

Järnvägsmodell AI-Samgods

Nils Breyer, Tomas Lidén, Marduch Tadaros, Liyun Yu

Sammanfattning

Denna summerande rapport gäller det arbete som bedrivits på LiU/ITN (avdelning KTS) under 2024–2025 för att utforma, implementera och testa en metod som konstruerar en godstrafikplan för en typvecka så att transportvolymerna längs de OD-relationer som ges av Samgods uppfylls.

Beräkningsprocessen och optimeringsmodellen som har tagits gör det möjligt att ta fram en godstransportplan för all inrikestransport på järnväg i hela Sverige under en typvecka. Modellen säkerställer att omloppen i planen är genomförbara och att kapacitetsbegränsningar och kapacitet som används av persontåg i nätverket respekteras. Även om modellen gör en rad förenklingar så ger den en rimlig uppskattning av trafiken och resurserna som krävs för att uppfylla den givna efterfrågan. Beräkningsprocessen som har tagits fram ger en bra utgångspunkt för att i nästa steg vidareutveckla och användas som en del i en godstransportmodell som Samgods eller för att studera järnvägstransporternas robusthet mot förändringar i järnvägskapaciteten eller godstransportmängden.

1 Introduktion

Effektiva och välfungerande godstransporter kräver en långsiktig planering av infrastrukturen. För att dimensionera och prioritera utbyggnaden av infrastrukturen utifrån faktiska och prognostiserade transportbehov krävs godstransportmodeller som möjliggör analys av hur systemet påverkas av olika scenarier. Transportsektorn står idag för en betydande andel av utsläppen av växthusgaser i Sverige vilket understryker vikten av omställningen till ett fossilfritt godstransportsystem. Godstransporter på järnväg är i Sverige redan i dag i stort sett fossilfria (Naturvårdsverket, 2025) och har därmed en viktig roll i framtidens transportsystem. För att ta välinformerade beslut i denna omställning krävs bra beslutsverktyg.

I Sverige används idag den nationella modellen Samgods¹ för att modellera godstransporter. Eftersom järnvägstransporter redan i dag begränsas av kapaciteten i järnvägsnätet ingår en järnvägskapacitetsmodell i Samgods (Edwards, 2024). Givet ett initialt flöde av godståg i nätverket utan kapacitetsbegränsningar syftar modellen till att i en iterativ process ta fram en lösning som uppfyller kapacitetsbegränsningarna. Modellen tar inte hänsyn till omlopp av fyllda och tomma vagnar och lok utan räknar med flöden av godståg och schablonmässiga tomtåg som läggs till i efterhand. Modellen tar inte hänsyn till att tillgången till kapacitet varierar mellan veckodagar och tider på dygnet i och med att persontrafiken varierar. Det finns därför en risk att lösningen som modellen föreslår inte korresponderar till en godstransportplan som går att genomföra.

Inom den vetenskapliga litteraturen har flertalet optimeringsmodeller tagits fram för att optimera flottan för en godstågsoperatör (Yaghini and Khandaghabadi, 2013; Milenković et al., 2023; Holmberg et al., 1994) och tidtabellsoptimering för godståg (Frisch et al., 2023). Dessa

¹<https://bransch.trafikverket.se/tjanster/system-och-verktyg/Prognos-och-analysverktyg/Samgods/>

modeller fokusera dock i regel på en operatör och den taktiska planeringen. Det finns däremot enbart få makroskopiska modeller som kan användas för strategisk planering (Fernández et al., 2004; Lidén and Joborn, 2017).

Ambitionen med metoden som beskrivs i denna rapport är att konstruera en godstrafikplan för en typvecka så att transportvolymerna längs de OD-relationer som ges av Samgods uppfylls. Godstrafikplanen är inte en exakt tidtabell, utan snarare en plan för flöden av godståg som tar hänsyn till villkor för trafikkapacitet på nätverket, lastkapacitet på tågen, och omlopp för lok och vagnar.

Beräkningsprocessen och den förbättrade modell som har tagits fram möjliggör att ta fram en godstransportplan för all inrikestransport på järnväg i hela Sverige under en typvecka. Modellen säkerställer att omloppen i planen går att genomföra och att kapacitetsbegränsningar även med hänsyn till den kapacitet som används av persontåg i nätverket respekteras. Även om modellen gör en rad förenklingar så ger den en rimlig uppskattning av trafiken och resurserna som krävs för att uppfylla den givna efterfrågan.

