



RAPPORT
Slutrapport KAIN 2

Dokumentdatum
2024-12-20

Ev. diarienummer
TRV 2020/72702
KTH-RPROJ-0275727
TRITA-ABE-RPT-256

Skapat av _____
Ingrid Johansson, Elin Hellblom och Anders Lindfeldt

Kapacitet i nätverk 2 – KAIN 2

Slutrapport

Ingrid Johansson
Elin Hellblom
Anders Lindfeldt

TRITA-ABE-RPT-256

Innehåll

Kapacitet i nätverk 2 – KAIN 2	1
Innehåll	2
Förord	3
Bakgrund	4
Modeller för beräkning av kapacitet	4
Linjekapacitet (enkelspår)	4
Nodkapacitet	5
Syfte och mål	5
Projektledning och genomförande.....	6
Metodik.....	6
Metodutveckling	7
Sammanfattning av databehov.....	9
Fallstudie	9
Norrköping C	9
Kalmar C	9
Linje 421 – Nyköpingsbanan.....	9
Linje 637 – Norge/Vänernbanan	10
Analys och utvärdering.....	10
Stationer.....	10
Enkelspår	10
Resultat, slutsatser och vidare forskning.....	11
Resultat i sammanfattning	11
Stationer.....	11
Enkelspår	13
Modellens begränsningar och avvikelser från projektspecifikationen.....	14
Övrig användning av modellen	15
Alternativ kompressionsmetod	15
Resenäsbyten vid plattform/plattformsallokering	15
Slutsatser	16
Vidare forskning	16
Resultatspridning och publikationer	17
Resultatspridning	17
Publikationer	18
Referenser	19

Förord

Den här rapporten sammanfattar projektet ”Kapacitet i nätverk 2 (KAIN 2)” som genomförts vid avdelningen för Transportplanering på Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm, 2021–2024. Projektet ingår i målområdet för En effektivare planeringsprocess inom forskningstemat Effektivare transporter på järnväg, och har finansierats genom branschprogrammet Kapacitet i järnvägstrafiken (KAJT).

Projektet har letts av projektledare Ingrid Johansson. Elin Hellblom har genomfört merparten av arbetet med metodutveckling, analys och databearbetning med stöd av Anders Lindfeldt. Ingrid Johansson, Anders Lindfeldt och Oskar Fröidh har varit handledare för Elin Hellbloms doktorandstudier under projektets gång. Magnus Backman har varit kontaktperson från Trafikverket och bidragit med expertstöd och dataunderlag.

Rapporten inleds med en bakgrundsbeskrivning av projektet och därefter beskrivs syfte och mål, projektledning, metodik, resultat och analys. Rapporten avslutas med en sammanfattning av slutsatser från projektet samt en redovisning av hur resultatspridning skett.

Stockholm, december 2024
Ingrid Johansson, Elin Hellblom och Anders Lindfeldt

Bakgrund

För att säkerställa ett pålitligt, robust och effektivt transportsystem på järnväg där utrymmet är begränsat och önskemålet om plats högt, är kapacitetsanalys en viktig del. Syftet med kapacitetsanalys är att estimeras trafikmängden som kan trafikera en viss infrastruktur. På så sätt kan flaskhalsar identifieras och planering och optimering av systemet kan förbättra systemets utnyttjande.

Det vanligaste måttet som använd idag är just kapacitetsutnyttjande, det vill säga hur stor del av tiden ett infrastrukturelement används. Trafikverkets nuvarande metod är baserad på standarden för kapacitetsanalys, tidtabellskompressionsmetoden som beskrivs i UIC Code 406 (UIC, 2013). Analysen är begränsad till linjer och beräknar kapaciteten på en övergripande nivå. I projektet har brister med Trafikverkets modell lyfts fram, så som att trafikmängden uppskattas för ett vardagsmedeldygn och värden för till exempel körtid och mötestid görs på en övergripande nivå baserat på tågtyp, hänsyn tas ej till angränsande infrastruktur och man tittar endast på den dimensionerande sträckan (Trafikverket, 2021).

I projektet Kapacitet i nätverk (KAIN) 2017-2019 pekades några av dessa brister i Trafikverkets metod ut. Efter en behovsanalys utvecklades metodprototyper för tidtabellsberoende beräkning av kapacitetsutnyttjande på stationer, förlängda linjedelar och kombinationen, baserat på indata från simuleringsverktyget RailSys. Metoderna användes i en fallstudie (Weik *et al.*, 2020) med förenklade förutsättningar såsom att samtliga tågslagen genom stationerna är låsta till spåret de är planerade till och att de vändande tågens tidtabellslagen inte är kopplade. Metoden har endast applicerats på dubbelspår och testats i fallstudie på endast en station och ett linjeavsnitt. Validering krävs, dessutom finns ingen gradering för bedömning av resultaten än.

Modeller för beräkning av kapacitet

I följande avsnitt beskrivs två metoder som används idag, Trafikverkets metod och UIC 406. Det finns givetvis andra modeller för kapacitetsberäkningar, men de har inte använts som jämförelse i detta projekt. För bredare överblick över olika metoder för kapacitetsberäkning på järnväg hänvisas läsaren till t.ex. Khadem Sameni and Moradi, (2022).

Linjekapacitet (enkelspår)

Beräkning av belagd tid på enkelspår
För beräkning av belagd tid (T_{bel}) på enkelspår gäller formeln

$$T_{bel} = \sum_{k=1}^{k=n} (T_{gång} + T_{möte} + T_{inf} + T_{fj})_k,$$

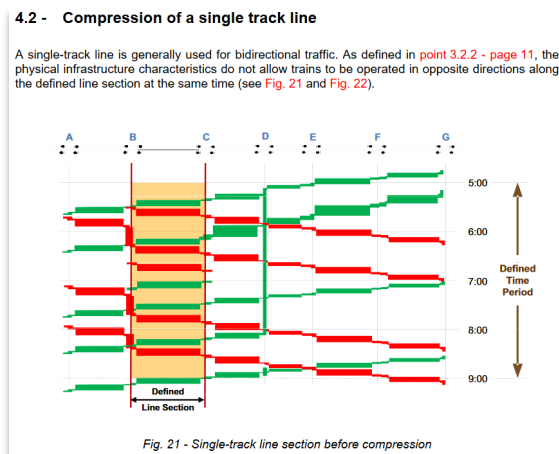
där:

- n : antal tåg som under tidsperiod för beräkning trafikerar spåret
- k : tågets ordningstal
- T_{inf} : tidstillägg vid ej samtidig infart till stationen, 2 min
- T_{fj} : tidstillägg vid ej fjärrblockering på banan, 1 min
- $T_{gång}$: tågets gångtid på dimensionerande stationssträcka

Vid ej samtidig infart beräknas tidstillägget T_{inf} för hälften av tågen. Storlek på tidstillägg p.g.a. tågmöten ($T_{möte}$) beror på tågtyp enligt tabellen nedan. Ett antagande om blandad trafik görs, dvs. samtliga tåg har möten.

Tågtyp	Hastighet [km/h]	$T_{möte}$ [min]
Snabbtåg	200	5
I/R-tåg	160-180	4
Lokaltåg	130-140	3
Godståg	70-160	5
Malmståg	50-70	5

Tabell 3. Tidstillägg för tågmöten $T_{möte}$, enkelspår.



