

Ett livscykelkostnadsperspektiv på
samtidig infart som
kapacitetshöjande åtgärd inom järnväg

En fallstudie på Malmbanan

Elias Bark Pettersson

Civilingenjör, Industriell ekonomi
2024

Luleå tekniska universitet
Institutionen för ekonomi, teknik, konst och samhälle

Förord

Detta examensarbete avslutar min civilingenjörsutbildning inom industriell ekonomi med inriktning logistik vid Luleå Tekniska Universitet. Arbetet motsvarar 30 högskolepoäng och har genomförts vid institutionen för ekonomi, teknik, konst och samhälle. Examensarbetet har genomförts hos Trafikverket i syfte att öka kunskapen om tillämpningen av livscykelkostnadsanalys inom tillgångsförvaltningen av järnvägsinfrastruktur.

Jag vill passa på att tacka de personer som har varit med och bidragit till mitt examensarbete. Tack till min handledare Björn Samuelsson som guidat mig genom detta arbete, framför allt inom operationsanalytisk metod. Tack till Jakob Eriksson och Jonathan Lannerås för den eminenta feedback ni givit i egenskap av huvudopponent respektive medopponent. Denna feedback har till stor del påverkat det slutgiltiga arbetets struktur och innehåll. Från Trafikverket vill jag tacka Anders Wahlberg, Rikard Granström, Per Köhler, Elaine Forssell och framför allt Peter Söderholm som initierade detta examensarbete och som har stöttat mig under dess gång. Avslutningsvis tack till mina föräldrar, min lillasyster och mina mor- och farföräldrar, utan er hade detta aldrig varit möjligt.

Luleå, maj 2024.

Elias Bark Pettersson

Sammanfattning

Inom tillgångsförvaltning av järnvägsinfrastruktur finns ofta flera tekniska lösningar för att realisera en viss funktion. Examensarbetet visar på hur beslutsunderlag kan framställas genom att jämföra olika tekniska lösningar med varandra baserat på livscykelkostnadsanalys (LCC-analys). Beslutsunderlaget syftar till att skapa en bättre förståelse för hur en högre samhällsekonomisk effektivitet kan uppnås.

Den kapacitetshöjande funktionen samtidig infart har studerats. Funktionen bidrar till snabbare och smidigare tågmöten. Arbetet avgränsades till enkelspårig järnväg och driftplatser med två spår. Examensarbetet avsedde att besvara:

Hur kan alternativa tekniska lösningar för funktionen samtidig infart inom järnväg jämföras med varandra genom livscykelkostnadsanalys?

I examensarbetet behandlades Malmbanan som är i stort behov av kapacitetshöjande åtgärder. Trafiken sker mestadels med tungt lastade långa tåg, vilket i kombination många spärväxlar är uttjänta gör att tågmöten tar tid. Ett referensfall med en driftplats baserad utifrån Malmbanans förutsättningar formulerades. Utifrån det presenterade referensfallet utformades fyra alternativa tekniska lösningar för hur funktionen samtidig infart kunde realiseras. Dessa alternativ jämfördes sinsemellan genom LCC-analys.

LCC-analys visade sig vara en effektiv metod för att jämföra de olika tekniska lösningarna med varandra. Det eftersom ett kvantitativt beslutsunderlag som beaktade hela livscykeln kunde erhållas. Resultatet visade hur de olika alternativa tekniska lösningarna förhöll sig till varandra med hänsyn till dess LCC, samt i förlängningen vilket alternativ som ansågs ge högst samhällsekonomisk effektivitet med avseende på given situation. Slutligen bör även den metodikkunskap som arbetet lagt grund för beaktas i fortsatt tillämpning. Arbetssättet med LCC-analys anses vara en effektiv metod när olika alternativa investeringsåtgärder ska jämföras med varandra.

Nyckelord: *Tillgångsförvaltning av järnvägsinfrastruktur, LCC, Samtidig infart.*

Abstract

In asset management of railway infrastructure, there are often several technical solutions to realize a certain function. This master's thesis shows how a decision criteria can be constructed by comparing different technical solutions with each other based on life cycle cost analysis (LCC analysis). The decision criteria aims to create a better understanding of how a higher socio-economic efficiency can be achieved.

The capacity increasing function simultaneous arrival has been. This function contributes to faster and smoother train crossings. The work has been limited to single track railway and crossing stations with two tracks. The master's thesis intended to answer:

How can alternative technical solutions for the function simultaneous arrival within railway be compared to each other with life cycle cost analysis?

The Iron Ore Railway was discussed. This railway needs capacity increasing measures. The traffic mostly takes place with heavily loaded long trains, which in combination with the fact that many switches are worn out means that many train crossings take time. A reference case with an operating location based on Malmbanan's prerequisites was formulated. Based on the presented reference case, four alternatives technical solutions for how the simultaneous arrival function could be realized were designed. These options were compared by LCC analysis.

LCC analysis proved to be an effective method for comparing different technical solutions with each other. A quantitative decision criteria that considers the entire life cycle was obtained. The result showed how the various alternative technical solutions within the reference case relate to each other, and by extension which alternative was considered to provide the highest socio-economic efficiency. Finally, the methodology knowledge obtained should also be considered for continued application. LCC analysis proved to be an effective method when different alternative investments are to be compared.

Keywords: *Asset Management of Railway Infrastructure, LCC, Simultaneous Arrival.*

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Problembeskrivning	3
1.3	Syfte	5
1.4	Avgränsningar	5
2	Teoretisk referensram	7
2.1	Trafikförutsättningar på enkelspår	7
2.2	Kapacitet	7
2.3	Tillgänglighet	9
2.4	Underhåll	11
2.5	Livscykelkostnadsanalys	14
2.6	Nuvärdesberäkning	15
3	Metod	16
3.1	Undersökningsansats	16
3.2	Undersökningsdesign	17
3.3	Modell för livscykelkostnadsanalys	18
3.4	Primärdata	21
3.4.1	Urval av data	21
3.5	Sekundärdata	23
3.6	Reliabilitet och validitet	24
4	Fallstudie	26
4.1	Nulägesbeskrivning Malmbanan	26
4.2	Tågmöten på enkelspår	28
4.2.1	Konventionella tågmöten	28
4.2.2	Tågmöten med samtidig infart	29
4.3	Referensfall	30

4.3.1	Alternativa tekniska lösningar	32
5	Resultat och analys	36
5.1	Livscykelkostnadsanalys	36
5.2	Resultat av LCC	39
5.2.1	Jämförelsealternativ	39
5.2.2	Alternativ 1: Endast växelbyte EV-1:9 till EVR-1:9	40
5.2.3	Alternativ 2: Fullständig samtidig infart med ESIL	41
5.2.4	Alternativ 3: Fullständig samtidig infart med skyddsväxlar	42
5.2.5	Sammanställning	43
5.3	Känslighetsanalys	45
6	Diskussion	47
7	Slutsats	50
7.1	Framtida studier	51
	Referenser	52
	Bilagor	59
	Bilaga A. Översikt Malmbanan	59
	Bilaga B. Samtliga funktionsfel	60
	Bilaga C. Tågstörande funktionsfel	61
	Bilaga D. Besiktningsdata	62
	Bilaga E. Driftplatser Malmbanan	63
	Bilaga F: Investeringskostnad	66
	Bilaga G: Periodiskt förebyggande underhåll	67
	Bilaga H: Besiktningsklasser	68

Figurförteckning

1	Tillgänglighet, funktionssäkerhet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet.	10
2	Matematiskt samband mellan tillgänglighet och otillgänglighet.	11
3	Trafikverkets underhållsstrategi.	13
4	Schematisk bild av operationsanalytisk metod.	16
5	Täthetsfunktion, total reparationstid för spårväxlar på Malmbanan.	22
6	Referensfall, driftplats pilsjö.	31
7	Jämförelsealternativ: EVR-1:9 växlar och ESIK.	32
8	Alternativ 1: EVR-1:15 växlar och ESIK.	33
9	Alternativ 2: EVR-1:15 växlar, spårförlängning och ESIL.	34
10	Alternativ 3: Samtidig infart med skyddsväxlar	34
11	Resultat jämförelsealternativ.	39
12	Resultat alternativ 1.	40
13	Resultat alternativ 2.	41
14	Resultat alternativ 3.	42
15	Sammanställt resultat av LCC-kalkyl.	43
16	Känslighetsanalys, parametrar förändrade med $\pm 10\%$	45

Tabellförteckning

1	Sammanställd primärdata.	21
2	Konstanta parametrar, prisnivå i januari 2024.	38
3	Procentuell ökning av LCC jämfört med JA.	44

Matematiska symboler och förkortningar

Förkortning	Förklaring	Enhet
LCC	Livscykelkostnad	[SEK]
$LCCI$	Investeringskostnad	[SEK]
$LCCF$	Förvaltningskostnad	[SEK]
$LCCA$	Avvecklingskostnad	[SEK]
$LCCIP$	Projekteringskostnad	[SEK]
$LCCI_{ink}$	Inköpskostnad	[SEK]
$LCCI_{ins}$	Installationskostnad	[SEK]
$LCCFD$	Driftskostnad	[SEK]
K_{AU}	Kostnad för avhjälpande underhåll	[SEK]
K_{PFU}	Kostnad för förebyggande underhåll	[SEK]
K_{TU}	Kostnad för tillståndsbaserat underhåll	[SEK]
K_B	Kostnad för besiktning	[SEK]
$K_{\hat{A}}$	Kostnad för åtgärd av anmärkningar	[SEK]
i	Index anläggningstyp	-
j	Index besiktningstyp	-
k	Index underhållsaktion	-
λ_i	Felfrekvens akut avhjälpande underhåll	-
z_i	Antal förutbestämt periodiskt underhåll	-
q_{ij}	Antal besiktningar	-
γ_i	Felfrekvens åtgärdade av icke akuta anmärkningar	-
K_P	Personalkostnad per timme	[SEK/t]
\bar{n}_U	Medelantalet personal som utför underhåll	-
\bar{n}_B	Medelantalet personal som utför besiktning	-
MLT_{ik}	Medel för inställetid	[t]
MLT_{ik}	Medel för reparationstid	[t]

Förkortning	Förklaring	Enhet
BT_j	Medel för besiktningtid	[t]
K_O	Kostnad för otillgänglighet	[SEK/min]
t_{mf}	Merförsening	[min]
\bar{m}_U	Medelkostnad för utrustning	[SEK]
\bar{m}_R	Medelkostnad för reservdelar	[SEK]
K_A	Kostnaden för avveckling	[SEK]
I_A	Intäkt för andrahandsvärde	[SEK]
r	Kalkylränta	[%]
n	Livslängd	[år]
T_I	Inbyggd tillgänglighet	[%]
T_O	Operativ tillgänglighet	[%]

1 Inledning

Detta kapitel introducerar examensarbetets bakgrund, följt av problemdiskussion, frågeställning och syfte. Slutligen presenteras en kort beskrivning av arbetets avgränsningar.

1.1 Bakgrund

Efterfrågan av transporter på järnväg ökar i takt med att allt fler vill kunna resa och transportera gods på ett långsiktigt hållbart sätt (Dominković m. fl., 2018; Holmes m. fl., 2019; Marchet m. fl., 2014; Modica m. fl., 2021; Sharma, 2020). Transporter på elektrifierad järnväg, där effekten kommer från förnybara energikällor ger lägre utsläpp än andra transportslag (Craig m. fl., 2013; Heinold, 2020; Heinold & Meisel, 2018). Det beror på att utsläppen från järnväg per kilometer och transporterad enhet är låg (ITF, 2023).

Ökad efterfrågan innebär en ökad trafikbelastning på järnvägsinfrastrukturen. Det svenska järnvägsnätet är högt belastat och många delar nyttjas nära dess maximala kapacitet (Lundström m. fl., 2023; Wajsman & Nelldal, 2012). En hög belastning innebär brister i tillförlitlighet och punktlighet, vilket kan avskräcka potentiella kunder (Garberg & Bengtsson, 2020). Det krävs åtgärder som på sikt kan bidra till att stärka tillförlitlighet och punktlighet, samt för att möta den ökade efterfrågan och erhålla järnvägstransporter som är långsiktigt hållbara för samhället. Cirka 70% av det svenska järnvägsnätet är enkelspårigt (Trafikverket, 2019), och många av dessa enkelspåriga banor har högt kapacitetsutnyttjande (Lundström m. fl., 2023; Wajsman & Nelldal, 2012). Dessa banor beläggs ofta över 80% för de två högst belastade timmarna (Lundström m. fl., 2023; Wajsman & Nelldal, 2012), vilket innebär att störningskänsligheten är hög och att det inte finns tillräcklig tid att underhålla banan.

Kapaciteten på en enkelspårig järnvägsbana är starkt beroende av den hastighet som tågen kan hålla efter linjen, hur förutsättningarna för möten ser ut, samt hur snabbt själva mötet går (Lindfeldt, 2015; Lundberg, 2020; Nelldal, 2017). På en enkelspårig bana kan möten endast ske på en station, eller driftplats som det benämns i Trafikverkets trafik-

bestämmelser för järnväg (TTJ) (Trafikverket, 2023b). Vid ett konventionellt tågmöte krävs att det ena tåget står helt stilla på driftplatsen under tiden som det andra tåget passerar, vilket innebär att mötet tar lång tid. Denna tid kan kortas ner om driftplatsen tillåter funktionen samtidig infart (Lindfeldt, 2015; Lundberg, 2020; Nelldal, 2017). Om funktionen samtidig infart tillåts på driftplatsen kan två tåg mötas rullade, vilket ger snabbare och smidigare möten. Kapaciteten på banan ökar eftersom tågen då belägger den enkelspåriga sträckan under kortare tid (Lundberg, 2020).

För att möjliggöra samtidig infart finns ett antal olika tekniska lösningar (Lundberg, 2016). Dessa tekniska lösningar kräver investeringsåtgärder i den anläggning där funktionen ska införas. Det krävs nya funktioner i signalsystemet samt ytterligare säkerhetsåtgärder som ska hindra två tåg för att kunna kollidera med varandra när de kör in på driftplatsen samtidigt.

För att säkerställa den samhällsekonomiska effektiviteten i en investeringsåtgärd förespråkas infrastrukturförvaltaren att beakta kostnader från ett livscykelperspektiv (Direktiv 2014/24EU; Swedish Standards Institute, 2017a). Av denna anledning kan livscykelkostnadsanalys (LCC-analys) nyttjas när olika investeringsåtgärder ska jämföras med varandra. LCC-analys är en metod för kostnadsutvärdering som tar hänsyn till alla kostnader som uppkommer under en hel livscykel (Bergman & Klefsjö, 2020; Sherif & Kolarik, 1981; Woodward, 1997), vilket ger en helhetssyn på ett investeringsbeslut.

Tidigare studier visar att en genomtänkt planering ur ett livscykelperspektiv kan vara avgörande för en investerings ekonomiska effektivitet (Dwaikat & Ali, 2018; Nilsson & Bertling, 2007; Sherif & Kolarik, 1981; Woodward, 1997). Exempelvis visar Woodward (1997) att kostnaden för drift och underhåll kan överstiga investeringskostnaden om hela livscykeln beaktas. Av denna anledning menar författaren att dessa kostnader också bör beaktas vid investeringsbeslut, särskilt för investeringar vars livslängder är långa. Patra m. fl. (2008) visar hur LCC kan nyttjas som beslutsstöd för underhåll av järnvägsinfra-

struktur. Dock lyfter författarna att det finns en osäkerhet förknippad med uppskattningen av de statistiska egenskaperna för tillförlitlighet och underhåll. Stenström m. fl. (2016) lyfter ett antal metoder för att hantera dessa osäkerheter. Författarna menar att osäkerheten kan minskas genom väl anpassad databearbetning.

Nilsson och Bertling (2007) nyttjade LCC-analys för att jämföra och utvärdera underhållsstrategier för vindkraftverk. Författarna visade att LCC-analys är en effektiv metod för att jämföra olika investeringar. Studier inom järnvägssektorn visar att LCC-analys kan nyttjas för att identifiera kostnadsdrivare och att olika komponenter kan ha stor inverkan på kostnaden (Khan m. fl., 2020; Nissen, 2009b; Patra m. fl., 2008). Nissen (2009b) visade hur LCC-analys kan användas för att identifiera hur olika underhållsparametrar påverkar kostnaden för spårväxlar. Författaren menar att användningen av LCC-analys möjliggjorde rättvisande jämförelser av olika investeringsalternativ.

1.2 Problembeskrivning

Ur ett kapacitetsperspektiv är Malmbanan mellan Boden och Riksgränsen en speciellt utsatt enkelspårig järnväg. Kapacitetsutnyttjandet är högt vilket innebär att och det endast finns begränsade möjligheter att öka trafikvolymen och att genomföra förebyggande underhåll utan att påverka robusthet och tillgänglighet negativt (Johansson & Lundström, 2021). Eftersatt underhåll, tidvis svåra väderförhållanden och att stora delar av anläggningen har passerat sin tekniska livslängd medför att banan också har stora brister i tillförlitlighet och punktlighet.

