykeltiden får plats inom den upprepningsfrekvens som man beslutat att infrastrukturen skall klara av⁴², något som stämmer väl överens med hur kapacitetstilldelningsprocessen går till i Nederländerna och Schweiz där man tar fram ett grundmönster för trafiken flera år i förväg. I det grundmönstret är trafikering bestämd,

⁴¹ N. Bešinović, R. P. Goverde (2018), Capacity Assessment in Railway Networks, in Handbook of Optimization in the Railway Industry, Springer International Publishing, 2018

⁴² I Schweiz görs detta med de s.k. Netznutzungskonzept och Netznutzungsplan vilka tas fram flera år i förväg och som ligger till grund för kantonernas förhandling om kostnader för utbyggnad samt i referendum-processer.

således är det detta man vill säkerställa att det fungerar, och projekterar infrastrukturförändringar om det behövs med avseende på den beslutade trafikeringen.

Den processen finns inte i Sverige med flera andra europeiska länder, där järnvägsföretag med flera söker kapacitet fritt på nätet drygt 8 månader innan trafikstart. Dessa sökande har i princip friheten att söka kapacitet fritt på järnvägsnätet vilket betyder att det inte finns förutsättningar att i förväg bestämma hur trafiken skall köras. Trafiken är ofta heterogen, med över åren stabila trafikflöden tillsammans med föränderliga trafikflöden och varierar från dag till dag⁴³.

I det fall vi undersöker försöker vidga underökningen till många möjliga framtida trafikeringar och scenarios. Vi önskar värdera utbyggnader med helst 60 års framförhållning (vilket är kalkylperioden för investeringen) vilket leder till att antalet trafikeringar är många fler med många olika möjligheter som även påverkas av annan infrastruktur utanför det undersökta området. Dessa måste i sin tur kopplas till sannolikheter för att just denna trafikering uppstår i framtiden. Denna sannolikhet påverkas av flera faktorer men är svår att beräkna redan med likformigt fördelad sannolikhet för tågets avgång inom det satta tidsfönstret. I princip behövs en tidtabell för varje trafikering, som styrs av den samhällsekonomiska värderingen för varje ingående tåg i trafikeringen, och eftersom antalet möjliga trafikeringar är stor så blir arbetet med att ta fram en samhällsekonomisk värdering för varje trafikering, anpassad för dess sannolikhet att uppstå i framtiden, omfattande. Vi har inte lyckats genomföra en sådan på ett bra sätt inom ramen för förstudien i SOSE.

7.4 Resultat

Ett resultat från Ansats 1 är sättet som händelsegrafer kan ritas upp. Varje rad är ett tågläge, och beroenden dem emellan blir bågar som sammanbinder tåglägena. Varje sådan trafikering kan genereras och visas grafiskt vilket ger överblick. Människor är duktiga på att se mönster och genom att visualisera de olika trafikeringarna kan en utredare göra val av vilka trafikeringar som är lämpliga att undersöka närmre.

Vidare är Max-Plus algebra en effektiv metod att räkna på minsta upprepningstiden och fungerar väl där underlaget är frekvenser av tåglägen över dygnet, vilket kan transformeras till en upprepad period (som längs hela dygnet, men ofta kortare).

Kopplingen till en samhällsekonomisk värdering är däremot svagare, framför allt som avgångs- och ankomsttider inte är kända på lång sikt. Man kan givetvis anta att trafiken kommer se ut på ett visst sätt och därifrån skapa värdering av nuvarande situation och framtida situation (JA och UA), men varje ”låst” avgångstid för det framtida scenariot är en chansning om det kommer vara rätt. En samhällsekonomisk värdering som tar hänsyn till att den specifika avgångstiden inte är känd utan mer eller mindre sannolik saknas.

Vidare är värdet för tillkommande trafik viktigt att ta hänsyn till. I princip skall skillnaden mellan att transporten sker på järnväg och ”andrahandsalternativet” där transporten sker på ett annat sätt beräknas (som kan vara antingen på järnväg det

⁴³ Gestrelis, S., Aronsson, M., and Bolin, M. (2015). On the uniqueness of operation days and delivery commitment generation for train timetables, in The 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo)

också, med en annan väg genom nätet och/eller vid en annan tidpunkt, eller med annat transportmedel). För resande är ofta andrahandsalternativet enklare att beräkna än för gods, speciellt för vagnslastsystemet är det svårt att beräkna andrahandsalternativ. Till exempel finns det för malmtransporter inte något andrahandsalternativ i praktiken och hela värdet på tåget blir kalkylvärdet för tillkommande/exkluderade transporter. För andra godstransporter kan skillnaden mellan tex. lastbil och tåg vara liten varför ett extra godstågläge kan på marginalen betyda ganska lite.

Komplexiteten stiger mycket snabbt med antalet tåglägen och med alternativa banobjekt. Ett tågläge som passerar tre mötesstationer med två spår får 8 möjligheter att passera, dvs antalet vägar ökar exponentiellt. För två tåglägen blir detta 8 möjligheter vardera vilka kan kombineras på ett antal olika sätt. Komplexiteten kommer från att varje sådant beroende mellan två tåg på samma resurs beror på att ordningen mellan rörelserna inte är avgjord.

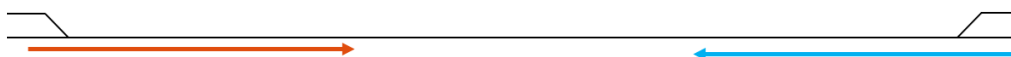
8 Ansats 2

För att få en bättre och tydligare koppling till den samhällsekonomiska värderingen undersöktes en ny modell med annan ansats. Denna modell utgick från den samhällsekonomiska värderingen, dvs. i stället för att utgå från kapacitetsfrågan så startar arbetet med att utgå från att det är den sannolika tidsbesparingen som skall värderas och ansatsen söker finna hur förändringen i infrastruktur leder till en sannolik tidsförändringen för tåglägena. Detta för att ligga närmre målet med metoden, att beräkna nyttan med en infrastrukturförändring.

Ansatsen utgår från det area-baserade kapacitetsmättet från stycke 3 och undersöker sannolikheten för överlapp mellan tåglägena. Målet är att beräkna den sannolika samhällsekonomiskt värderade totala restiden för en mängd tåglägen med tidsfönster för avgång/ankomst-tider. Detta inbegriper konfliktreglerande tidskostnader. Tanken är att enklare komma åt restidsförändringar för tåglägena då JA och UA utvärderas och restidsförändringarna påverkar både restidskostnaden och antalet tåg som kan produceras på banan. Genom att applicera sannolikheter på avgångs- och ankomsttider, samt helst också på mixen av tåglägen, så kan en mer anpassad och med avseende på olika osäkerheter mer korrekt bedömning av den samhällsekonomiska nyttan göras.

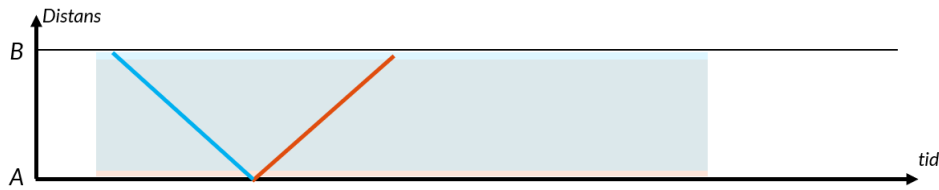
8.1 Sannolik väntekostnad

Betrakta situationen för JA i Figur 14 nedan, en sträcka mellan två mötesstationer.



Figur 14 Sträcka med omgivande mötesstationer

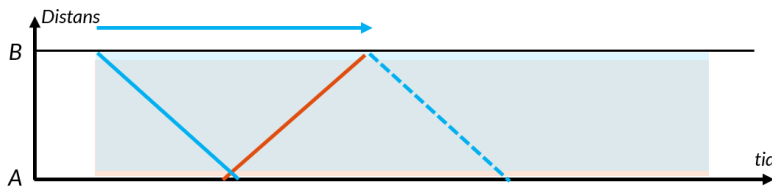
Antag att två tåglägen, rött och blått, har en potentiell konflikt då de (i framtiden) kan förväntas befinna sig på sträckan enligt grafen i Figur 15. De skuggade områdena är det tidsfönster som de kan variera inom.