Modellen och beräkningsprocessen som har tagits fram ger en mycket bra utgångspunkt för att kunna vidareutvecklas så att den kan användas som en del i en godstransportmodell som Samgods. Utöver det finns potential att använda modellen för att direkt studera järnvägstransporternas robusthet mot förändringar i järnvägskapaciteten (exempelvis vid stora banarbeten) samt effekter av förändringar i godstransportmängden.

2 Beräkningsprocessen

Beräkningsprocessen som har tagits fram beräknar en periodisk järnvägstransportplan för en typvecka som uppfyller en given efterfrågan. Planen är periodisk, vilket innebär att veckan delas in i ett antal perioder som bestäms av en parameter för periodlängden. En periodlängd på 8 timmar innebär till exempel att veckan delas in i 21 perioder (tidsintervall).

Beräkningen utgår i huvudsak ifrån följande indata:

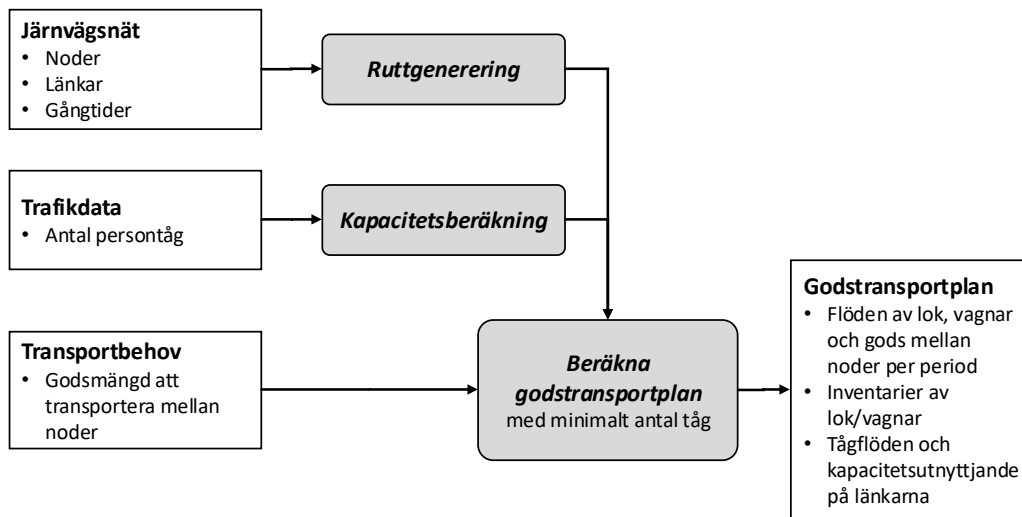
- Nätverket: Järnvägsnätets noder och länkar inklusive gångtid för varje länk
- Kapacitetsdata: Tidsuppdelat antal persontåg på varje länk (reserverad kapacitet), parametrar som styr kapaciteten på länkarna (blocklängd, max inflöde av tåg per block)
- Transportefterfrågan: Årlig transportvolym i ton för olika godstyper mellan olika par av noder (OD-par)
- Övriga parametrar: Godstyper, vagntyper och begränsningar för vikter, tåglängder etc.

Järnvägsnätet representeras på ett förenklat sätt där noder representerar orter där det antingen finns en transportefterfrågan eller där flera järnvägssträckor förgrenas. Mellanstationer längs en sträcka ingår däremot i en och samma länk. Nätverket är riktat vilket innebär att det finns en riktad länk åt var sitt håll för de noder som kopplas med en järnväg. Även enkelspår modelleras på detta sätt.

Utifrån denna indata sker beräkningen sedan i tre steg (se Figur 1):

1. Beräkning av tillgänglig kapacitet per länk
2. Beräkning av alternativa rutter
3. Framtagande av godstransportplanen genom optimering

De två första stegen behövs för att generera all nödvändig data och beskrivs i Avsnitt 2.1 och 2.2. Resultatet av de två första stegen används sedan tillsammans med transportefterfrågan i optimeringsmodellen som genererar godstransportplanen som beskrivs i Avsnitt 2.3.



Figur 1: Översikt över indata och beräkningsflödet för att hitta en godstrafikplan

2.1 Kapacitetsberäkning

Godstransportplanen som tas fram av den utvecklade metoden är periodbaserad. Istället för att schemalägga exakta tåglägen innehåller planen ett flöde av tåg, vagnar och lok som behövs för att uppfylla den givna transportefterfrågan. Flödena anger hur många tåg, vagnar och lok som avgår totalt under en viss period. Det bestäms inte när exakt under perioden tågen kör utan antagandet är att avgången sker någon gång under perioden där avgången är lika sannolik varje tidpunkt under perioden. Denna periodbaserade kapacitetsmodell möjliggör hänsyn till kapacitetsbegränsningar utan att behöva schemalägga exakta tåglägen för varje tåg. Genom att enbart beräkna flöden minskar komplexiteten avsevärt.