Figur 1. Skärmbild från Trafikverkets dokument, vänster (Trafikverket, 2016)

Figur 2. Skärmbild från UIC code 406, höger (UIC, 2013)

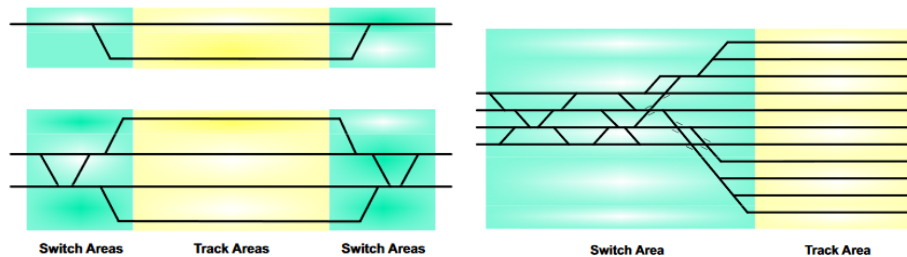
I Figur 1 ovan visas den formel som Trafikverket använder vid kapacitetsberäkning för enkelspår. Där summeras först tider för varje tåg och sedan summeras totala tiden för alla tåg tillsammans. Tiderna beror dels på tågtyp, dels på sträckans längd.

I Figur 2 ovan visas processen som UIC använder för kompression av enkelspår, där en sträcka mellan två mötesplatser definieras och därefter pressas blocken inom denna sträcka uppåt tills de tar i varandra. Tolkningen av UIC's riktlinjer är att ett generellt antagande görs om att alla tåg alltid kan mötas på alla mötesplatser (undantag gör om ett tåg står parkerat en länge tid på en mötesplats) och mötesplatserna tas därför inte med i komprimeringen.

För båda metoderna beräknas själva kapacitetsutnyttjandet genom att beräkna förhållandet mellan tiden som infrastrukturen utnyttjas och den totala tiden för den undersökta tidsperioden. Resultatet är en procentsiffra.

Nodkapacitet

I andra upplagan av UIC code 406 för kapacitetsberäkningar infördes en metod för nodkapacitet (en nod kan vara en station). Som Figur 3 nedan visar delas stationen in i växelområde och plattformsområde, vilka analyseras separat. Växelområdet analyseras genom att göra en tidtabellskompression. För plattformsområdet beräknas kapacitetsutnyttjandet för varje plattformsspår separat genom att komprimera beläggningstiden.



Figur 3. Illustration från UIC 406 indelning av växelområde och plattformsområde (UIC, 2013)

Något som påtalats med denna metod redan i projektet KAIN är att uppdelningen riskerar att överskatta kapaciteten och det inte alltid är så enkelt att göra indelningen av växel- och plattformsområde.

Syfte och mål

KAIN 2 vidareutvecklar den metodprototyp för tidtabellsberoende kapacitetsanalys av såväl stationer som linjer som togs fram i föregångsprojektet KAIN. Metoden ska vidareutvecklas och förbättras med fokus på analys av stationer och att kunna appliceras på enkelspår. Även validering, gradering och visualisering ingår i projektet.

Projektet syftar till att förbättra kapacitetsberäkningarna som på längre sikt kan ge positiva effekter i form av bättre punktlighet och förutsägbarhet för Trafikverket, järnvägsföretagen och kunderna. Metoden ska kunna användas både för analys av befintlig infrastruktur och för framtida utformningar och tidtabeller.

Mer konkret kan projektet sammanfattas till dessa delar:

1. Vidareutveckling av stationsmodellen från föregående KAIN projekt där tågvändningar på stationer implementeras samt en funktion för alternativa tågvägar genom stationer tas fram. Syftet med dessa tillägg är att kopplade tågrörelser ska hållas ihop i den utbyggda modellen och att se om det går att få en bättre komprimering som tar hänsyn till stationens flexibilitet med avseende på att tåg kan använda olika spår.
2. Implementera beräkningar för enkelspår i modellen. Modellen ska även fungera för enkelspår och ta hänsyn till enkelspårsspecifika egenskaper så som mötesstationer med samtidig infart och ej samtidig infart.
3. Validering av kapacitetsutnyttjandet för linjer jämförs mot Trafikverkets befintliga modell. För stationer finns ingen tidigare modell och validering sker därför genom analys av flera stationer med olika komplexitet och utifrån empiriska erfarenheter.
4. En karta tas fram för Sveriges järnvägsnät där kapacitetsutnyttjande för både linjer och stationer illustreras.

Slutligen ska två vetenskapliga artiklar tas fram som bygger på resultaten från projektet, den ena behandlar enkelspår och den andra stationskapacitet.

Projektledning och genomförande

Projektet har genomförts på Avdelningen för Transportplanering på KTH på uppdrag av Trafikverket inom ramen för KAJT. Trafikverkets handläggare har varit Magnus Backman. Projektet startade 2021-09-01 och avslutas 2024-12-31.

Vid projektstart var Oskar Fröidh projektledare och projektet var avsett som ett tvåårigt postdoktorprojekt med Ingrid Johansson som huvudutförare. Ingrid Johansson tillträdde senare som projektledare och i samråd med Trafikverket förlängdes sedan projekttiden och projektet ändrade inriktning till att vara ett doktorandprojekt fram till licentiatexamen. Elin Hellblom anställdes som doktorand för att vara huvudutförare i projektet. Oskar Fröidh har varit huvudhandledare. Ingrid Johansson och Anders Lindfeldt har varit biträdande handledare.

En referensgrupp har följt projektet genom regelbundna möten två gånger per år. De som varit inbjudna till mötena är Carl-William Palmqvist från Lunds universitet, Anders Peterson från Linköpings universitet samt Magnus Backman, Emma Solinen, Fredrik Lundström, Pär Johansson, Per Köhler och Kristian Persson från Trafikverket Kapacitetscenter.