Figur 15 Två tåg, ett blått tåg och ett rött tåg, traverserar sträckan mellan A och B. De skuggade områdena utgör tågens tidsfönster för avgång från respektive utgångsstation och överlappar helt.

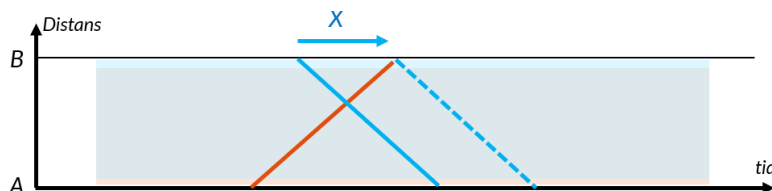
Den area som de två tåglägenas tidsfönster täcker varandra utgör den ”konfliktzon” som de två tågen har.

Antag en framtida situation enligt Figur 16 där rött tåg avgår precis innan blått tåg ankommer till driftplats A. Blått tåg behöver vänta på rött tåg till dess att det har tagit sig till station B vilket ger en väntetid för blått tåg enligt den blå horisontella pilen i Figur 16.



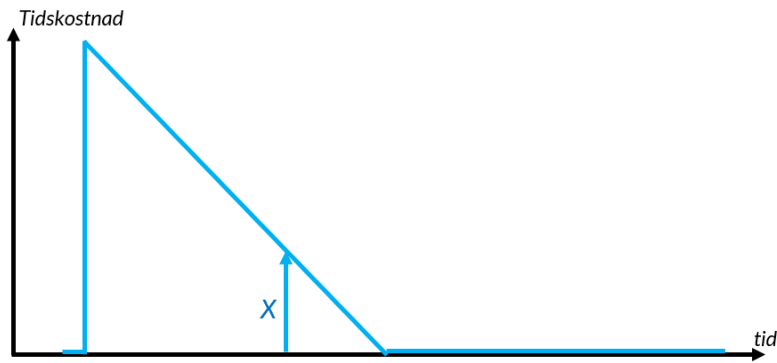
Figur 16 En lösning på en framtida sannolik konfliktsituationen från Figur 15

Om vi antar att blått tågs i framtiden önskade avgång från B är likformigt sannolikhetsfördelad längs hela tidsfönstret uppstår olika väntetider som en funktion av blått tågs i framtiden sannolikt önskade avgångstid från B. Ett ytterligare exempel på en sådan framtida sannolik situation ges i Figur 17.



Figur 17 Ytterligare en möjlig framtida situation baserad på prognosticerade tidsfönster för de två tåglägena.

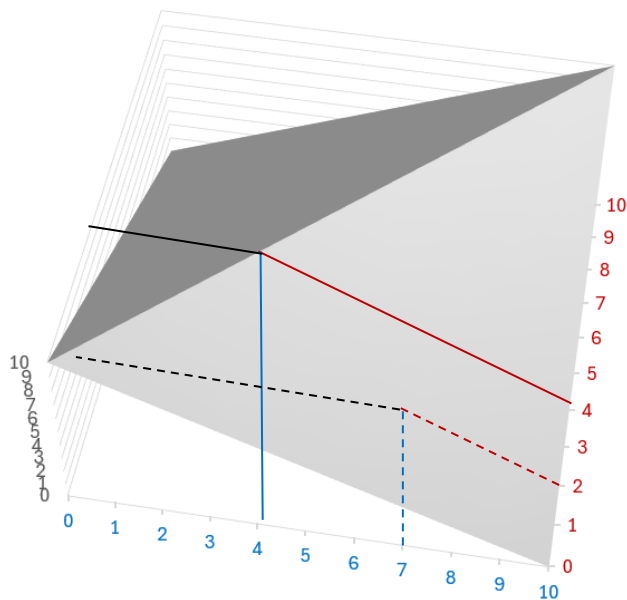
Figur 18 visar hur blått tågs väntetid ges av dess ankomsttid till B, givet att rött tåg har en låst avgångstid och inte skall ta kostnaden för konflikten. Konflikten är som störst då blått och rött tåg ”krockar” precis före station A, och är som lägst då rött tåg nästa nått fram till station B då blått tåg önskar avgå därifrån.



Figur 18 Tidskostnad för blått tåg om detta skall tillföras mötestidskostnad för konflikt med rött tåg.

Då vi relaxerar rött tågs avgångstid från A så fås en funktion i två argument, regleringskostnaden för blått tåg och motsvarande regleringskostnad för rött tåg. Den faktiska kostnaden (när enbart dessa två tåglägen betraktas) är minimum av de två regleringskostnaderna. Grafen över konfliktkostnaden blir då tredimensionell och visas i Figur 19.

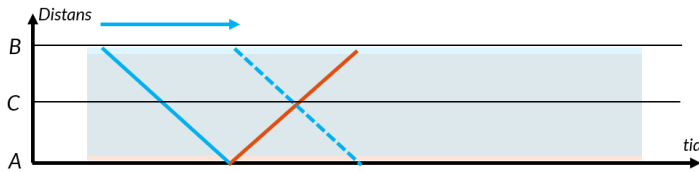
Om båda tex. avgår vid tidpunkten 4 så blir väntetidskostnaden 10 (illustrerat med de heldragna linjerna i figuren) medan om de avgår vid 3 respektive 5 tidsenheter (de streckade linjerna) blir väntetidskostnaden 6 tidsenheter (en punkt på den sluttande högra ytan). Med fler tåg ökar antalet argument till regleringsfunktionen och resultatet blir en mångdimensionell graf med en dimension högre än antalet inblandade tåglägen.



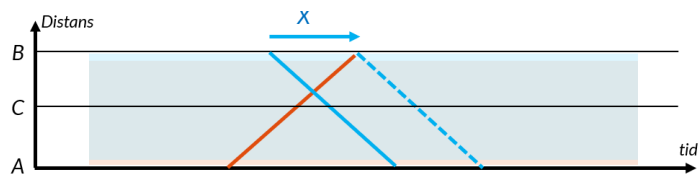
Figur 19 Tidskostnaden för två tåg som möts på en enkelspårsträcka, uppdelat i 10 diskreta tidsperioder.

Nu introducerar vi i UA en mellanliggande station C, mitt emellan A och B. Detta möjliggör ett möte för blått och rött tåg mitt på sträckan. Sannolikheten för att stöta ihop på den ursprungliga sträckan A-B är fortfarande lika stor, men konsekvensen av att ha en konflikt på sträckan A-B är nu mindre eftersom de två tågen även kan mötas i stationen C.

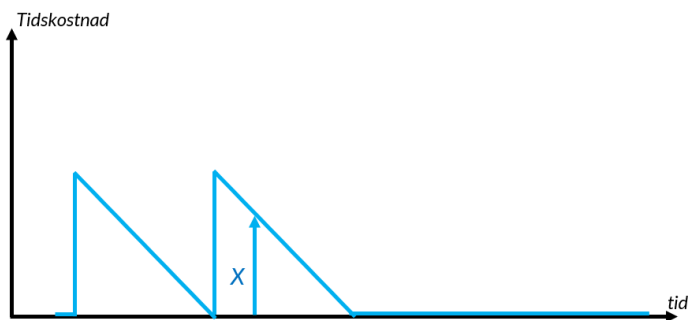
Motsvarande figurer som för Figur 16 och Figur 17 för detta alternativ ges i Figur 20 och Figur 21.



Figur 20 Samma situation som i Figur 16 men med mellanliggande mötesstation C.