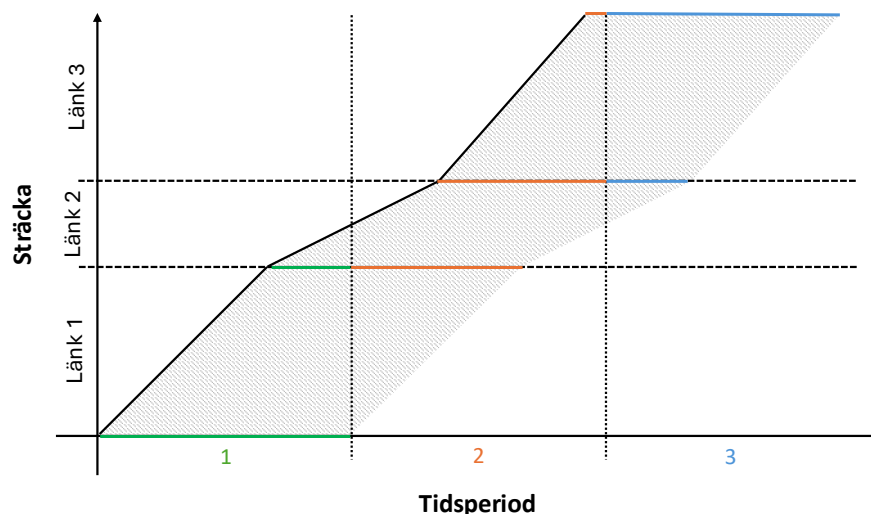
Kapaciteten på en järnvägssträcka är svårt att beskriva med ett enda tal eftersom den påverkas av blandningen av tåg med olika hastigheter som trafikerar banan, ordningen som tågen kör i, antalet förbigångsspår med mera. För att göra modellen hanterlig och inte för detaljerad för planering på strategisk nivå behövs dock en förenkling. I den modell vi föreslår definieras därför kapacitet som maximalt antal inkommande tåg på en länk under en viss tidsperiod.

Kapaciteten, maximalt antal inkommande tåg på en länk, beräknas genom att multiplicera antalet block på länken med parametern för kapacitet per block. På enkelspår begränsar denna kapacitet summan av antalet tåg åt båda håll medan på dubbelspår begränsar den antalet tåg åt varje håll för sig. Antal block uppskattas utifrån länkens längd och ett fast blockavstånd.

Godstågen delar kapaciteten på järnvägen med persontåg. För att kunna ta fram en godstransportplan som tar hänsyn till detta kan kapacitet för persontåg reserveras i beräkningsprocessen. Detta kan göras utifrån data om framförda persontåg under en typvecka. Kapaciteten för dessa persontåg reserveras då och enbart restkapaciteten kan då användas av optimeringsmodellen (se Avsnitt 2.3) för godstågen.

2.2 Ruttgenerering

För varje transportrelation med efterfrågan beräknas en uppsättning alternativa rutter. Flera alternativa rutter möjliggör att modellen kan hantera kapacitetsbrist genom att flytta flöden till en mindre belastad rutt vid behov. Det första ruttalternativet är alltid den snabbaste vägen



Figur 2: Illustration av de förberäknade länkinträden för en rutt som används av den periodbaserade kapacitetsmodellen. Ett tåg som är planerat att starta i period 1 antas starta tidigast i början av perioden (svart linje), men lika sannolikt vid någon senare tidpunkt under perioden (skuggat område).

baserad på de genomsnittliga gångtiderna för varje länk. Det andra ruttalternativ beräknas genom att öka länkkostnaderna med en straffaktor för länkar som har använts tidigare. Genom att upprepa denna process kan flera alternativa rutter tas fram.

Eftersom gångtiderna för varje länk är kända går det att beräkna när ett tåg som använder en viss rutt kommer börja använda varje länk på rutten. Länkbelastningarna för varje rutt förberäknas för att avlasta optimeringsmodellen och ges som indata till modellen. Länkbelastningarna anger för varje rutt vilka länkar som påverkas och under vilka tidsperioder.