Metodik

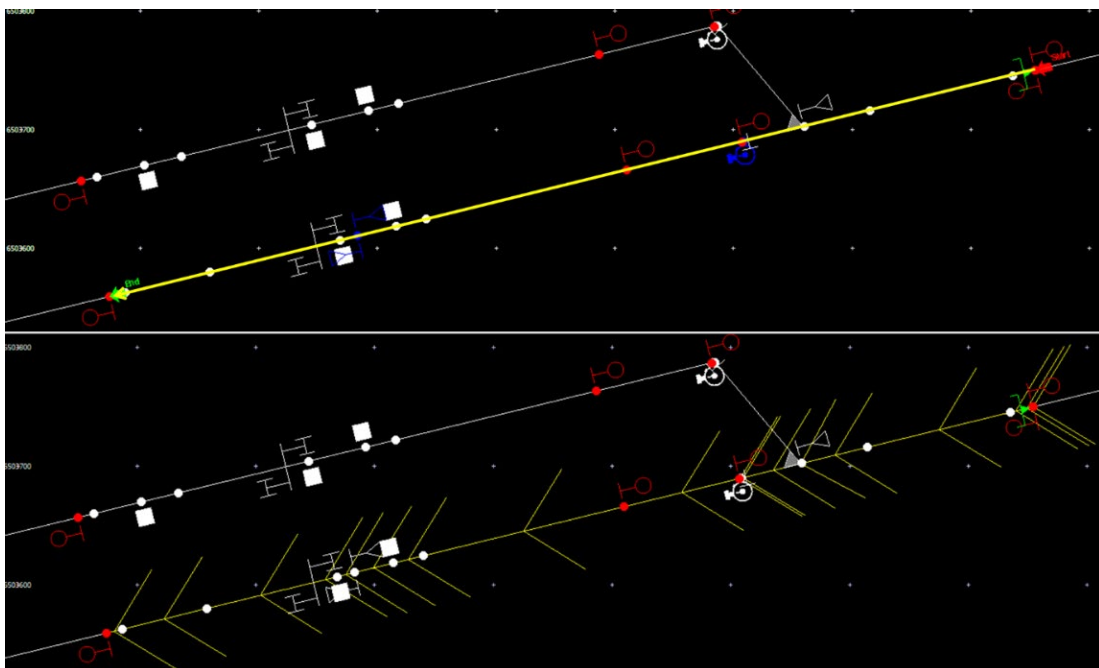
Som tidigare beskrivits har detta projekt tagit avstamp i det tidigare forskningsprojektet KAIN som presenteras i slutrapporten för KAIN (Warg & Johansson, 2019). Där utvecklades en kompressionsmodell för stationer och längre dubbelspårs sträckor vilka testades genom en fallstudie. Modellen är ett Matlab-baserat verktyg för komprimering av både planerade och slumpade tidtabeller. Indata till modellen exporteras från RailSys. Exporterna innefattar information om blockbeläggning, infrastruktur och tidtabell. Tidtabellen från RailSys bygger på den verkliga tidtabellen, vilket innebär att olika typer av tidstillägg inkluderas i analysen. Modellen använder all information för att beräkna kapacitetsutnyttjandet av vald station eller sträcka.

I den tidigare modellen användes tidtabellsdata från RailSys innehållande rutt (train route) för varje tåg och ankomsttid och släpptid för varje blocksektion som tåget passerade. Informationen om blocksektionerna matchades med infrastrukturdata för att se vilka block och rutter som har konflikter med varandra, dvs inte kan beläggas samtidigt. Därefter görs komprimeringen genom att varje tåg i tur och ordning komprimeras fram till den tidpunkt då ytterligare förskjutning ger en konflikt med ett redan tidigare komprimerat tåg, alltså rent praktiskt innebär att de utnyttjar samma del av stationen eller linjen samtidigt vilket inte är möjligt.

I den uppdaterade versionen av modellen har framförallt tre justeringar gjorts (1) förfinad upplösning av blocksektioner (2) koppling av vändande tåg på stationer (3) mer övergripande metod för komprimering. Utvecklingen har inneburit att det blivit möjligt att studera samtidig och icke-samtidig infart vid stationer. Utöver dessa uppgraderingar har även möjlighet till analys av alternativa tågvägar implementeras (4).

Metodutveckling

- (1) För att få ut mer detaljerad information om tågens beläggning längs tågrutten har Headway-filen från RailSys bytts ut mot en simuleringslogg från RailSys. Loggfilen erhålls efter genomförd simulering och innehåller information om tågets exakta beläggning (StartOccupation, ReleaseOccupation) för varje länk tåget passerar längs den simulerade rutten. En länk är en sträcka mellan två noder i RailSys infrastruktur. Skillnaden mellan blocksektion, "block section" och länk, "link" illustreras nedan i Figur 4. På detta sätt blir upplösningen mer förfinad. Arbetet är nödvändigt för att kunna modellera overlaps och partiellt tågvägsupplåsning på ett korrekt sätt.



Figur 4. Illustration av skillnaden mellan blocksektion (övre) och länkar (undre) i RailSys.

Innan komprimeringen kan utföras krävs ett förbearbetningssteg där länkarna kombineras och definieras som olika block. Denna process genomförs för varje tåg och identifierar exakt när och vilka länkar som används av varje enskilt tåg. Steget, där länkar kombineras till block, beror på ändringar i start- eller släpptider för ockupation, se Figur 4. Ett block börjar vid den första noden av den initiala länken och avslutas vid den sista noden av den sista länken för det tidsintervallet.

Därefter identifieras potentiella blockkonflikter enligt samma princip som i den tidigare modellen. Alla block som delar noder är märkta för att säkerställa att inte två block som delar en nod kan vara upptagna samtidigt under komprimering.

- (2) I de fall analysen görs för en station har en funktion för att koppla ihop vändande tåg i KAIN utvecklats. Funktionen ser till att koppla ihop tåg som i RailSys tidtabellen har en planerad anslutning till ett annat tåg. Ett exempel kan vara tåg 123 som ankommer sin slutstation, sedan står inne vid stationen 15 minuter då föraren hinner byta hytt, tåget kan städas etc. Sedan avgår tåget med nummer 124. Detta tillvägagångssätt möjliggör mer realistiska analyser av tidtabeller, både verkliga planerade tidtabeller, men framför allt även vid slumpmässigt genererade tidtabeller. Kopplingen av tåg eliminerar risken att tidtabeller genereras där avgående tåg avgår innan det ankommande tåget anlärt.
- (3) Som beskrivits ovan och i förra projektets slutrapport komprimerade den tidigare modellen ”tåg-för-tåg”. I den nya uppdaterade versionen görs komprimeringen iterativt i en stor matris innehållande inbördes tidsskillnaden mellan potentiella konflikter mellan alla tåg. Stegvis minimeras sedan tiden mellan tågen genom loopar tills det inte längre går att minimera tiden utan att konflikter uppstår. Uppdateringen av kompressionsmetoden är nödvändig för att få giltiga resultat när tåg kopplas ihop på stationen.
- (4) Metoden för analys av alternativa tågvägar på stationer har utvecklats för att utforska möjligheten att uppnå ett lägre kapacitetsutnyttjande om tågen får använda andra rutter på stationen. De alternativa rutterna skapas i RailSys och simuleras på samma sätt som den ordinarie tidtabellen för att sedan exporteras till modellen och sparas som 'template trains'. Samtliga tåg har fått en alternativ tågväg genom stationen. Varje tåg har därmed möjlighet att välja mellan totalt två olika tågvägar genom stationen. Det finns dock ingen begränsning i modellen hur många tågvägar ett tåg kan ha.
Vid analysen går modellen sedan igenom tågen i original tidtabellen och jämför med de i tidtabellen med alternativa tågvägar för att hitta vilka alternativa tågvägar som varje tåg har. Därpå kör modellen igenom olika scenarier tåg för tåg, i tidsordning, med de olika tågvägarna för respektive tåg och väljer den tågväg som ger lägst kapacitetsutnyttjande för stationen totalt. Det valda alternativet sparas i tidtabellen och blir det nya utgångsläget när den bästa tågvägen för nästa tåg ska bestämmas. Algoritmen kan även ta hänsyn till tåg som kommer efter det aktuella tåget. Det görs genom att räkna ut kapacitetsutnyttjande för alla kombinationer av tågvägar för det aktuella tåget och nästkommande tåg. Den tågväg för det aktuella tåget som i den kombinationen som ger lägst kapacitetsutnyttjande väljs. Proceduren fortsätter sedan för nästa tåg tills alla tåg är utvärderade. Om varje tåg har totalt två olika tågvägar genom stationen, så ger det modellen 4 alternativ att välja mellan i varje loop:
 - a) Den ursprungliga ruten för det aktuella tåget, den ursprungliga ruten för det efterföljande tåget
 - b) Den alternativa ruten för det nuvarande tåget, den ursprungliga ruten för det efterföljande tåget
 - c) Den ursprungliga ruten för det aktuella tåget, den alternativa ruten för det efterföljande tåget
 - d) Den alternativa ruten för det nuvarande tåget, den alternativa ruten för det efterföljande tåget

Det finns även möjlighet att ta hänsyn till fler än 1 efterföljande tåg. Upp till 4 efterföljande tåg kan analyseras.