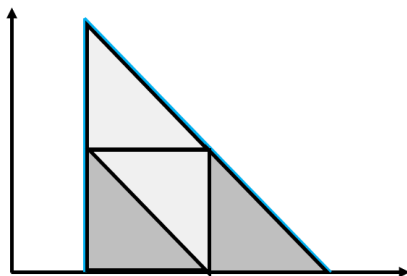


Figur 21 Samma situation som i Figur 17 men med mötesstation C.



Figur 22 Regleringskostnad för fallet med mötesstation C

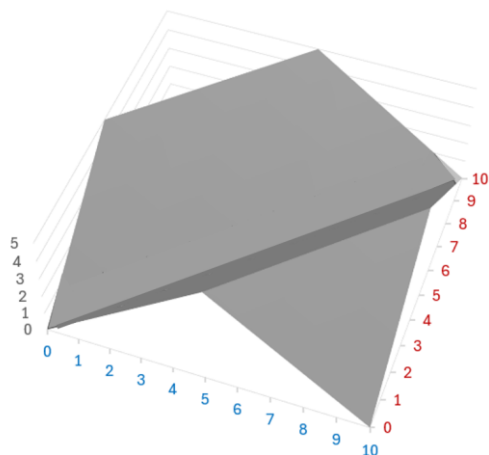
Regleringstidskostnaden på sträckan A-B med mellanliggande station C för blått tåg (om detta alltid tar konsekvensen för en konflikt) visas i Figur 22. Den förväntade kostnaden har halverats, den ursprungliga "triangeln" för konfliktkostnad i Figur 18 har ersatts med de två nya "trianglarna" från Figur 22 vilket kan illustreras i en sammansatt figur, Figur 23, där den minskade väntetid är de ljusa inskrivna trianglarna.



Figur 23 Minskad kapacitetsförbrukning då mötesstation byggs

Då rött tågs avgångstid relaxeras till att vara inom dess tidsfönster och således även det kan ta kostnaden för konflikten regleras fås återigen en tredimensionell graf, men nu med en ”diagonal dal” som representerar den nya stationen C.

Vidare har den maximala väntetiden sjunkit från 10 tidsenheter till 5. Om vi bortser från händelser utanför stationerna A och B så har konsekvensen av att blått och rött tåg överlappar på sträckan A och B halverats.



Figur 24 Tidskostnaden för två tåg som möts på en enkelspårsträcka med mellanliggande mötesstation, 10 diskreta tidsperioder. Notera att det är två toppar som är hälften så höga jämfört med fallet utan mötesstation.

På detta sätt kan kostnaden av två tåg som möts i JA och UA räknas ut för likformigt fördelade ankomst/avgångstider inom ett tidsfönster. Om fler tåglägen adderas ökar antalet dimensioner och regleringskostande kan inte längre visas i en tredimensionell figur, men principen blir densamma för fler tåglägen. Fördelen med detta är att osäkerheten som finns för hur anläggningen trafikerats på lång tid, upp till 60 års horisont, har byggts in i sannolikhetsberäkningarna för hur två tåg möts på sträckan A-B.

8.2 Tredje tåget

Ovanstående exempel visar situationen för tåglägen. Då ett tredje tåg läggs till det ovanstående resonemanget uppstår dock nya komplikationer i modellen, annat än att antalet dimensioner ökar så att det inte längre går att visuellt skapa grafer. Tre tåg kan inte mötas i station 1 utan det tredje tåget kommer att få vänta på rand-stationen till området.

I föregående stycke konstaterades att antalet argument till den funktion som returnerar konfliktkostnaden är samma som antalet inblandade tåg. Men funktionen blir mer komplicerad då fler än en mötesstation är inblandad i beräkningen av regleringskostnaden för mötet. Ett tredje tåg inlagt i Figur 15 kommer att leda till att något tåg får vänta om en omgivande station. Har vi då ytterligare ett fjärde och ett femte tåg inblandade så växer komplexiteten. I princip görs en konfliktreglering för alla tågen, för alla kombinationer av ankomst- och avgångstider. För två tåglägen kunde detta illustreras, men för flera tåglägen går detta inte längre, och den underliggande beräkningen blir komplex.

Ett av problemen med Ansats 1 och Ansats 2 är att de söker hitta regleringskostnaden baserad på den sannolika framtida konflikter och deras lösningar, vilket är ett kombinatoriskt mycket stort problem.

Man kan likna detta vid att beräkna gstrycket i en behållare: Alla molekyler i behållaren har olika energinivåer, och dessa krockar med varandra varvid energin fördelar sig olika mellan molekylerna hela tiden. Men statistiskt så kan vi räkna med medelvärden för dessa molekyler då antalet molekyler i en behållare är mycket stort och effekten av att de olika molekylerna har olika energinivåer jämnar ut sig då antalet är mycket stort. På samma sätt är de med mängden möjliga framtida trafikeringar, de är väldigt många. Kan man "internalisera" kombinatoriken i en kalkyl som kan fördela sannolika konfliktregleringskostnader i förväntade traverseringstider för de prognosticerade tåglägena så kan dessa ansättas distans- och tidsvärden i en samhällsekonomisk kalkyl. På motsvarande sätt kan även förmågan att producera fler tåg bedömas. "Tricket" blir att omvandla ökad kapacitet (minskad beläggningstid på bandelar/blocksträckor) till sänkt traverseringstid för tåglägena för alla i framtiden sannolika trafikeringar och ökade möjligheter att producera fler tåg (eller, för den delen, ökad robusthet mot förseningar).

Detta är bakgrunden till Ansats 3.

9 Ansats 3

Från de två första ansatserna kan man dra slutsatsen att den samhällsekonomiska värderingen helst skall vara en integrerad komponent i metoden samt att antalet trafikeringar växer mycket fort med sträckans längd som undersöks och antalet tåglägen.

I Ansats 3 försöker vi internalisera kombinatoriken till sannolikheter i metoden och fokuserar på den sannolika traverseringstiden för de undersökta tåglägena. Om traverseringstiden förlängs på grund av trängsel så uppstår en väntetidskostnad gentemot om tåget var självt på banan. Den sannolika väntetidskostnad är en funktion av samtliga möjliga konfliktsituationer som kan förekomma givet de tåg som undersöks och banans möjligheter att reglera konflikterna.

Ansats 3 utgår delvis från grundmodellen i Ansats 1, men i stället för att generera alla trafikeringar givet de prognosticerade tåglägenas tidsfönster och därefter för vart och ett av dem beräkna minsta cykeltiden, så försöker vi i stället "internalisera" sannolikheterna i beroendegrafen. Detta betyder att vi lämnar den direkta tillämpningen av Max-Plus algebran eftersom cykelfrihet inte längre kan garanteras då två tågs körordning på en sträcka inte behöver vara bestämd på förhand, däremot är den sannolika fördelningen mellan en tågordning och dess invers given. Således har bågarna i händelsegraferna nu sannolikheter vilket vi utnyttjar för att beräkna sannolikheten för varje trafikering och målet är att kunna räkna fram en väg genomförandetid.

Genom att hålla ordning på vilka bågar som traverseras i en beräkning så kan ändå cykelfria sekvenser av beroende undersökas. Av detta skäl övergår vi till att använda Critical Path Method (CPM, se stycke 5). Beräkningen ger i princip samma resultat, med den skillnaden att CPM inte i sig självt hanterar en återupprepad trafikperiod.

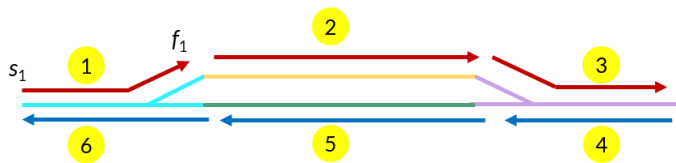
Detta är dock enkelt att åstadkomma genom att i efterhand binda ihop de beroenden som gäller nästa trafikeringsperiods beläggningar och räkna ut minsta cykeltiden.