Figur 2 visar ett exempel hur länkbelastningar beräknas för en rutt som använder tre länkar. Ett flöde som planeras att avgå på rutten i period 1 innebär att avgången sker någon gång under period 1 och länk 1 belastas därmed enbart i period 1 (länkbelastning 100%). Länkbelastningen på länk 2 är däremot fördelad på två perioder: 33% av flödet antas inkomma på länken under period 1 medan 67% först inkommer under period 2. Detta ges av andelen av det skuggade området i figuren i början av länken som överlappar med respektive tidsperiod.

2.3 Optimeringsmodellen

Syftet med optimeringsmodellen är att ta fram en godstransportplan för en vecka som uppfyller den givna transportefterfrågan genom att använda de givna alternativa rutterna och med hänsyn till kapacitetsbegränsningar.

De huvudsakliga beslutsvariablerna i modellen är:

- Hur många tåg som ska skickas under varje tidsperiod för de olika trafikrelationerna,
- Hur många lok och vagnar av respektive vagnstyp som dessa tåg ska ha,
- Hur många av vagnarna som är lastade med de olika varuslagen.

Detta ger i sin tur hur många lok och vagnar som avgår respektive ankommer till de olika bangårdarna och därmed hur många lok och vagnar som befinner sig i rörelse respektive står still på bangårdarna.

Bivillkoren för att erhålla korrekt trafik är:

1. Att det önskade transportbehovet (viktmängd) utförs för alla OD-par;
2. Att trafikkapaciteten över alla länkar och tidsperioder inte överskrids, där persontågens kapacitetsbehov har dragits bort;
3. Att tillräckligt många lok används för att ge nödvändig dragkraft (med tanke på tågens bruttovikt, dvs vagn och last);
4. Att tågens maxlängd inte överskrids;
5. Att korrekta gångtider används, så att tågen dels belastar länkarna längs sina rutter, dels ankommer till slutdestinationerna, vid rätt tidsperioder;
6. Att lagerhållningen av lok och vagnar är korrekt på alla noder;
7. Att lagerhållningen av lok och vagnar inte överskrider övre gränsen på någon nod.

För lagerhållningen kan man antingen kräva cyklicitet, dvs att ingående mängd lok och vagnar i början av planen är desamma som utgående mängd på alla noder i slutet av planen. Det går också att köra utan krav på cyklicitet.

De resurser som är främst förknippade med kostnader i praktiken är antalet lok och vagnar som behövs samt antalet tåg (avgångar med lok och vagnar) som behöver köras och belastar infrastrukturen. Flera målfunktioner har undersökts, bland annat:

1. minimera antal lok och vagnar,
2. minimera antal tåg,
3. minimera antal tåg, lok och vagnar.

Den ursprungliga målfunktionen var att minimera antalet lok och vagnar, men detta gav väldigt långa lösningstider. Att minimera antalet tåg, och lok och vagnar har gett något bättre lösningstider. Att enbart minimera antalet tåg har dock gett den största förbättringen och möjliggjort att lösa relativt stora problem även om cyklicitet krävdes. För att samtidigt säkerställa att inte antal vagnar och lok som används blir orealistiskt stort har bivillkor 7 lagts till i modellen. När antal vagnar och lok inte ingår i målfunktionen kan lösningen innehålla vagnar och lok som aldrig används. Sådana vagnar och lok dras därför av i efterhand.

Ytterligare förbättringar har undersökts för att kunna generera en godstransportplan för ännu större problem. Det som har visat sig vara mycket framgångsrikt var att relaxera bivillkor 1 genom att istället för ett hårt bivillkor istället använda ett högt straff i målfunktionen för varje transportrelation som inte är uppfylld. Utöver att drastiskt korta lösningstiden möjliggör detta också att ta fram en godstransportplan även om något enstaka OD-par inte går att uppfylla på grund av kapacitetsbrist på någon länk. Lösningen kommer i så fall att indikera vilka OD-par som inte var möjliga att uppfylla.

3 Implementering

Hela beräkningsprocessen är implementerad i Python och alla steg kan köras helt automatiserad i både Windows och Unix/Linux-miljöer. En PostgreSQL-databas används för att hantera både indata för varje probleminstans och tillhörande lösningar. Probleminstanser och tillhörande parametrar definieras i en konfigurationsfil som är separerad från koden. Versionshantering sker med Git.

Kodbasen är strukturerad i flera huvudkomponenter:

- network-modulen innehåller funktioner för att bygga upp nätverket i databasen,
- instance-modulen skapar en instans inklusive kapacitets- och ruttberäkning,
- solve-modulen innehåller optimeringsmodellen,
- solution-modulen hanterar lösningar och resultat
- analysis-modulen innehåller analysverktyg och visualisering.