Sammanfattning av databehov.

Nedanstående data behöver exporteras från/finnas i RailSys:

- Konfliktanterad och spårplanerad tidtabellversion, i RailSys
- Vändande tåg kopplade genom "turnaround", i RailSys
- Information om "alternative tracks" på stationer
- Simuleringslogg efter genomförd simulering utan "Routing", RailSys
- Exporterad infradata med nodID och km-tal, RailSys

Fallstudie

Modellen appliceras på en fallstudie. För enkelspår används linje 421 (Nyköpingsbanan) och 637 (Norge/Vänerbanan), och för stationer används Norrköping C och Kalmar C. Vid analys av enkelspår har den dimensionerande sträckan enligt Trafikverkets dokument för beräkning av linjekapacitet använts. För stationer har in- och utfartssignal avgränsat stationsområdet. Övergripande information om respektive linje/station beskrivs nedan.

Den dag som valts för tidtabellsanalys är en vanlig torsdag i oktober 2022. Tidtabellerna för denna dag har således legat till grund för alla analyser. Tidsperioden har satts till 16h (kl. 06-22).

Norrköping C

Norrköping är en genomgående station med blandad trafik, som även har vändande tåg på stationen. Stationen trafikeras främst av pendeltåg (Östgötapendeln), regionaltåg (Mälartåg) och snabbtåg (SJ) men även andra interregionala tåg och godståg. Norr om stationen ligger Norrköpings godsbangård.

Det finns såväl väster- som östergående person- och godståg som har stationen som sin slutstation. De vändande persontågen från motsatt håll delar spår i Norrköping vilket gör det viktigt att definiera spår användning och uteslutande tågvägar på rätt sätt, framför allt eftersom tågen blockerar spåret en längre tid tills de kan avgå igen.

På stationen finns 8 spår, varav 5 av dessa har plattformar. Spår 1 används i regel för genomgående trafik söderut, och spår 7 för genomgående trafik norrut. Spår 2, 3 och 6 delas in i del a och b, där vändande Mälartåg norrut står på spår 2b eller 6b. Pendeltågen vänder oftast på spår 3 eller 6a.

Kalmar C

Kalmar C är en säckstation med tre plattformsspår samt några växlings- och uppställningsspår. Spår 1 och 2 är uppdelade i A och B delar där två (kortare) tåg kan stå inne samtidigt. Spår 1A kan förutom genom passage av 1B nås genom tågväg via 2A. Innan Kalmar C ligger Kalmar södra där godsterminal finns vilket gör att Kalmar C i regel trafikeras av persontrafik. De tåg som trafikeras är regionaltåg (Krösatåg, Öresundståg och SJ).

Linje 421 – Nyköpingsbanan

De dimensionerande sträckorna på linjen är Vagnhärad-Lästringe och Ålberga-Kolmården. I Vagnhärad sker passagerarutbyte. Alla mötesstationer har samtidig infart och två parallella spår.

DIMENSIONERANDE STRÄCKA	LÄNGD STRÄCKA	SAMTIDIG INFART	TRAFIK (ANTAL TÅG AV TYP)
Vagnhärad-Lästringe	13 km	Ja-Ja	Passenger: 41 Freight: 2
Ålberga-Kolmården	15 km	Ja-ja	Passenger: 33 Freight: 3

Linje 637 – Norge/Vänernbanan

De dimensionerande sträckorna är Kil-Edsvalla, Säffle-Åmål och Bjurholm-Öxnered. Mötesstationerna varierar i storlek och huruvida passagerarutbyte kan ske eller inte. Vissa stationer har samtidig infart, i vissa relationer. Tabellen nedan utgår från det som anges i beräkningsarket för linjekapacitet.

DIMENSIONERANDE STRÄCKA	LÄNGD STRÄCKA	SAMTIDIG INFART	TRAFIK (ANTAL TÅG AV TYP)
Kil-Edsvalla	10 km	Ja-Nej	Passenger: 16 Freight: 13
Säffle-Åmål	16 km	Nej-Nej	Passenger: 17 Freight: 13
Bjurholm-Öxnered	8 km	Ja-Ja	Passenger: 30 Freight: 16

Analys och utvärdering

Stationer

Vad gäller analysen av stationer kan den också delas upp i två delar; framtagning av stationskapacitets siffror för valda stationer och en bedömning av respektive station kapacitet genom slumpade tidtabeller.

I denna analys har först resultat för kapacitetsutnyttjande på respektive station tagits fram enligt beskriven komprimeringsmetod. Eftersom ingen graderingsskala finns för stationer har 10 000 slumpade tidtabeller kapacitetsberäknats genom Monte Carlo simulering. Tidtabellerna har slumpats på så vis att det anges en slumpad starttid för varje tåg, i varje simulering. Fördelningen kan ge en indikation på "bästa" och "värsta" scenarior för given sammansättning av tåg.

Metoden för val av alternativa tågvägar ska kunna generera en ny tidtabell med något lägre kapacitetsutnyttjande ifall bättre val upptäcks. Modellen kan även berätta vilka tåg det är som i så fall bytts ut. Dessa val behöver vidare diskuteras inte bara från ett kapacitetsperspektiv utan även resenärens perspektiv.

Enkelspår

Analysen av modellen har bestått i dels en jämförelse med andra metoder för bedömning av prestationsförmåga dels en studie av effekterna med samtidighet på mötesstationer på enkelspår.

I jämförelsen har KAIN-modellens resultat jämförts med resultat från beräkning enligt Trafikverkets metod med samma trafiksammansättning samt med beräkning enligt UIC 406 kompressionsmetod. För att ytterligare analysera skillnader mellan modellerna har olika detaljer och variabler (Trafikverkets metod) separerats, studerats och jämförts.

I den andra delen har samtidig infart på mötesstationer analyserats. Detta har gjorts genom att manipulera infrastrukturen i RailSys så att antingen alla stationer har samtidig infart eller inga stationer har samtidig infart. Nya simuleringar har sedan genomförts för respektive fall (med eller utan samtidighet) och linje varpå skillnaden i kapacitetsutnyttjande mellan fallen utvärderats.