Utöver detta genomförs stora investeringar i hållbar malmbrytning och stålframställning i Norrbottens inland, vilka bedöms ge positiv effekt för svensk samhällsekonomi (Tillväxtverket, 2023). Järnvägen är det enda realistiska alternativet för att transportera malmen till hamnarna vid kusten och dessa transporter bedöms helt nödvändiga för investeringarnas framgång (Ahlm & Kangevall, 2023; Lundström m. fl., 2023). Kapacitetshöjande åtgärder krävs för att möta denna efterfrågan (Johansson & Lundström, 2021).

Malmbanan trafikeras i huvudsak av tungt lastade långa tåg, vilket i kombination med att ett stort antal spårväxlar är uttjänta gör att många tågmöten går sakta (Johansson & Lundström, 2021). Genom att byta växlar och införa funktionen samtidig infart kan tågmöten genomföras snabbare och effektivare (Nelldal, 2017), vilket innebär att den kapaciteten ökar (Lundberg, 2020). På Malmbanan kan flertalet tekniska lösningar nyttjas för att realisera växelbyten och införandet av samtidig infart. För att säkerställa en hög samhällsekonomisk effektivitet anses det därför intressant att jämföra kostnaden för ett antal alternativa investeringsåtgärder med varandra. Som tidigare presenterat finns flertalet studier som visar på hur LCC-analys effektivt kan nyttjas för att jämföra investeringar med varandra. Genom att presentera kvantifierade värden för flera olika alternativ möjliggörs jämförelser, vilket leder till en bättre förståelse för hur en högre samhällsekonomisk effektivitet kan uppnås. En sådan analys kan i sin tur fungera som beslutsunderlag för val av investering hos Trafikverket.

Vid litteratursökning har författaren av detta examensarbete inte kunnat identifiera någon tidigare studie som undersökt hur alternativa tekniska lösningar för att realisera en möjlig funktion inom järnväg kan jämföras och utvärderas genom LCC-analys. Ur ett teoretiskt perspektiv ämnar detta examensarbete till att fylla detta akademiska gap och bidra till utvecklingen inom det vetenskapliga fältet. Ur ett praktiskt perspektiv ämnar detta examensarbete till att ta fram en jämförelse av olika alternativa investeringar för att möjliggöra en viss funktion för att öka järnvägens kapacitet. Den aktuella funktionen är samtidig infart vid driftplatser på enkelspårig järnväg, vilken kan realiseras genom flertalet olika tekniska lösningar. Vidare kan även funktionen implementeras i olika omfattning, vilket i sin tur ger olika stor effekt på kapaciteten. Ett antal alternativa lösningar kommer att föreslås och jämföras genom LCC-analys. Denna jämförelse kan i sin tur nyttjas som beslutsunderlag för val av investeringsåtgärd. Sålde har följande frågeställning formulerats: *Hur kan alternativa tekniska lösningar för funktionen samtidig infart inom järnväg jämföras med varandra genom livscykelkostnadsanalys?*

1.3 Syfte

Syftet med examensarbetet är att visa hur ett beslutsunderlag kan framställas genom att jämföra olika tekniska lösningar för en viss funktion inom tillgångsförvaltningen av järnvägsinfrastruktur. För att genomföra denna jämförelse kommer LCC-analys att nyttjas. Det bidrar till att öka kunskapen om tillämpningen av LCC-analys inom tillgångsförvaltningen av järnvägsinfrastruktur, vilket också kan ge ökad förståelse för hur en högre samhällsekonomisk effektivitet uppnås. Denna kunskap ska bidra till att verksamhetskraven i Myndighetsförordning (SFS-2007:515) på efterlevnad, hushållning, effektivitet och redovisning uppfylls. För att uppnå detta syfte har följande fyra delmål formulerats:

- Beskriva en möjlig funktion för kapacitetsförbättring.
- Beskriva alternativa tekniska lösningar för att realisera funktionen.
- Jämföra alternativa tekniska lösningar för realisering av funktionen med varandra ur ett LCC perspektiv.
- Presentera grund för beslutsunderlag för val av teknisk lösning för att realisera krävd funktion baserat på LCC-analys.

1.4 Avgränsningar

Examensarbetet har avgränsats till den svenska statliga järnvägsinfrastrukturen, vilket gör Trafikverket till huvudsaklig behovsägare. Detta eftersom examensarbete genomförs tillsammans med Trafikverket, samt att övriga förvaltare av järnvägsinfrastruktur i Sverige är så pass små att tillämpningsexemplet inte är av primärt intresse. Dock kan arbets sättet fortfarande vara intressant. Det kan även finnas infrastrukturägare i andra länder som kan använda både arbetssätt och resultat från detta arbete.

Arbetet har avgränsats till att endast beakta driftplatser med två spår på en enkelspårig bana, då denna struktur är den vanligast förekommande på Malmbanan (Johansson & Lundström, 2021). Användbarheten är högst på driftplatser med två spår, vilket är den huvudsakliga anledningen till att arbetet avgränsas till denna struktur. Vidare har

endast kapacitetshöjande åtgärder i järnvägsinfrastrukturen, där samtidig infart är den huvudsakliga fokuspunkten beaktats. Således bortses det från hur kapaciteten påverkas av tidtabell då det är ett annat sätt att optimera trafikeringen.

Trafikverkets interna principer för LCC har inte beaktats eftersom författaren ville vara objektiv mot tillgängliga arbetssätt. Istället nyttjades för branschen gällande standard inom LCC-kalkyl Swedish Standards Institute (2004).

Slutligen avgränsas arbetet till att endast beakta LCC-analys och inte livscykelanalys (LCA). Då syftet med arbetet var att lägga grund för ett beslutsunderlag för investeringsåtgärder passar en LCC-analys bättre då den är specifikt inriktad på kostnader. En LCA kan dock tillföra insikter för olika investeringsåtgärders miljöpåverkan, men rymms inte inom detta arbetes omfattning.

2 Teoretisk referensram

Detta kapitel introducerar den vetenskapliga litteratur som ligger till grund för examensarbetet. Kapitlet delas in i flera sektioner, först introduceras trafikförutsättningar på enkelspår, följt av kapacitet, tillgänglighet, underhåll, livscykelkostnadsanalys och slutligen nuvädesberäkning.

2.1 Trafikförutsättningar på enkelspår

På en enkelspårig bana krävs att de tåg som befinner sig inom ett visst linjeavsnitt färdas i samma riktning och samma hastighet för att kollisioner inte ska uppstå (Lai & Barkan, 2009). Linjeavsnitten är avsnitten av spår mellan driftplatserna. På en driftplats finns fler spår än ett, vilket gör att möten och förbigångar kan genomföras (Nelldal, 2017).

En driftplats är ett signalreglerat område som övervakas mer detaljerat än linjen (Nelldal, 2017). På en driftplats finns spårväxlar som kan läggas om för att bestämma vilket spår ett tåg tillåts att åka in på. Driftplatserna fjärrstyrs från en trafikledningscentral där tågklararen kan ge tågvägar och lägga om växlar (Trafikverket, 2019). Linjens signal-system registrerar information om tågets position och hastighet (Lai & Barkan, 2009). Informationen hanteras i signalställverk som ofta finns i anslutning till en driftplats (Trafikverket, 2019). Signalställverket reglerar signalbesked och växellägen vilket är det som möjliggör tågvägar och logik i trafikledningssystemet.

2.2 Kapacitet

En järnvägs kapacitet avser dess förmåga att transportera personer och gods över en given sträcka. Kapaciteten kan exempelvis mätas som genomströmning (antal tåg), servicenivå (merförsening) eller tillgångsanvändning (hastighet och ockupationstid för infrastruktur) (Dingler m. fl., 2011). Kapaciteten beror på infrastrukturen, de rullande materielen samt hur dessa parametrar interagerar med varandra inom ramen för gällande tidtabell (Abril m. fl., 2008; Lindfeldt, 2015; Nelldal, 2017).

Enligt Lindfeldt (2015) är antalet spår på linjen den främsta faktorn som påverkar kapaciteten, där de vanligaste konfigurationerna är enkelspår, dubbelspår och fyrspår. Vidare menar författaren att kapaciteten på ett dubbelspår är fyra gånger högre än på ett enkelspår, medan ett fyrspår har tre gånger högre kapacitet än ett dubbelspår, förutsatt att trafikvolymen är heterogen. På dubbelspår eller fyrspår kan möten ske efter linjen, vilket är den huvudsakliga orsaken till att kapaciteten är högre än på enkelspår (Nelldal, 2017).

Kapaciteten på en enkelspårig järnvägsbana är starkt beroende av den hastighet som tågen kan hålla efter linjen, hur förutsättningarna för möten ser ut, samt hur snabbt själva mötet går (Abril m. fl., 2008; Lindfeldt, 2015; Nelldal, 2017). Högre hastighet ger ökad kapacitet eftersom tågen når driftplatserna snabbare. Kortare avstånd mellan driftplatserna ger högre kapacitet eftersom möten kan se oftare. Snabbare möten ger ökad kapacitet eftersom tågen då belägger den enkelspåriga sträckan under kortare tid.

Samtidig infart kan nyttjas för att genomföra möten snabbare (Nelldal, 2017). Det är en signalteknisk funktion som tillåter två mötande tåg att köra in på en driftplats samtidigt. Detta skiljer sig från ett konventionellt tågmöte, vilket kräver att det ena tåget står helt stilla inne på driftplatsen för att det andra tåget ska kunna passera i motsatt riktning (Lundberg, 2020). Enligt gällande säkerhetsföreskrifter krävs skyddsavstånd eller skyddsväxlar med sidospår som vid eventuellt fel ska hindra de två tågen från att kollidera med varandra (Lundberg, 2016). Skyddsväxlar är ett krav på banor där linjehastigheten överstiger 160 km/h. Nelldal (2017) menar också på att skyddsväxlar kan vara en förberedande åtgärd inför byggandet av eventuellt dubbelspår.

Slutligen påverkas kapaciteten av linjens tillgänglighet. Enligt Stenström m. fl. (2016) korrelerar tillgänglighet positivt med kapacitet, där hög tillgänglighet sammanfaller med hög kapacitet och låg tillgänglighet med låg kapacitet. Bristfälligt förebyggande underhåll kan resultera i trafikstörande fel som måste åtgärdas med avhjälpande underhåll (Söderholm m. fl., 2021), vilket i sin tur minskar den tillgängliga tiden för trafik.

2.3 Tillgänglighet

Genom begreppet tillgänglighet kan driftsäkerheten för ett system eller en komponent kvantifieras. Isermann (2006) definierar tillgänglighet som sannolikheten att ett system eller en komponent kommer att fungera som tilltänkt vid en viss tidpunkt t eller inom ett visst tidsintervall Δt . Vidare förklarar författarna att tillgänglighet således är det matematiska sambandet mellan tillgänglig tid och otillgänglig tid.

Beroende på syfte, driftmiljö samt vilken typ av data som finns tillgänglig kan detta matematiska samband formuleras på flera sätt. Isermann (2006) formulerar sambandet baserat på tillförlitlighetsegenskaperna hos ett system eller en komponent enligt,

$$T_I = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}, \quad (1)$$

den $MTBF$ är den genomsnittliga drifttiden mellan fel och $MTTR$ är den genomsnittliga tiden att reparera. Detta kan kallas *inbyggd tillgänglighet* (T_I) och ger teoretiskt maximala tillgängligheten under perfekta förhållanden där endast det tekniska systemets egenskaper beaktas. Författaren menar att det representerar den maximala potentiella tillgängligheten för systemet om det inte fanns några fel eller driftstopp. Detta tillvägagångssätt har nyttjats praktiskt av exempelvis Nilsson och Bertling (2007) och många fler.

Ur ett större perspektiv som även beaktar underhållsorganisationens förmåga menar Stenström m. fl. (2016) att tillgänglighetsbegreppet också kan förklara; hur ofta fel uppstår, hur ofta avhjälpande underhåll krävs, hur ofta förebyggande underhåll utförs samt hur lång tid underhållet försenas på grund av inställetid. Författarna beräknar en *operativ tillgänglighet* (T_O) enligt,

$$T_O = \frac{MTBM}{MTBM + MMDT} = \frac{\text{tillgänglig tid}}{\text{tillgänglig tid} + \text{otillgänglig tid}}, \quad (2)$$

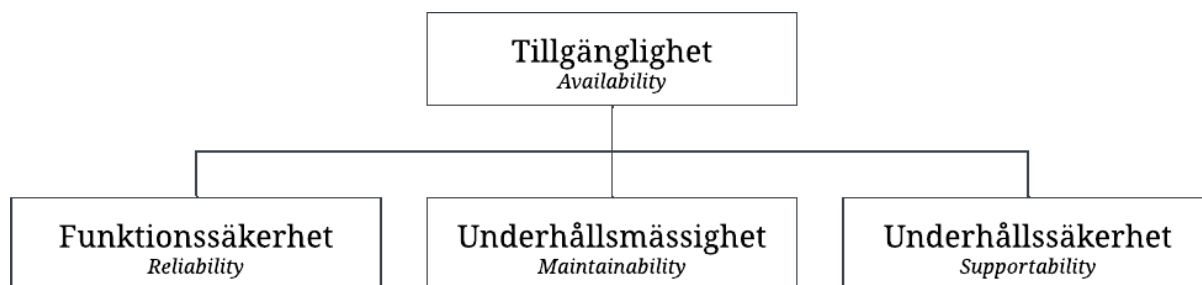
där $MTBM$ är medeltiden mellan underhåll och $MMDT$ medeltiden för underhåll. Författarna menar att styrkan i denna metod är att den tar hänsyn till faktiska driftförhållanden, förebyggande och avhjälpande underhåll samt inställetider och reparationstider

som påverkar systemets förmåga att utföra sin avsedda funktion. Det representerar tillgängligheten för systemet som användaren upplever under normal drift. T_O beräknas baserat på faktiska operationella data och prestandamått över en specifik period.

Inom förvaltningsprocessen för järnvägsinfrastruktur bör tillgänglighet hanteras inom ramverket RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Supportability), se Figur 1. Där betraktas tillgänglighet som en samlingsbeteckning för funktionssäkerhet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet (Swedish Standards Institute, 2004, 2017a). Ramverket syftar att skapa en balans mellan ett systems driftsäkerhet och dess livscykelkostnad, i relation till dess säkerhet och den uppgift som systemet är tilltänkt att utföra. Funktionssäkerhet och underhållsmässighet är egenskaper hos det tekniska systemet medan underhållssäkerhet anger underhållsorganisationens förmåga (Stenström m. fl., 2016).

Figur 1

Tillgänglighet, funktionssäkerhet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet.



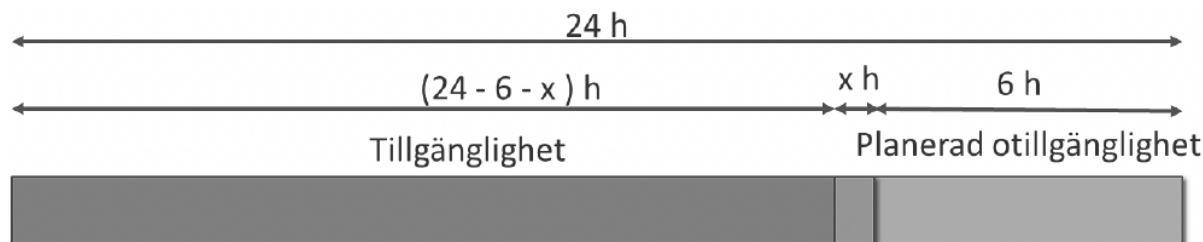
Kommentar. Från Swedish Standards Institute (2004) , s. 11.

För tillgångsförvaltning av järnvägsanläggningen förespråkar Stenström m. fl. (2016) att tillgänglighet beräknas som operativ tillgänglighet. Detta eftersom det visar den faktiska tillgängligheten med avseende på verkliga driftsfaktorer och stillestånd. Författarna kvantifierar begreppen *funktionssäkerhet*, *underhållsmässighet* och *underhållssäkerhet*. Funktionssäkerheten svarar på hur ofta ett funktionsfel sker och mäts i *tid till funktionsfel*. Underhållsmässigheten svarar på hur svårt det är att reparera ett funktionsfel och mäts i *tid för reparation*. Underhållssäkerheten svarar på hur snabbt underhållsorganisationen reagerar på ett funktionsfel och mäts i *inställelsetid*.

För svensk järnväg kan tillgänglig tid fördelas om 24 timmar per dygn alla dagar året om som 18 timmar planerad drift och 6 timmar planerat förebyggande underhåll (Trafikverket, 2020b). Matematiskt förklaras tillgängligheten enligt Figur 2, där den inte planerade otillgängligheten (x) dras från den planerade tillgängligheten.

