

Prognostisering av kapacitetskonsumtion på järnväg från historiska data

Underlagsrapport 1 från projektet TTR och beräkning av segmentet Rolling Planning (TORP)

Martin Aronsson, Martin Kjellin, Zohreh Ranjbar

RISE Rapport 2025:118

Prognostisering av kapacitetskonsumtion på järnväg från historiska data

Underlagsrapport 1 från projektet TTR och beräkning av segmentet Rolling Planning (TORP)

Martin Aronsson, Martin Kjellin, Zohreh Ranjbar

Innehåll

Innehåll	2
Förord	3
Sammanfattning	5
1 Inledning och bakgrund	6
2 Introduktion till TTR-processen	7
2.1 TTRs förplanering	8
2.1.1 Kapacitetsstrategin.....	9
2.1.2 Kapacitetsmodellen	9
2.1.3 Kapacitetsutbudet.....	10
2.2 Årlig tilldelning inklusive ansökan om kapacitet	10
2.3 Rolling Planning och Ad Hoc	11
3 Kapacitetsmått	12
4 Data	14
5 Metod	15
5.1 Klustering av dygn.....	15
5.1.1 Process.....	15
5.1.2 Jämförelse av klustringsalgoritmer.....	16
5.2 Prognostisering.....	21
6 Utvärdering	22
7 Fortsatt arbete	24

Förord

Upprinnelsen till projektet *TTR och beräkning av segmentet Rolling Planning* (TORP) är den under 2020-talet pågående utvecklingen av en ny process för tilldelning av järnvägskapacitet. Under slutet av 2010-talet genomförde de europeiska organisationerna RailNetEurope (RNE), Forum Train Europe (FTE) samt European Rail Freight Association gemensamt en ambitiös förstudie, TimeTable Redesign. Denna diagnosticerade behovet av en förändrad kapacitetstilldelningsprocess. Denna förstudie ledde fram till ett större program, Timetabling and Capacity Redesign (akronymen TTR behövs). Under 2023 kom så kommissionen med ett förslag till en ny förordning inom kapacitetstilldelning på järnväg, denna gång överstatlig, att förhandlas vidare mellan ministerrådet och parlamentet.

I både TTR och förslaget till ny förordning är förplanering och reservering av kapacitet för olika behov en viktig komponent. Infrastrukturförvaltaren får en överordnad uppgift att planera så att infrastrukturen används effektivt, inbegripet förplanering och reservering av kapacitet för olika behov innan ansökan om kapacitet. Processen sträcker sig från fem år innan första dag i tågplanen och tågplanen ut, således sex år.

Ett nytt produktsegment introduceras i och med TTR-processen, Rolling Planning, RP (som rakt översatt till svenska blir "rullande planering", men denna term krockar med det allmängiltiga begreppet "rullande planering" varför vi kommer att använda den engelska beteckningen i denna rapport). För detta produktsegment är det tänkt att kapacitet ska hållas reserverad genom den årliga tilldelningsprocessen. Denna kapacitet ska sedan kunna tilldelas löpande under tågplanens genomförande, för en period av upp till tre år efter ansökan om ett RP-tågläge. Detta är nytt för svenska förhållanden.

Visserligen har det redan i nuvarande direktiv från EU som implementerats genom delegerade akter (varje land inom EU har krav att implementera lagstiftning i linje med direktivet) funnits krav på reservkapacitet, det vill säga reserverad kapacitet för behov under tågplanens genomförande, men detta är inte implementerat idag av någon europeisk infrastrukturförvaltare¹. RP kan ses som en större utvidgning av reservkapacitetsbegreppet till att omfatta all trafik som kan förväntas variera dynamiskt under året, och omfattar således en större andel av tillgänglig kapacitet än som avsågs med reservkapacitet. RP omfattar dessutom reservering av kapacitet upp till tre år från ansökningsdatum, vilket gör att RP även påverkar kommande tågplaner.

Tanken med RP är att främja det segment inom järnvägstransporter som har ett mer dynamiskt behov, kanske framför allt godstrafiken där kontrakt ofta tecknas över flera tågplaneperioder, och att godsoperatören skall kunna garantera vissa kvalitetsegenskaper i kontraktet med transportköparen.

Det är mot denna bakgrund som projektet TORP (TTR och beräkning av segmentet Rolling Planning) har startats. Syftet med TORP är att:

"... stärka det svenska genomförandet och implementering av den nya kapacitetstilldelningsprocessen som den beskrivs i TTR och i EU-kommissionens förslag till förordning, specifikt implementeringen av segmentet Rolling Planning i svensk kontext

¹ Se M. Aronsson, Reservkapacitet i tågplaneprocessen – förstudie, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1700723/FULLTEXT01.pdf>

med bl.a. prioriteringskriterier för värdering av RP-segmentet gentemot övriga segment. Det svenska arbetet med värderingsprinciper för kapacitetsanvändning väcker intresse ute i Europa, varför intresse kan förväntas även internationellt.”

Målet med projektet är att:

- Utveckla grundläggande och principiella metoder, manuella och/eller i kombination med algoritmer som kan användas för att skapa en värdesatt representation av järnvägskapacitet, användbar för att kunna segmentera kapaciteten. Värdesättning är viktigt för att kunna avgränsa RP från årlig tilldelning, ett villkor för att tilldelande myndighet skall kunna hänvisa till rättvis och lika behandling av årligt tilldelad kapacitet och kapacitet inom RP.
- Stötta den svenska implementeringen av TTR genom att bidra med resultat rörande hur osäkerhet i trafikunderlaget kan hanteras genom kapacitetstilldelningsprocessen, specifikt för RP, vars reserverade kapacitet vid årlig tilldelning baseras på en förutsägelse av kommande tilldelning under tågplanperioden. Denna förutsägelse (prognosticerad trafik) behöver baseras på vad som historiskt är kända mönster, men även ta hänsyn till nya transportlösningar för att inom TTR-processen skapa underlag för innovativa nya transportupplägg.
- Studera om tidigare resultat från FoI-projektet RIT², där ett kapacitetsobjekt benämnt *kapacitetsreservationer* togs fram, kan tillämpas i utformningen av RP-tåglägen med flerårig giltighetstid.

Trafikverket har inom ramen för sitt eget genomförandeprojekt TTR Sverige flera utredningar som adresserar dels RP i sig, dels frågan om reservering av kapacitet och värdering av trafik samt verkets nya roll som säkerställare av att förplaneringen leder till effektivt utnyttjande av infrastrukturen. Det är mot bakgrund av dessa verksamheter som TORP genomför en forsknings- och innovationsinsats där detta är den första avrapporteringen.

² Aronsson, M. & Kjellin, M. (2022), Reservkapacitet i tilldelningsprocessen (RIT) – Slutrapport. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-61171>

Sammanfattning

I EU-kommissionens förslag från 2023 till en ny överstatlig förordning för kapacitets-tilldelning på järnvägen introduceras en ny tåglägesprodukt kallad "Rolling Planning". Kapacitet till detta segment skall avskiljas senast 18 månader före tågplanens första dag, och därefter skall egenskaperna hos den reserverade Rolling Planning-kapaciteten bevaras genom den årliga tilldelningen av kapacitet. Tilldelning av Rolling Planning-kapacitet sker därefter under genomförandet av tågplanen då ansökan sker tidigast fyra månader och senast en månad innan första avgång. Giltigheten är upp till 36 månader, vilket ställer krav på reservation av redan tilldelade Rolling Planning-tåglägen i framtida tågplaner. Detta produktsegment ställer krav på infrastrukturförvaltaren att dels identifiera Rolling Planning-kapacitet innan ansökan om kapacitet sker, dels kunna reservera kapacitet genom årlig tilldelning, dels kunna värdera kapacitetens användning innan ansökan om kapacitet sker. För svenskt vidkommande är detta nya uppgifter för infrastrukturförvaltaren och denne behöver nya modeller, metoder och verktyg för att lösa denna nya uppgift.

I denna underlagsrapport beskrivs förslag på sådana modeller, metoder och tekniker för att kunna identifiera Rolling Planning-kapacitet från tidigare utförd trafik. Dessa är baserade på ett kapacitetsmått som utgår från den area som framtida tilldelade tåglägen belägger i en tidtabellgraf. Historiskt utförd trafik generaliseras genom användande av detta mått till dagliga mönster vilka därefter klustras och bildar underlag för typdygn (kapacitetskonsumtionsmönster). Ett antal olika klustringsalgoritmer har utvärderats, både genom bedömning av resultatet och genom användande av en etablerad teknik kallad silhuettpoäng. Genomförda prov på data från Värmlandsbanan visar att valet av klustringsalgoritm inte är avgörande för resultatet, utan att flera undersökta algoritmer leder till ungefär samma indelning i kluster och därmed till liknande uppsättningar av typdygn.

Med hjälp av en klassificeringsalgoritm tilldelas därefter varje dygn i den framtida tågplanen ett av de framtagna typdyggen, vilket bestämmer den prognosticerade konsumtionen för Rolling Planning-segmentet det dygnet. I den framtida tilldelningsprocessen skulle sådana prognoser kunna vara ett sätt att avgöra när och hur mycket kapacitet som ska avsättas och reserveras till Rolling Planning i kapacitetsmodellen vid X-18. Metoden utvärderas genom att prognoser baserade på olika tågplaner jämförs med den faktiska kapacitetskonsumtionen under en annan redan passerad tågplanepериод. Det visar sig att prognoserna har en viss träffsäkerhet, men att de sannolikt kommer att behöva anpassas med hjälp av kompletterande underlag, till exempel uppgifter om förväntade förändringar av kapacitetsbehovet.