Resultat, slutsatser och vidare forskning

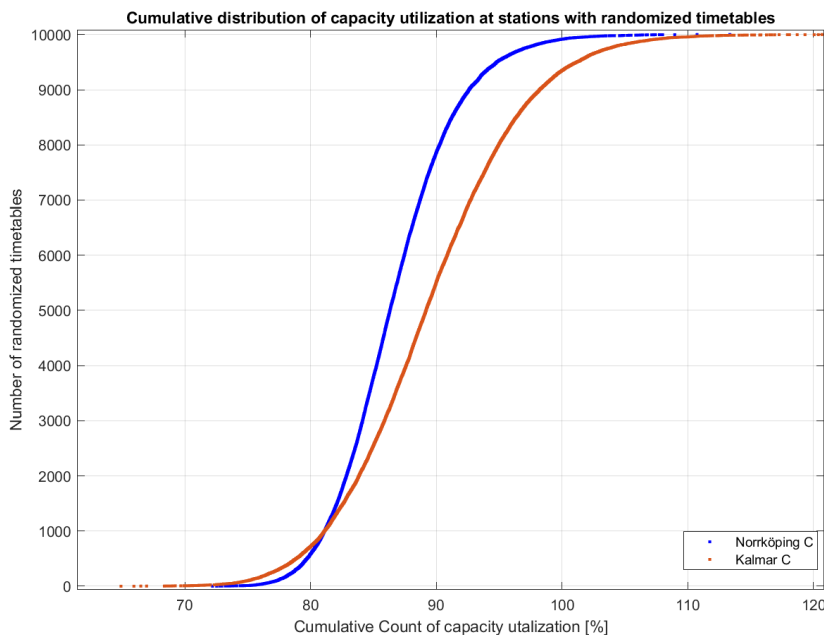
Resultat i sammanfattning

Stationer

I tabellen nedan presenteras resultatet av kapacitetsutnyttjandet på de två stationerna från fallstudien. Kapacitetsutnyttjandet för de båda stationerna är snarlika även om de har väldigt olika antal tåg som trafikerar stationen. Detta har troligtvis att göra dels med hur många spår dessa tåg kan fördelas på, dels stationens utformning. Norrköping C är en genomgående station och två tåg kan även stå inne samtidigt på de uppdelade plattformslägena, a och b. Även om Kalmar också har uppdelade plattformslägen, är Kalmar en säckstation och åtkomst till de inre lägena kräver kapacitet från yttre lägen. För både Norrköping och Kalmar antas vändtiden ha en stor påverkan på kapacitetsutnyttjandet också, då vissa tåg i tex Norrköping står inne på stationen i samband med vändningen i över en timme.

	Kapacitetsutnyttjande	Antal tåg	Antal spår	Stationstyp	Omgivande spår
Norrköping C	76,1%	182	7	Genomgående	Dubbelspår, båda sidor
Kalmar C	72,5%	36	3	Säckstation	Enkelspår, ena sidan

Utifrån de framtagna värdena och resonemanget kring dessa anses modellen på ett rimligt sätt kunna beräkna kapacitet för stationer, genomgående och säckstationer, även med vändande tåg.



Figur 5 Kumulativ fördelning av slumpade tidtabeller för Norrköping och Kalmar station.

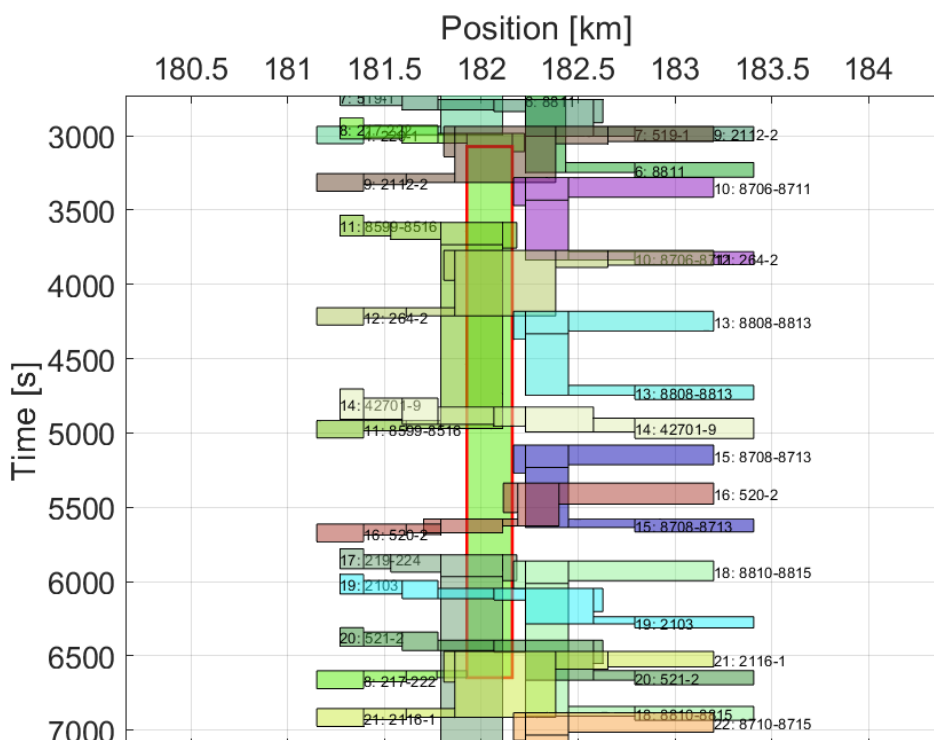
Vid Monte Carlo simuleringen visades att fördelningen för Kalmar C blev något mer utdragen, med resultat mellan 65 och över 120 procent medan fördelningen för Norrköping blev något snävare, mellan 72 och 110 procent. Detta beror gissningsvis på att korsande tågvägar i Kalmar begränsar kapaciteten mer och att andelen vändande tåg är större i Kalmar än i Norrköping. I båda fallen kan konstateras att dagens tidtabell står sig bra jämfört med övriga slumpade tidtabeller, detta har troligtvis att göra med att dagens tidtabell är väl planerad.

Alternativa tågvägar

En station med flera spår har en flexibilitet i hur spåren kan användas. Det har gjorts flera körningar med modellen på Norrköping C för att se om ändrad spår användning kan reducera kapacitetsutnyttjandet. Tabellen under visar beräknat kapacitetsutnyttjande för originaltidtabellen och 5 scenarier där metoden har fått använda alternativa tågvägar för samtliga tåg. Tabellen visar även hur många tåg som använder en alternativ tågväg (jämfört med original tidtabellen). I scenarierna har modellen körts med olika inställningar på hur många efterföljande tåg som modellen ska ta hänsyn till när den väljer vilken tågväg som är bäst för ett tåg. Resultaten visar att det är svårt att förbättra kapacitetsutnyttjandet så mycket jämfört med originaltidtabellen. Det scenario som uppvisar lägst kapacitetsutnyttjande är endast knappt 2 procentenheter bättre än originaltidtabellen. Resultatet är väntat, då en spårplanerad tidtabell redan har anpassats för att ge ett bra utnyttjande av stationen. Funktionen med alternativa tågvägar har antagligen större betydelse om den appliceras på tidtabeller som skapats genom slumpning. Detta på grund av att det då finns behov att anpassa spår användningen till den nya slumpade tågordningen (dvs. göra det jobb som tidtabellsplaneraren redan gjort i originaltidtabellen).