Figur 2

Matematiskt samband mellan tillgänglighet och otillgänglighet.



2.4 Underhåll

Syftet med underhåll är att möjliggöra konstruerad prestanda hos ett system eller en komponent genom att säkerställa erforderlig funktionalitet under hela dess livslängd (Bertling, 2002). Författaren delar in underhållsarbetet i två typer av åtgärder, avhjälpande underhåll och förebyggande underhåll.

Akut avhjälpande underhåll utförs efter att ett fel har inträffat och identifierats, med avseende att återställa systemet eller komponenten till sin ursprungliga funktion (Bertling, 2002). När avhjälpande underhåll krävs är inte möjligt att planera. Det innebär att det ofta leder till nertid och förlorad produktionstid, vilket påverkar tillgängligheten negativt (Stenström m. fl., 2016). Söderholm m. fl. (2021) påpekar, i enlighet med Swedish Standards Institute (2000, 2017b), att allt avhjälpande underhåll inte behöver vara akut, utan i vissa fall kan skjutas upp till ett planerbart tillfälle.

Om underhållsprogrammet för förebyggande underhåll är korrekt utformat och tillämpat bör risken att akut avhjälpande underhåll krävs för att åtgärda ett fel som uppkommer på grund av normal degradering minimeras (Söderholm m. fl., 2021). Det eftersom ett

effektivt och ändamålsenligt förebyggande underhåll används för alla fel som bedömts kritiska då de påverkar säkerhet, driftsäkerhet eller kostnader. Vidare menar författarna att avhjälpande underhåll är rationellt att tillämpa för inte kritiska fel då det möjliggör att hela komponentens livslängd tas tillvara. Visst avhjälpande underhåll kan också skjutas upp till ett lämpligt tillfälle beroende på var i anläggningen och vid vilken tid det uppstår i förhållande till dess användning (Söderholm m. fl., 2021).

Förebyggande underhåll utförs i syfte att minska risken för framtida funktionsfel och är baserat på tillstånd eller tid, vilket gör det planerbart (Daily & Peterson, 2016; Shi m. fl., 2020). Förebyggande underhåll utförs inom förutbestämda tidsintervall eller enligt föreskrivna tillståndskriterier då systemet eller komponenten fortfarande är funktionellt. Stenström m. fl. (2015) menar att eftersom förebyggande underhåll är planerbart bör inte tillgängligheten påverkas negativt. Syftet med förebyggande underhåll är att maximera tillgängligheten och minimera kostnaden, utan att säkerheten försämras. Författarna menar att om kvaliteten på det förebyggande underhållet ökar, minskar risken för att akut avhjälpande underhåll kommer att krävas. Följden blir att tillgängligheten bör öka.

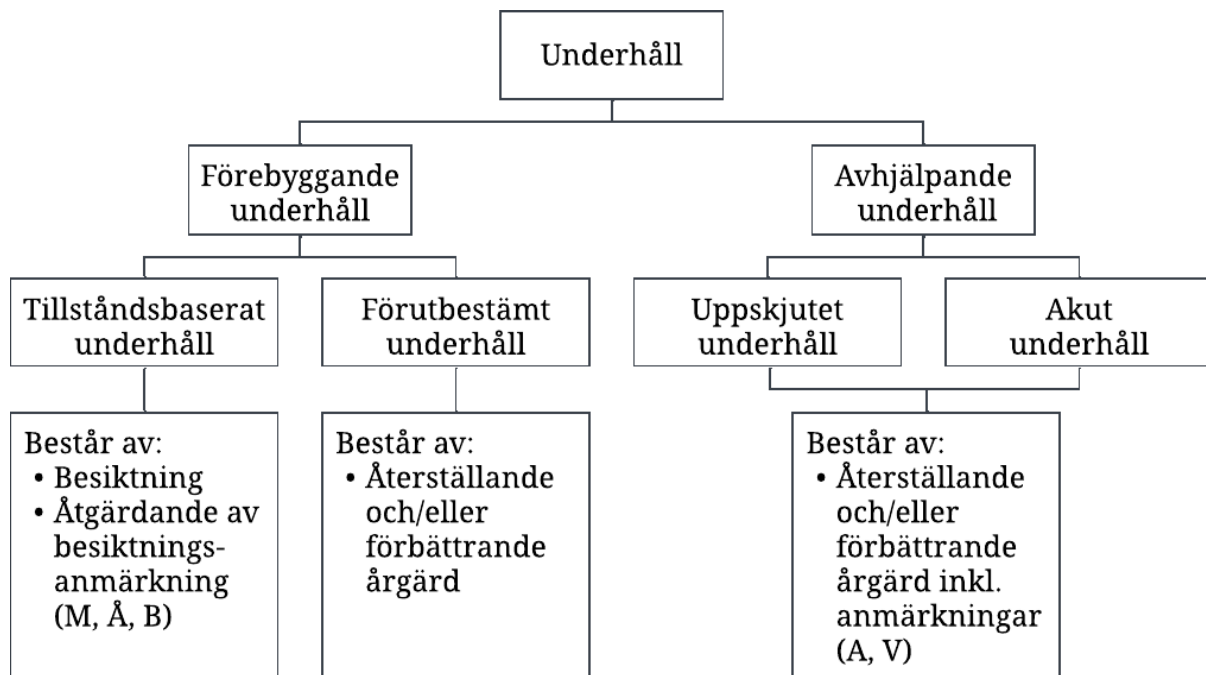
Hur en underhållsstrategi utformas och vad som ingår i densamma kan se olika ut beroende på organisation, driftmiljö samt vad för system eller komponent som ska underhållas (Bertling, 2002; Shi m. fl., 2020; Stenström m. fl., 2015). Exempelvis påverkar huruvida systemet eller komponenten är reparerbar eller inte, samt vilka risker som kan uppstå om systemet eller komponenten slutar fungera som tilltänkt (Bergman & Klefsjö, 2020; Bertling, 2002; Söderholm m. fl., 2021).

Inom järnväg krävs att allt underhåll planeras, både avhjälpande och förebyggande (Söderholm m. fl., 2021). Enligt författarna beror det i huvudsak på att då underhåll genomförs kan trafik inte bedrivas, vilket innebär att trafiksituationen först behöver hanteras innan underhåll kan genomföras. Trafikverkets underhållsstrategi bygger på gällande underhållsstandard, Swedish Standards Institute (2017b).

Figur 3 visar Trafikverkets underhållsstrategi. Förebyggande underhåll delas in som tillståndsbaserat underhåll och förutbestämt underhåll. Avhjälpande underhåll delas in i akut underhåll och uppskjutet underhåll.

Figur 3

Trafikverkets underhållsstrategi.



Kommentar. Trafikverkets underhållsstrategi, från *BVF 826 Definitioner av begrepp inom banhållningsprocessen*, baserad på Swedish Standards Institute (2017b).

I enlighet med grundläggande tillförlitlighetsteori anger Söderholm m. fl. (2021) att om tillståndsbaserat underhåll ska vara kostnadseffektivt behöver besiktningintervallen optimeras efter antalet besiktningar samtidigt som risken för funktionella fel som kan påverka säkerhet eller drift inte ska förekomma.

Akut avhjälpande underhåll påverkar vanligtvis alltid planerad trafik (Stenström m. fl., 2015). Uppskjutet avhjälpande underhåll kan påverka trafiken om det inte finns lämpliga tider att förlägga den avhjälpande underhållsåtgärden (Söderholm m. fl., 2021). Tillståndsbaserat underhåll baserat på besiktningar som resulterar i anmärkningar med en åtgärdstid på tre månader eller mer påverkar vanligtvis inte trafiken (Söderholm m. fl.,

2021). Det beror enligt författarna på att de tillgängliga tider för att genomföra underhållsåtgärder i anläggningen utifrån planerad trafik vanligtvis är tillräckliga.

Tillståndsbaserat underhåll med besiktning som resulterar i anmärkning som ska åtgärdas inom två veckor påverkar vanligtvis trafiken vid underhållets genomförande (Söderholm m. fl., 2021). Det beror enligt författarna på att tillgänglig ofrafikerad tid i anläggningen sällan är tillräcklig. En sådan anmärkning blir således ett exempel på uppskjutet avhjälpande underhåll. Tillståndsbaserat underhåll där en besiktning resulterar i en anmärkning som kräver omedelbart trafikstopp eller trafikomledning fram till att underhåll genomförs är ett exempel på akut avhjälpande underhåll där felet upptäcktes vid en besiktning (Söderholm m. fl., 2021). Författarna anser att de anmärkningar som upptäcks vid besiktning och behöver åtgärdas akut eller inom två veckor bör betraktas som symptom på ett bristfälligt förebyggande underhåll, om orsaken är normal degradering.

2.5 Livscykelkostnadsanalys

Woodward (1997) menar att traditionella metoder för kostnadsutvärdering oftast bara fokuserar på initiala kostnader och förbiser de långsiktiga effekterna av drift, underhåll och avveckling. På grund av detta förespråkar författaren nyttjandet av LCC-analys när olika investeringsalternativ ska jämföras.

LCC-analys är en metod för att beräkna och analysera kostnader som uppstår under hela livscykeln för exempelvis ett system, en produkt eller en anläggning (Bergman & Klefsjö, 2020; Nilsson & Bertling, 2007; Sherif & Kolarik, 1981; Woodward, 1997). LCC-analys härstammar från 1960-talet och den amerikanska försvarsindustrin där metoden nyttjades för att öka kostnadseffektiviteten vid upphandlingar (Sherif & Kolarik, 1981). Genom att betrakta alla kostnader under hela livscykeln och inte bara den initiala investeringskostnaden, kunde kostnadseffektiviteten maximeras. Syftet med LCC-analys är att optimera kostnadseffektiviteten vid en investering genom att ta hänsyn till alla kostnader som uppkommer över hela livscykeln (Woodward, 1997) vilket ger en helhetssyn

på ett investeringsbeslut (Sherif & Kolarik, 1981).

LCC-analys tar hänsyn till alla kostnader som kan uppstå under en produkt eller en anläggnings livscykel. Enligt Bergman och Klefsjö (2020) innefattar detta exempelvis kostnader för projektering, inköp, installation, drift, underhåll och avveckling. Woodward (1997) menar att kostnader för exempelvis drift och underhåll i flertalet fall kan överstiga ursprungliga inköps- och investeringskostnader. På grund av detta anses LCC-analys lämpa sig för jämförelse mellan olika investeringsalternativ i kapitalintensiva branscher där systemen har långa livslängder (Woodward, 1997).

Byggande, underhåll och uppgraderingar av järnvägsinfrastruktur är kapitalintensivt och komponenterna har lång livslängd (Patra, 2007). På grund av detta förespråkas nyttjandet av LCC för bedömning och jämförelse av investeringar inom järnvägsinfrastruktur av exempelvis Nissen (2009b) och Patra m. fl. (2008). Nissen (2009b) menar att LCC-analys visualiserar kostnader i olika livscykelstadierna på komponentnivå vilket gör det möjligt att analysera vad som driver vilka kostnader.

2.6 Nuvärdesberäkning

Inflation och ränta gör att framtida kassaflöden inte återspeglar nuvarande kassaflöde (Brealey m. fl., 2019). Nuvärdesmetoden möjliggör diskontering av framtida kassaflöden till en nuvarande tidpunkt. Genom att räkna om alla framtida betalningar till en given tidpunkts penningvärde kan nuvärdet NV beräknas enligt,

$$NV = CNV(n, r)_f \Leftrightarrow C(1 + r)^{-n}, \quad (3)$$

där C är kassaflödet, r är kalkylräntan och n är livslängden.

3 Metod

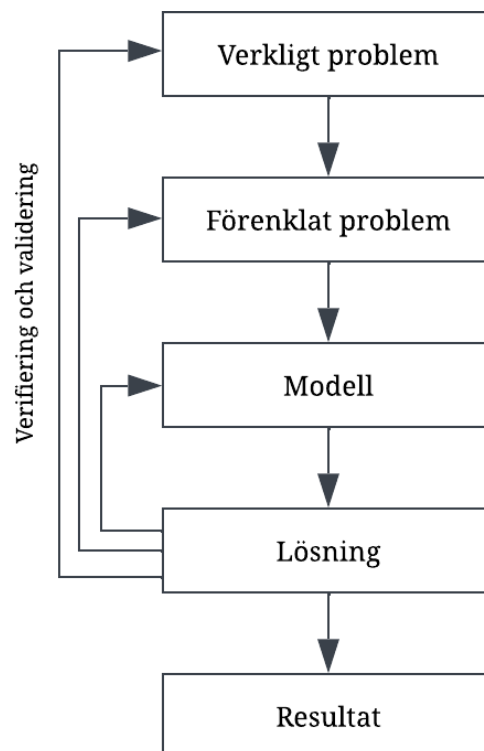
Detta kapitel beskriver den metod som nyttjas för att besvara examensarbetes frågeställning och syfte. Först presenteras ansats och design, sedan LCC-modell, den insamlade datan och slutligen förs en diskussion kring reliabilitet och validitet.

3.1 Undersökningsansats

Examensarbetet har genomförts enligt traditionell metod för kvantitativ matematisk modellering inom operationsanalys. Operationsanalys är ett tvärvetenskapligt vetenskapsområde där analytiska metoder nyttjas för att möjliggöra grundade beslut i komplexa situationer (Lundgren m. fl., 2008). Det primära syftet med operationsanalys är att tillhandahålla kvantitativa verktyg och metoder för att lösa beslutsproblem effektivt. Lundgren m. fl. (2008) tillhandahåller ett angreppssätt för operationsanalytisk metod baserat på en process i fem huvudsakliga steg, se Figur 4.

Figur 4

Schematisk bild av operationsanalytisk metod.



Kommentar. Från Lundgren m. fl. (2008) , s. 9.

Genomförandet av examensarbetet baserades på denna modell, anpassat av författaren till arbetes egen kontext. En operationsanalytisk metod nyttjades framför andra metoder eftersom syftet med detta examensarbete var att ta fram en kvantitativ jämförelse för ett antal olika alternativ för införandet av samtidig infart inom järnväg. Detta i sin tur syftade att bidra till ökad kunskap om tillämpningen av LCC inom tillgångsförvaltningen av järnvägsinfrastruktur.

För samtliga beräkningar har försiktighetsprincipen beaktats. Det innebär att alla tider och kostnader har skattats avrundade uppåt, vilket ger en högre säkerhet. All LCC-modellering är genomförd i kodspråket R och finns att tillgå från författaren på begäran.

3.2 Undersökningsdesign

Som en del i den första fasen av Lundgren m. fl. (2008) arbetsätt formulerades det verkliga problemet inom ramarna för en fallstudie. Patel och Davidson (2019) menar att en fallstudie passar sig väl vid ingenjörsmässig undersökning, där operationsanalys ingår. En fallstudie genomförs då ett enskilt fall ska undersökas och anses relevant då en fråga innehåller antingen *hur* eller *varför* (Patel & Davidson, 2019; Yin, 1989). Fallstudie som design är också relevant då syftet med studien är att visa på dynamiken i en enda specifikt definierad miljö (Eisenhardt, 1989). Detta möter upp mot examensarbetets frågeställning och syfte, vilket var att visa på *Hur kan alternativa tekniska lösningar för funktionen samtidig infart inom järnväg jämföras med varandra genom livscykelkostnadsanalys?*, för att öka kunskapen om tillämpningen av LCC inom tillgångsförvaltningen av järnvägsinfrastruktur. Det enskilda fallet förklarades noggrant och med tydlighet eftersom det för en fallstudies trovärdighet är väsentligt att visa hur något är (Patel & Davidson, 2019).

Avsikten med fallstudien var att studera hur samtidig infart hade kunnat införas på en driftplats på Malmbanan. På grund av komplexiteten i den typ av anläggning krävdes förenklingar för att möjliggöra kvantifieringar. Fallet ställes upp som ett fiktivt referens-

fall, baserat på generaliseringar av nuläget på Malmbanans driftplatser. Anledningen till att ett fiktivt referensfall nyttjades istället för en faktisk driftplats var de stora skillnader som finns mellan olika fall, samt att även det enskilda fallet hade stor komplexitet. Nyttjandet av ett fiktivt referensfall bedömdes även ge högre generaliserbarhet.

I arbetets andra fas formulerades ett förenklat problem med det fiktiva referensfallet som grund. Tre huvudsakliga alternativ på teknisk lösning presenterades, utöver ett jämförelsealternativ. De olika alternativen baserades på insamlad sekundärdata om tillgänglighet, kapacitet och underhåll. Problemets väsentliga beståndsdelar identifierades och inkluderades, det som bedömdes försumbart exkluderades.