Varje båge ansätts en sannolikhet som beror av hur sannolik den är att inträffa. Summan av en båges sannolikhet och dess invers, om den förekommer, skall vara 1. För de beroenden som uppstår som en konsekvens av de olika beläggningarna som utförs i sekvens i tågsläget då det traverserar de olika infrastrukturobjekten så ansätt sannolikheten 1.0 då dessa beroenden inte har något alternativ, tåget belägger ju infrastrukturobjekten i sekvens.

Beroenden som uppstår då tåg delar samma infrastrukturobjekt har däremot en sannolikhet associerad med det som avgör hur sannolik detta beroende är. Summan av detta beroende och dess invers skall vara 1.0. Dessa sannolikheter kan beräknas genom tidsfönstrens överlapp på den aktuella resursen. Beroendet visar på den sannolika påverkan som det ena tågsläget har på det andra tågslägets genomförandetid.

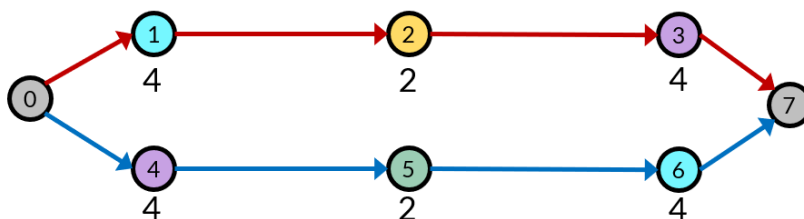
9.1 Sannolika tågordningar

Figur 25 används som illustration av översättningen mellan tågslägen, trafikeringar, beroendegrafer och motsvarande matris för tid mellan olika rörelser. Detta är utgångsläget innan någon trafikering är bestämd. De olika infrastrukturobjekten där enbart en tågrörelse kan genomföras åt gången är färgkodade, och dessa färger återfinns i färgkodningen i tillstånden i Figur 25.



Figur 25 Förenklad trafikering av en mötesstation med två tåg. Färgerna är inlagda för att underlätta mappningen mellan de olika figurerna i detta stycke och återfinns i kommande händelsediagram.

I Figur 26 visas enbart de beroenden som uppstår mellan händelser baserat på tågens beläggningar av de olika infrastrukturobjekten som sker i sekvens längs tågfärden. Varje nod i händelsediagrammet motsvarar en tågrörelse på ett infrastrukturobjekt i Figur 25. Utöver dessa har två ytterligare noder introducerats, en startnod och en slutnod vilket gör beräkningen enklare att genomföra. Dessa har markerats med grå färg. Under respektive händelsenod står tidsutsträckningen för respektive händelse. Det är beläggningen på infrastrukturobjekten som är händelsen, således skall även tiden det tar för till exempel ställverket att registrera och säkerställa att infrastrukturen åter är fri representeras i händelsens tidsutsträckning.



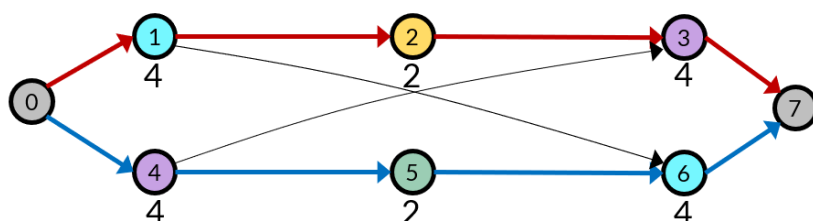
Figur 26 Händelsediagram för tågrörelserna i Figur 25. Färgerna representerar de olika infrastrukturdelen och siffrorna tiderna att genomföra händelsen.

Initial-matrisen som kodar beroendena inom tågets rörelser finns i Tabell 1. Matrisen visar således nåbarhet inom ett ”hopp” och läses som ”från händelse på rad i till start av händelse på kolumn j ”, till exempel tar händelse ett 4 tidsenheter och således tar det 4 tidsenheter innan händelse 2 (tidigast) kan starta.

Tabell 1 Mappning mellan tåg, infrastruktur och genomförandetid, här saknas ännu beroendena mellan tågägen.

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-∞	0	-∞	-∞	0	-∞	-∞	-∞
1	-∞	-∞	4	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞
2	-∞	-∞	-∞	2	-∞	-∞	-∞	-∞
3	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4
4	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4	-∞	-∞
5	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	2	-∞
6	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4
7	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞

Figur 27 visar en (av tre) möjliga trafikeringar av driftplatsen. I denna trafikering möts de två tågerna på driftplatsen vilket leder till de två beroendena emellan de två tågernas händelser, markerade med tunnare pilar $1 \rightarrow 6$ och $4 \rightarrow 3$.



Figur 27 En möjlig trafikering med de två tågägen från Figur 25

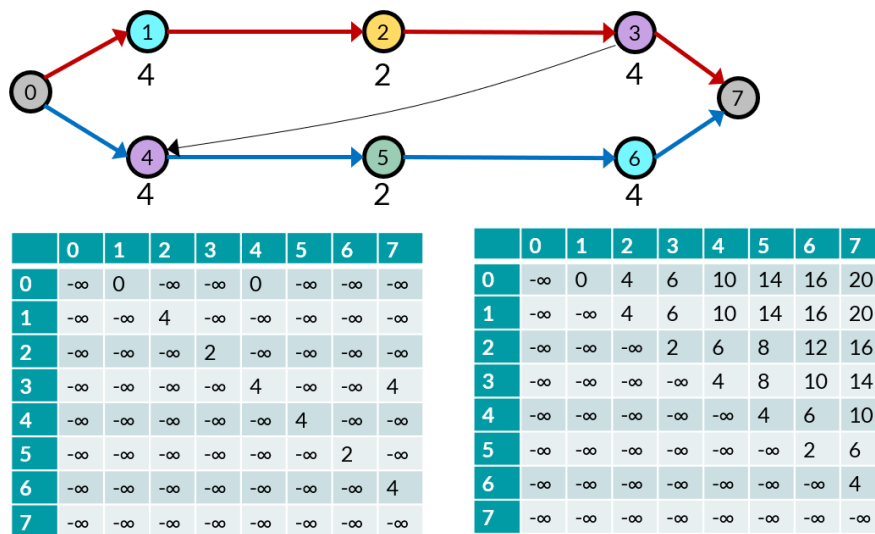
I Tabell 2 visas till vänster initialmatrisen för denna trafikering. Jämfört med Tabell 1 tidigare så har de tidigare slut-händelserna för de två tågerna nu ”kontakt” med andra händelser i beroendegrafen ($1 \rightarrow 6$ och $4 \rightarrow 3$) och finns med i matrisen. Detta motsvarar en bestämd trafikering och är lika med hur detta hanterades i Ansats 1.

Tabell 2 Till vänster initialmatris med beroenden från Figur 27 samt beräknade tidigaste starttider för händelserna i höger tabell. Kortaste genomförandetid kan avläsas som det maximala värdet för nod 7 längs till höger.