	Antal efterföljande tåg	Kapacitetsutnyttjande	Antal tåg med alternativ tågväg
Norrköping C	Original tidtabell	76,1 %	0 av 182
Norrköping C	0	74,8 %	32 av 182
Norrköping C	1	74,2 %	14 av 182
Norrköping C	2	75,8 %	21 av 182
Norrköping C	3	75,6 %	17 av 182
Norrköping C	4	76,3 %	17 av 182

Som tidigare har beskrivits, kan modellen ta hänsyn till hur spårvalet av ett tåg påverkar möjligheten till ett effektivt spårval för upp till 4 efterföljande tåg. Ett överraskande resultat är att modellen inte ger lösningar med lägre kapacitetsutnyttjande ju fler efterföljande tåg som tas hänsyn till när bästa tågväg för ett tåg skall väljas. Bäst är att endast ta hänsyn till ett efterföljande tåg. Högst kapacitetsutnyttjande blir det om man tar hänsyn till fyra efterföljande tåg, och lösningen är då till och med sämre än originaltidtabellen. I första anblicken kan det tyckas omöjligt att modellen ger sämre lösningar ju mer information som den använder för att fatta sina beslut, men det är antagligen ett resultat av de tåg som står inne länge och vänder på stationen. Spårvalet för tågen bestäms i sekvens, i tidsordning baserat på tågens ankomsttid. Spårvalet för ett tåg som står inne och vänder i till exempel en timme, bestäms tillsammans med spårvalet för tåg som ankommer ungefär samtidigt. Spårvalet för det vändande tåget påverkar dock även möjligheterna till bra spårval för andra tåg ända tills tåget lämnar stationen, det vill säga en timme senare i vårt exempel. På Norrköping C hinner långt fler än 4 tåg passera under en timme, vilket gör det svårt att fatta ett beslut som är bra för hela tidtabellen. Se exempel i figuren under. För att lösa problemet skulle betydligt fler efterföljande tåg behöva inkluderas i analysen så att alla de tåg som hinner passera det vändande tåget som står inne täcks helt och hållet. En annan möjlighet som eventuellt skulle kunna förbättra resultaten är att beräkna kapacitetsutnyttjandet baserat på tiden för tågens sista signalblock, i stället för tågets första signalblock som det nu görs.



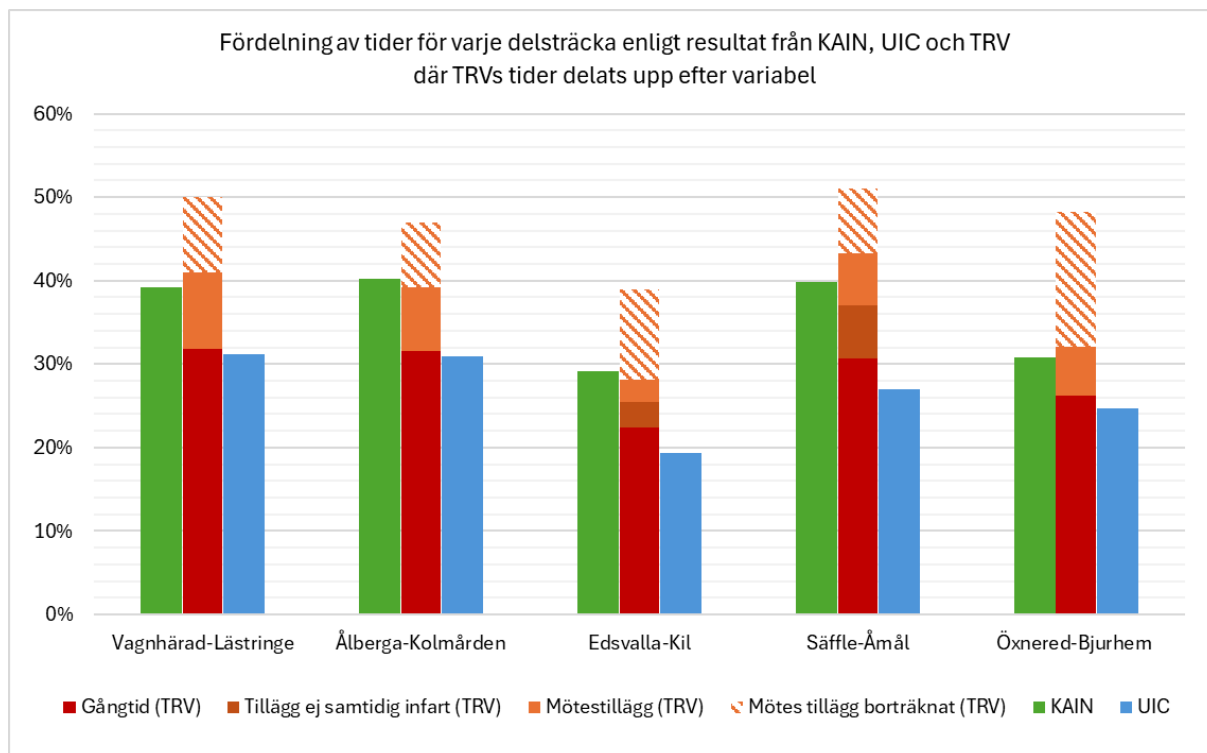
Figur 6 Exempel på blockbeläggning för originaltidtabellen på Norrköping C. Ett tåg som står inne länge för vändningen är markerat med röd linje.

Enkelspår

I jämförelsen kunde en betydande skillnad mellan de tre modellerna som presenterats observeras där Trafikverkets beräkningsmetod gav högst kapacitetsutnyttjande, UIC metoden lägst och KAIN-metoden mitt emellan de två andra (se Figur 6). Efter att ha separerat parametrarna i Trafikverkets modell och jämfört dessa med de två andra metoderna kunde en tydlig likhet ses mellan den del av resultaten från TRVs modell som endast baseras på tågens gångtid och resultaten från UIC-metoden. Detta är väntat då UIC inte heller fångar effekten av möten på mötesstationer, utan endast visar den komprimerade gångtiden mellan mötesstationerna. Likheten i gångtid indikerar att båda modellerna hanterar beräkning av kapacitetsutnyttjande av just gångtiden likvärdigt.

Resultaten med fokus på analys av mötestider visar att Trafikverkets metod tenderar att överestimera behovet av mötestid för många av sträckorna. Detta beror på att Trafikverket i sina beräkningar antar att alla tåg har möte på alla stationer, vilket också är en förenkling som tidigare lyfts fram av Trafikverket. För lågtrafikerade sträckor, som de som undersökts i fallstudien, är dock mötesfrekvensen betydligt lägre.

För att bekräfta att det är skillnaden mellan antagen mötesfrekvens och verklig mötesfrekvens som förklarar skillnaden mellan TRVs modell och KAIN, gjordes en kartläggning av antal möten i den faktiska tidtabellen som används av KAIN. Trafikverkets beräkningar justerades därefter med de faktiska antalet möten. De båda modellerna visade då likvärdiga resultat. Således anses resultaten bekräfta KAINs förmåga för beräkning av kapacitetsutnyttjande på enkelspår och att Trafikverkets antaganden om gångtider är rimliga och mötestider är rimliga så länge de endast appliceras på de tåg som faktiskt har möten.



Figur 7 visar resultatet av kapacitetsberäkningarna på fallstudiens sträckor för respektive metod. Här har de olika parametrarna från Trafikverkets modell delats upp i gångtid, tillägg för icke-samtidighet och tillägg mötestid. Tillägg för möte har i sin tur delats upp efter analys av antal faktiska möten och solid färg indikerar tid för möten som faktiskt sker och streckad färg indikerar tid för obefintliga möten enligt analyserad tidtabell.