I den tredje fasen beräknades LCC för de framtagna alternativen. För beräkningarna nyttjades en vedertagen metodik för LCC-kalkyl, delvis av författaren anpassad efter givet ändamål, se Kapitel 3.3. Ytterligare förenklingar genomfördes med hänsyn till tillgänglig data.

Den fjärde fasen inkluderade verifiering, validering och utvärdering. Genom sådant resonemang menar Lundgren m. fl. (2008) att resultatet tillförlitlighet stärks. Lösningen verifierades utifrån den modell som formulerats. Modellen validerades efter hur väl den representerar det lösta problemet. En känslighetsanalys genomfördes för att utvärdera enskilda parametrars inverkan på lösningen.

I den femte och sista fasen presenterades resultatet. Slutsatser formulerades och resultatet diskuterades utifrån metodval och förenklingar. Styrkor och svagheter belystes samt att praktiskt och vetenskapligt bidrag framfördes.

3.3 Modell för livscykelkostnadsanalys

Ett systems eller en komponents livscykel kan enligt Swedish Standards Institute (2004) delas in i sex faser, *1. koncept och definition, 2. design och utveckling, 3. tillverkning, 4.*

installation, 5. *drift och underhåll* och 6. *avveckling*. Steg 1-3 är det arbete som leverantören redan genomfört. Dessa kostnader betalar infrastrukturägaren för som en del i inköpskostnaden. I detta examensarbete nyttjas en förenklad modell i tre steg anpassad för en järnvägsanläggning enligt, 1. *investering*, 2. *förvaltning* och 3. *avveckling* med stöd i Swedish Standards Institute (2004) och från Nissen (2009b) och Stenström m. fl. (2015). Kostnader för investering i logistikstöd, underhållsutbildning och investering i underhållsutrustning hanteras inte och behandlas som noll.

Anläggningens livscykelkostnad beräknas genom att summera investeringskostnad ($LCCI$), förvaltningskostnad ($LCCF$) och avvecklingskostnad ($LCCA$) enligt,

$$LCC = LCCI + LCCF + LCCA. \quad (4)$$

Investering inkluderar projektering, inköp och installation. Förvaltning inkluderar drift och underhåll. Avveckling är den kostnad som uppkommer för att avyttra anläggningen då dess livslängd är uppnådd. Investeringskostnaden placeras i år noll. Förvaltningskostnaden är ett snitt som summeras på årsbasis och multipliceras med nuvärdesfaktorn $NV(n, r)_f$. Detta ger nuvärdet för summan av LCC för varje år. Dessa kostnader summeras sedan över anläggningens livslängd för att ge total LCC. Avvecklingskostnaden placeras i livslängdens sista år och multipliceras med nuvärdesfaktorn för det giva året.

Investeringskostnaden ($LCCI$) ges av,

$$LCCI = LCCI_P + LCCI_{Inv} + LCCI_{Ins}, \quad (5)$$

där $LCCI_P$ är projekteringskostnaden, $LCCI_{Ink}$ är inköpskostnaden och $LCCI_{Ins}$ är installationskostnaden. Förvaltningskostnaden $LCCF$ ges av,

$$LCCF = LCCF_D + LCCF_U, \quad (6)$$

där $LCCF_D$ är driftkostnaden och $LCCF_U$ är underhållskostnaden. Kostnaden för underhåll $LCCF_U$ är summan av kostnaden för avhjälpande underhåll K_{AU} , för förutbestämt periodiskt underhåll K_{FPU} och kostnaden för tillståndsbaserat underhåll K_{TU} enligt,

$$LCCF_U = K_{AU} + K_{FPU} + K_{TU} \quad (7)$$

Kostnaden för avhjälpande underhåll K_{AU} beräknas enligt,

$$K_{AU} = \sum_{n=1}^i \lambda_i (K_P \times \bar{n}_U \times (2 \times MLL_{ik} + MRT_{ik}) + \bar{m}_U + \bar{m}_D) + K_O \times tmf_i. \quad (8)$$

Kostnaden för förutbestämt periodiskt underhåll K_{FPU} beräknas enligt,

$$K_{FPU} = \sum_{n=1}^i z_i \times (K_P \times \bar{n}_U \times (2 \times MLL_{ik} + MRT_{ik}) + \bar{m}_U + \bar{m}_D). \quad (9)$$

Kostnaden för tillståndsbaserat underhåll K_{TU} beräknas som summan av besiktningar K_B och åtgärdade av icke akuta anmärkningar $K_{\hat{A}}$ enligt,

$$K_{TU} = K_B + K_{\hat{A}}, \quad (10)$$

med,

$$K_B = \sum_{n=1}^i \sum_{n=1}^j q_{ij} \times (2 \times MLL_{ik} + BT_j) \times \bar{n}_B \times K_P \quad (11)$$

och,

$$K_{\hat{A}} = \sum_{n=1}^i \gamma_i \times (K_P \times \bar{n}_U \times (2 \times MLL_{ik} + MRT_{ik}) + \bar{m}_U + \bar{m}_D). \quad (12)$$

λ_i är felfrekvensen för avhjälpande underhåll per anläggningstyp i . γ_i är felfrekvensen för åtgärdade av icke akuta anmärkningar per anläggningstyp i . z_i är antalet tillfällen förutbestämt periodiskt underhåll genomförs per anläggningstyp i . q_{ij} är antalet besiktningar per anläggningstyp i och besiktningstyp j . K_P är kostnaden för en personaltimme, \bar{n}_U är medelantalet personal som utför underhåll och \bar{n}_B är medelantalet personal som besiktar. MLL_{ik} är medelinställelsetid för anläggningstyp i , MRT_{ik} är medeltiden för reparation för anläggningstyp i och B_j är medeltiden för besiktning beroende av besiktningstyp j . För MLL_{ik} och MRT_{ik} är k den typ av åtgärd eller reparation som genomförs. \bar{m}_U är medelkostnaden för utrustning och \bar{m}_D är medelkostnaden kostnaden för reservdelar.

Avvecklingskostnaden $LCCA$ beräknas enligt,

$$LCCA = K_A - I_A \quad (13)$$

där K_A är kostnaden för avvecklingen och I_A är intäkten för eventuellt andrahandsvärde.

3.4 Primärdata

Primärdata i form av underhållsdata och besiktningsdata samlades in från Trafikverkets interna databaser *Ofelia* respektive *Bessy*. Datan gällde perioden 2015-01-01 till 2023-12-31 för Malmbanan (Riksgränsen - Boden), se Tabell 1. En översikt av Malmbanans bandelar ges i Bilaga A.

Tabell 1

Sammanställd primärdata.

	Tidsperiod 2015-01-01 till 2023-12-31
Funktionsfel totalt (st)	24 458
Tågförsenande fel (st)	5 707
Besiktningsanmärkningar (st)	50 672

Underhållsdatan innehåller samtliga inrapporterade akuta funktionsfel per anläggningstyp på Malmbanan under den givna tidsperioden, vilka kan vara trafikstörande eller inte. Reparationstid (RT), inställetid (LT) och merförsening (mf) finns inrapporterat. En sammanfattning av samtliga funktionsfel ges i Bilaga B och för tågstörande fel i Bilaga C. Besiktningsdatan innehåller samtliga inrapporterade besiktningsanmärkningar per anläggningstyp på Malmbanan under den givna tidsperioden. Dessa är kategoriserade beroende på besiktningstyp och typ av anmärkning (A, V, M, Å, B, Ö). En A-anmärkning behöver åtgärdas akut, en V-anmärkning inom två veckor, en M-anmärkning inom en till tre månader, en Å-anmärkning inom tre år, en B-anmärkning bör åtgärdas innan nästa besiktningstillfälle och en Ö-anmärkning bör åtgärdas vid lämpligt tillfälle. En sammanfattning av besiktningsdatan ges i Bilaga D.

3.4.1 *Urval av data*

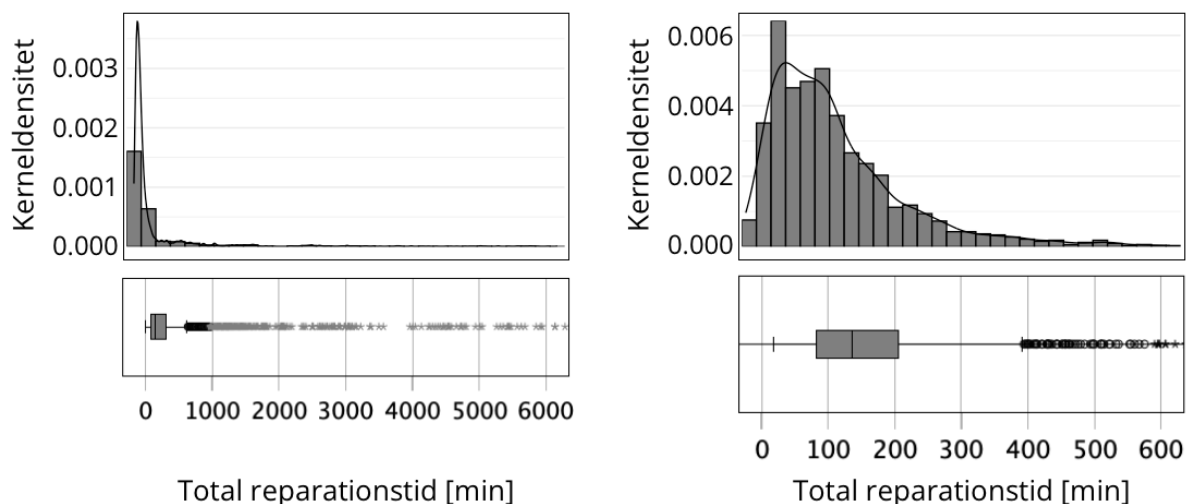
Den insamlade primärdatan nyttjades för att skatta framtida underhållsbehov. För avhjälpande underhåll ansågs tågförsenande funktionsfel bättre representera den faktiska tid det tar att utföra underhåll, jämfört med icke försenande funktionsfel. Detta då det vid tågförsenande fel ter sig rimligt att underhållet genomförs på snabbast och mest effektiva

möjliga sätt. Vidare registreras underhållstider ofta manuellt av exempelvis tågpersonal eller trafikledning, vilket innebär att de endast är ungefärliga värden. Detta innebar att datans trovärdighet försämras. Av denna anledning menar Stenström m. fl. (2015) att medelvärden istället kan nyttjas för att skatta RT och LT. Då denna typ av tider relaterade till underhåll ofta är lognormalfördelade kan det log-normala medelvärdet nyttjas (O'Connor & Kleyner, 1992).

Det log-normala medelvärdet är känsligt för extremvärden (O'Connor & Kleyner, 1992). Genom att avgränsa datan kan extremvärden exkluderas, vilket ger ett mer sanningsenligt medelvärde på RT och LT. Figur 5 nedan visar täthetsfunktionen för total reparationstid, summan av RT och LT, för spårväxlar på Malmbanan.

Figur 5

Täthetsfunktion, total reparationstid för spårväxlar på Malmbanan.



Kommentar. Till vänster: Data exkluderade enligt 95 % konfidensintervall. Till höger: Data exkluderade genom att begränsa LT och RT.

För avgränsning av data nyttjades ett angreppssätt framtaget av Stenström m. fl. (2015) som undersökt underhållstider på svensk järnväg. Författarna skattade RT och LT genom en avgränsning av tågförsenande funktionsfel som uppfyller: $5 < LT < 240$ minuter och $10 < RT < 600$ minuter. Detta ansågs fördelaktigt konfidensintervallet eftersom förfat-

tarna menade på att det gav ett mer sanningsenligt medelvärde på RT och LT. Av denna anledning skattades RT och LT för respektive anläggningstyp enligt de log-normala medelvärdet av tågförsenande funktionsfel enligt ovan nämna restriktioner från Stenström m. fl. (2015). Undantaget är ett antal fel som uteslutits eftersom de orsakat ovanligt långa tågförseningar.

Tågförseningar registreras av signalsystemet och tillförlitligheten bedömdes därför som hög. Tågförseningar inom ett 98 % konfidensintervall har beaktas. Det eftersom långa tågförseningar ofta innebär höga underhållskostnader, vilka i denna studie hade gett en felaktig bild av en anläggnings kostnader. Det ansågs rimligt att den enskilda uppbyggnaden av en anläggning för att möjliggöra samtidig infart inte påverkar risken för den typen av långa tågförseningar. Den typen av långa förseningar hade förmodligen skett oavsett valt alternativ för samtidig infart. Att undersöka den typen av längre fel anses dock intressant för hela järnvägens livscykel, men ryms inte inom det här examensarbets omfattning.

3.5 Sekundärdata

För att skapa en robust teoretisk referensram är insamlingen av sekundärdata ett väsentligt första steg. Den teoretisk referensramen byggdes upp av sex huvudsakliga ämnen; *trafikförutsättningar på enkelspår, kapacitet, tillgänglighet, underhåll, livscykelkostnad och nuvärdesberäkning*. Dessa sex ämnen ansågs relevanta för att skapa förståelse inom arbetets kontext. Vilka källor som inkluderades baserades på dess trovärdighet. Referensgranskade vetenskapliga artiklar från ansedda tidskrifter har använts i den utsträckning det varit möjligt. Dessa hittades via databaserna *Scopus*, *Google Scholar* och *Luleå universitets databasbibliotek*. På grund av arbetets praktiska och specifika natur har även standarder, konferensbidrag, doktorsavhandlingar och böcker använts. Originalkällor har använts då dessa varit tillgängliga. Denna målsättning, i kombination med att det vetenskapliga fältet kan anses gammalt sattes inte någon restriktion för publikationsår.

För att bygga upp den teoretiska referensramen nyttjades *nyckelordssökning*, *bakåtrullande snöbollssökning* och *framåtrullande snöbollssökning*. Bakåtrullande snöbollssökning innebär att en studie identifieras genom att granska de referenser som används av en redan lokaliserad källa. Framåtrullande snöbollssökning innebär att andra relevanta studier undersöks som hänvisar till den redan identifierade källan (Hiebl, 2021; Wohlin, 2014).

Hiebl (2021) menar på att en kombination av snöbollssökning och nyckelordssökning är en effektiv metod för att undersöka befintlig litteratur inom ett visst område. Litteratursökning genomfördes på engelska och de nyttjade nyckelorden var *railroad system*, *availability*, *railroad availability*, *railroad capacity*, *preventive maintenance*, *corrective maintenance*, *railroad maintenance*, *life cycle costing* och *net present value*

3.6 Reliabilitet och validitet

En studies reliabilitet syftar till studiens pålitlighet. Alltså hur väl andra med samma observationer ska kunna dra samma slutsatser (Bryman, 2018). Inom operationsanalytisk metod anses det viktigt att mäta och analysera data på ett sätt som genererar konsekventa och tillförlitliga resultat (Lundgren m. fl., 2008). Arbetet har genomförts efter ett protokoll framarbetat av Yin (1989). Detta protokoll innehåller följande fyra steg:

1. En inledning som innehåller de mål, problem och ämne som undersöks.
2. Tillvägagångssätt för att säkerställa vilka källor som använts och bibehålla hög tillförlitlighet.
3. Specifika frågor som undersökaren måste ha i åtanke under datainsamlingen.
4. God struktur och format.

Genom att tydliggöra hur arbetet genomförts stärks reliabiliteten. Detta eftersom tydlighet i genomförande förenklar för andra att med samma observationer också dra samma slutsatser (Yin, 1989). Vidare har extra fokus lagts på dokumentation av datainsamling och de nyttjade analytiska metoderna vilket stärker reliabiliteten.

Med validitet ämnas studiens giltighet, alltså hur väl studien mäter det som den är avsedd att mäta (Bryman, 2018). Validiteten i en studie kan säkerställas om det finns en överensstämmelse mellan verklighet och tolkning (Olsson & Sörensen, 2011). Inom operationsanalytisk metod är det viktigt att säkerställa att använda metoder och modeller är giltiga för att lösa det specifika problemet (Lundgren m. fl., 2008).

Arbetets interna validitet har stärkts genom tydliga definitioner av teorier och begrepp inom området, genom noggranna definitioner av variabler och mått samt genom noggrann validering och verifiering för att bekräfta att resultaten är korrekta och relevanta. Vad gäller extern validitet faller det sig omöjligt att anta att studiens resultat kan generaliseras utför sin givna kontext. Detta eftersom det är ett fall som har studerats vilket inte kan anses representativt (Eisenhardt, 1989).

4 Fallstudie

I detta kapitel presenteras en nulägesbeskrivning av de förutsättningar som finns på Malmbanan, samt hur tågmöten på enkelspår kan genomföras. Det ligger till grund för det referensfall som sedan presenteras. Slutligen föreslås fyra alternativa tekniska lösningar där samtidig infart implementeras i referensfallet, med olika metod och omfattning.