1 Inledning och bakgrund

EU-kommissionen kom 2023 med ett förslag till ny överstatlig förordning inom området kapacitetstilldelning på järnvägsinfrastruktur³. Denna baseras till stora delar på resultat från det utvecklingsprogram, Timetabling and Capacity Redesign (TTR)⁴, som RailNetEurope (RNE) och Forum Train Europe (FTE) med stöd av European Rail Freight Association (ERFA) tagit fram. Vi kommer i denna rapport att referera till den av RNE/FTE framtagna processen som TTR-processen.

Ett nytt produktsegment introduceras i och med TTR-processen, Rolling Planning, RP⁵. RP-kapacitet skall enligt förordningsförslaget identifieras och avsättas vid X-18⁶, i samband med publicering av *kapacitetsmodellen* (se avsnitt 2.1), och därefter skall dess egenskaper bibehållas genom den årliga tilldelningen. Denna kapacitet skall sedan kunna tilldelas löpande under tågplanens genomförande, för en period av upp till tre år efter ansökan om ett RP-tågläge.

För svenska förhållanden, liksom internationellt, ställer RP krav på infrastrukturförvaltaren att förstå marknaden och dess behov, att förstå värdet av ännu inte ansökta tåglägen (vilket redan följer med kravet på förplanering), att kunna ställa prognosticerat RP-behov mot förväntad årligt ansökt trafik samt att ha förmåga att reservera kapacitet genom den årliga tilldelningen. RP kan ses som en större utvidgning av reservkapacitetsbegreppet i nuvarande järnvägslagstiftning till att omfatta all trafik som kan förväntas variera dynamiskt under året, och omfattar således en större andel av tillgänglig kapacitet än som avsågs med det tidigare begreppet reservkapacitet. Genom att RP innefattar även känd trafik men med förväntat dynamiskt beteende finns det större förutsättningar att kunna prognosticera en generell omfattning på trafiken än för reservkapacitet. En introduktion till den nya kapacitetstilldelningsprocessen ges i kapitel 2.

Kapacitet inom järnvägsområdet har flera uttydningar, ofta med samma enhet som produktivitet dvs antal tåg per tidsenhet. I detta projekt använder vi ett kapacitetsbegrepp framtaget specifikt med avsikt att vara användbart i TTRs förplanering⁷. Detta kapacitetsbegrepp bygger på att betrakta arean i en tidtabellgraf som mått på kapacitet, och därmed också att se på kapacitet som en förmåga vilken kan användas på flera sätt, t.ex. för att producera tåg av olika sorter vilka kan konsumera olika mängd kapacitet. Att reservera kapacitet betyder i detta sammanhang, i sin enklaste form, att avsätta en viss area i en tidtabellgraf till ett visst ändamål. Se vidare i kapitel 3.

³ 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>

⁴ RailNetEurope, 2024, Description of the Timetabling and Capacity Redesign Process, version 4.0, https://rne.eu/wp-content/uploads/Long_Description_of_the_TTR_process_V4.0_2024-12-10.pdf

⁵ Rolling Planning blir direkt översatt till svenska "rullande planering", men denna term krockar med det mer allmängiltiga begreppet "rullande planering" varför vi kommer att använda den engelska beteckningen Rolling Planning (RP) i denna rapport

⁶ Vi använder det gängse sättet att ange tid från tågplanens ibruktage, dvs X-18 är den tidpunkt som ligger 18 månader innan tågplanens första genomförandedag.

⁷ 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>

Det huvudresultat som presenteras i denna rapport är en beskrivning (kapitel 5) och utvärdering (kapitel 6) av en metod för att skapa prognoser för hur kapacitetskonsumtionen för ett visst trafiksegment på en viss sträcka kommer att variera över året och dygnet, baserat på data (se kapitel 4) för motsvarande trafik under tidigare tågplaner. Avsikten är att denna metod ska kunna bli en del av en process för att identifiera den mängd kapacitet som, enligt TTRs processbeskrivning, infrastrukturförvaltaren skall publicera som RP vid X-18.

Observera att den framtagna prognosmetoden i sig inte säger något om vilka trafiksegment som ska ingå i Rolling Planning, hur trafik ska värderas eller hur prognoserna ska anpassas till planerade och/eller kommunicerade förändringar i trafiken (i form av till exempel Capacity Needs Announcements, CNA). Dessa frågor kommer att behandlas i det fortsatta arbetet (se kapitel 7).

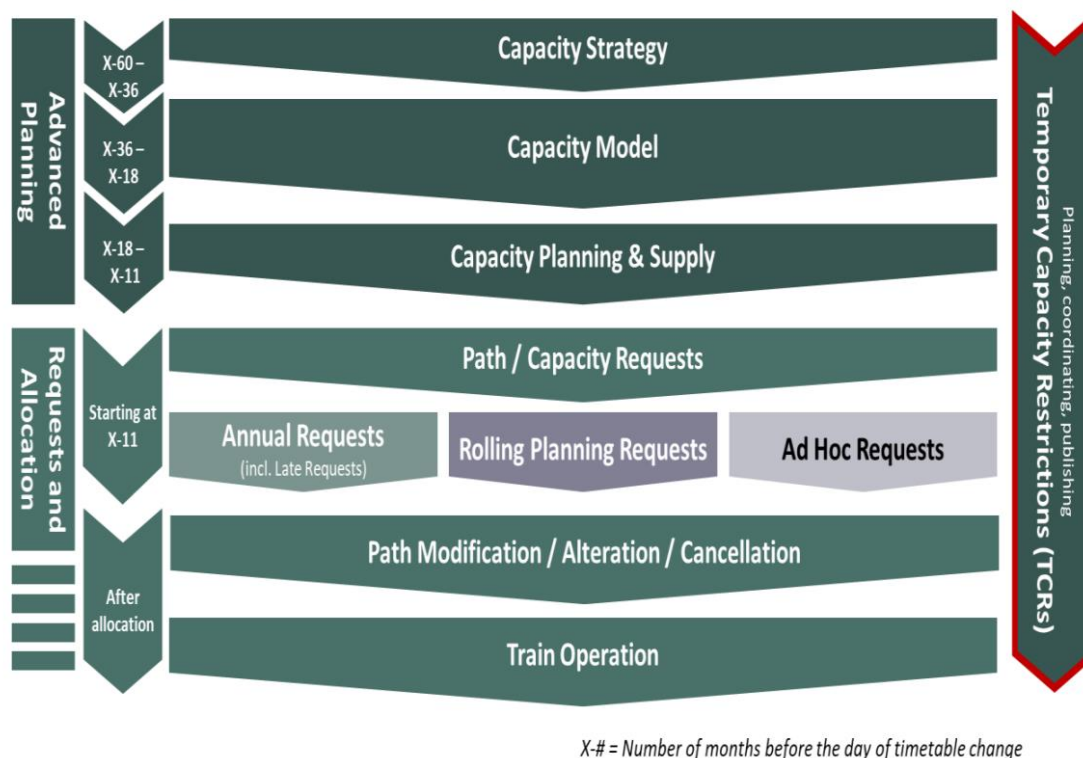
2 Introduktion till TTR-processen

Enligt kapacitetstilldelningsprocessen som utvecklingsprogrammet TTR tagit fram startar tilldelningsprocessen vid X-60⁸ och innehåller flera processteg, se Figur 1, med de olika fasernas tidsutsträckning till vänster.

Ansökan om kapacitet utgör en vattendelare mellan de två huvudfaserna, den tidiga planeringen som också benämns förplaneringen (Advance Capacity Planning, ACP) och den senare planeringen efter ansökan om kapacitet vilket benämns ansökan (begäran) och allokering av kapacitet (Request and Allocation). I Figur 1 ligger ansökan om tåglägen ur produktsegmentet Rolling Planning (RP) inlagt parallellt med ansökan om årligt tilldelad kapacitet, men dessa tåglägen i RP-segmentet sökes under pågående genomförande av tågplanen och med upp till tre års giltighet.

⁸ Vi använder den notation som blivit de facto standard i branschen att referera till tidpunkter i tilldelningsprocessen, där "X" står för tidtabellskiftet (byte av tågplan) och där X-60 betyder 60 månader före tidtabellskiftet. Bokstaven "M" har börjat användas i betydelsen "månad i tågplanen".

Key Elements of TTR process



Figur 1 Kapacitetstilldelningsprocessens faser enligt TTR-projektet. Tid flyter nedåt i figuren. Till vänster visas huvudskedena för trafikplanering samt perioderna då de olika planeringsfaserna genomgår. Figuren är hämtad från TTR-projektets beskrivning⁹.

2.1 TTRs förplanering

För svenska förhållanden är förplaneringen innan ansökan om kapacitet ett nytt moment. Med nuvarande lagstiftning får inte infrastrukturförvaltaren förplanera ”färdiga” katalogtåglägen att erbjuda för direkttilldelning utan varje tågläge skall principiellt skapas efter att tågläget har sökts vilket kan ske antingen i samband med den årliga ansökningsprocessen vid X-8,5 eller under tågplanens genomförande. Det är för närvarande järnvägsföretagen, kollektivtrafikhuvudmän, större industriföretag med stora transportbehov, med flera aktörer med transportbehov på järnväg som har ansvaret att tolka samhällets transportbehov och inkomma med ansökningar. I den föreslagna TTR-processen får infrastrukturförvaltaren ett ökat mandat att förplanera användningen av kapaciteten och samordna trafik med underhållsinsatser.