För databehandling används NumPy och SciPy för numeriska beräkningar, Pandas för datahantering, och NetworkX för ruttberäkningar. Optimeringsmodellen har beskrivits matematiskt och sedan implementerats i Python med hjälp av programpaketet Pyomo (Python Optimization Modeling Objects) och optimeringslösaren Gurobi. Innan optimeringsmodellen körs valideras indata med ett antal automatiserade tester som upptäcker eventuella inkonsistenser.

För att lösa större problem har KTS-avdelningens beräkningsserver använts. Genom ett skript hämtar beräkningsservern all relevant indata från databasen, löser problemet och skriver lösningen tillbaka i databasen.

PostgreSQL-databasen möjliggör att enkelt visualisera både indata och lösningar. För att skapa diagram används matplotlib-biblioteket i Python. För kartvisualiseringar över nätverk, tågvolym, kapacitetsutnyttjande har programmet QGIS använts som är ett geografiskt informationssystem som kan hämta data direkt från databasen.

4 Data

Nätverket som har använts för att testa beräkningsprocessen kommer från Samgods och innehåller 1520 länkar och 687 noder som på ett förenklat sätt beskriver alla järnvägssträckor i Sverige. Noderna representerar platser där det finns en transportefterfrågan eller där flera järnvägssträckor sammanstrålar. Antalet spår för varje länk har hämtats manuellt från NJDB².

LUPP-trafikdata³ om faktiskt framförda tåg har använts för att sammanställa aggregerad trafikdata. Det aggregerade trafikdatat innehåller 24 000 tåg (varav 5 000 gods) för en typvecka (2019).

Eftersom LUPP-data använder en mer detaljerad beskrivning och andra beteckningar än Samgods-nätverket har vi fått spendera förhållandevis mycket tid med att matcha och sammanföra noder, där olika obalanser uppstått. Främst gäller det större stationer som Hallsberg, Göteborg, Gävle etc, där ankommande tåg registrerats på andra noder än de avgående.

Det aggregerade trafikdatat har i första steget använts för att identifiera faktiska trafikrelationer. Optimeringsmodellen har då använts för att bestämma när och hur ofta tågen ska gå på dessa relationer. Eftersom det inte fanns direkta tåg för all transportefterfrågan har vi senare gått över till att använda genererade ruttalternativ som är oberoende av faktiska tåg (se Avsnitt 2.2).

Det aggregerade trafikdata används dock fortfarande som källa för gångtiden på länkarna som är baserade på den genomsnittliga tiden från godstågen i trafikdatasetet. Utöver detta är den reserverade kapaciteten för persontåg på länkarna baserad på faktiskt antal tåg i trafikdatan.

Transportbehoven har hämtats från Samgods och är de transporter där logistikmodulen i första steget värderar att järnvägstransport är mest gynnsam. Transportbehoven som har använts motsvarar alltså järnvägstransporterna i Samgods innan kostnaderna har uppdaterats

²<https://njdbwebb.trafikverket.se>

³<https://bransch.trafikverket.se/tjanster/system-och-verktyg/forvaltning-och-underhall/Lupp-uppfoljningssystem/>

av kapacitetsmodulen för järnväg. Enbart inrikes transporter inkluderas, alltså transportbehov med utgångspunkt och destination i Sverige.

Totalt finns 3243 olika transportbehov i datasetet, som beskrivs av en årlig efterfrågan i ton av en av 16 varuslag mellan ett visst par av noder. Efterfrågan delas sedan på 50 (arbetsveckor) för att få den mängden som ska uppfyllas i godstransportplanen för en vecka. Vi inkluderar alla transportbehov, även om vissa transportbehov är så små att det är sannolikt inte lönsamt att köra direkta godståg under varje vecka.

5 Resultat

Ett flertal olika probleminstanser har skapats av varierande storlek, dels för att kunna göra olika skalningstester, dels för att kunna felsöka på små probleminstanser. Detta har gjorts genom att i mindre instanser enbart inkludera en delmängd av transportefterfrågan.

För samtliga körningar har vi använt en tidsperiod på 8 timmar, vilket ger 21 perioder för en veckas trafik. En periodlängd på 8 timmar håller antalet perioder och därmed komplexiteten nere samtidigt som det fortfarande går att avbilda skillnaden i kapacitetstillgång mellan natt och dag på sträckor med mycket persontrafik.

Redan för relativt små instanser visade det sig att målfunktionen som minimerar vagnar och lok leder till orimligt långa beräkningstider. När vi istället ändrade till att minimera antalet tåg kunde vi lösa även mycket stora instanser, både cykliskt och icke-cykliskt. För att ändå få ett mer realistiskt antal vagnar har maxantalet lok och vagnar på varje station begränsats till 20 respektive 200.