Analysen av effekterna av mötesstationer med och utan samtidig infart bekräftar hypotesen om att kapacitetsutnyttjandet blir högre då samtidig infart inte är tillgängligt. Diskussionen kring tilläggstid för icke-samtidighet enligt Trafikverkets metod kopplar till resonemanget om mötestid, där tillägget enligt metoden läggs på för hälften av alla tåg på sträckan, men troligen bara spelar in i de fall möten faktiskt sker. I Trafikverkets modell görs också en förenkling om att en station har samtidig infart, JA eller NEJ. För några av de undersökta stationerna i fallstudien visade det sig att samtidighet förekom för vissa kombinationer av tågvägar på stationen men inte för andra, vilket också spelar in i de fall tid för icke-samtidighet läggs på.

Modellens begränsningar och avvikelser från projektspecifikationen

Modellen kräver en färdig tidtabell i RailSys, som är konflikthanterad, spårplanerad och innehåller kopplingar mellan tågen och information om alternativa tågvägar. På grund av tillgången till denna information och tidstillgången i projektet har det därför inte varit möjligt att studera fler än de linjer och stationer som nu presenteras i fallstudien. Detta i sig är en begränsning i modellen: att den kräver så väl förberett underlag för att simulering ska kunna genomföras och användbara tågvägsdata fås fram. I och med detta uppnås inte det av projektets om att ta fram en karta med kapacitetsutnyttjande för alla Sveriges stationer och linjer med den nya modellen.

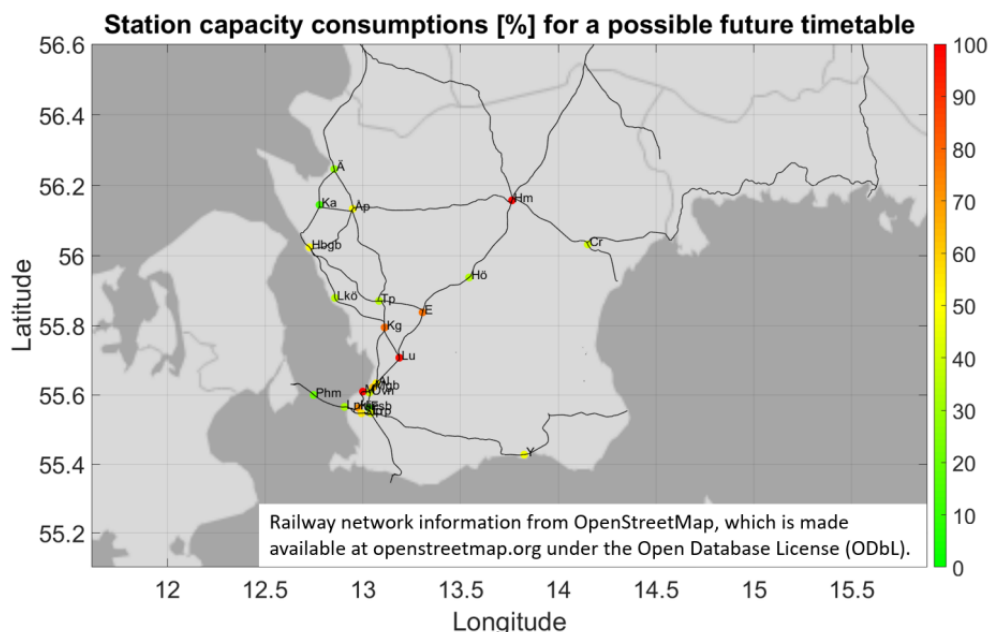
I dagsläget kan modellen beskrivas som "stel", vilket innebär att tågvägar, uppehållstider och mötestider inte kan ändras vid komprimering om de inte ändras redan innan simulering i tidtabellen i RailSys. Detta gör att vid till exempel slumpade tidtabeller behåller tåg som har en längre tid för möten tiden även om ett möte inte sker där i just den slumpade tidtabellen. Liknande gäller vid ett tågmöte på enkelspår och det ena tåget är planerat på sidospår. Vid en slumpad tidtabell kanske ett möte inte sker där det är planerat i originaltidtabellen, alternativt så sker mötet med ett annat tåg som i originaltidtabellen också

är planerat till sidospåret, och det skulle vara rimligare om tåget i fråga kör på huvudspår. På grund av stelheten kan detta inte ändras utan den tågväg som är planerad används. Det senare adresseras delvis genom alternativa tågvägar men endast på stationer och endast för de alternativa rutten som förbestämts.

Övrig användning av modellen

Alternativ kompressionsmetod

Ett alternativt sätt att implementera tidtabellskomprimering för stationer har utvecklats av Ingrid Johansson tillsammans med Norman Weik (då DLR, numera TU München) och presenterades på konferensen RailBeijing i november 2021 (Johansson and Weik, 2021). I denna variant kan tågen i komprimeringen byta plats med de närmast omgivande tågen ifall detta resulterar i att en lucka i tidtabellen fylls och ett lägre kapacitetsutnyttjande därmed uppnås. Metoden demonstrerades i en fallstudie över flertalet skånska järnvägsstationer och en potentiell framtida tidtabell.



Figur 8. Kapacitetsutnyttjande av den analyserade tidtabellen för stationer i Skåne med det alternativa komprimeringssättet där tågen tillåts byta plats med närmast omgivande tåg (Johansson, I., & Weik, N., 2021).

Resenärsbyten vid plattform/plattformsallokering

Ingrid Johansson har tillsammans med Anders Peterson (LiU) arbetat med plattformsallokering på stationer vilket resulterat i en konferensartikel som presenterades på EWGT i september 2023 och publicerats i Transportation Research Procedia (Johansson and Peterson, 2024). Artikeln bygger vidare på ett par examensarbeten från Linköpings universitet som behandlar plattformsallokering och använder Norrköpings station som fallstudie. Några olika enkla principer för att allokera tågen till ett plattformsspår utvärderas (till exempel ”byten tvärs över plattform”, ”alltid spåret närmast utgången”) med avseende på antalet korsande tågvägar, antalet byten på samma plattform, och kapacitetsutnyttjandet, där det sistnämnda beräknats med metoden såsom den är implementerad i projektet KAIN.

Inom ramen för Ingrid Johanssons deltagande i EU-Rail FA1 MOTIONAL WP6 mars 2023 - november 2024 har arbetet med plattformsallokering vidareutvecklats. Metodiken för att utvärdera plattformsallokeringen med avseende på antalet korsande tågvägar och byten vid samma plattform har

implementerats i mjukvara för att underlätta vidareutveckling, samt förfinats till en mer realistisk definition av vilka tågbyten som ska räknas. En fallstudie som jämför Halmstad C idag och efter planerad ombyggnad har genomförts. Även här analyseras stationskapacitetsutnyttjandet. En konferensartikel som beskriver resultatet planeras.

Slutsatser

Komprimeringsmodellen för stationer visar på att det är möjligt att beräkna stationskapacitet för stationer som helhet där vändande tåg modellmässigt kopplas. Den uppdaterade kompressionsmetodiken gör att tåg med lång vändtid kan hanteras på ett rimligare sätt, även om hantering av dessa tåg överlag kan vara grund för vidare diskussioner och troligtvis inte har ett entydigt svar.