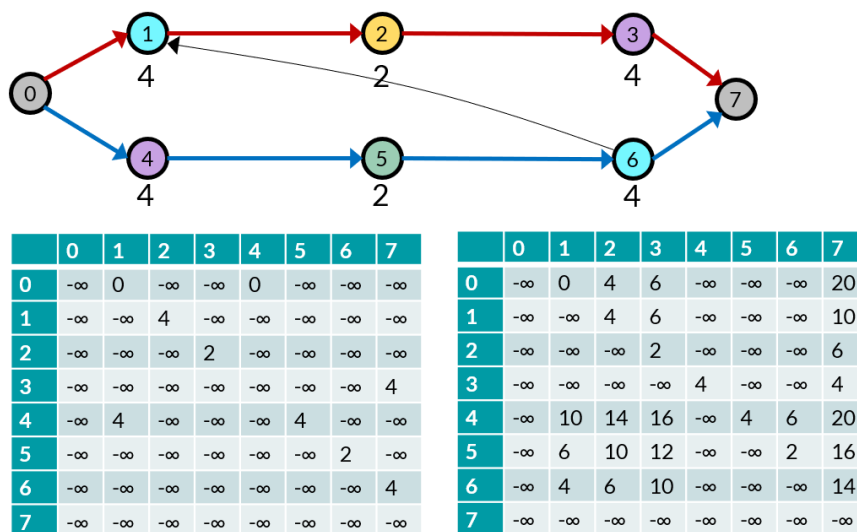
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-∞	0	-∞	-∞	0	-∞	-∞	-∞
1	-∞	-∞	4	-∞	-∞	-∞	4	-∞
2	-∞	-∞	-∞	2	-∞	-∞	-∞	-∞
3	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4
4	-∞	-∞	-∞	4	-∞	4	-∞	-∞
5	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	2	-∞
6	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4
7	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-∞	0	4	6	0	4	6	10
1	-∞	-∞	4	6	-∞	-∞	-∞	10
2	-∞	-∞	-∞	2	-∞	-∞	-∞	6
3	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4
4	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4	6	10
5	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	2	6
6	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4
7	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞

De andra två trafikeringarna så kör det ena tågerna före det andra och beskrivs analogt. I Figur 28 och Figur 29 visas de två andra fallen och deras matriser samt de beräknade genomförandetider i motsvarande tabeller till höger.



Figur 28 Rött tåg kör före blått tåg på det undersökta spårområdet.



Figur 29 Blått tåg kör före det röda tåget på det undersökta spårområdet.

Dessa tre fall kan alla inträffa. Varje beroende i dessa trafikeringar har än så länge haft sannolikheten 1.0, dvs det är ställt utom allt tvivel att de inträffar. Eftersom varje beläggning tar strikt mer än 0 tidsenheter (borträknat de introducerade start- och slutnoderna) och alla beroenden måste vara riktade framåt i tiden så garanteras cykelfrihet i grafen.

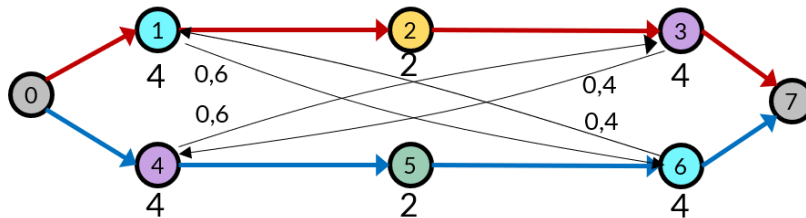
Antag nu att det är möjligt att ha beroenden med sannolikheter. Varje beroende får då en invers och summan av beroendet och dess invers måste vara 1.0. Beroendebågar kommer då att uttrycka hur sannolikt det är att den nod som beroendet påverkar kommer skjutas framåt i tiden, på samma sätt som för sannolikhet 1.0 tidigare, men anpassat till den angivna sannolikheten. Även inversen kalkyleras på samma sätt och påverkar beroendets andra nod på motsvarande sätt. Detta visas i Figur 30.

Då dessa inverterade bågar introduceras så är cykelfrihet viktigt att bevaka, ett tågläges sluttid för det undersökta spårområdet skall inte kunna påverka sig självt. Således är det inte tillåtet med beroendekedjor som besöker samma nod mer än en gång.

Varje beroendekedjas sannolikheter multipliceras för att få sannolikheten för den kedjans totala sannolikhet, samt parallellt kedjans genomförandetid. Summan av sannolikheten av samtliga genomförbara kedjor summeras och kommer att vara som mest 1,0, troligen är denna summa mindre än 1,0 då inte alla sannolikhetsbågar är kombinerbara. Den faktiska sannolikheten för att en kedja inträffar är så dess sannolikhet delat med summan av alla genomförbara kedjor.

Genom denna operation har nätverksgrafan kommit att representera samtliga möjliga tidtabeller och det vägda medelvärdet av dem är den sannolika genomförandetiden för trafiken med hänsyn till alla giltiga trafikeringar samt deras sannolikheter.

I Figur 30 har samtliga beroenden mellan de olika beläggningarna för rött och blått tåg från Figur 27 till Figur 29 lagts in, med sannolikheter.



Figur 30 Inlagda sannolika beroenden från Figur 27.

Motsvarande tabeller som tidigare ges till vänster i Tabell 3 nedan, medan den röda tabellen till höger kodar de sannolikheter som visas i händelsediagrammet i Figur 30.

Tabell 3 Gnomförandetider för händelserna samt sannolikheter för beroenden och deras inverser.

	0	1	2	3	4	5	6	7		0	1	2	3	4	5	6	7
0	-∞	0	-∞	-∞	0	-∞	-∞	-∞	0		1.0			1.0			
1	-∞	-∞	4	-∞	-∞	-∞	4	-∞	1			1.0				0,6	
2	-∞	-∞	-∞	2	-∞	-∞	-∞	-∞	2				1.0				
3	-∞	-∞	-∞	-∞	4	-∞	-∞	4	3					0,4			1.0
4	-∞	-∞	-∞	4	-∞	4	-∞	-∞	4				0,6		1.0		
5	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	2	-∞	5							1.0	
6	-∞	4	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	4	6		0,4						1.0
7	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞	7								

Notera att sannolikheterna är "lokala" till varje beroende och dess invers. Alla beroendebågar är inte kombinerbara till giltiga tågplaner då den del kombinationer skapar cykler vilket skulle betyda (minst) ett beroende som går bakåt i tiden. I figuren ovan kan tex. bågen $3 \rightarrow 4$ (3 kör före 4 på lila infrastrukturobjekt, se Figur 30 och Figur 25) och $6 \rightarrow 1$ inte kombineras. Ett i tid senare beroendes sannolikhet har en betingad sannolikhet av tidigare valda beroenden, så tex. är $F(4 \rightarrow 3 \mid 6 \rightarrow 1) = 0,0$, dvs har vi tidigare valt beroendet $6 \rightarrow 1$ så kan inte $3 \rightarrow 4$ vara giltigt längre. På samma sätt gäller $F(3 \rightarrow 4 \mid 1 \rightarrow 6) = 1,0$.

Sannolikheten för trafikeringen Figur 27 är således $4 \rightarrow 3$ och $1 \rightarrow 6$ vilket ger $0,6 \times 0,6 = 0,36$, Figur 28 ger $4 \rightarrow 3$ (och $1 \rightarrow 6$ implicit) vilket ger $0,6 \times 0,4 = 0,24$ samt för Figur 29 $6 \rightarrow 1$ (och $3 \rightarrow 4$) ger $0,6 \times 0,4 = 0,24$. Totalt ger detta $0,36 + 2 \times 0,24 = 0,84$. Den kombination av sannolikhetsbågar som inte finns med, och som är ogiltig, är $6 \rightarrow 1$ till-

sammans med $3 \rightarrow 4$ som leder till en cykel och därmed ett beroende "bakåt" i tiden (genom se i diagrammet kan vi även "se" att detta leder till att någon båge måste "gå bakåt i tiden"). Således behöver kedjornas sannolikheter normaliseras med summan för alla giltiga kedjor vilket är 0,84. Vi får då sannolikheten för trafikeringen i Figur 27 till $0,36/0,84 = 0,43$, för Figur 28 till $0,24/0,84 = 0,285$ och analogt för Figur 29, $0,24/0,84 = 0,285$. Den sammanvägda sannolika tiden för de tre trafikeringarna blir $0,43 \times 10 + 0,285 \times 20 + 0,285 \times 20 = 15,7$ tidsenheter.

På motsvarande sätt bör det vara möjligt att räkna på den sannolika transporttiden för de ingående tågen givet sannolikheterna för trafikeringarna. Detta är då underlaget för att beräkna den sannolika transporttidsvinsten (eller förlusten) med hjälp av samhällsekonomiska värden för VOT / VTTS (Value Of Time / Value of Travel Time Savings). Det borde även vara möjligt att räkna ut de sannolika tidigaste respektive senaste starttiderna (sluttiderna) för de ingående händelserna (de gula ringarna i händelsediagrammen ovan).