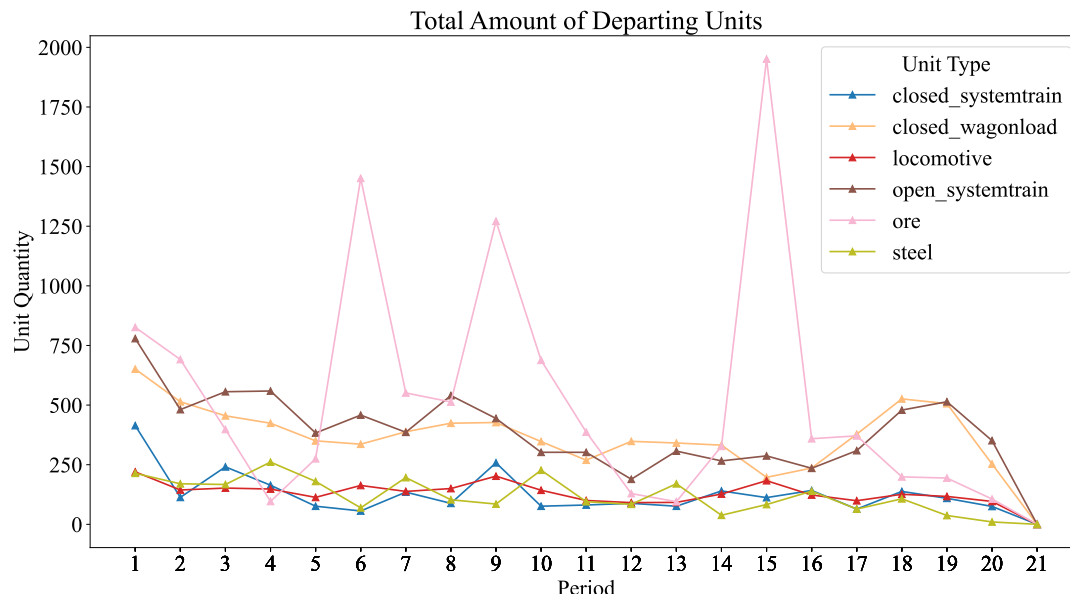
I de tester vi har genomfört har vi även sett att antalet alternativa rutter påverkar beräkningstiden kraftigt. Vi började med 3 alternativa rutter i varje OD-par, men minskade detta i efterhand till 2 alternativa rutter per OD-par.

Även efter ovanstående förenklingar har vi ännu inte kunnat lösa en probleminstans med all efterfrågan (3243 olika transportbehov) under rimligt tid. Genombrotten kom här efter att vi även gjorde en relaxation av efterfrågan i modellen. Ändringen innebär att målfunktionen minimerar summan av antalet tåg och ett straff för varje icke-uppfyllt transportbehov. Det höga straffet gör att modellen i största möjliga mån försöker uppfylla all efterfrågan. Det finns dock flera fördelar med detta

- lösaren styrs till att hitta en lösning genom att uppfylla efterfrågan successivt, vilket verkar minska beräkningstiden
- det finns en trivial tillåten lösning (som inte uppfyller något transportbehov) och lösaren kan därifrån direkt och parallelliserad avsöka trädet med bättre lösningar, vilket minskar beräkningstiden
- även om enstaka transportbehov faktiskt inte kan uppfyllas går det att få en lösning som uppfyller så mycket som möjligt

Denna ansats möjliggjorde till slut att kunna beräkna en godstransportplan för en vecka som uppfyller 3241 av samtliga 3243 transportbehov med en beräkningstid satt till 20 timmar på vår beräkningsserver. Problemet som har lösts är cyklisk, dvs. alla antal vagnar och lok i varje nod i slutet av veckan ska vara samma som i början av veckan. Kapacitet på länkarna har reducerats för persontågen. Lösningen kräver totalt 1678 tåg och använder 541 lok och 7459 vagnar.

Figur 3 visar antalet avgående enheter (lok och vagnar) efter typ. Vi ser att godstrafikplanen har spridit ut transporterna relativt jämnt under veckan med undantaget att ore-vagnar är koncentrerade till vissa perioder. Mängderna som transporteras med dessa vagnar är avsevärt större än transporter med alla andra vagnar och koncentrerade till ett fåtal OD-par. Topparna



Figur 3: Totalt antal avgående lok och vagnar per period i den beräknade godstransportplanen

visar att modellen försöker att minimera antalet tåg genom att transportera så mycket gods åt gången i dessa OD-par.