Förplaneringen delas upp i tre moment, formandet av en *kapacitetsstrategi* (X-60 – X-36), formandet av en *kapacitetsmodell* (X-36 – X-18), där Rolling Planning har en stor roll, samt formandet av ett *kapacitetsutbud* (X-18 – X-11). Vart och ett av dessa beskrivs i avsnitten nedan, men den intresserade rekommenderas att läsa TTR-projektets egna dokument som kan hämtas från projektets hemsida¹⁰.

⁹ RailNetEurope & Forum Train Europe, Description of the Timetabling and Capacity Redesign Process, version 4.0. Hämtad från https://rne.eu/wp-content/uploads/Long_Description_of_the_TTR_process_V4.0_2024-12-10.pdf

¹⁰ Se <https://rne.eu/downloads/>, under “Capacity Management – TTR”

Denna för svenska förhållanden nya process ställer krav på att både detaljera utbudet av ”kapacitetsprodukter” men också bibehålla flexibilitet för att kunna matcha detta utbud med ansökningarna, inte minst med avseende på Rolling Planning som är i fokus för denna rapport.

Rolling Planning tilldelas sedan under innevarande tågplan, i Figur 1 beskrivet som ”Request and Allocate”. Tolkningen är att segmenten Årlig tågplan och Rolling Planning tilldelas var för sig, inom sina respektive reserverade kapacitetsavgränsningar (liksom även temporära kapacitetsrestriktioner, TCR). Detta ställer krav på hur begreppet kapacitet formuleras och värdering av de olika kapacitetsreservationerna för att en samhällsekonomiskt effektiv trafik skall komma till stånd som nyttjar infrastrukturen på bästa sätt.

2.1.1 Kapacitetsstrategin

Kapacitetsstrategin definierar de mer generella principerna för den tågplan som förbereds. Dessa principer bildar en ram för resten av kapacitetstilldelningsprocessen. Detta sker genom att den förväntade tillgängliga kapaciteten i järnvägsnätet beskrivs i ett dokument, liksom en första grov uppskattning vad detta betyder för de framtida trafikflödena. Viktiga komponenter utgör en beskrivning av kapacitet i nätverket, viktiga större kapacitetsrestriktioner och vid vilka tider som dessa är aktuella samt för trafikflödena viktiga principer som styr hur dessa kommer hanteras, t.ex. viktiga via-vägar och omledningar kring flaskhalsar etc. Processteget som tar fram kapacitetsstrategin pågår från X-60 till X-36, vilket betyder att flera tågplaner hanteras parallellt.

2.1.2 Kapacitetsmodellen

Baserat på principerna som kapacitetsstrategin resulterat i startar arbetet med kapacitetsmodellen. Syftet med kapacitetsmodellen är att definiera uppdelningen av tillgänglig kapacitet i olika användningsområden och produkttyper. Användningsområdena är tillfälliga kapacitetsrestriktioner, kapacitetsprodukter tillgängliga i årlig tilldelning samt kapacitet tillgänglig under tågplanens genomförande och även vidare framåt i tiden, produktsegmenten Rolling Planning och Ad Hoc. Syftet är att visa, harmonisera och möjliggöra diskussion om kapacitetens användning i olika huvudkategorier men inte i detalj bestämma användningen. Således är fokus på flöden av trafik och inte enskilda tågägen, och snarare resursanvändning per användningsområde (bandel eller liknande) och inte själva transporterna och hela deras sträckning.

Arbetet med kapacitetsmodellen sker i två ”spår”, dels tillfälliga kapacitetsrestriktioner, dels produktion av trafik, se Figur 1. För trafik är det förväntat att minst ett typdygn åskådliggörs med en timmes upplösning.

Ett huvudresultat från detta processteg är en kapacitetsmodell som, för trafikens del, visar på hur kapaciteten har delats upp för olika syften och användning i senare steg. Detta görs i flera dimensioner, kallat *lager* i TTR-projektets dokumentation. Exempel på sådana uppdelningar är:

- i tjänstetyper: resandetåg, godståg, temporära kapacitetsrestriktioner samt annan användning
- i tidsordning när kapaciteten allokeras: Årlig tilldelning, Rolling Planning, Ad Hoc, samt temporära kapacitetsrestriktioner.

Vid X-24 inträffar händelsen Capacity Needs Announcement, CNA. Detta är ett formaliserat tillfälle då järnvägsföretag, regionala trafikhuvudmän, stora industrier med flera framtida sökande av järnvägskapacitet kan lämna in önskemål om kapacitet för sin framtida trafik. Detta skall inte blandas ihop med ansökan om kapacitet som sker vid X-8,5 utan CNA är och syftar till en prognos och indikation om vad de sökande ser att de kommer att behöva. Det är inte obligatoriskt att ha lämnat in önskemål om kapacitet för att senare kunna ansöka om kapacitet, men infrastrukturförvaltaren förväntas i sitt fortsatta arbete med kapacitetsutbudet ta hänsyn till de önskemål som lämnas in.

Kapacitetsmodellen tas fram under perioden X-36 till X-18, således överlappar framtagningen av två tågplaners kapacitetsmodeller.

2.1.3 Kapacitetsutbudet

Då kapacitetsmodellen tagits fram med dess partitionering av tillgänglig kapacitet i olika användningsområden kan infrastrukturförvaltaren ta fram ett kapacitetsutbud. Syftet med kapacitetsutbudet är att visa, harmonisera mellan infrastrukturförvaltare och göra tillgängligt för de sökande alla detaljer kring den användbara kapaciteten för varje syfte (t.ex. resandetrafik, godstrafik etc.).

Utbudet består i 364 (371) dagars kapacitetsdiagram/grafer, där olika kapacitetsobjekt visas, tex. Rolling Planning-kapacitet (vars egenskaper skall bevaras genom den årliga tilldelningen), årligt förplanerade tåglägen, samt kapacitet för skraddarsydda tåglägen. Utbudet skall ta hänsyn till redan allokerad/reserverad kapacitet i Rolling Planning-segmentet från föregående år liksom till redan allokerad/reserverad kapacitet för ramavtalad trafik. Vidare skall kapacitet allokerad till tillfälliga kapacitetsrestriktioner också redovisas, samt vilken kapacitet som är tillgänglig för vilken/vilka produkter.

Målet är att kapacitetsutbudet skall vara stabilt efter processtegets slut vid X-11 och fram till tågplanepriodens slut vid X+12. Dock finns det tillfällen då detta kan komma att uppdateras, framför allt om det visar sig att viss reserverad kapacitet inte utnyttjades som det var tänkt i utbudet. Utbudet skall vara tillgängligt för alla parter.

Processteget startar vid X-18 och pågår till X-11 då utbudet publiceras. Detta processteg avslutar principiellt TTR-processens förplanering. Därefter vidtar ansökan om kapacitet samt tilldelning av kapacitet i Årlig tilldelning samt Rolling planning (och Ad Hoc vid akuta och oförutsedda händelser).

2.2 Årlig tilldelning inklusive ansökan om kapacitet

Ansökan om kapacitet sker mellan X-11 och X-8,5. I detta skede är det framför allt de sökande som agerar och skickar in sina ansökningar till infrastrukturförvaltaren.

Efter X-8,5 och fram till X-2 ser processen ungefär ut som dagens process, med den skillnaden att ansökningar till årlig tilldelad trafik dels måste ske inom det segment som är reserverat för den tilldelningen, dels att det kan finnas möjlighet att söka förplanerade

katalog-tåglägen. Kapacitet reserverad för annan användning, t.ex. till Rolling Planning-produkter samt Ad Hoc får inte allokeras till årligt tilldelad trafik, utan skall vara opåverkad genom detta processteg.

2.3 Rolling Planning och Ad Hoc

I denna rapport är det framför allt segmentet Rolling Planning (RP) som är i fokus. RP är en ny form av tåglägesprodukt. Tanken med denna produkt är att den skall attrahera trafik med föränderliga behov men någorlunda kända volymer. Således skall det gå att prognostisera behoven under förplaneringen men inte detaljerna vilket gör att de inte passar att schemalägga i årlig tilldelning. Kapacitet för denna typ av trafik avsätts som reserverad kapacitet och tilldelas under tågplanen och med upp till 3 års giltighet från tilldelningstillfället.

Tilldelning inom Ad Hoc-segmentet har inte samma tolkning som idag, där den omfattar i princip all förändring av tågplanen under tågplaneperioden. Ad Hoc i TTR-processen är mer tänkt för senare och akutare förändringar och inte t.ex. nya affärer, dessa skall hellre sökas inom RP-segmentet.

RP-kapacitet reserveras vid X-18 och det skall säkerställas genom årlig tilldelning att det bibehåller sin attraktivitet gentemot det segment som det är tänkt att ”träffa”. Detta kan konkret ske på flera sätt: Som en del av den tillgängliga kapaciteten (i termer av arean i tidtabellgrafen), kapacitetsreservationer formulerade t.ex. som delar av framtida tåglägen¹¹, eller som tåglägen med förskjutningsmöjlighet (dvs en begränsad period kring det prognosticerade tågläget inom vilket det kan variera).

Denna rapport fokuserar framför allt på att ta fram en metod för att identifiera omfattningen/behovet av RP-kapacitet över ett eller flera olika typdygn. Utgångspunkten är det areabaserade kapacitetsmåttet vilket används för att dels representera den utförda trafiken, dels förutspå den kapacitet som skall reserveras. Den area som ett visst typtåg upptar i en graf ansluter på ett naturligt sätt till kapacitetsmodellen beskriven i avsnitt 2.1.2 där mängden kapacitet för ett visst ändamål skall publiceras och visualiseras. Avsättningen av kapacitet görs således med avseende på en viss kapacitetsprodukt, inte med avseende på en viss trafik (dvs vissa konkreta tåglägen). Detta kan jämföras med en produktionsindustris strategiska planering där beslut fattas om vilka typer av produkter som skall produceras ett visst framtida år och även kanske produktmixen, men de faktiska produkterna (individerna) är inte kända ännu. Till exempel kan ett stålverk fatta beslut om vilka stålsorter som man kommer framställa och ha som alternativ i sitt produktutbud mot kund men varje individuell plåt eller rör finns inte med i den strategiska planen.