Notera att utökningen till sannolikheter är konservativ i den meningen att om sannolikheterna "läses" till ett av de tre tidigare undersökta "fasta" fallen (dvs sannolikheterna blir 0.0 eller 1.0 beroende på vilka tågordningar som väljs) så återfås samma kalkyl som tidigare (och som för Ansats 1). Jämfört med Ansats 1, där alla trafikeringar genererades och löstes med Max-plus algebra, så har i Ansats 3 sannolikheterna för tågordningarna "internaliserats" till händelsegrafan genom att ansätta de sannolikheter som de olika tågordningarna har.

9.2 Sannolikheternas värden

Sannolikheterna för händelsen att tåg A kör före tåg B eller tvärtom kan beräknas från tågens tidsfönster för denna händelse. Dessa sannolikheter kodar sannolikheten att en viss tågordning inträffar givet det tidsfönster som de inblandade tågen har. Detta beräknas oberoende av andra händelsers tågordningar på andra platser i nätet, så summan av sannolikheten att tåg A kör före tåg B eller tvärtom på ett enkelspår är 1.0.

Eftersom en beroendekedja inte får vara cyklisk (vilket skulle betyda att en händelse påverkade sig själv "bakåt" i tiden) så är inte alla händelser (tågordningar) är kombinerbara med varandra. Det betyder att då flera händelser kombineras ihop måste de leda till en icke-cyklisk graf som normaliseras med avseende på summan av alla cykliska händelsekedjor som kan förekomma. I stycke 9.1 så var det en kombination som var omöjlig, således måste de kvarvarande tre trafikeringarnas sannolikheter normaliseras med summan av de möjliga trafikeringarna. Förväntansvärdet för genomförandetiden blir då det vägda medelvärdet av sannolikheten för varje trafikering multiplicerat med genomförandtiden för denna trafikering.

Således betyder inte detta att det inte finns trafikeringar som tar längre tid än den sannolika genomförandetiden, det gör det med säkerhet eftersom kalkylen tar fram ett vägt medelvärde baserat på trafikeringarnas olika längder och hur sannolika de är. Skulle man vilja ha det sämsta (längsta) beräknade värdet är det maximala värdet av samtliga möjliga trafikeringar, något som kan beräknas med både Ansats 1 (även om antalet trafikeringar kan bli många) och Ansats 3. Poängen med Ansats 3 är att kalkylera det vägda sannolika utfallet. Infrastrukturen kommer trafikeras med en eller flera av de internaliserade trafikeringarna och de olika beroendekedjornas sannolik-

Den kombination av händelser som inte kan inträffa är $16 \rightarrow 3$ samt $13 \rightarrow 26$ i samma kedja. Dessa båda har sannolikheten $1/3$ vardera, vilket betyder att de giltiga kedjornas värden skall normaliseras med $1.0 - (1/3 \times 1/3) = 8/9$.

I Figur 33 har en av beroendekedjorna ritats in, där rött tåg och blått tåg möts på mötesstationen till höger, vilket betyder att det är beroendet från händelse 13 till händelse 26 som knyter ihop de två tågens rörelser i denna trafikering. Denna kedjas vägda sannolikhet är $(1/3 \times 2/3) / (8/9) = 1/4$. Summan av hela kedjans längd är $(4+2+8+2+8) + (8+2+8+2+4) = 48$ tidsenheter.



Figur 33 En av två kortaste sannolika genomförandetiderna för trafikeringen i Figur 32

Det finns ett analogt fall där tågen möts på stationen till vänster vilket får samma vägda sannolikhet, $1/4$, och samma genomförandetid, 48 tidsenheter.

De två tågen kan även mötas på den mittersta stationen. Den vägda sannolikheten för detta blir $(2/3) \times (2/3) / (8/9) = 1/2$ samt genomförandetiden $4+2+8+2+8+2+4 = 30$ tidsenheter (dvs den tid som båda tågen tar att köra genom banavsnittet).

Den vägda genomförandetiden blir då $2 \times (1/4 \times 48) + 1/2 \times 30 = 39$ tidsenheter.

9.4 Flera tåg och begränsad kapacitet

Då flera tåg adderas växer komplexiteten snabbt. I ovanstående exempel är körvägen genom stationen bestämd (kan ses genom färgsättningen på beläggningen av spårresurserna i Figur 32 och i Figur 25 och Figur 26). Lägger vi till fler tåg och/eller lägger till information att de olika spåren har olika egenskaper vad gäller traverseringstid så ökar antalet kombinationer som behöver undersökas. Till exempel så vill vi inte ha med kombinationer där ett tåg använder mötesspåret även då det inte sker ett möte på stationen. För en fast trafikering så är detta inget bekymmer (såsom i Ansats 1) eftersom vi där bestämmer trafikeringen innan genomförandetiden beräknas med tex Max-Plus algebra, men poängen med Ansats 3 är ju att internalisera sådan kombinatorik i sannolikheter i stället. Det har inte gjorts i exemplen i stycke 9.1 och stycke 9.3.

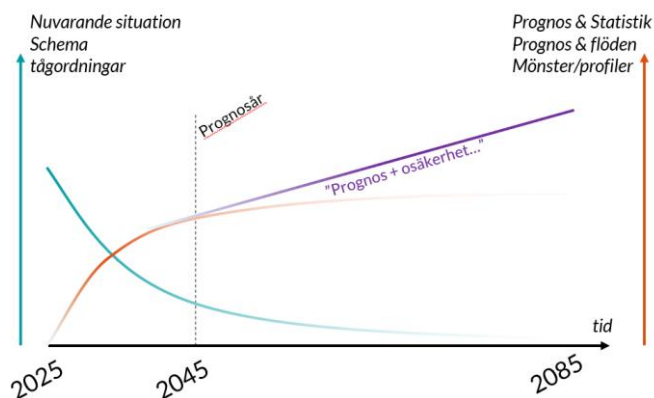
För att kunna abstrahera bort val av spår på driftplatsen och lägga till driftplatsobjekt med högre kapacitet än ett tåg åt gången krävs ny modellering och tillägg i CPM-metoden. Detta skulle betyda att linje-resurser har kapacitet 1 medan stationsobjekt skulle kunna ha kapacitet som är större än 1, tex. kapacitet för två tåg samtidigt i exemplen ovan, ett på vardera spåret. Denna utöknings av CPM-metoden är inte genomförd inom ramen för SOSE. Tillägget måste kunna hantera dels att stationen inte kan överbeläggas, dels att beroendekedjor kan avgöras huruvida de är cykliska eller ej, dels att vad sannolikheten för tågmöte mellan olika kombinationer av tåg är och vad detta betyder för domino-effekter för andra tåg än de som möts på driftplatsen (till exempel att ett tredje tåg blir väntande på en station innan eftersom det är fullt på framförvarande driftplatser). Om dessa sannolikheter kan beräknas, vilken beror av sannolikheten för att två tåg är samtidigt på framförvarande station, så finns

möjligheten att beräkna sannolika framtida genomförandetider för trafik baserade på prognosticerade tåglägen med tidsfönster samt förändring i infrastruktur. Projektet SOSE har dock inte inom ramen för sin insats kunnat vidareutveckla Ansats 3 med dessa utökningar av CPM-metoden och om detta blir användbart och hanterligt.