4.1 Nulägesbeskrivning Malmbanan

Malmbanan är en cirka 450 km lång enkelspårig bana. Hastigheter i normalhuvudspår upp till 135-160 km/h tillåts beroende på bandel. Banans största tillåta axellast (STAX) är 30, men mellan Kiruna och Riksgränsen tillåts STAX 32,5. Tåglängder upp till och med 750 meter tillåts. Avståndet mellan driftplatserna varierar mellan 7-13,5 km med undantag för Buddbyn och Holmfors där avståndet är kortare. För fullständig beskrivning av driftplatserna se Bilaga E.

Trafiken på Malmbanan delas upp i tre kategorier; malm-, gods-, och persontrafik, där LKAB:s malmtåg dominerar. När dessa tåg körs fullt lastade är de 750 meter långa och väger 8 600 ton. Högsta tillåtna hastighet för ett lastat malmtåg är 60 km/h, medan ett tomt tillåts köra 70 km/h. Även Boliden och Kaunis iron kör sina malmtåg på banan, men de är färre och lättare lastade än LKAB:s tåg. Banan trafikeras också av lättare lastade godståg och persontåg. Dessa tåg är kortare och kan köra fortare än vad malmtågen tillåts. Mellan Kiruna och Narvik körs cirka 24 malmtåg per dygn i båda riktningar och mellan Malmberget och Luleå cirka åtta malmtåg per dygn i båda riktningar (Johansson & Lundström, 2021). På sträckan mellan Boden och Kiruna körs tio persontåg per dygn och på sträckan mellan Kiruna och Riksgränsen körs fyra persontåg per dygn (Johansson & Lundström, 2021).

I stort sett hela banan har kapacitetsbrist. Enligt Trafikverkets basprognos har banan kapacitetsbrist med ett kapacitetsutnyttjande på minst 90 % under ett två timmars maxvärde (Trafikverket, 2020a, 2023a). Som referens innebär ett kapacitetsutnyttjande

över 80% ökad känslighet för störningar med förlängda res- och transporttider (Johansson & Lundström, 2021). Det finns begränsade möjligheter att öka trafikvolymen eller utföra långsiktigt underhåll, utan att påverka nuvarande drift negativt (Johansson & Lundström, 2021).

Enligt Johansson och Lundström (2021) beror kapacitetsbristen på flertalet faktorer. Eftersatt underhåll, tidvis svåra väderförhållanden och att stora delar av anläggningen har passerat sin tekniska livslängd påverkar tillgänglig kapacitet negativt. Banan trafikeras även med en trafiklast högre än den ursprungligen var dimensionerad för, vilket medför ytterligare slitage. Utöver detta är ungefär en tredjedel av banans driftplatser inte tillräckligt långa för att hantera möten som involverar de långa malmtågen. Sammantaget bidrar detta till att banan har stora brister i tillförlitlighet och punktlighet, samt låg robusthet mot störningar.

Malmbanan har signalsystemet ATC (Automatic Train Control) där kommunikation mellan signalsystem och fordon sker via baliser (signalplattor) som finns placerade i spåret. De innebär att informationen är punktformig och endast exakt då den registreras. Informationen hanteras i reläbaserades ställverk so finns placerade i anslutning till driftplatserna. Som en del i Nationell transportplan 2022-2033 ska signalsystemet på Malmbanan uppgraderas till ERTMS (European Rail Traffic Management System) (Johansson & Lundström, 2021), där kommunikationen istället baseras på radiosignaler. Det innebär att nya signalbesked kan lämnas kontinuerligt, vilket ger exaktare övervakning. För ERTMS krävs att istället datorbaserade signalställverk. Sträckan mellan Riksgränsen och Kiruna har påbörjats 2019, och projektet i sin helhet bedöms vara klart till 2029.

Johansson och Lundström (2021) föreslår flertalet åtgärder som kan bidra till att öka kapaciteten på Malmbanan. Genomgående för dessa kapacitetshöjande åtgärder är att förlänga driftplatser samt införandet av samtidig infart.

4.2 Tågmöten på enkelspår

I detta kapitel presenteras grunderna för konventionella tågmöten samt för tågmöten med samtidig infart.

4.2.1 Konventionella tågmöten

Enligt Trafikverkets kapacitetshandbok, (Lundberg, 2016), gäller följande vid ett konventionellt tågmöte på enkelspår. Det ena tåget behöver stå helt stilla inne på driftplatsen för att det andra tåget ska kunna passera i motsatt riktning. Efter att det först anländande tåget har stannat aktiveras ett tidrelä som ger ytterligare 90 sekunders fördröjning (Lundberg, 2020), vilket är en säkerhetsåtgärd för att minimera kollisionsrisken. Efter denna period kan tågväg läggas för mötande tåg, vilket innebär att det mötande tåget tillåts passera genom driftplatsen. När det mötande tåget har lämnat driftplatsen aktiveras relät igen, vilket ger ytterligare 90 sekunders fördröjning. Efter denna period tillåts det första tåget att åka vidare (Lundberg, 2020).

Enligt Anders Wahlberg, Järnvägsspecialist för Trafikverket kan ett konventionellt tågmöte ske på två sätt (Personlig kommunikation, 29 februari 2024). Antingen genom att det stillastående tåget står på det avvikande huvudspåret (mötesspåret) eller på normalhuvudspåret (genomgående spår). Banans största tillåtna hastighet (STH) avgör vid vilken hastighet det mötande tåget tillåts passera på normalhuvudspåret. I det andra fallet, vilket exempelvis uppstår om det första tåget är för långt för att rymmas på det avvikande huvudspåret, kommer det i stället att stå på normalhuvudspåret. Mötande tåg kommer då att passera driftplatsen på det avvikande huvudspåret. Växelns STH avgör i sådant fall vid vilken hastighet det mötande tåget tillåts att åka. Ur kapacitetssynpunkt förespråkas att det först ankommande tåget ställs på avvikande huvudspår. Detta eftersom den hastighet som tåg tillåts färdas på normalhuvudspåret är högre än vad som gäller för det avvikande huvudspåret. Hur långa tåg som kan mötas på en driftplats avgörs av det avvikande huvudspårets hinderfria längd. Det kortare av de två tågen behöver rymmas på det avvikande huvudspåret.

Om samtidig infart tillåts på driftplatsen försvinner väntetiden som ett konventionellt tågmöte innebär (Lundberg, 2020). På grund av detta går mötet avsevärt fortare, vilket innebär att kapaciteten på banan ökar. Det beror på att tågen då belägger den enkelspåriga sträckan under kortare tid. (Nelldal, 2017).

4.2.2 Tågmöten med samtidig infart

Om funktionen samtidig infart tillåts på en driftplats kan tågmöten i stället ske rullande då de mötande tågen tillåts köra in på driftplatsen samtidigt. För att samtidig infart ska tillåtas krävs tekniska lösningar på anläggningen som möjliggör funktionen. Dels krävs nya funktioner i signalsystemet och dels krävs mer utförliga säkerhetsåtgärder som ska hindra två tåg för att kunna kollidera med varandra. Vid samtidig infart krävs att tågen kör relativt sakta, jämfört med om det ena tåget hade stått still. Att väntetiden försvinner är det som gör att kapaciteten ändå ökar (Lundberg, 2020).

Samtidig infart kräver att nya signalobjekt registreras och att signalsystemet programmeras om. Logiken ändras, vilket gör att tågklararen tillåts lägga tågväg på driftplatsens båda spår samtidigt. Ett signalställverk med rälåteknik kan inte hantera dessa nya signalobjekt. Det krävs att ställverket utrustas med en lokal dator, alternativt att det uppgraderas till ett helt datorbaserat ställverk (A. Wahlberg, personlig kommunikation, 29 februari 2024).

Om linjen är utrustad med signalsystemet ERTMS kan vissa nya signalobjekt hanteras utan ytterligare uppgraderingar av den yttre anläggningen (A. Wahlberg, personlig kommunikation, 29 februari 2024). Det beror på att då ERTMS införs byts samtliga signalställverk till datorbaserade. Större förändringar kräver flyttning av skyltar och isolerskarvar. Alla förändringar i ERTMS systemet kräver dock omprogrammering och omgenerering av systemet. Stopplyktor eller andra optiska signaler byts ut mot målpunkter i systemet, men funktionen är likvärdig som en stopplykta. ERTMS möjliggör större

exakthet i övervakning av tågens positioner och hastigheter, vilket tillsammans med säkerhetsåtgärdernas omfattning påverkar vid vilken hastighet ett möte med samtidig infart kan ske. På banor där signalsystemet ska uppgraderas till ERTMS bedöms införandet av samtidig infart särskilt intressant eftersom det då blir mer kostnadseffektivt (A. Wahlberg, personlig kommunikation, 29 februari 2024).

Ur säkerhetssynpunkt krävs antingen att skyddsavståndet förlängs eller skyddsväxlar som fysiskt hindrar tåget på avvikande huvudspår från att komma in på normalhuvudspåret (Lundberg, 2016). Skyddsväxlar är av säkerhetsskäl ett krav på banor där linjehastigheten överstiger 160 km/h (A. Wahlberg, personlig kommunikation, 29 februari 2024). 100 meter skyddsavstånd tillåter samtidig infart i 10 km/h om banan har utrustad med ATC. Om ERTMS är infört tillåts en övervakningshastighet på 15 km/tim med 100 meter skyddssträcka.

Skyddsväxlar tillåter samtidig infart i 40 km/h oavsett signalsystem, dock menar A. Wahlberg på att skillnaden i hastighet mellan 15 km/h och 40 km/h inte är speciellt stor i praktiken (personlig kommunikation, 29 februari 2024). Den ökade hastigheten ger också upphov till ett större rörelsemängdsmoment, framför allt för ett fullastat malmtåg. Ur ett säkerhetsperspektiv blir bromssträckorna längre och risken finns att säkerheten minskar. Det krävs ytterligare säkerhetsutredningar för att avgöra innebörden av ett rullande möte i 40 km/h för fullastade malmtåg. Även fast 40 km/h tillåts är det tveksamt att malmtågen bör mötas i den hastigheten. Av denna anledning beaktas skillnaden mellan 15 km/h och 40 km/h som liten i detta arbete.

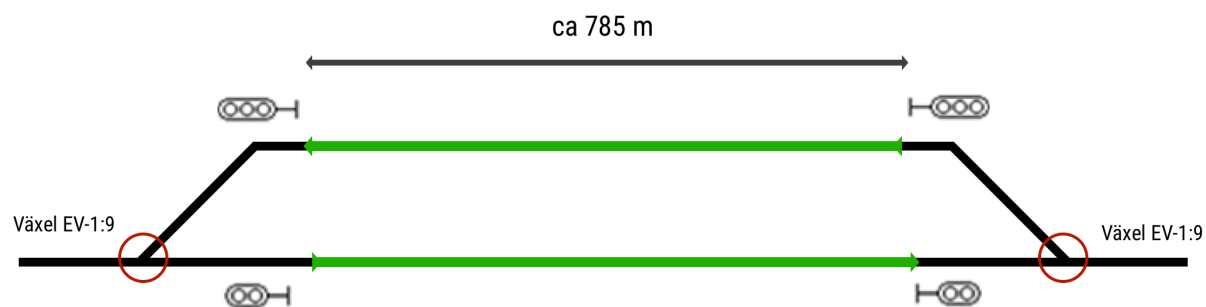
4.3 Referensfall

För att jämföra alternativa tekniska lösningar för hur samtidig infart kan införas på Malmabanans driftplatser har ett referensfall formulerats. Ett referensfall nyttjas eftersom det ger högre generaliserbarhet. Då det huvudsakligen är skillnaderna i hur samtidig infart kan införas som ska jämföras krävs att förutsättningarna på anläggningen ser lika

ut för de olika alternativen. I referensfallet behandlas en fiktiv driftplats benämnd Pilsjö, se Figur 6.

Figur 6

Referensfall, driftplats pilsjö.



Den hinderfria längden på normalhuvudspår och avvikande huvudspår är 785 meter. Det innebär att det vid denna driftplats är möjligt för två tåg som är 750 meter långa att mötas, detta dock utan samtidig infart. Spåret passerar driftplatsen i rak väst-öst riktning. Trafiken genom driftplatsen är relativt heterogen, men efterfrågan på att köra fler 750 meter långa tåg är hög. Driftplatsen har två EV-1:9 växlar vars tekniska livslängd är uppnådd. Denna äldre typ av växlar ger STH 40 km/h i avvikande huvudspår. Banans STH är 140 km/h, vilket innebär att skyddsväxlar inte är ett säkerhetskrav.

Från ett geotekniskt perspektiv ligger driftplatsen i rakspår, banunderbyggnaden är stabil och det finns en väganslutning som inte behöver flyttas. Spårstandarden är hög och signalställverket är reläbaserat. Banan kommer i närtid att utrustas med trafikledningssystemet ERTMS. Kostnaden för detta exkluderas i denna kalkyl då denna uppgradering finns inräknad i Nationell transportplan 2022-2033 (Johansson & Lundström, 2021).

När ERTMS implementeras byts signalställverken från reläbaserade till datoriserade, vilket innebär att införandet av samtidig infart blir mer kostnadseffektivt. Växelbyten krävs för att inte tillgänglighet och robusthet ska försämrats på grund av de uttjänta växlarerna. Som lösning till referensfallet föreslås ett jämförelsealternativ och tre huvudsakli-

ga alternativ, beskrivna som JA, A1, A2 och A3. Lösningarna baseras på kapacitets-, tillgänglighets- och underhållsteori, samt på personlig kommunikation med A. Wahlberg under perioden 8-10 April 2024.

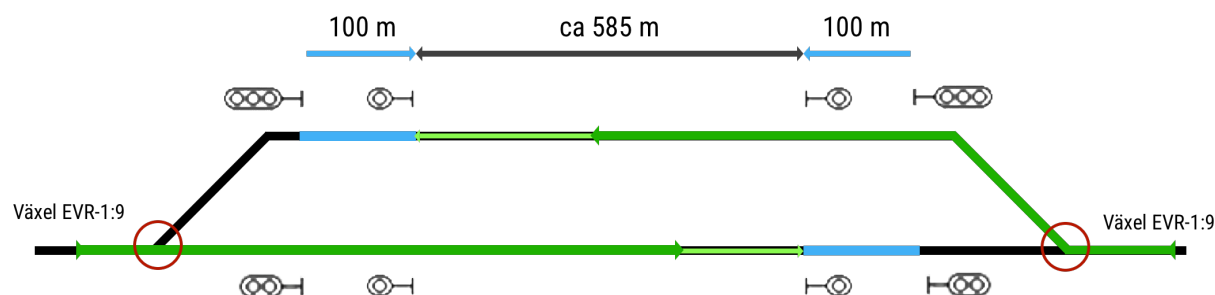
4.3.1 Alternativa tekniska lösningar

De fyra alternativen på tekniska lösning har olika utformning och design. Genensamt för samtliga alternativ är att de gamla EV-växlarna byts ut till EVR-växlar. En EVR-växel har en rörlig korsningsspets i stället för en fast, vilket innebär mindre slitage och högre STH jämfört en växel med fast korsningsspets (Nissen, 2009b). Det mindre slitaget innebär att anläggningens tillgänglighet kommer att öka, vilket i kombination med högre STH gör att kapaciteten ökar. Två varianter på EVR-växlar kommer att föreslås.

Jämförelsealternativet (JA) innebär att endast växlarna byts från EV-1:9 till EVR-1:9. STH ökar då från 40 km/h till 50 km/h i avvikande huvudspår. När ERTMS införs är det enligt A. Wahlberg som standard att utrusta driftplatser med en variant av samtidig infart som heter ESIK (*enkelspår, samtidig infart, kort tågväg*) (Personlig kommunikation, 29 februari 2024). 100 meter av det avvikande huvudspåret nyttjas som skyddsavstånd, vilket innebär att samtidig infart tillåts för tåg som är 100 meter kortare än avvikande huvudspårets hinderfria längd. JA beskrivs principiellt i figur 7. Eftersom växlarna är uttjänta anses detta vara den minsta krävda åtgärden för att inte tillgänglighet och robusthet ska försämrats.

Figur 7

Jämförelsealternativ: EVR-1:9 växlar och ESIK.