¹¹ Aronsson, M., & Kjellin, M. (2022). Reservkapacitet i tilldelningsprocessen (RIT) – Slutrapport. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-61171>

3 Kapacitetsmått

För beräkning av kapacitetskonsumtion används i denna rapport ett kapacitetsmått som tidigare har utvecklats av RISE¹². Grunden för detta mått är att betrakta arean som ett (framtida) tågläge belägger i en tidtabellgraf som kapacitetskonsumtion, inklusive säkerhetsavstånd, ställverkets utlösningstid med mera. Måttet innebär generellt att ett tåg (tågläge) av en viss kategori som belägger ett signalblock 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. Arean motsvarar då den kapacitet som tågläget konsumerar.

Kapacitetsmåtten är tänkt att kunna användas i de tidiga faserna av planeringsprocessen (till exempel i TTR-processens förplanering där kapacitet ska avsättas för olika produktsegment, t.ex. Rolling Planning, se avsnitt 2.1), när det ännu inte är känt exakt vid vilken tidpunkt i schemat (tidtabellen) som tåget kommer att planeras in.

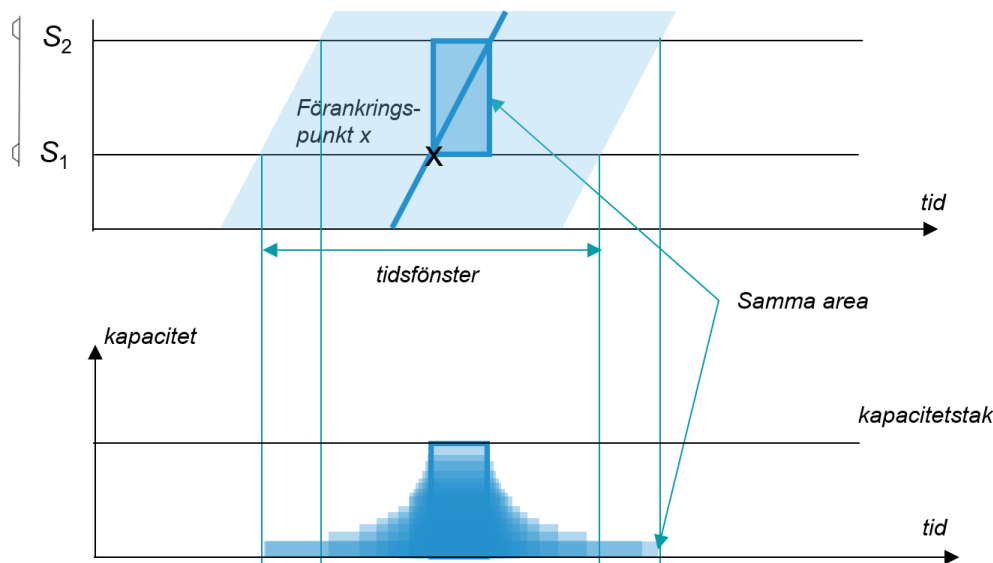
Då avgångstid och ankomsttid är bestämda färdas tåget mellan areans hörn och de vertikala sidorna när från utgångspunkten till destinationspunkten, i Figur 2 är detta blocksignalerna S_1 till S_2 . Men eftersom tidpunkterna för avgång (ankomst) ännu inte är kända under förplaneringsfasen finns det en period, benämnt tidsfönster i figuren, inom vilken det är rimligt att anta att detta tågläge kommer att schemaläggas (marknads-mässigt 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 (då fastställda) avgångstiden för tågläget¹³.

För enkelhets skull kan vi anta att sannolikheten för var inom tidsfönstret som tågläget kommer att tilldelas är likformigt fördelad (troligen är sannolikheten olika fördelad inom perioden, t.ex. 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. 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 2¹⁴.

¹² 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>

¹³ Egentligen kan förankringspunkten 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 överensstämja med hur trafiken i praktiken genomförs.

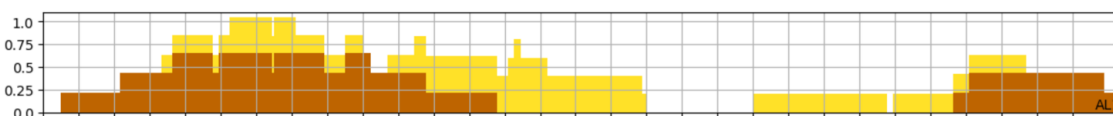
¹⁴ Egentligen är inte denna area kvadratisk formad utan innehåller en period av ökande höjd i början och en avtagande höjd på slutet eftersom den sannolika beläggningen i ändpunkterna av



Figur 2: Fördelning av kapacitetskonsumtionen för ett tåg över ett tidsfönster

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 3 visar på ett sådant exempel, framtaget vid en tidigare studie¹⁵.



Figur 3 Exempel på beläggningsgraf över 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

tidsfönstret är avtagande mot noll. Full höjd nås vid utrymmet mellan de inre vertikala begränsningslinjerna i figuren.

¹⁵ 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>

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. För den metodutveckling som redovisas här bedömer vi dock att det inte är nödvändigt att ta hänsyn till denna tillkommande kapacitetskonsumtion, så länge det varken görs för de träningsdata som utgör underlag för prognoserna eller för de testdata (utfallsdata) som prognoserna utvärderas mot. Eftersom det underlättar arbetet att inte behöva uppskatta hur mycket kapacitet som kan komma att förbrukas på detta sätt, kommer vi här bara att räkna med den kapacitet som förbrukas direkt av de enskilda tågen.

4 Data

I samråd med expertis inom området har vi använt trafiken på Värmlandsbanan i våra undersökningar. Rekommendationen grundade sig bland annat på att kapacitetsutnyttjandet på denna bana är högt och att där förekommer trafik som skulle kunna vara aktuell för Rolling Planning (till exempel timmertåg). De data som använts är hämtade från fyra tågplaner från tiden före införandet av MPK, det nuvarande planeringssystemet för kapacitetstilldelning: T18, T19, T21 och T22. Vi har använt ett urval av trafik bestående av all faktiskt utförd godstrafik (alla planerade och icke inställda godståg) enligt Trafikverkets system Lupp. Anledningen till detta urval är dels att det är enkelt att skilja ut denna trafik ur de tillgängliga uppgifterna, dels att vi har bedömt att det är rimligt att tänka sig att i en sådan ganska stor och ospecifik grupp av tåg kommer olika undantagsfall som utmärker enskilda tågplaner att bli mindre framträdande. Med detta urval av tåg bör det därför vara möjligt att utvärdera den framtagna prognosmetoden utan att utvärderingen blir störd av sådana undantagsfall.

Vi har använt samma uppdelning av Värmlandsbanan i bandelar som i underlaget till kapacitetskartan från Trafikverkets kapacitetscenter (år 2017)¹⁶. Närmare bestämt har vi studerat kapacitetskonsumtionen med det area-baserade kapacitetsmåttet på den dimensionerande sträckan eller en del av denna (enligt underlaget till kapacitetskartan) för respektive bandel, se Tabell 1. Den studerade sträckan på varje bandel avgränsas i vardera änden av en driftplats. Mellan ändpunkterna kan det finnas hållplatser, linjeplatser och mellanblocksignaler, men inte några driftplatser.

Tabell 1: Studerade sträckor på Värmlandsbanan

Bandel	Studerad sträcka
Laxå–Kristinehamn	Laxå–Hasselfors
Kristinehamn–Karlstad C	Skattkärr–Karlstad Välsviken
Karlstad C–Kil	Karlstad C–Skåre
Kil–Arvika	Kil–Högboda
Arvika–Charlottenberg	Arvika–Åmotfors

Vid beräkningen av kapacitetskonsumtionen har i samtliga fall hela avståndet mellan ändpunkterna på den studerade sträckan använts. Om sträckan består av flera signal-

¹⁶ Erhållet kalkylblad från Trafikverket

block innebär detta att kapacitetskonsumtionen överskattas i förhållande till den beräkning per signalblock som beskrivs i avsnitt 3 av denna rapport (och i förhållande till verkligheten). Anledningen till detta avsteg från den beskrivna beräkningsmetoden är att de data som vi har haft tillgång till helt eller delvis saknar uppgifter om ankomst- och avgångstider för de mellanliggande platserna. Vår bedömning är att detta inte påverkar metodutvecklingen, eftersom detta avsteg görs både för de data som utgör underlag för prognoserna och för de utfallsdata som prognoserna utvärderas mot.

5 Metod

Den metod som tagits fram för att skapa prognoser för kapacitetskonsumtion består av två delar. I den första delen delas dygn från en eller flera tidigare tågplaneperioder in i ett antal *kluster* (grupper). Vart och ett av de kluster som bildas omfattar dygn som i sina kapacitetskonsumtionsmönster (hur kapacitetskonsumtionen varierar över dygnet) dels liknar varandra inom klustret, dels skiljer sig från de dygn som ingår i andra kluster. Vilka och hur många kluster som är lämpligast att bilda är inte känt på förhand, utan avgörs med hjälp av ett utvärderingsmått.