10 Diskussion och slutsatser

Kalkylperioden är 60 år så det råder stora osäkerheter för hur trafiken kan komma att se ut under hela denna period. Figur 34 visar på hur olika sätt att bedöma betydelsen av en utbyggnad för en kalkylperiod på 60 år. De långsiktiga prognoserna beräknas med c:a 20 års framförhållning, vilket är c:a 1/3 av hela kalkylperioden. För de första kommande åren kan antagandet vila på ungefär samma trafiksituation som är nu rådande, men ganska snart därefter avtar säkerheten i prognosen och det blir viktigare och viktigare att kunna bedöma utbyggnaden baserad på sannolika trafikutfall och/eller scenario-analyser av olika framtids-scenarios. Dels förändras efterfrågan på trafik, dels kommer infrastrukturen att byggas ut på andra platser vilket påverkar trafiken på det just nu undersökta området.

Det är således viktigt att finna bättre metoder för att kunna genomföra mer generella och sannolikhetsbaserade analyser där olika sannolika "framtid" kan värderas. Detta gäller både framtida trafikbehov (baserat på olika transportprognoser) men även olika sannolika infrastrukturförändringar, inte bara för järnvägen.



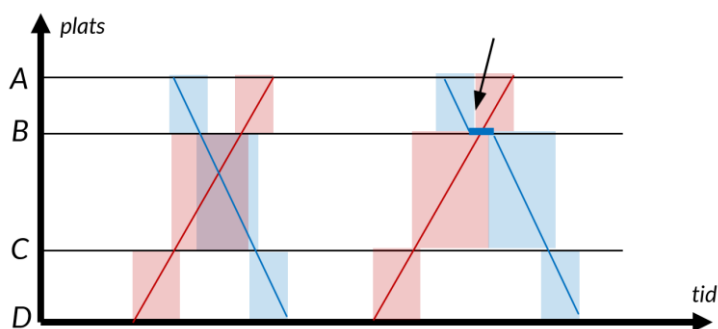
Figur 34 Osäkerheter över 60 års avskrivning

Vidare så kan kapaciteten vara tillräckligt i så mening att all trafik får plats, medan den kan vara samhällsekonomiskt ineffektiv om trafiken tvingas till mycket väntetider pga. möten och förbigångar. Att mäta kapaciteten i sig säger inte om kapaciteten är effektivt utnyttjad. Det är således skillnad på kapacitetsutnyttjande, produktivitet (mängd transporter) och effektivitet (hur effektivt transporter produceras). Kapacitetsmätningar, för beläggnings av infrastruktur, väsentligen hur stor andel av tiden som något belägger infrastrukturen. Produktivitet anger hur många transportenheter som produceras, dvs. sådana enheter som upptar kapacitetsenheten, det kan vara ett ensamt lok eller ett fullbelagt tåg – det "kostar" samma kapacitet. Effektivitet anger hur mycket transportarbete som genomförs per tidsenhet – ett fullastat tåg kan således ge samma transporteffektivitet som två halvfulla tåg, däremot är de nyttjade medlen (spårresurserna) inte lika effektivt utnyttjade med två halvfulla tåg. Den samhälls-

ekonomiska värderingen utgår från vad som transporteras samt volymen av detta medan kapacitetsbedömningen utgår från om kapaciteten räcker till för den efterfrågade beläggningen. För både den samhällsekonomiska värderingen och kapacitetsanalysen är trafiken av avgörande betydelse, men de två områdena ”drar åt varsitt håll”: där det ur kapacitetshänseende är bäst med jämn beläggning över tid, och så få enheter som möjligt, så önskar transportmarknaden så många transportmöjligheter som möjligt vilket stärker utbudet och valmöjligheterna. Den samhällsekonomiska värderingen värderar vad ett möjligt utbud av transportalternativ är värt då en investering i (ny) infrastruktur görs.

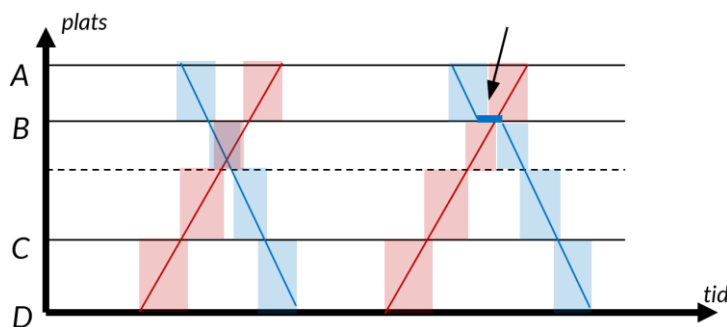
Det är den sannolika restidsförbättringen och möjligheten för ytterligare trafik som skall värderas samhällsekonomiskt. Således behöver den ytterligare kapaciteten som blir tillgänglig omvandlas till restidsvinster och möjligheten till ökad trafik.

Betrakta Figur 35 där två tåglägen har en konflikt på en bana. Deras beläggningsareor är inritade som skuggor. Till höger finns en av två lösningar inlagd, den som oftast väljs vid manuell konstruktion: ett tågläge får vänta på att banan blir fri.



Figur 35 Konfliktsituation i JA, till vänster en konflikt mellan två tåglägen med beläggningsareor inritade kring de två tågen.

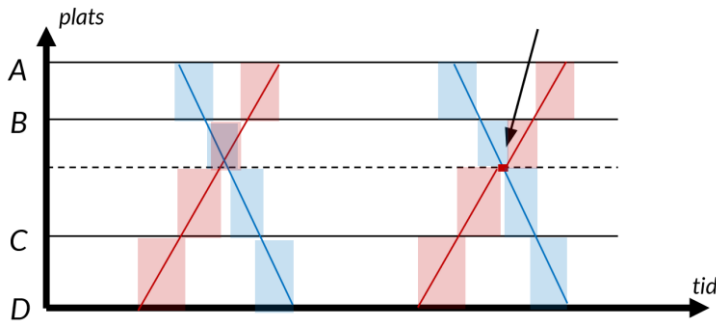
Notera de stora beläggningsareorna på den dimensionerande sträckan mellan station B och C. De påverkar dels tiden för konfliktregleringen mellan de två tåglägena, dels hur många tåg per tidsenhet som kan framföras på denna bandel. Detta leder till att den dimensionerande sträckan ofta är föremål för kapacitetsutbyggnad och är därför ett huvudsakligt underlag för den förenklade kapacitetsberäkningen som Trafikverket använder sig av⁴⁴.



Figur 36 Samma situation efter utbyggnad i UA, konfliktlösningalternativ 1 ger samma tidsfördröjning för blått tåg.

⁴⁴ Trafikverket 2021, Förstudie Utveckling av modell för kapacitetsberäkningar – Kartläggning av brister och utvecklingsbehov, intern rapport TRV2021/147548

Låt oss nu anta att det sker en utbyggnad på den dimensionerande sträckan. Motsvarande beläggningssituation visas i Figur 36 och Figur 37. Den tidigare konfliktlösningen finns bevarad men ett nytt alternativ har möjliggjorts, ett möte på den nya mötesstationen. Notera även de avsevärt mindre areorna. Ligger mötesstationen på mitten av den dimensionerande sträckan så är beläggningen (arean) halverad. Denna minskning av kapacitetskonsumtion kan även omvandlas till fler tåglägen. Det är detta som väsentligen framkommer både i den ursprungliga kompressionsmetoden enligt UIC 406⁴⁵ men även i Trafikverkets egen kapacitetsberäkning.



Figur 37 Nytt konfliktlösningssalternativ på nybyggd mötesplats, rött tåg får vänta på blått tåg men med kortare väntetid.

För att kunna bedöma vad denna nya möjlighet i realiteten betyder för kortade gångtider för alla tåglägen som kör på banan så behöver förändringen i konfliktregleringskostnad som sker lokalt på detta avsnitt kunna bedömas. För fallet där trafikeringen är bestämd kan detta göras genom en tidtabellanalys, men då tåglägena associeras med tidsfönster representerande sannolika avgångs- och ankomsttider så finns inte längre möjligheten att göra en tidtabellanalys. Detta är bakgrunden till de tre ansatserna som redogjorts för i denna rapport. Ansats 1 undersökte samtliga alternativa trafikeringar på en längre sträcka och Ansats 3 sökte internalisera kombinatoriken från alla olika trafikeringar i Ansats 1.