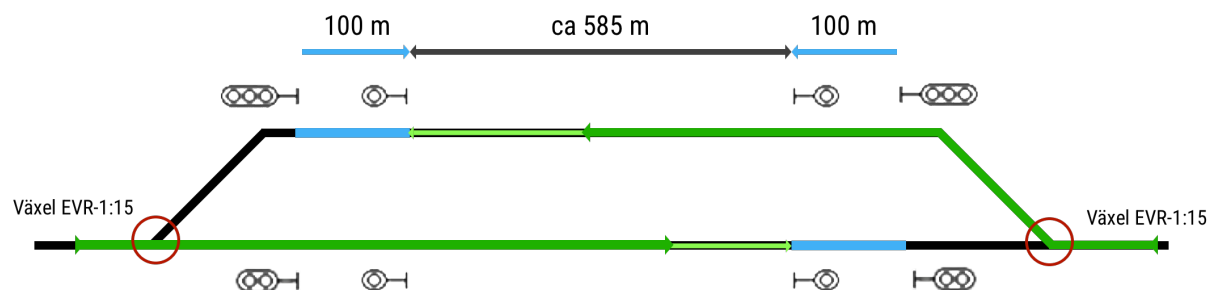


I detta fall tillåter driftplatsen således samtidig infart för tåg som är kortare 650 meter, detta i 15 km/h. Längre tåg kan fortfarande mötas, dock utan samtidig infart. Direkt bedöms kapaciteten öka eftersom samtidig infart tillåts för tåg upp till 650 meter, samt att de nya växlarna ger något snabbare konventionella tågmöten. Indirekt bedöms kapaciteten öka eftersom att de nya växlarna har högre tillgänglighet.

I det första alternativet (A1) föreslås att växlarna byts från EV-1:9 till EVR-1:15. En EVR-1:15 växel tillåter STH 80 km/h i avvikande huvudspår. Eftersom en EVR-1:15 växel har större växelvinkel än en EV-1:9 växel så krävs mer utrymme. Det innebär att en av växlarna behöver flyttas cirka 50 meter. Detta bedöms vara den avgörande skillnaden i investeringskostnad mellan A1 och JA. I och med uppgraderingen till ERTMS utrustas driftplatsen med ESIK, vilket ger samtidig infart för två kortare än 650 meter. Principiellt beskrivs A1 i figur 8.

Figur 8

Alternativ 1: EVR-1:15 växlar och ESIK.



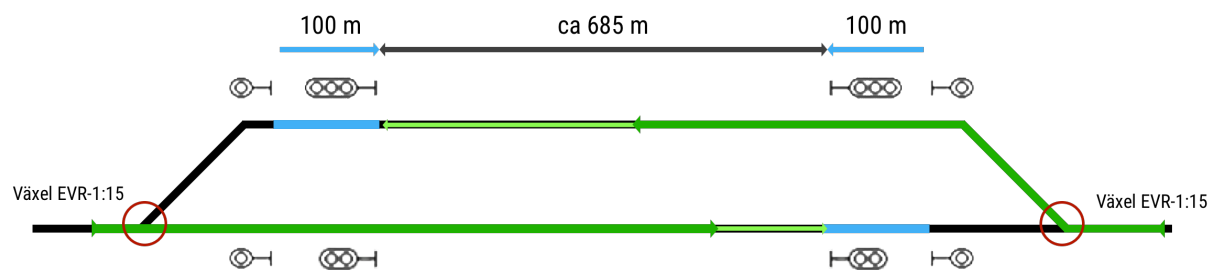
Kapaciteten bedöms öka på likande sätt som i JA, med skillnaden att EVR-1:15 växlarna ger snabbare konventionella tågmöten. Samtidig infart tillåts i 15 km/h.

I det andra alternativet (A2) föreslås införandet samtidig infart för tåg som är 750 meter långa. För detta krävs att det avvikande huvudspåret förlängs med 100 meter, vilket ger ett cirka 885 meter långt avvikande huvudspår. Således finns 100 meter skyddsavstånd och cirka 785 meter hinderfritt avvikande huvudspår, vilket innebär att samtidig infart kan tillåtas för tåg som är 750 meter långa. Denna lösning kallas ESIL (*enkelspår, samtidig*

infart, lång tågväg). Här placeras stopplykterna, i ERTMS representerade av målpunkter i systemet i slutet på spåret. Principiellt beskrivs A2 i Figur 9.

Figur 9

Alternativ 2: EVR-1:15 växlar, spårförlängning och ESIL.

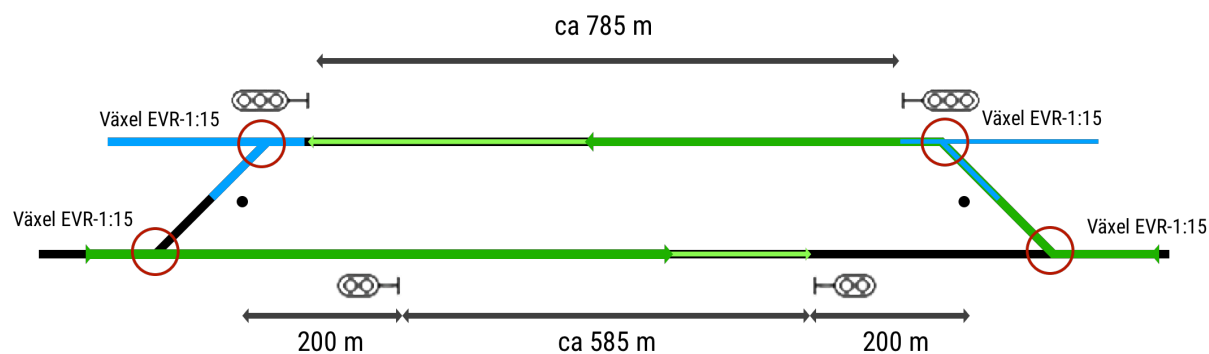


När detta genomförs byts båda växlar från EV-1:9 till EVR-1:15, likt i A1. Det ger en total spårförlängning med 150 meter. Skillnaden i kapacitet mot JA och A1 är att långa tåg tillåts mötas med samtidig infart. Investeringskostnaden ökar jämfört med JA och A1 eftersom avvikande huvudspåret behöver förlängas ytterligare.

I det tredje alternativet (A3) föreslås också att införa samtidig infart för tåg som är 750 meter långa. I detta fall görs det genom att utrusta driftplatsen med skyddsväxlar. En skyddsväxel hindrar ett tåg rent fysiskt från att återgå till normalhuvudspåret från det avvikande huvudspåret genom att växla ut det på ett tredje skyddsspår, enligt Figur 10.

Figur 10

Alternativ 3: Samtidig infart med skyddsväxlar



Samtidig infart tillåts eftersom skyddsväxeln hindrar tåget på det avvikande huvudspå-

ret från att oavsiktligt rulla ut på normalhuvudspåret. På normalhuvudspåret är det skyddsavståndet mellan signalen och växeln som möjliggör samtidighet. Enligt P. Köhler, kapacitetsanalytiker på Trafikverket, tillåter denna lösning att ett långt tåg på normalhuvudspåret kan hänga över växeln tills att det andra tåget kört in på det avvikande huvudspåret (Personlig kommunikation, 16 februari 2024). Skyddsväxlar tillåter samtidig infart i 40 km/h, vilket gör att mötet med samtidig infart kan gå att genomföra snabbare än vid alternativen med skyddsavstånd.

Likt A1 och A2 byts båda växlarna från EV-1:9 till EVR-1:15. Utöver detta byggs skyddsväxlar på huvudspåret, också EVR-1:15 växlar. Likt i A1 behöver den ena växeln i normalhuvudspår flyttas, vilket innebär en spårförlängning med cirka 50 meter. Den direkta kapacitetsökningen bedöms något högre än A2, eftersom samtidig infart kan tillåtas i 40 km/h. Spårväxlar kräver dock mer underhåll och har lägre robusthet än spår, vilket innebär att den indirekta kapaciteten blir lägre. Investeringskostnaden bedöms öka jämfört med JA, A1 och A2 då två ytterligare växlar krävs. A. Wahlberg menar på att detta alternativ bör ha en lägre teoretisk kapacitet än A2 (Personlig kommunikation, 16 februari 2024). Anledningen till att detta alternativ föreslås är eftersom linjehastigheten inte begränsas till 160 km/h och att byggandet av skyddsväxlar kan vara en förberedande åtgärd inför byggandet av eventuellt dubbelspår.

5 Resultat och analys

I detta kapitel presenteras de förutsättningar, avgränsningar och skattningar som nyttjats i LCC-analysen. Vidare ges resultatet av jämförelsen med LCC-analys av de fyra alternativa tekniska lösningarna inom referensfallet.

5.1 Livscykelkostnadsanalys

För infrastrukturägaren består investeringskostnaden av projektering, inköp och installation. Dessa kostnader skattades i Trafikverkets GKI-mall för investering, se Bilaga F. Då inköp och installation beaktas samtidigt i mallen summeras dessa även i LCC-kalkylen.

I driftkostnaderna för en driftplats ingår huvudsakligen övervakning, snöhantering och elförsörjning. I denna analys behandlas endast snöhantering för spårväxlar, vilket Nissen (2009b) menar på är den stora driftkostnaden. Övriga parametrar behandlas som lika oavsett alternativ och skattas därför som noll i jämförelsen. Snöhanteringen består huvudsakligen av snöröjning samt uppvärmning av växeln.

Kostnaden för snöröjning och uppvärmning är beroende av väder och snömängd, vilket innebär att endast en approximation kan göras. Om ett växelvärmesystem antas ha en maxeffekt på 30 kW och körs i snitt 180 dagar om året, 18 timmar om dagen, på full effekt, blir den årliga elförbrukningen 97 200 kilowatt per timme. Om elpriset är 40 öre per kilowattimme innebär det att den totala kostnaden för uppvärmningen blir cirka 38 000 SEK per spårväxel och år. Om kostnaden för snöröjning är 3 000 SEK per timme och att det krävs i snitt fyra timmar snöröjning per växel och år blir årskostnaden 12 000 SEK. Totalt blir då driftkostnaden för en spårväxel 50 000 SEK per år.

Underhåll delas in som förebyggande och avhjälpande. Det förebyggande underhållet utförs som förutbestämt underhåll och tillståndsbaserat underhåll. I det tillståndsbaserade underhållet ingår besiktningar av anläggningsdelarna samt åtgärdande av besiktningsanmärkningar. Förutbestämt underhåll genomförs enligt rådande föreskrifter för den givna

anläggningsdelen, se Bilaga G. Denna typ av underhåll bedöms relativt omfattande och skattas ta 120 minuter per tillfälle. Eftersom planerbarheten är hög skattas inställelsetiden som noll. Förutbestämt underhåll genomförs av två personer.

Antalet besiktningar som genomförs beror på en kombination av trafikvolym och banhastighet, se Bilaga H. Det görs två typer av besiktningar, underhållsbesiktning och säkerhetsbesiktning. En underhållsbesiktning bedöms ta 270 minuter och en säkerhetsbesiktning 210 minuter. Besiktningar utförs av en person. Underhållsbesiktningar beaktas för samtliga inkluderande komponenter. För säkerhetsbesiktning beaktas endast spårväxel eftersom de besiktas separat. För övriga anläggningsdelar besiktas ofta långa sträckor under samma tillfälle och det anses inte behövas något extra tillfälle på grund av de förändringar som de givna alternativen innebär. Sålunda skattas kostnaden för dessa som noll och endast de säkerhetsbesiktningar som härrör spårväxel beaktas i analysen.

Vid korrekt utformat förebyggande underhåll ska åtgärdandet av anmärkningar genomföras under otillgänglig tid för trafik som är planerad för underhåll, vilket gör att trafikstörningen blir liten. På grund av planerbarhet och att flera anmärkningar kan åtgärdas i anslutning till varandra skattas inställelsetiden som noll och åtgärdstiden som 30 minuter. Åtgärdandet av anmärkningar genomförs av två personer. Antalet åtgärdade anmärkningar skattas från antalet M-anmärkningar, B-anmärkningar och Å-anmärkningar från den historiska besiktningsdatan.

Om en besiktningsanmärkning har en prioritet att åtgärdas inom två veckor kan det dock ses som ett avhjälpande underhåll (A-anmärkningar och V-anmärkningar). Akuta fel, inrapporterade av exempelvis tågpersonal eller trafikledning, kräver också avhjälpande underhåll. Det avhjälpande underhållet genomförs för att återställa anläggningen till sin ursprungliga funktion, vilket ofta har stor påverkan på trafiken. På grund av detta uppkommer kostnaden för otillgänglighet. Detta kan ses som den kostnad infrastrukturförägaren blir skyldig samhället på grund av att denne inte kan erbjuda produkten att

köra tåg. Genomfört avhjälpande underhåll skattas från den historiska datan av inrapporterade funktionsfel samt A-anmärkningar och V-anmärkningar från besiktningsdatan. Genomsnittlig inställetid MLT_{ik} och genomsnittlig reparationstid MRT_{ik} skattas från det log-normala medelvärdet av tågförsenande funktionsfel för varje given komponent.

Då funktionen att köra tåg oftast ska bevaras avvecklas sällan en järnvägsanläggning helt. Snarare genomförs uppgradering, renovering och utbyte av komponenter. Livslängden av enskilda komponenter påverkas av trafikvolymen och de geotekniska förutsättningarna på den plats där anläggningen är belägen, vilket innebär att livslängden kan variera. Exempelvis kan spårväxlar rekonditioneras och flyttas till lågfrekvent trafikerade spår om de fortfarande bedöms funktionsdugliga. I denna jämförelse skattas avyttringskostnaden som fem procent av inköp- och installationskostnaden.

Investeringskostnaden placerades i år noll. Förvaltningskostnaden hanterades som lika för samtliga år. Tabell 2 ger de parametrar som skattas som konstanta. I ett verkligt fall varierar mest troligt dessa kostnader beroende på situation. Kostnad för otillgänglighet är baserad på Nissen (2009b) och omräknad till prisnivå i januari 2024.

Tabell 2

Konstanta parametrar, prisnivå i januari 2024.

Förklaring	Beteckning	Värde	Enhet
Livslängd	n	35	[år]
Kalkylränta	r	3,5	[%]
Medelantalet personal som utför underhåll	\bar{n}_U	2	[antal]
Medelantalet personal som utför besiktning	\bar{n}_B	1	[antal]
Personalkostnad per timme	K_P	1 500	[SEK/t]
Kostnad för otillgänglighet	K_O	880	[SEK]
Medelkostnaden för utrustning	\bar{m}_U	500	[SEK]
Medelkostnaden för reservdelar	\bar{m}_R	1 500	[SEK]

5.2 Resultat av LCC

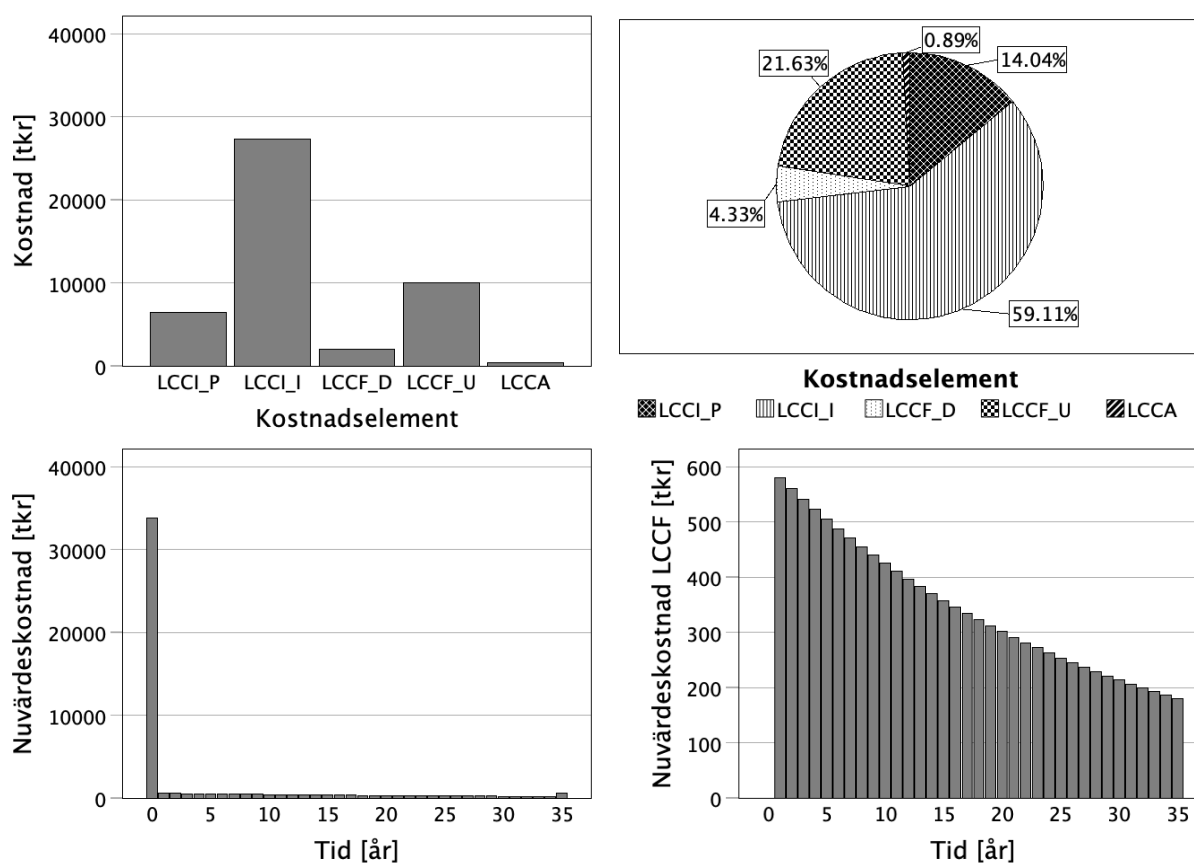
I detta delkapitel presenteras LCC-analysens kvantitativa resultat för jämförelsealternativet och de tre andra alternativen samt en jämförelse mellan alternativen.