I den andra delen av metoden skapas sedan ett typdygn för varje kluster, det vill säga ett typiskt mönster för kapacitetskonsumtionen som är baserat på konsumtionsmönstren för de dygn som har förts till klustret. Syftet med detta typdygn är att det ska kunna fungera som prognos för kapacitetskonsumtionen under dygn som kan antas likna dygnet i klustret. Därför tränas till sist en klassificeringsalgoritm att tilldela troliga typdygn till dygn under en ”framtida” (under metodutvecklingen i praktiken en annan redan passerad) tågplaneperiod.

5.1 Klustring av dygn

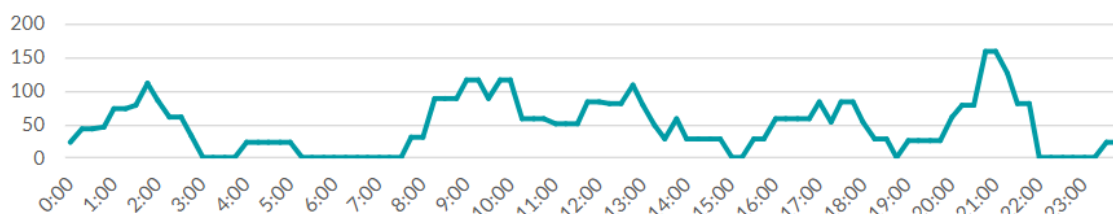
Klustringsalgoritmer är maskininlärningsmetoder som går ut på att dela in data i grupper, så kallade kluster, där varje kluster består av datapunkter som liknar varandra – eller annorlunda uttryckt: som ligger nära varandra i en rymd där dimensionerna utgörs av egenskaper hos datapunkterna. Vilka kluster som förekommer är inte givet på förhand, vilket skiljer klustring från klassificering, som istället går ut på att dela in datapunkter i givna grupper.

I den undersökning som presenteras här utgörs varje datapunkt av kapacitetskonsumtionsmönstret för en viss sträcka och ett visst dygn under en tågplaneperiod. Nedan beskrivs den övergripande processen för att ta fram dessa mönster för kapacitetskonsumtionen och bilda kluster av dygn. Därefter jämförs resultatet av att tillämpa några olika klustringsalgoritmer på problemet att klustra dygn baserat på sådana mönster.

5.1.1 Process

Processen för att ta fram kapacitetskonsumtionsmönster och bilda kluster av dygn ser ut på följande sätt:

1. Beräkna kapacitetskonsumtionen för varje godståg enligt det mått som beskrivs i kapitel 3, det vill säga genom att multiplicera den studerade sträckans längd (i meter) med den tid (i minuter) då tåget befinner sig på sträckan.
2. Dela in dygnet i 96 perioder om 15 minuter och fördela kapacitetskonsumtionen för varje tåg likformigt över ett tidsfönster om 75 minuter, bestående av den femtonminutersperiod under vilken tåget faktiskt körde ut på sträckan samt två femtonminutersperioder före och två efter denna. Att använda ett tidsfönster om 75 minuter är ett något godtyckligt val, men är tänkt att spegla att behovet som ligger bakom det konkreta tågläget är behäftat med en viss osäkerhet. Likaså är det något godtyckligt att använda femtonminutersperioder, men det bör ge en tillräcklig noggrannhet för de behov som är aktuella här. Detta kan bli föremål för förändring senare.
3. För varje femtonminutersperiod under varje enskilt dygn: summera den fördelade kapacitetskonsumtionen för alla tåg som genom fördelningen kommit att beröra perioden. På så sätt får man (i jämförelse med om man skulle summera kapacitetskonsumtionen för de enskilda tågen utan någon fördelning över tidsfönster) ett något utjämnat kapacitetskonsumtionsmönster i form av en kurva, se Figur 4, som visar hur kapacitetskonsumtionen varierar över det aktuella dygnet.
4. Använd en klustringsalgoritm för att bilda kluster, där vart och ett består av ett antal dygn (från en eller flera tågplaner) som har en liknande kapacitetskonsumtionskurva.



Figur 4: Exempel på en kapacitetskonsumtionskurva för ett dygn (tidpunkter under dygnet längs x-axeln och kapacitetskonsumtion – i detta fall mätt i kilometerminuter – längs y-axeln)

5.1.2 Jämförelse av klustringsalgoritmer

Det finns många olika i litteraturen beskrivna klustringsalgoritmer. Dessa skiljer sig åt i metod (hur kluster definieras och bildas) och potentiellt i resultat. I preliminära undersökningar i projektet RIT¹⁷ användes algoritmen *k-means*, där det önskade antalet kluster k är en på förhand given parameter. Det finns fler algoritmer som också har antalet kluster som en parameter, medan antalet kluster för andra algoritmer är en konsekvens av algoritmens arbetssätt och därför inte känt på förhand. En annan viktig skillnad mellan olika algoritmer är att vissa algoritmer garanterat placerar varje datapunkt (i detta fall: dygn) i ett kluster, medan andra kan leda till att vissa punkter kategoriseras som ”utliggare” (outliers) som inte tillhör något kluster alls.

¹⁷ Aronsson, M. & Kjellin, M. (2022), Reservkapacitet i tilldelningsprocessen (RIT) – Slutrapport. Hämtad från <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-61171>

Vi har jämfört olika klustringsalgoritmer för att klargöra om valet av algoritm är avgörande för resultatet av klustringen, det vill säga om olika algoritmer i väsentlig utsträckning skiljer sig åt i hur de delar in dygnen i kluster och i hur hög klustringskvaliteten blir. Undersökningen omfattar sex olika algoritmer implementerade i biblioteket *scikit-learn*¹⁸ för programspråket Python: k-means, agglomerativ klustring, Gaussian mixture models (GMM), DBSCAN, HDBSCAN och OPTICS. För att avgöra klustringskvaliteten har vi valt att använda *silhuettpoäng*¹⁹, en ofta förekommande utvärderingsmetod som ger ett värde mellan -1 och 1. Ett värde nära 1 betyder att de enskilda datapunkterna i genomsnitt har ett kort avstånd till övriga datapunkter i sitt eget kluster och ett långt avstånd till det närmaste av de övriga klustren. Detta är ett enkelt och intuitivt tilltalande sätt att definiera klustringskvalitet, om än inte det enda möjliga. Eftersom det inte är givet på förhand vilka kluster som ska förekomma finns det inget neutralt facit att utvärdera mot, utan man måste helt enkelt bestämma sig för ett mått att använda.

De genomförda försöken tyder på att valet av algoritm har en begränsad effekt på indelningen i kluster. Det är med andra ord stor sannolikhet att två dygn som enligt en viss algoritm ingår i samma kluster också gör det enligt en annan algoritm. Detta exemplifieras i Tabell 2–Tabell 6, som jämför resultaten av att använda olika algoritmer för att klustra data för T21 från sträckan Skattkärr–Karlstad Välsviken. I jämförelserna fungerar k-means (rader i tabellerna, kluster K0–K2) som referenspunkt. På varje rad i tabellerna markeras med gult vilket av de kluster som den andra algoritmen har bildat som i störst utsträckning motsvarar det aktuella k-meansklustret. Till exempel visar Tabell 2 att av de 149 dygn som k-means har placerat i kluster K0, har den agglomerativa klustringen placerat sex dygn i kluster A0 och 143 dygn i kluster A2. Således motsvarar klustren K0 och A2 i stor utsträckning varandra, liksom K1 och A1 respektive K2 och A0. Notera att vilka beteckningar klustren har är godtyckligt. Det eventuella antal dygn som enligt algoritmen inte ingår i något kluster alls anges i kolumnen ”inget” (förekommer för OPTICS, HDBSCAN och DBSCAN).

Tabell 2: Jämförelse av agglomerativ klustring (A0–A2) och k-means (K0–K2) vid klustring av data för T21 från sträckan Skattkärr–Karlstad Välsviken

	A0	A1	A2
K0	6	0	143
K1	7	117	0
K2	93	0	0

Tabell 3: Jämförelse av GMM (G0–G2) och k-means (K0–K2) vid klustring av data för T21 från sträckan Skattkärr–Karlstad Välsviken

	G0	G1	G2
K0	6	0	143

¹⁸ För dokumentation, se <https://scikit-learn.org/stable>

¹⁹ Rousseeuw, P.J. (1987), *Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis*, Journal of Computational and Applied Mathematics, volym 20 1987, s. 53–65. Hämtad från [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)

K1	13	104	7
K2	93	0	0

Tabell 4: Jämförelse av OPTICS (O0–O1 samt inget kluster) och k-means (K0–K2) vid klustring av data för T21 från sträckan Skattkärr–Karlstad Välsviken

	inget	O0	O1
K0	3	0	146
K1	2	122	0
K2	22	0	71

Tabell 5: Jämförelse av HDBSCAN (H0–H1 samt inget kluster) och k-means (K0–K2) vid klustring av data för T21 från sträckan Skattkärr–Karlstad Välsviken

	inget	H0	H1
K0	17	0	132
K1	17	106	1
K2	40	0	53

Tabell 6: Jämförelse av DBSCAN (D0–D2 samt inget kluster) och k-means (K0–K2) vid klustring av data för T21 från sträckan Skattkärr–Karlstad Välsviken