Vid jämförelse mellan KAINs kompressioner och Trafikverkets beräkning för linjekapacitet visade sig resultaten lika när samma data för faktiska antal möten används. Att endast komprimera sträckan mellan mötesstationer enligt UIC code 406 anses inte spegla kapaciteten lika bra som de övriga två modellerna där stationer/mötesstationer inkluderas. Trafikverkets modell för beräkning av linjekapacitet är mer lätthanterlig men innehåller vad man skulle kunna anse överdrivna antaganden för tidstillägg av möte och icke samtidighet eftersom modellen antar att alla tåg möts. Nackdelen med att endast komprimera den faktiska tidtabellen är att det är just kapaciteten för den trafiksammanställningen som visas. Om ordningen ändras eller möten flyttas kan det ge nya resultat på kapacitetsutnyttjandet. En ytterligare nackdel är att komprimeringen inte tar hänsyn till vad som händer utanför den analyserade sträckan, vilket innebär att beroenden och andra faktorer såsom trafikupplägg som kan påverka den verkliga kapaciteten riskerar att försummas. Ur det perspektivet skulle Trafikverkets ”överdimensionerande” värden kunna anses inkludera denna osäkerhet och ses som en form av robusthetstillägg. Följaktligen blir då frågan om man vid estimering genom tidtabellskomprimering bör göra extra robusthetstillägg för att kompensera för osäkerheten utanför komprimerade sträckan.

Sammanfattningsvis bekräftar resultaten tidigare studier om att definiering av dimensionerande sträcka och tidtabellssammansättning har en stor betydelse för linjekapaciteten på enkelspår. Resultaten pekar också på att det är möjligt att beräkna stationskapacitet med hjälp av kompressionsmetoden.

I slutet av 2024 planeras två vetenskapliga artiklar att skickas in till vetenskapliga journaler för publicering. Den ena handlar om resultaten från arbetet med enkelspår och den andra om kapacitetsutnyttjandet på stationer.

Vidare forskning

Modellen som tagits fram i detta projekt har som nämnt sina brister, bland annat många steg för tillgång till data, tidskrävande och stela tidtabeller. I vidare forskning planteras ytterligare studier av bedömning av kapacitet på stationer, men genom en mer generell och lätthanterlig metod, och metod för identifiering av flaskhalsar internt på stationen.

Resultatspridning och publikationer

Resultatspridning

Resultat från projektet har spridits i olika forum såväl nationellt som internationellt.

Tillfälle	Datum	Typ	Titel
RailBeijing 2021	2021-11-05	Internationell konferens	Strategic assessment of railway station capacity – Further development of a UIC 406-based approach considering timetable uncertainty
Transportforum	2022-06-17	Branschforum	Strategisk kapacitetsanalys av järnvägsstationer
EWGT 2023	2023-09-07	Internationell konferens	Rail Platform Allocation for Reliable Interchanges
STRC	2023-10-16	Nationell konferens	Extension of timetable compression approach for assessing the capacity of stations – with turnarounds and alternative track assignment
STRC	2023-10-17	Nationell konferens	Rail Platform Allocation for Reliable Interchanges
KAJT:s höstseminarium	2023-11-27	Forskardag	Extension of timetable compression approach for assessing the capacity of stations – with turnarounds and alternative track assignment
Transportforum	2024-01-17	Branschforum	Vilket tåg från vilket spår? En balansakt mellan snabba byten, enkel tågklarering och effektivt kapacitetsutnyttjande
Transportforum	2024-01-17	Branschforum	Metodutveckling för beräkning av kapacitetsutnyttjande på stationer
ETC 2024	2024-09-18	Internationell konferens	Capacity utilization of single-track railways using compression method
STRC	2024-10-17	Nationell konferens	A timetable compression approach for assessing the capacity utilization of single-track sections in Sweden

Den 21-22 mars 2024 besökte Elin Hellblom och Ingrid Johansson, tillsammans med flera kollegor från Avdelningen för Transportplanering på KTH, TU Dresden och deras Chair of Railway Operations prof. Nikola Bešinović. Kunskapsutbyte skedde genom forskningspresentationer och diskussioner.

En temadag om stationskapacitet för inbjudna deltagare från Trafikverket Kapacitetscenter, KTH och Banedanmark ägde rum på KTH den 7 november 2023. KTH presenterade projekten KAIN och KAIN 2, Trafikverket presenterade kapacitetsarbete för Uppsala C och Banedanmark presenterade

kapacitetsarbete för Ringsted station. Därefter diskuterades kapacitetsbegreppet och analys av kapacitetsutnyttjande för stationer, samt vilka möjligheter och svårigheter detta innebär.

Resultat har även spritts inom referensgruppen vid referensgruppsmötena som hölls den 15 november 2021, den 10 maj 2022, den 8 november 2022, den 9 maj 2023, den 7 november 2023, den 7 maj 2024 samt den 22 oktober 2024.

Publikationer

Publicering, journalartikel:

Detta är en journalartikel som beskriver metodutvecklingen från tidigare publicerad modell för beräkning av stationskapacitet genom komprimering:

Preliminär titel: *Extension of UIC 406 approach for assessing capacity of stations - with turnarounds and alternative tracks*. 2025. Hellblom, E. Johansson, I. Lindfeldt, A.

I denna artikel analyseras kapacitetsberäkningar av enkelspår genom en jämförelse av Trafikverkets metod, den internationella UIC metoden och den framtagna och vidareutvecklade KAIN metoden:

Preliminär titel: *Crossing stations at single-track railway lines and the effect of simultaneous entry on capacity*. 2025. Hellblom, E. Lindfeldt, A. Johansson, I.

Publicerade, konferensbidrag:

Johansson, I. & Peterson, A. (2024). Rail Platform Allocation for Reliable Interchanges. *Transportation Research Procedia*, vol. 78, pp. 198-205. DOI: 10.1016/j.trpro.2024.02.026

Johansson, I., & Weik, N. (2021). Strategic assessment of railway station capacity – Further development of a UIC 406-based approach considering timetable uncertainty. In: *Proceedings of The 9th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA), RailBeijing 2021*, Beijing, China, 3-7 November 2021.

Referenser

Johansson, I. and Peterson, A. (2024) 'Rail platform allocation for reliable interchanges', *Transportation Research Procedia*, 78, pp. 198–205. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.026>.

Johansson, I. and Weik, N. (2021) 'Strategic assessment of railway station capacity – Further development of a UIC 406-based approach considering timetable uncertainty', in *Proceedings of the 9th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). RailBeijing 2021*, Beijing, China.

Khadem Sameni, M. and Moradi, A. (2022) 'Railway capacity: A review of analysis methods', *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 24, p. 100357. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100357>.

Trafikverket (2016) 'Trafikverkets modell för beräkning av linjekapacitet'. Trafikverket. Available at: https://bransch.trafikverket.se/contentassets/ab2b717bc619425280126edb6e725188/2016/pm_trafikverkets_modell_for_berakning_av_linjekapacitet.pdf (Accessed: 6 November 2024).

Trafikverket. (2021). *Förstudie Utveckling av modell för kapacitetsberäkningar - kartläggning av brister och*. Trafikverket.

UIC (2013) *Code 406 - capacity*. 2nd edition, Paris, France: International Union of Railways.

Weik, N. *et al.* (2020) 'Extending UIC 406-based capacity analysis – New approaches for railway nodes and network effects', *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 15(100199). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100199>.

Warg, J., & Johansson, I. (2019). *Slutrapport KAIN – Kapacitet i nätverk*.