Att kapacitetskonsumtionen har minskat lokalt när mötesstationen byggs i Figur 37 är klart, vi kan även mäta kapacitetskonsumtionens minskning som den areaminskning som sker (area kan betraktas som ett mått på kapacitet), men vad detta betyder för trafiken på det omgivande spårsegmenten, och därmed för den samhällsekonomiska värderingen i termer av restidsvinster och fler tåg, är mycket svårare att beräkna, dvs. konsekvensen på omgivande spårsegment för den med sannolikheter behäftade trafiken. Antag ett tredje och fjärde tågläge som interfererar med dessa två tåglägen i Figur 37 men utanför sträckan A-D, hur dessa påverkas är oklart om endast sträckan B-C studeras, men detta ingår i den samhällsekonomiska värderingen av lösningsförslaget. Detta har även förstudieutredningar för förbättrade metoder utförda av Trafikverket konstaterat⁴⁶. Således ligger ”det stora tricket” för att förstå om en utbyggnad är samhällsekonomiskt lönsam under en kalkylperiod på 60 år i att lyckas ”översätta” kapacitetsförändringen till restidsvinster och merutnyttjande över längre sträckor än bara lokalt så att en samhällsekonomisk värdering kan genomföras för en trafik som är behäftad med sannolikhetsutfall.

⁴⁵ UIC, 2004. ”Code 406 – Capacity”, 1st edition, Paris, France

⁴⁶ Trafikverket 2021, Förstudie Utveckling av modell för kapacitetsberäkningar – Kartläggning av brister och utvecklingsbehov, intern rapport TRV2021/147548

Utredningens mål var att undersöka den föreslagna metoden beskriven i Ansats 1. Konstaterandet är att det inte får anses som en framkomlig väg att kombinatoriskt generera alla trafikeringar givet en trafikbeskrivning (en mängd tåg) med tidsfönster inom vilka dessa kan variera samt därefter beräkna alla fördröjningstider givet den bestämda trafikeringen med hjälp av metoden Max-Plus algebran. Antalet trafikeringar växer mycket fort eftersom varje trafikering dels behöver en bestämd tågväg genom infrastrukturen, dels bestämda tågordningar då två tåglägen konkurrerar om samma infrastrukturobjekt. Det är dessutom oklart vilken sannolikhet som varje sådan genererad trafikering har, vilket behövs för att kunna gå vidare och bedöma den sammanvägda sannolika samhällsekonomiska värderingen. Slutsatsen blir att den föreslagna ansatsen inte är en framkomlig väg att bedöma det samhällsekonomiska värdet av utbyggd infrastruktur med en framtida trafik behäftad med sannolikheter.

De händelsegrafer som tagits fram, se avsnitt 7, kan dock utgöra ett hjälpmedel för manuell analys då dessa har en tydlig struktur: tid finns längs med den horisontella axeln och de olika undersökta tåglägena längs den vertikala axeln. Den programvara som tagits fram i samband med Ansats 1 kan dels generera trafikeringar, dels beräkna kortaste genomförandetiden för trafikeringen och därmed visualisera denna i de strukturerade händelsediagrammen.

Utöver Ansats 1 har projektet sökt alternativa metoder genom Ansats 2 och Ansats 3. Då kombinatoriken vart överväldigande stor i Ansats 1, samt svårigheter med att skatta en samhällsekonomisk värdering för en framtida sannolikhetsbehäftad trafik, så anlades i Ansats 2 ett helt sannolikhetsbaserat synsätt och försök till att skatta restidsvinster och -förluster. Ansats 2 baserades på tidsfönstren kring de prognosticerade tåglägena söktes metoder att omvandla de därigenom sannolika konfliktsituationerna mellan tåglägen i de undersökta trafikeringarna till väntetiderna vid möten och förbigångar. Tanken var att förändringar i infrastrukturen egentligen inte påverkar konfliktsituationen i sig (tågen "slår ihop" på väsentligen samma plats ändå) utan det är konsekvensen av konflikten som ändras, se avsnitt 8. Problemet med denna ansats var hur konsekvensförändringen påverkade konfliktsituationer och i sin tur deras sannolika konsekvenser mellan tåglägen på andra platser längs med den undersökta sträckan. Detta blev komplext och svårt att överblicka, och ligger långt från de metoder som används idag. Ansats 1 och Ansats 2 leder därmed fram till Ansats 3.

I Ansats 3 baseras på vunna erfarenheter från Ansats 1 och Ansats 2. Slutsatsen från Ansats 1 är att så mycket kombinatorik som möjligt behöver omvandlas ("internaliseras") i sannolikheter, men att den prognosticerade trafiken (de undersökta tåglägena) och infrastrukturens layout skapar beroenden med sannolikheter mellan tåglägenas beläggningar av infrastrukturobjekten som behöver beaktas. Syftet är att formulera en sannolikhetskalkyl för den sannolika förväntade genomförandetiden för de prognosticerade tåglägena baserat på de beroenden som kan uppkomma i olika trafikeringar. Dessa beroenden uppstår som en konsekvens av att de olika tåglägena delar resurser men att ordningen dem emellan har olika sannolikhet.

Vidare så önskar vi abstrahera från enskilda infrastrukturobjekt för tex. mötesstationer då vi inte betraktar de två spåren som väsentligen olika resurser utan snarare att mötesstationen är en resurs med sammanvägd kapacitet: två spår ger en resurs med kapacitet 2, tre spår ger en resurs med kapacitet 3, etc. På detta sätt tas onödigt kombinatorik bort (fördröjningstiden för tåglägena blir ungefär samma). Detta har

dock inte kunnat utvecklas vidare inom ramen för förstudien SOSE. Här finns dock möjligheter att gå vidare med utveckling av händelser av typen ”samtidighet” i kalkylen i Ansats 3, det borde vara möjligt att beräkna dessa på liknande sätt baserat på sannolikheter för överlapp mellan två tåglägen, givet deras tidsfönster.

Den samhällsekonomiska värderingen bygger mycket på VOT/VTTS (Value of time / Value of Travel Time Savings). Oftast så utgår kalkylerna från en bestämd tidtabell för de jämförelse-alternativet (JA) och utvärderingsalternativet (UA) där infrastrukturen således skiljer sig åt med målet att jämföra de två. Men då sannolikheter ”vävs” in i uppgiften blir denna värdering svårare att genomföra, genomförandetiden för varje tåg på banavsnittet är inte längre bestämd utan beror av flera trafikeringar med lite olika sannolikheter. Dessa behöver vägas samman för att få den sammanvägda sannolika genomförandetiden (transporttiden) för tåget, något som inte är gjort inom ramen för denna förstudie. Detta torde dock vara möjligt att beräkna baserat på de sannolikheter som beräknas för de olika beroendekedjorna i de sannolikhetsgraferna i Ansats 3.

Sammanfattningsvis finns det ett fortsatt behov av att värdera infrastrukturinvesteringar och dess samhällsekonomiska lönsamhet. För tidsperioder nära nuläget så fungerar olika typer av tidtabellanalyser då trafiken kan bedömas vara någorlunda lik den som redan idag utför och/eller behoven kan anses vara kända. På lite längre sikt kan skattningar byggda på prognoser och kända framtida förändringar i tex. större industriernas förändringar som underlag för skattningar av beläggningsprofiler (över tex. dygnet timmar) fungera som bedömningsunderlag för nedbrytningen av transportbehov i tåglägen, då med sannolika trafikeringstider. Men på längre sikt ökar osäkerheten och antalet scenarios ökar kraftigt. Detta får som konsekvens att det inte är praktiskt möjligt att värdera alla möjliga sannolika fall längre, och en kalkyl behöver utvecklas där sannolikheter av olika slag blir en integrerad del av kalkylen och den samhällsekonomiska värderingen.

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Systems Engineering
RISE Rapport : 2026:48
ISBN:978-91-90109-77-9