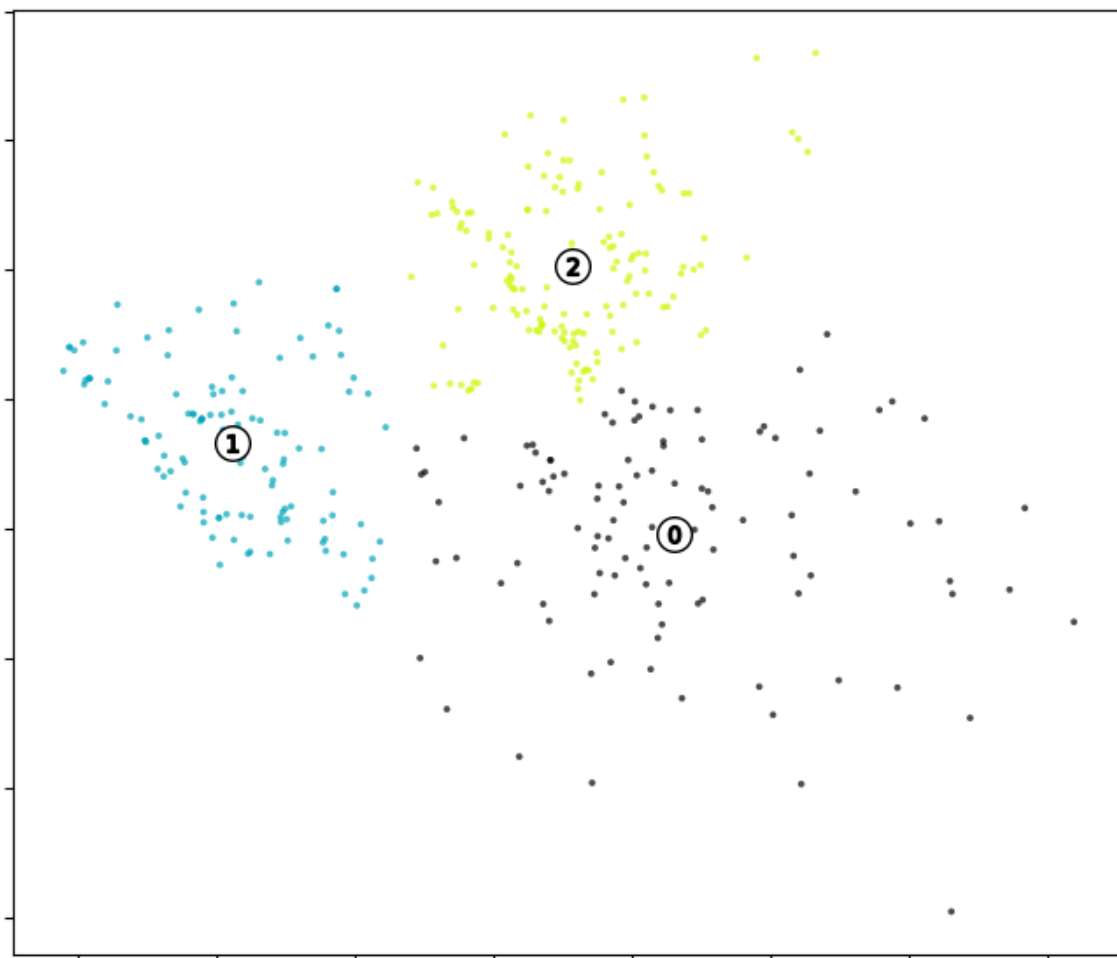
	Inget	D0	D1	D2
K0	6	0	143	0
K1	4	116	4	0
K2	26	0	61	6

De olika algoritmerna har olika parametrar som användaren anger och som påverkar klustringen. Exempelen i Tabell 2–Tabell 6 gäller för de testade parametervärden som visade sig ge högst silhuettpoäng i de aktuella försöken. För k-means, agglomerativ klustring och GMM är antalet kluster en parameter, och för dessa algoritmer sattes antalet kluster till, i tur och ordning, två, tre, fyra, fem och sex. I exemplet gav det för alla dessa algoritmer högst silhuettpoäng att göra en indelning i tre kluster, vilket alltså är det parametervärde som ligger bakom resultaten i tabellerna. För OPTICS, HDBSCAN och DBSCAN, som inte har antalet kluster som en parameter, är det svårare att avgöra vilka parametervärden som ska prövas i strävan efter en maximal silhuettpoäng, samtidigt som resultaten är mycket beroende av vilka parametervärden som väljs.

Notera att de genomförda försöken inte innebär någon formell optimering. Med andra ord bevisar de inte vilka parametervärden som ger den högsta möjliga silhuettpoängen för de olika algoritmerna. Istället har vi manuellt prövat olika parametervärden och på så sätt sökt oss fram mot högre silhuettpoäng.

De algoritmer som inte har antalet kluster som en parameter kan resultera i ett annat antal kluster än det som är bäst för de andra algoritmerna. Detta illustreras av tabellerna för OPTICS (Tabell 4) och HDBSCAN (Tabell 5), där två kluster har bildats (och några dygn inte har placerats i något kluster alls), medan k-means, agglomerativ klustring och GMM alla leder till högst silhuettpoäng vid indelning i tre kluster. En effekt av detta blir att ett av de kluster som bildas av OPTICS och HDBSCAN kommer att innehålla de flesta punkterna från *två* av de kluster som bildats av k-means. Bortsett från detta och att OPTICS, HDBSCAN och DBSCAN inte nödvändigtvis skapar en klusterindelning som omfattar alla punkter (utliggare, som inte behöver likna varandra, kan placeras utanför klusterindelningen), stämmer de indelningar i kluster som de olika algoritmerna gör väl överens. Detta framgår av att de flesta dygna återfinns i de gulmarkerade rutorna i Tabell 2–Tabell 6.

En illustration av hur ett klustringsresultat kan se ut finns i Figur 5, som med olika färger visar klustren (A)0–(A)2, som bildats genom agglomerativ klustring. Varje punkt i figuren är ett dygn. I de försök vi har gjort har vi genomgående använt en algoritm för att innan klustringen reducera antalet dimensioner från 96 (antalet femtonminutersperioder per dygn) till två. Detta är en vanlig åtgärd för att förbättra klustringsresultat och medför här också att dygna enkelt kan visas i en tvådimensionell figur.



Figur 5: Kluster bildade genom agglomerativ klustring av data för T21 från sträckan Skattkärr–Karlstad Välsviken

Även om de resulterande klusterindelningarna således inte skiljer sig så mycket åt mellan olika algoritmer, kan valet av algoritm ha tämligen stor påverkan på silhuettpoängen. Som framgår av Tabell 7 varierar den maximala funna silhuettpoängen för de olika algoritmerna i exemplet ovan mellan 0,29 (DBSCAN) och 0,51 (k-means). I toppen av tabellen finns k-means, agglomerativ klustring och GMM, utan särskilt stor inbördes skillnad. Det är möjligt att spridningen i silhuettpoäng sett över alla algoritmer skulle minska med en mer uttömmande sökning efter de bästa parametervärdena för de övriga algoritmerna (som inte har antalet kluster som en parameter), men det är ändå inte säkert att de på så sätt funna parametervärdena skulle ge lika goda resultat för alla sträckor och tågplaneperioder.

Tabell 7: De bästa funna värdena på silhuettpoängen vid klustring med olika algoritmer av data för T21 från sträckan Skattkärr–Karlstad Välsviken

Algoritm	Silhuettpoäng
k-means	0,51
agglomerativ klustring	0,50
GMM	0,47
OPTICS	0,45
HDBSCAN	0,37
DBSCAN	0,29

Våra försök med olika algoritmer och parametervärden för andra sträckor och tågplaneperioder ger resultat som pekar i ungefär samma riktning som exemplet ovan. En rimlig tolkning av dessa försök är därför att det är ganska lätt att avgöra vilken ungefärlig indelning i kluster som är den bästa (givet silhuettpoäng som utvärderingsmetod) och att det inte har en avgörande betydelse för resultaten vilken av algoritmerna k-means, agglomerativ klustring och GMM som används. Denna slutsats förstärks av en tendens att klusterindelningen, oavsett algoritm, skiljer lördagar, söndagar och helgdagar (å ena sidan) från övriga dagar (å den andra), vilket är ett förväntat resultat med tanke på att det är välkänt att transportbehoven skiljer sig åt mellan vardagar och helger. Det varierar mellan olika sträckor och algoritmer om det tillför något (i form av högre silhuettpoäng) att göra en indelning i tre kluster istället för två. Att ha fyra kluster eller fler verkar hur som helst inte innebära någon förbättring. Klustertillhörigheten för ett dygn verkar också kunna påverkas av tidpunkten under året, vilket förefaller rimligt med tanke på förekomsten av säsongvariationer, semesterperioder och liknande.

5.2 Prognostisering

Syftet med att dela in dygn i kluster är att varje kluster ska bli underlag för ett typdygn, det vill säga ett mönster för kapacitetskonsumtionen som kan fungera som prognos för konsumtionen under framtida dygn med liknande egenskaper som de dygn som ingår i klustret. Vilket typdygn som ska utgöra prognos för ett visst framtida dygn kan avgöras med hjälp av en *klassificeringsalgoritm*. Givet en uppsättning datapunkter och en förutbestämd uppsättning kategorier tilldelar en sådan algoritm en kategori till varje datapunkt. Att det är bestämt på förhand vilka kategorier som kan förekomma skiljer klassificeringsalgoritmer från klustringsalgoritmer, som skapar en uppsättning kluster (motsvarigheten till klassificeringsalgoritmernas kategorier) under körning. I detta fall är det alltså de framtida dygnen som är datapunkterna och typdygnen som är kategorierna.