5.2.1 Jämförelsealternativ

Den totala livscykelkostnaden för JA beräknades till cirka 46 mkr över livslängden 35 år. För LCC per kostnadselement, procentuell fördelning per kostnadselement, nuvärdeskostnad för varje år samt nuvärdeskostnad för förvaltningskostnaden LCCF per år, se Figur 11.

Figur 11

Resultat jämförelsealternativ.



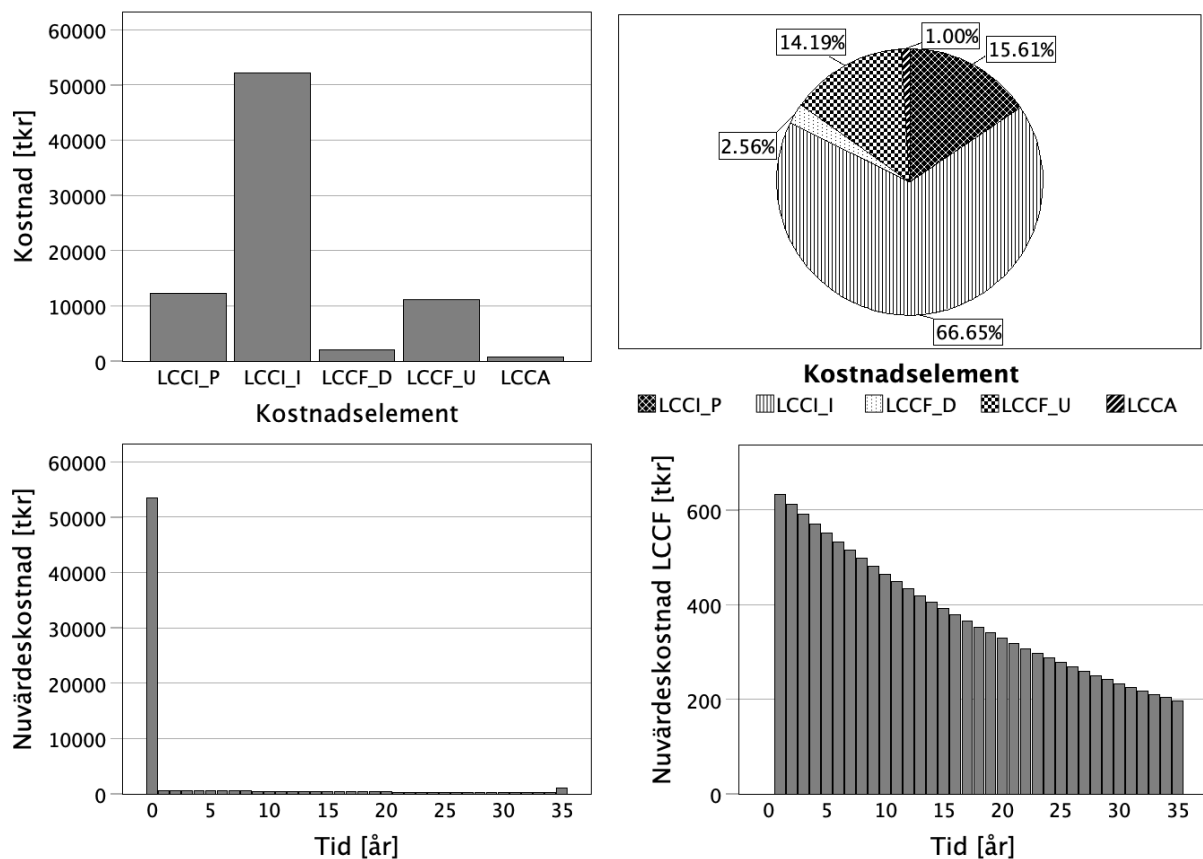
Kommentar. Resultatet av LCC för jämförelsealternativet (JA) enligt; livscykelkostnad per kostnadselement, procentuell fördelning, nuvärdeskostnad och nuvärdeskostnad för LCCF.

5.2.2 Alternativ 1: Endast växelbyte EV-1:9 till EVR-1:9

Den totala livscykelkostnaden för A1 beräknades till cirka 78 mkr över livslängden 35 år. För LCC per kostnadselement, procentuell fördelning per kostnadselement, nuvärdeskostnad för varje år samt nuvärdeskostnad för förvaltningskostnaden LCCF per år, se Figur 12.

Figur 12

Resultat alternativ 1.



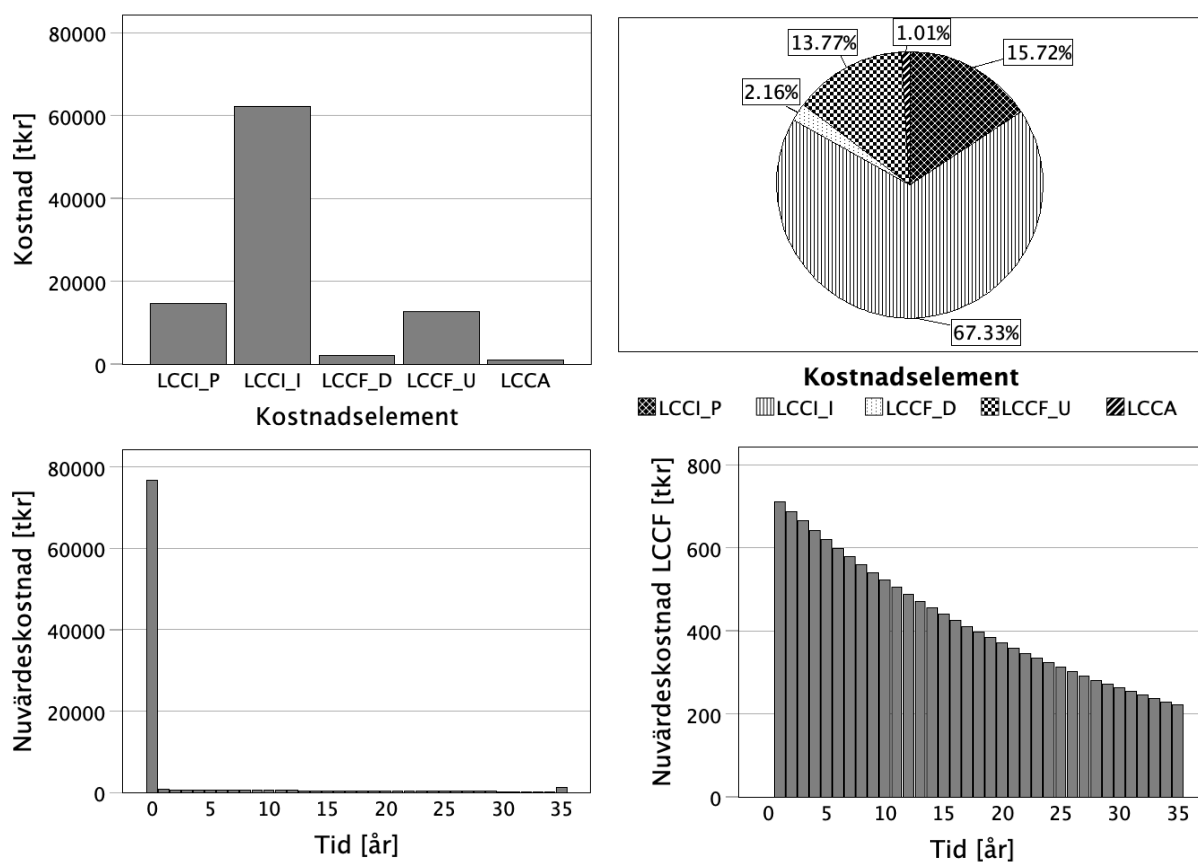
Kommentar. Resultatet av LCC för alternativ 1 (A1) enligt; livscykelkostnad per kostnadselement, procentuell fördelning, nuvärdeskostnad och nuvärdeskostnad för LCCF.

5.2.3 Alternativ 2: Fullständig samtidig infart med ESIL

Den totala livscykelkostnaden för A2 beräknades till cirka 92 mkr över livslängden 35 år. För LCC per kostnadselement, procentuell fördelning per kostnadselement, nuvärdeskostnad för varje år samt nuvärdeskostnad för förvaltningskostnaden LCCF per år, se Figur 13.

Figur 13

Resultat alternativ 2.



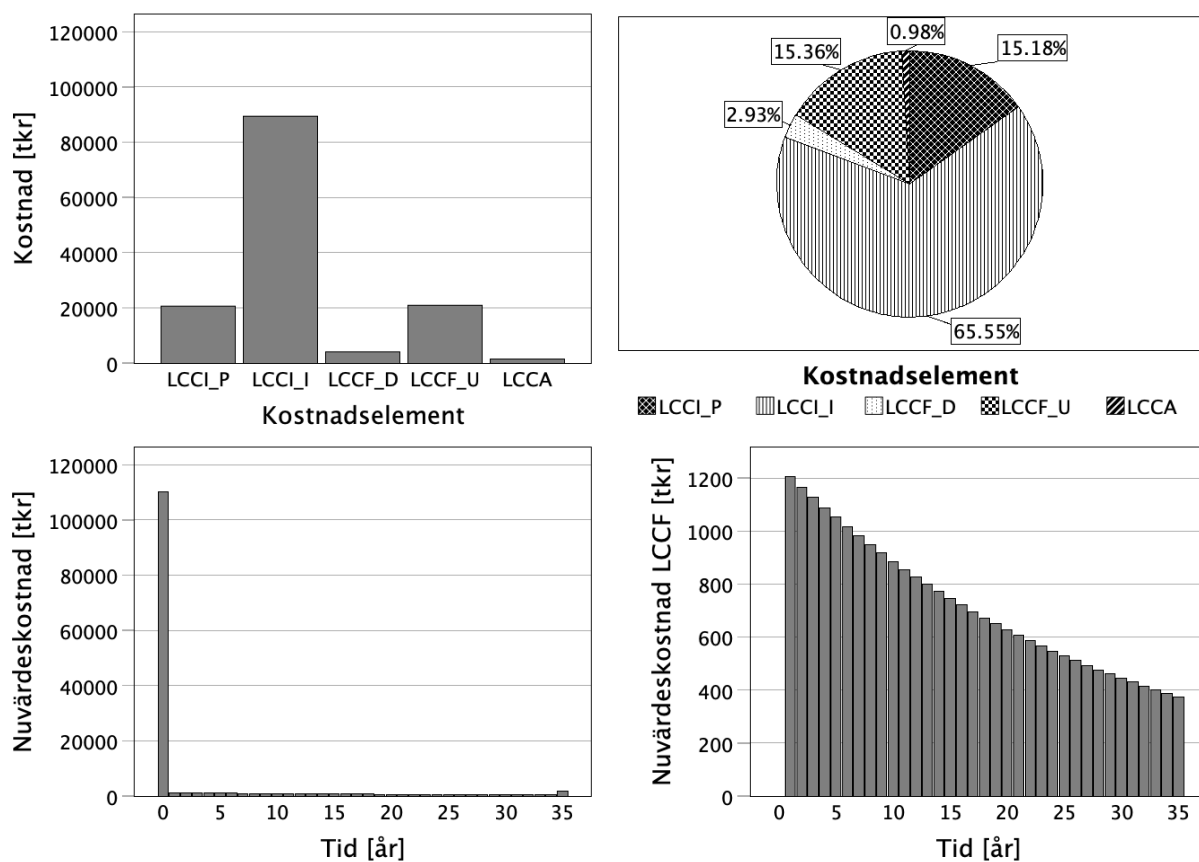
Kommentar. Resultatet av LCC för alternativ 2 (A2) enligt; livscykelkostnad per kostnadselement, procentuell fördelning, nuvärdeskostnad och nuvärdeskostnad för LCCF.

5.2.4 Alternativ 3: Fullständig samtidig infart med skyddsväxlar

Den totala livscykelkostnaden för A3 beräknades till cirka 137 mkr över livslängden 35 år. För LCC per kostnadselement, procentuell fördelning per kostnadselement, nuvärdeskostnad för varje år samt nuvärdeskostnad för förvaltningskostnaden LCCF per år, se Figur 14.

Figur 14

Resultat alternativ 3.



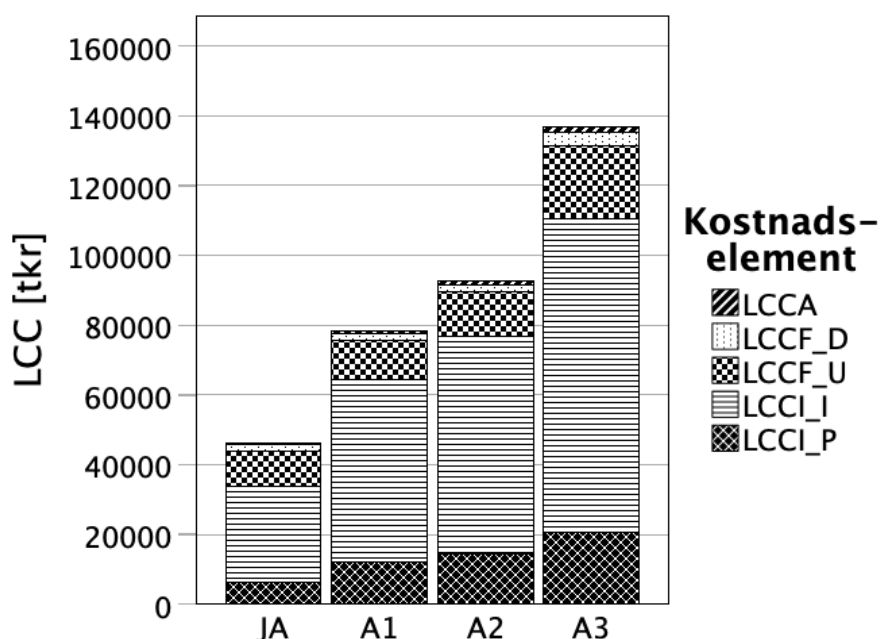
Kommentar. Resultatet av LCC för alternativ 3 (A3) enligt; livscykelkostnad per kostnadselement, procentuell fördelning, nuvärdeskostnad och nuvärdeskostnad för LCCF.

5.2.5 Sammanställning

Sammanfattningsvis visar Figur 15 den totala livscykelkostnaden för jämförelsealternativet samt de tre föreslagna alternativen. Resultatet visar att inköp och installation är den största kostnaden för samtliga alternativ. Underhållskostnaden förhåller sig relativt likvärt mellan JA, A1 och A2, vilket skiljer sig mot A3 där underhållskostnaden är betydligt högre.

Figur 15

Sammanställt resultat av LCC-kalkyl.



Procentuellt har jämförelsealternativet den högsta förvaltningskostnaden. Det är rimligt eftersom investeringskostnaden är lägre men förvaltningskostnaden är i paritet med A1 och A2, som har betydligt högre investeringskostnaad. Det ter sig också rimligt eftersom förvaltningskostnaden är direkt beroende av antalet spårväxlar. A3 har en högre förvaltningskostnad på grund av att det inkluderar fyra spårväxlar istället för två. Att andelen förvaltningskostnad är liknande som A1 och A2 beror på den högre investeringskostnaden. I ett verkligt scenario ter det sig dock rimligt att förvaltningskostnaden bör vara en något större andel av total livscykelkostnad för samtliga alternativ. Det beror på att modellen exkluderat ett antal faktorer som ansågs likvärdiga oavsett alternativ.

I relation till jämförelsealternativet kan ett antal reflektioner göras om resterande alternativ. Tabell 3 nedan visar hur samtliga kostnadselement för de tre alternativen förhåller sig till jämförelsealternativet. A1 är 69 % dyrare än JA, A2 är 100 % dyrare än JA och A3 är 196 % dyrare än JA.

Tabell 3

Procentuell ökning av LCC jämfört med JA.

Alternativ	$LCCI_P$	$LCCI_I$	$LCCF_U$	$LCCF_D$	$LCCA$	Totalt
A1	88 %	91 %	11 %	0 %	91 %	69 %
A2	124 %	128 %	27 %	0 %	128 %	100 %
A3	220 %	228 %	110 %	100 %	228 %	196 %

A2 och A3 bedöms ge den största kapacitetsökningen eftersom de tillåter införandet av fullständig samtidig infart. I relation till jämförelsealternativet ökar kostnaderna med 100% för A2 och med 196% för A3. A2 bör alltså ge en högre kostnadseffektivitet i relation till kapacitetsökning. Av denna anledning rekommenderas alternativ 2. Undantaget är om det finns planer på att i framtiden bygga dubbelspår på linjen, i sådant fall rekommenderas A3. Det grundar sig i att skyddsväxlar är en förberedande åtgärd inför byggandet av fullständigt dubbelspår (Nelldal, 2017). För att avgöra den samhällsekonomiska effektiviteten i den typen av investering krävs dock att en fullständig nyttokostnadsanalys genomförs för det givna projektet.