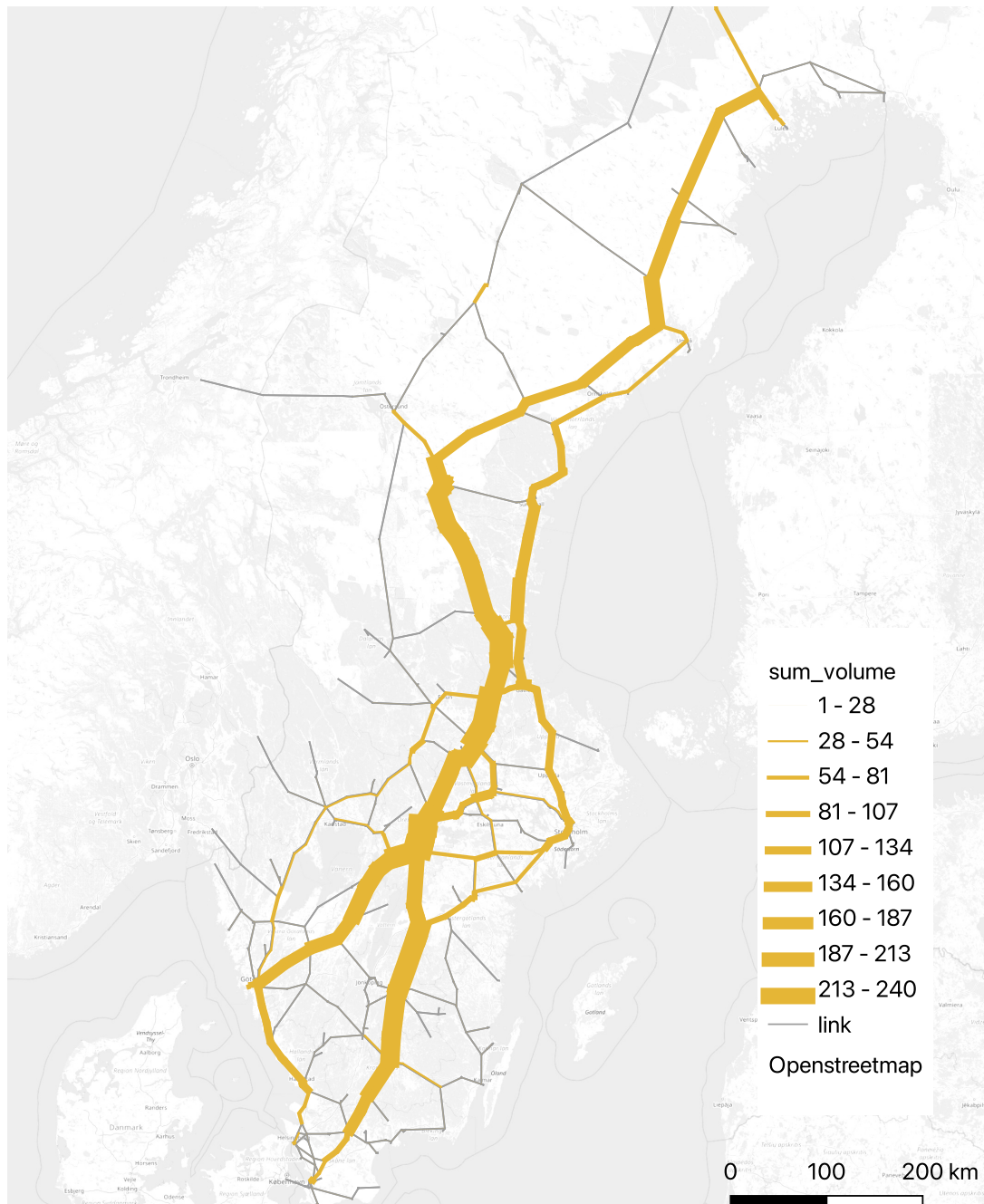
Genom att aggregera antalet tåg för varje länk under veckan kan vi visualisera hur järnvägsnätet används i godstransportplanen. Figur 4 visar flödet av godståg på varje länk. Notera att enbart inrikes transportbehov har inkluderats och därför körs inga gränsöverskridande tåg.