Generella klassificeringsalgoritmer behöver tränas på ett träningsmaterial bestående av egenskaper och kategoritillhörighet för en större mängd datapunkter. Syftet med träningen är att lära algoritmen vilka (kombinationer av) värden på egenskaperna som hör ihop med vilka kategorier. Därefter kan den upptränade algoritmen utvärderas med hjälp av ett testmaterial som inte har använts i träningen. Om kategoritillhörigheten för datapunkterna i testmaterialet är känd kan man direkt utvärdera algoritmens förmåga att förutsäga kategoritillhörighet baserat på datapunkternas egenskaper. I detta fall finns inget facit för vilket typdygn som ska tilldelas till ett visst dygn i testmaterialet, utan uppgiften är istället att utvärdera om metoden kan skapa prognoser (tilldelningar av typdygn) som ligger tillräckligt nära faktiska kapacitetskonsumtionsmönster. Resultatet av denna utvärdering finns i kapitel 6.

Prognosen för en viss sträcka skapas i följande steg:

1. Beräkna, inom vart och ett av klustren av dygn, den genomsnittliga kapacitetskonsumtionen för var och en av de femtonminutersperioder som dygnen delats in i. Resultatet av denna beräkning blir ett typdygn för varje kluster. (Det finns andra tänkbara sätt att kombinera dygnen i ett kluster till ett typdygn, men här har vi valt att använda genomsnittet, som är enkelt att beräkna och som med viss sannolikhet borde leda till prognoser som träffar ungefär rätt.)
2. Skapa ett träningsmaterial bestående av klustertillhörighet och egenskaper (veckonummer [1–52/53], dag i veckan [1–7] samt dag i storhelg eller liknande [ja/nej]) för vart och ett av dygnen i en eller flera tågplaneperioder. Valet av egenskaper att basera träningen på anknyter till de faktorer som vi har funnit påverkar klustertillhörigheten (se avsnitt 5.1.2). Det faktum att klustringen ofta skiljer lördagar, söndagar och helgdagar från övriga dagar fångas av egenskaperna ”dag i veckan” och ”dag i storhelg eller liknande”, medan säsongsvariationer, semesterperioder och liknande fångas av egenskapen ”veckonummer”.
3. Skapa ett testmaterial bestående av samma egenskaper för vart och ett av dygnen i den tågplaneperiod som prognosen ska gälla för.
4. Använd träningsmaterialet för att träna en klassificeringsalgoritm att tilldela typdygn baserat på dygnens egenskaper. Den algoritm som vi har valt att använda

är en Pythonimplementation av *beslutsträd* från biblioteket *scikit-learn*²⁰. Beslutsträd har bland annat fördelen att de är enkla att visualisera och tolka. Det är alltså lätt att förstå varför en viss datapunkt har tilldelats en viss kategori.

5. Låt den tränade algoritmen tilldela det mest troliga typdygnet till vart och ett av dygnet i testmaterialet och på så sätt skapa en prognos för den aktuella sträckan och tågplaneperioden.

6 Utvärdering

Den beskrivna metoden för att skapa prognoser har utvärderats med hjälp av data från Värmlandsbanan. I detta kapitel beskrivs hur utvärderingen har gått till och vad den har gett för resultat.

Den klustring som ingår i processen för att ta fram typdygn har här gjorts med agglomerativ klustring. Anledningen till detta val är dels att det, som konstaterades i avsnitt 5.1.2, inte verkar ha någon avgörande betydelse för resultatet om man använder *k-means*, agglomerativ klustring eller *GMM*, dels att resultatet av agglomerativ klustring kan visualiseras som ett träd och är enkelt att tolka (jämför med beslutsträd i avsnitt 5.2). För varje sträcka och tågplaneperiod i prognosunderlaget har det antal kluster (mellan två och sex) som har visat sig ge högst silhuettpoäng använts. I praktiken innebär detta att antalet kluster (typdygn) har varit antingen två eller tre.

I utvärderingen används den genomsnittliga procentuella avvikelserna mellan den prognosticerade och den faktiska kapacitetskonsumtionen per timme som ett mått på kvaliteten. Utvärderingen består av följande steg:

1. För varje typdygn och varje timme under dygnet: beräkna absolutbeloppet av skillnaden mellan den prognosticerade konsumtionen och den genomsnittliga faktiska konsumtionen för de dygn i testmaterialet som enligt klassificeringsalgoritmen ska tilldelas det aktuella typdygnet. Observera att prognosen alltså inte jämförs med den faktiska konsumtionen för de enskilda dygnet (vilket troligen ofta skulle visa på större skillnader) och att ingen klustring baserad på den faktiska konsumtionen görs. Att göra en utvärdering per timme anknyter till att *TTR*-processens typdygn har minst en timmes upplösning (se avsnitt 2.1.2).
2. För varje typdygn och varje timme under dygnet: beräkna vilken procentandel resultatet av punkt 1 utgör av den genomsnittliga faktiska konsumtionen för de dygn som tilldelats det aktuella typdygnet.
3. Beräkna ett genomsnitt av resultatet av punkt 2 över alla timmar under dygnet och alla typdygn, viktat efter hur vanligt varje typdygn är i prognosen. Resultatet av denna beräkning blir det slutliga utvärderingsmättet, som ger en övergripande uppfattning om hur stort felet i prognosen är i förhållande till den faktiska kapacitetskonsumtionen.

²⁰ För dokumentation, se <https://scikit-learn.org/stable/modules/tree> och <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeClassifier.html>

Resultatet (punkt 3) av en utvärdering av prognoser för T22 visas i Tabell 8. Prognoserna är baserade på träningsmaterial från tre olika tågplaner, nämligen T18, T19 och T21²¹. Eftersom utvärderingsmättet är den genomsnittliga procentuella avvikelser från den faktiska konsumtionen innebär lägre procentandelar en bättre (mer träffsäker) prognos. Vi kan konstatera följande:

- Prognoserna blir i nästan alla fall bättre ju kortare tiden är mellan den tågplan som utgör underlag och den tågplan som prognosen gäller. Detta är förväntat, eftersom trafiken alltid förändras mellan olika tågplaner och de ackumulerade förändringarna bör bli större ju längre tiden går. Vi har gjort vissa försök med prognosunderlag som kombinerar data från flera olika tågplaner (med tanken att egenheter för enskilda år på så sätt skulle bli mindre framträdande), men det har inte lett till bättre resultat. Utvärderingen tyder alltså på att sannolikheten för att få träffsäkra prognoser för en viss tågplanperiod generellt sett skulle vara störst om man kunde vänta tills utfallsdata (information om faktiskt körda tåg) från närmast föregående tågplanperiod blev tillgängliga. Eftersom framtagandet av prognoserna är tänkt att vara en del av arbetet med kapacitetsmodellen (som börjar vid X-36) är dock detta inte möjligt. Under arbetet med kapacitetsmodellen blir utfallsdata som gäller en tre år äldre tågplan tillgängliga. Vid skapandet av en prognos och underlag för en kapacitetsmodell i en tänkt TTR-process för T22 skulle man således inte ha haft tillgång till data nyare än T19.
- Skillnaderna mellan prognosticerad och faktisk konsumtion ger genomgående intryck av att vara stora – som mest utgör skillnaden 157 % av den faktiska konsumtionen.²² Om man studerar kurvor över prognosticerad och faktisk konsumtion framstår skillnaderna dock inte nödvändigtvis som lika dramatiska, vilket illustreras av Figur 6, som visar kapacitetskonsumtionsmönstren för de tre typdygnen (klustren) i den enligt utvärderingsmättet minst träffsäkra prognosen (Skattkärr–Karlstad Välsviken med T18 som underlag) och motsvarande genomsnittliga faktiska konsumtionsmönster. Prognosen ger ofta intryck av att hyggligt väl förutsäga den faktiska kapacitetskonsumtionen, särskilt om man tillåter sig att göra vissa tidsförskjutningar av toppar och dalar i konsumtionen.

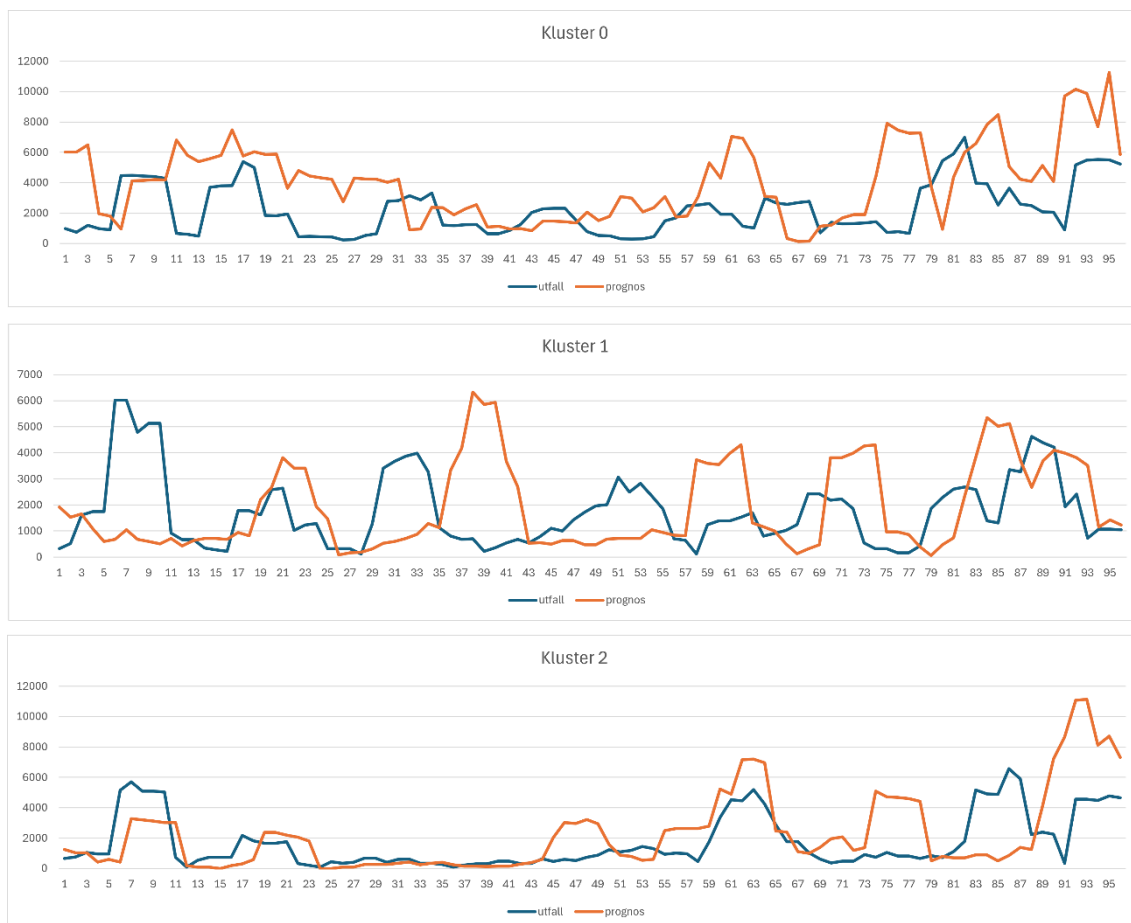
Tabell 8: Genomsnittlig skillnad mellan den prognosticerade och den faktiska kapacitetskonsumtionen under T22, som andel av den faktiska konsumtionen (med olika tågplaner som prognosunderlag)

Sträcka	Underlag: T18	Underlag: T19	Underlag: T21
Laxå–Hasselfors	90 %	75 %	48 %
Skattkärr–Karlstad Välsviken	157 %	103 %	57 %

²¹ För T18 saknades data för tågplanepriodens första veckor, fram till årsskiftet 2018/2019. Prognosen som är baserad på T18 omfattar därför inte motsvarande veckor för T22. Dessutom ledde brister i data till ett orimligt kapacitetskonsumtionsmönster för en viss dag under T19 på sträckan Laxå–Hasselfors. Detta mönster ersattes därför med mönstret för samma veckodag under veckan därpå.

²² På grund av användningen av absolutbelopp bidrar både för höga och för låga prognoser till att öka skillnaden, men eftersom en för låg prognos inte kan avvika med mer än 100 % i förhållande till den faktiska konsumtionen (prognosen kan inte vara lägre än 0) innebär en så stor skillnad som 157 procent att prognosen i större utsträckning träffar för högt än för lågt.

Karlstad C-Skåre	95 %	72 %	60 %
Kil-Högboda	69 %	77 %	53 %
Arvika-Åmotfors	103 %	79 %	49 %



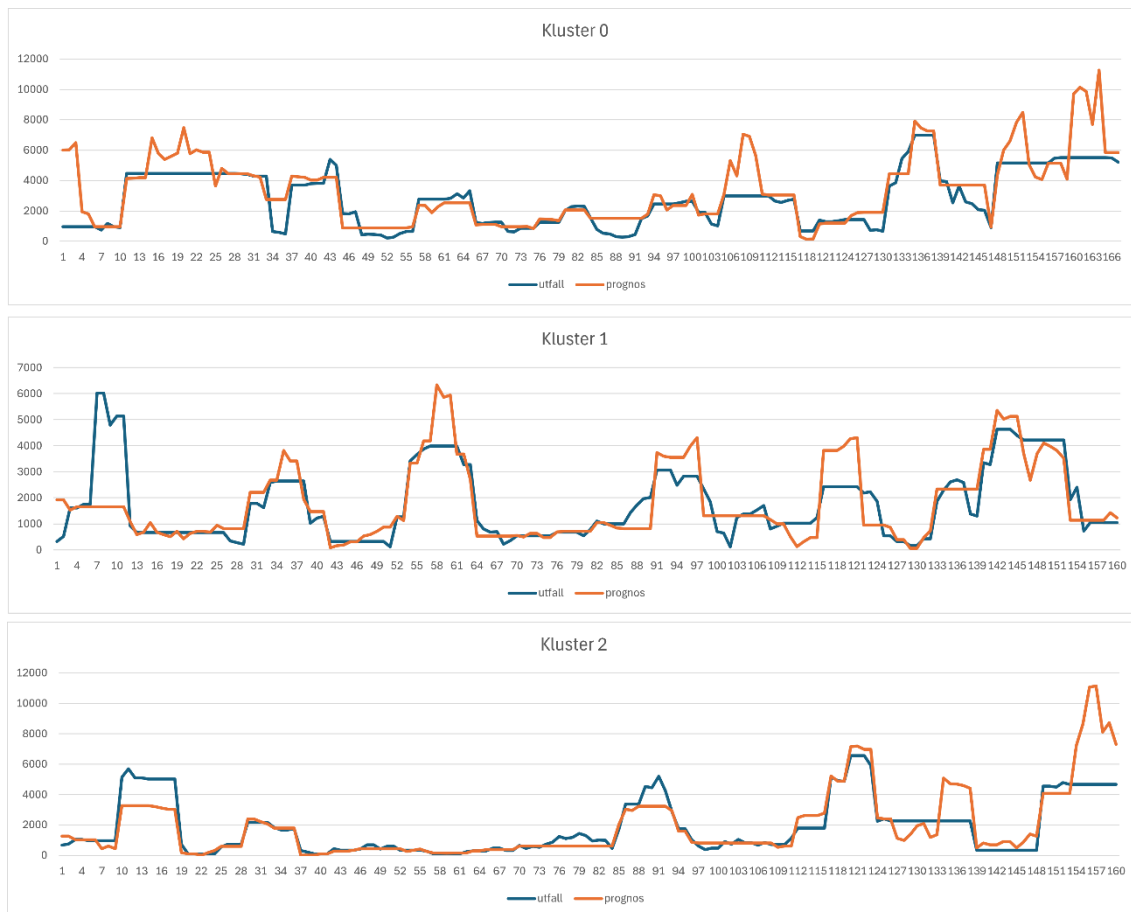
Figur 6: Jämförelse av prognos baserad på T18 och utfall för T22, för sträckan Skattkärr-Karlstad Välsviken (femtonminutersperioder under dygnet längs x-axlarna och kapacitetskonsumtion i meterminuter längs y-axlarna)

7 Fortsatt arbete

Detta avslutande kapitel beskriver några frågor som behöver undersökas vidare, med anledning av de resultat som har presenterats i denna rapport.

Konstaterandet att prognoser som enligt utvärderingsmättet beskrivet i kapitel 6 avviker kraftigt från den faktiska konsumtionen inte nödvändigtvis framstår som orimliga vid en visuell granskning väcker frågan om måttet är för strikt, till exempel på så sätt att det använder en fast indelning i timmar under dygnet, vilket skulle kunna innebära att något felplacerade toppar och dalar får en för sträng bedömning. Kanske skulle den reserverade kapaciteten trots allt vara tillräcklig för den trafik som järnvägsföretagen ansöker om, bara man gjorde mindre förskjutningar av de önskade tåglägena?

För att undersöka om sådana förskjutningar skulle kunna förbättra prognoserna har vissa försök gjorts med en metod kallad *dynamic time warping*, som kan anpassa två kurvor till varandra genom att dra ut och pressa ihop dem i tidsled. Figur 7 visar resultatet av att använda en typ av *dynamic time warping* på kurvorna i Figur 6.



Figur 7: Resultatet av att använda *dynamic time warping* på prognos baserad på T18 och utfall för T22, för sträckan Skattkärr–Karlstad Vällsviken (femtonminutersperioder under dygnet längs x-axlarna och kapacitetskonsumtion i meterminuter längs y-axlarna).

Vi kan konstatera att det är möjligt att med denna metod anpassa kurvorna bättre till varandra, men det krävs ytterligare undersökningar för att avgöra om och i så fall hur metoden kan komma till nytta i detta sammanhang.

Det är viktigt att prognoserna träffar tillräckligt rätt (i fråga om både volymer och tidpunkter) för att vara användbara som underlag för avsättning av kapacitet för Rolling Planning. Vad som är en tillräckligt bra prognos och hur man kan bedöma detta innan det finns något utfall att jämföra med är öppna frågor. Det är emellertid klart att den typ av prognoser baserade på historiska data som har presenterats i denna rapport behöver anpassas med hjälp av kompletterande underlag, till exempel Capacity Needs Announcements, CNA (se avsnitt 2.1.2). Utan en sådan komplettering riskerar man att konservativt bara avsätta kapacitet för trafik motsvarande den som prognosen är baserad på och inte för de faktiska framtida behoven. När TTR-processen väl har tillämpats under några år kommer man också att kunna kalibrera avsättningarna av kapacitet för Rolling Planning med hjälp av erfarenheter av hur väl den avsatta kapaciteten har varit anpassad till de faktiska behoven under tidigare tågplanepioder. Dessutom kan det hända att

man kommer att kunna se trender i hur behoven förändras över tid, vilket kan bli ett ytterligare underlag för vilka avsättningar som ska göras.

Slutligen kommer det framtida arbetet att behandla frågor såsom vilka trafiktyper som ska ingå i Rolling Planning, hur trafik ska värderas samt hur kapacitet skall representeras och reserveras.

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 2025:118
ISBN: 978-91-90109-10-6