6 Slutsatser och fortsatt forskningsbehov

Beräkningsprocessen och optimeringsmodellen som har tagits fram i arbetet möjliggör att ta fram en godstransportplan som tar hänsyn till alla relevanta begränsningar. Detta är en fördel mot dagens kapacitetsmodell som används i den nuvarande nationella Samgods-modellen där lösningen är på en mer aggregerad nivå som inte direkt går att översätta till en omloppsmässig genomförbar plan. I den nationella modellen modelleras transporterna idag endast på årsnivå. Genom att använda tidsperioder och alternativa rutter levererar vår modell en plan som fördelar transporterna i tid och mellan olika rutter för en typvecka på ett sätt som inte överskrider kapacitetsbegränsningarna i nätverket utan att exakt behöva schemalägga varje tåg. Att ta fram en tidsuppdelad godstransportplan möjliggör att kontrollera att den årliga transportmängden faktiskt går att transportera med genomförbara omlopp.

De viktigaste begränsningar i modellen är att målfunktionen som används enbart fokusera på antalet tåg, att modellen optimerar hela systemet och inte tar hänsyn till att det finns olika godsoperatörer, att vagnlasttrafik/rangerbangårdar inte modelleras specifikt och att kapacitetsmodellen är relativ enkel. Med tanke på komplexiteten i problemet är beräkningstiden på 20 timmar för probleminstanser med samtliga inrikes järnvägstransporter redan acceptabel i kontext av strategisk planering. Det finns dock potential för att minska beräkningstiden ytterligare genom ändringar i modellen eller lösningsprocessen.

Det finns idag få järnvägstransportmodeller som är utvecklade för planering på strategisk nivå. Förutom att vidareutveckla beräkningsprocessen med avseende på ovanstående be-



Figur 4: Länkflöden (antal tåg) under en vecka i den beräknade godstransportplanen

gränsningar finns därför ett flertal behov för vidare forskning i området särskild inom dessa tillämpningar:

- Integration med en transportmodell: Allokera kostnader per transport utifrån godstransportplanen för att använda dessa i en transportmodell som i en iterativ process avgör är lönsamma att köra på järnväg.
- Analys av rangerbangårdar: Modellera vagnlaster och använd lösningen som indata till kapacitetsmodell för rangerbangårdar
- Underhållsplanering: Använd modellen för att schemalägga tillfälliga kapacitetsbegränsningar och minimera påverkan på godstrafiken.
- Robusthetsanalys: Använd modellen för att analysera effekter av större störningar i nätverket eller kraftiga förändringar i efterfrågan.
- Värdering av investeringar: Använd modellen för att värdera nyttan av kapacitetshöjande insatser eller nya järnvägssträckor för godstrafik.

Beräkningsprocessen och optimeringsmodellen som har tagits fram möjliggör att ta fram en godstransportplan som uppfyller de nationella transportbehoven på järnväg. Den linje-baserade ansatsen där flöden av tåg planeras istället för enskilda tåg är en lämplig modell för planering på strategisk nivå som har stort potential att vidareutvecklas och användas för olika typer av planering på strategisk nivå.

Referenser

- Edwards, H. (2024). Railway capacity management for Samgods using linear programming with a stochastic approach. Technical report, Sweco.
- Fernández, J. E. L.; de Cea, J. C.; Giesen, R. E. (2004). A strategic model of freight operations for rail transportation systems. *Transportation Planning and Technology*, 27(4):231–260. doi:10.1080/0308106042000228743. Publisher: Taylor and Francis Ltd.
- Frisch, S.; Hungerländer, P.; Jellen, A.; Lackenbucher, M.; Primas, B.; Steininger, S. (2023). Integrated freight car routing and train scheduling. *Central European Journal of Operations Research*, 31(2):417–443. doi:10.1007/s10100-022-00815-3. Publisher: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- Holmberg, K.; Joborn, M.; Lundgren, J. (1994). A Model For Allocation Of Empty Freight Cars With Capacity Restrictions And Fixed Costs. *WIT Transactions on The Built Environment*, 6. doi:10.2495/CR940151. ISBN: 978-1-85312-354-2 Publisher: WIT Press.
- Lidén, T.; Joborn, M. (2017). An optimization model for integrated planning of railway traffic and network maintenance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 74:327–347. doi:10.1016/J.TRC.2016.11.016. Publisher: Elsevier Ltd.
- Milenković, M.; Bojović, N.; Abramini, D. (2023). Railway freight wagon fleet size optimization: A real-world application. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 26:100373. doi:10.1016/J.JRTPM.2023.100373. Publisher: Elsevier.
- Naturvårdsverket (2025). Inrikes transporter, utsläpp av växthusgaser.
- Yaghini, M.; Khandaghabadi, Z. (2013). A hybrid metaheuristic algorithm for dynamic rail car fleet sizing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6):4127–4138. doi:10.1016/J.APM.2012.09.013. Publisher: Elsevier.