Att A3 tillåter samtidig infart i högre hastighet kan också beaktas. Dock ter det sig rimligt att det ökande behovet av underhåll bör innebära att kapaciteten ökar mindre med A3 jämfört med A2. Detta behöver dock undersökas vidare och erforderlig riskanalys behöver genomföras.

För att tillgänglighet och robusthet inte ska försämrats krävs att åtminstone jämförelsealternativet genomförs. Jämförelsealternativet rekommenderas om kapacitetsbehovet är lågt eller om tillräckligt kapital inte kan anskaffas. Det ter sig rimligt att andra projekt

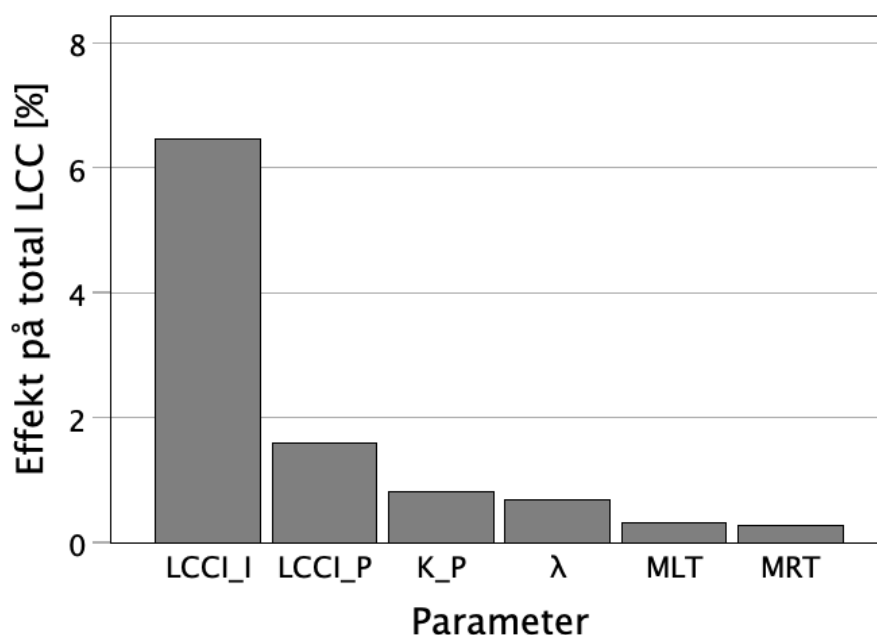
också konkurrerar om samma pengar. Eventuellt hade kapitalet kunnat nyttjas effektivare i dessa projekt. För att avgöra detta krävs dock att en fullständig nyttkostnadsanalys över samtliga investeringar i järnvägsinfrastruktur genomförs.

5.3 Känslighetsanalys

I känslighetsanalysen varierades samtliga parametrar med $\pm 10\%$ för att undersöka dess effekt på total LCC. Figur 16 visar de sex parametrar som har störst påverkan på total LCC. För övriga parametrar blir effekten på total LCC mindre än en procent, även fast de förändras med $\pm 50\%$.

Figur 16

Känslighetsanalys, parametrar förändrade med $\pm 10\%$



Känslighetsanalysen visade att kostnaden för inköp och installation ($LCCI_I$) hade störst inverkan på total livscykelkostnad. Det tedde sig också rimligt eftersom $LCCI_I$ stod för cirka 60 till 70 procent av alternativens livscykelkostnad. Att personalkostnad per timme (K_P) hade relativt stor inverkan på total livscykelkostnad tedde sig också rimligt eftersom samtliga kostnader för underhålls- och besiktningssåtgärder beror av den. Att även felfrekvensen för akut avhjälpande underhåll (λ) har relativt stor inverkan på total livscykelkostnad förvånade inte heller. Felfrekvensen ger upphov till kostnaden för

otillgänglighet, vilket gör avhjälpande underhåll till den dyraste typen av underhåll per tillfälle. Liknande resonemang kunde föras kring (*MLT*) och (*MRT*), vilka också härrör till det avhjälpande underhållet.

6 Diskussion

Resultatet från LCC-analysen verifierades utifrån den LCC-modell som har formulerats och resultatet anses korrekt baserat på indata, förenklingar och avgränsningar. Modellen anses väl representera det förenklade problemet. Resultatet ter sig rimligt eftersom en större förändring i nuvarande anläggning bör ge en högre investeringskostnad. Vidare anses det rimligt att förvaltningskostnaden för alternativ tre är dubbla den för de andra alternativen. Detta eftersom förvaltningskostnaden i modellen är direkt beroende av antalet spårväxlar och alternativ tre har det dubbla antalet spårväxlar jämfört med de andra alternativen.

Vad gäller modellens validitet utifrån det verkliga problemet bör ett antal faktorer beaktas. För det första anses investeringskostnaden ytterst specifik för hur det ser ut på den plats där anläggningen ska byggas. Exempelvis om driftplatsen ligger i anslutning till eller i en kurva kan det vara dyrt att förlänga spåret. En annan faktor som har stor inverkan på investeringskostnaden är hur vägförbindelserna ser ut. Som känslighetsanalysen visar har de kostnader som hanteras inom investering (projekt, inköp och installation) en stor inverkan på resultatet. Således innebär detta en lägre generaliserbarhet.

För det andra fastställdes ett antal förutsättningar som gemensamt för samtliga alternativ i referensfallet, exempelvis växlar, ursprunglig längd, befintlig spårstandard och geotekniska förutsättningar. Detta stärker generaliserbarheten något eftersom dessa förutsättningar således blir mer generella. Styrkan återfinns i att det möjliggör rättvisa jämförelser av olika alternativ, vilket också var arbetets huvudsakliga syfte. Svagheten är att det i vissa extremfall inte är möjligt att nyttja ett visst alternativ på grund av det specifika fallets kontext.

För det tredje hanteras förvaltningskostnaden i modellen som lika för varje år. Om ett fel förväntas ske vart annat år hanteras det som ett halvt fel per år i modellen. Vilket alltså innebär att förvaltningskostnaden beräknas som ett årligt snitt. På sådant sätt slås

kostnaden för exempelvis reinvesteringar ut som ett snitt över samtliga år och inte på det specifika året som de förväntas genomföras, vilket förenklar kalkylen. I ett verkligt scenario lär förvaltningskostnaden i stället variera från ett år till år i ett annat. Vidare skattades underhållstider för respektive anläggningstyp men inte beroende på feltyp. I ett verkligt scenario är det rimligt att olika typer av fel istället tar olika lång tid att reparera, vilket således ger upphov till varierande kostnader (Nissen, 2009a).

För det fjärde baserades livslängd och underhåll på kalenderår och inte på det tonnage som trafikerar banan. Det innebär att resultatet endast är applicerat på sträckor där trafiken ser liknande ut som på Malmbanan, där datan är insamlad ifrån. Detta eftersom underhållskostnaden bedöms starkt beroende av trafikvolym och tonnage (Nissen, 2009a).

Slutligen går det att föra en intressant diskussion kring att förvaltningskostnaden i detta fall inte överstiger investeringskostnaden, vilket exempelvis Woodward (1997) menar på är vanligt. Det kan bero på flertalet faktorer. Exempelvis beaktas inte hela förvaltningskostnaden i detta examensarbete, utan endast de kostnader som särskiljer de olika alternativen. I ett verkligt scenario ter det sig rimligt att förvaltningskostnaden är högre för samtliga alternativ. En annan faktor som bör beaktas är att det rör sig om mycket stora investeringar. Oavsett anses det intressant att beakta LCC eftersom exempelvis förvaltningskostnaden skiljer sig åt mellan de olika alternativen.

Sammantaget anses dessa resonemang relevanta ur både ett teoretiskt och ett praktiskt perspektiv. Det teoretiska perspektivet belyser arbetets vetenskapliga styrkor och svagheter i relation till dess reliabilitet och validitet. Vad gäller det praktiska perspektivet lyfter detta resonemang ett antal punkter vilka den praktiker som ska nyttja denna typ av metod bör beakta. Förutsättningar, avgränsningar och skattningar påverkar resultatet, vilket den som i en praktisk kontext ska implementera denna typ av arbetsätt bör ta hänsyn till. Modellens kan anses valid om den teoretiker eller praktiker som ska nyttja densamma har dessa resonemang i åtanke. Dessa behöver en förståelse för att modellen

inte visar verkligheten exakt som den är, vilket kan anses vara sant för samtliga modeller som syftat till att förklara verkligheten kvantitativt (Lundgren m. fl., 2008). Modellen anses med gott syfte kunna nyttjas för att framställa beslutsunderlag om beslutsfattarna också är införstådda i modellens indata, förenklingar och avgränsningar. Detta ligger i linje med examensarbetets frågeställning och syfte, vilket får anses uppfyllt.

7 Slutsats

Krävd funktion för kapacitetsförbättring har beskrivits. Alternativa tekniska lösningar för att realisera den krävda funktionen har beskrivits inom ramarna för ett referensfall. En LCC-analys har genomförts för att jämföra dessa alternativa lösningar med varandra, vilket kan ligga till grund för ett beslutsunderlag till val av alternativ lösning.

För det första visar examensarbetets fallstudie att olika alternativa lösningar kan rekommenderas beroende på ändamål och förutsättningar. Jämförelsealternativet rekommenderas om kapacitetsbehovet är lågt eller om ytterligare kapital inte finns tillgängligt. Alternativ 2 rekommenderas om maximal kapacitetshöjning eftersträvas. A3 rekommenderas om dubbelspår ingår i framtidsplanerna för den givna banan. A1 rekommenderas inte.

För det andra visar examensarbetet hur resonemang kring avgränsningar och datakvalitet kan föras. Det visar på hur praktiker kan resonera kring förutsättningar, avgränsningar och skattningar när en kontext ska kvantifieras.

Slutligen visar examensarbetet på ett arbetssätt som kan bidra till ökad förståelse för hur en högre samhällsekonomisk effektivitet kan uppnås. Genom att föreslå en metod för att jämföra olika investeringalternativ inom sin kontext kan verksamhetskraven i Myndighetsförordning (SFS-2007:515) på efterlevnad, hushållning, effektivitet och redovisning stärkas. Sammantaget svarar examensarbetet på:

Hur kan alternativa tekniska lösningar för funktionen samtidig infart inom järnväg jämföras med varandra genom livscykelkostnadsanalys?

Författaren gör inte i anspråk på att detta är det enda svaret som går att ge på frågeställningen. Examensarbetet visar dock på ett konkret och tillförlitligt tillvägagångssätt som svarar på presenterad problemformulering och syfte.

7.1 Framtida studier

Framtida studier rekommenderas genomföra en nyttokostnadsanalys där den förväntade kapacitetsökningen beräknas och ställs mot LCC för respektive alternativ. Då är det möjligt att avgöra vilket alternativt som är mest kostnadseffektivt. Det ger också svar på om den ökande hastigheten vid samtidig infart i A3 ger någon ökad kapacitet. Effekten på kapaciteten för de olika alternativa tekniska lösningarna kan exempelvis studeras i en simuleringsstudie. Det gör det även möjligt att undersöka ett större perspektiv och beakta en hel bandel istället för endast en driftplats. Vidare hade framtida studier kunnat undersöka om kapacitetsökningen kan värderas monetärt. En sådan värdering kan bidra till att avgöra om det är kostnadseffektivitet eller maximal kapacitet som bör eftersträvas när beslut fattas.

Framtida studier kan även komplettera LCC-analysen i detta arbete med en riskanalys, liksom Nissen (2009b) förespråkar. Utifrån ett riskperspektiv går det inte att säkerställa ett beslut som endast baseras på en LCC-analys. Inom det presenterade examensarbetet har inte någon riskanalys genomförts. Detta eftersom de föreslagna alternativen på teknisk lösning redan nyttjas inom svensk järnvägsanläggning. Vid byggande av denna typ av anläggning krävs dock att varje bygge utvärderas med riskanalys separat.

Följaktligen kan framtida studier inkludera osäkerhetsanalys baserat på statistisk försöksplanering, i likhet med Patra m. fl. (2008). Genom denna metod kan spridningseffekter, lägeseffekter och samspelseffekter belysas vilket ger en större förståelse för hur olika parametrar påverkar resultatet. Denna typ av analys kan ge en mer djupgående förståelse än vad en vanlig känslighetsanalys gör. Det beror på att statistisk försöksplanering också hanterar samspelseffekter mellan olika parametrar.

Slutligen kan det i framtida studier undersökas hur samtidig infart kan implementeras på driftplatser som har fler spår än ett. Det är av intresse eftersom det är ett relativt outforskat område där det finns möjligheter att genomföra kapacitetshöjande åtgärder.

Referenser

- Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M. Á., Tormos, P., & Lova, A. (2008). An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *44*(5), 774–806. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.04.001>
- Ahlm, N., & Kängevall, J. (2023). *Regeringsuppdrag att analysera åtgärder i transportinfrastrukturen i Norrbottens och Västerbottens län*. <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1797357/FULLTEXT01.pdf>
- Bergman, B., & Klefsjö, B. (2020). *Kvalitet från behov till användning* (6. utg.). Studentlitteratur AB.
- Bertling, L. (2002, 1. januari). *Reliability-centred maintenance for electric power distribution systems*. <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:9186>
- Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2019, 7. januari). *Principles of corporate finance*.
- Bryman, A. (2018). *Samhällsvetenskapliga Metoder* (3. utg.). Liber.
- Craig, A. J., Blanco, E., & Sheffi, Y. (2013). Estimating the CO2 intensity of intermodal freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *22*, 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.02.016>
- Daily, J., & Peterson, J. B. (2016, 14. december). *Predictive maintenance: How big data analysis can improve maintenance*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46155-7_18
- Dingler, M. H., Preston, J., Barkan, C. P. L., & Sameni, M. K. (2011). Profit-Generating capacity for a freight railroad. *Transportation Research Board 90th Annual Meeting* Transportation Research Board. <http://railtec.illinois.edu/CEE/pdf/Conference%20Proceedings/2011/Sameni%20et%20al%202011.pdf>
- Direktiv 2014/24/EU. *DIRECTIVE 2014/24/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 26 February 2014 on public procurement and repealing Directive 2004/18/EC*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014L0024>

- Dominković, D. F., Bačeković, I., Pedersen, A. S., & Krajačić, G. (2018). The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 1823–1838. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.117>
- Dwaikat, L. N., & Ali, K. N. (2018). Green buildings life cycle cost analysis and life cycle budget development: Practical applications. *Journal of Building Engineering*, *18*, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.03.015>
- Eisenhardt, K. M. (1989). Building Theories from Case Study Research. *The Academy of Management Review*, *14*(4), 532. <https://doi.org/10.2307/258557>
- Garberg, B., & Bengtsson, M. (2020). *Färdplan för överflyttning av godstransporter från väg till järnväg och sjöfart*. <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1438680/FULLTEXT01.pdf>
- Heinold, A. (2020). Comparing emission estimation models for rail freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *86*, 102468. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102468>
- Heinold, A., & Meisel, F. (2018). Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *65*, 421–437. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.003>
- Hiebl, M. R. W. (2021). Sample selection in Systematic Literature Reviews of Management Research. *Organizational research methods*, *26*(2), 229–261. <https://doi.org/10.1177/1094428120986851>
- Holmes, M. R., Dodds, R., & Frochot, I. (2019). At home or abroad, does our behavior change? Examining how everyday behavior influences sustainable travel behavior and tourist clusters. *Journal of Travel Research*, *60*(1), 102–116. <https://doi.org/10.1177/0047287519894070>
- Isermann, R. (2006, 1. januari). *Fault-Diagnosis systems*. <https://doi.org/10.1007/3-540-30368-5>
- ITF. (2023, 24. maj). *ITF Transport Outlook 2023*. <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>

- Johansson, P., & Lundström, A. (2021). *Bristanalys Narvik-Luleå Bristande kapacitet i järnvägssystemet, förslag på kapacitets och kvalitetshöjande åtgärder: slutrapport*. <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1573884/FULLTEXT02.pdf>
- Khan, S. A., Lundberg, J., & Stenström, C. (2020). Life cycle cost analysis for the top-of-rail friction-modifier application: A case study from the Swedish iron ore line. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 235(1), 83–93. <https://doi.org/10.1177/0954409720904255>
- Lai, Y., & Barkan, C. P. L. (2009). Enhanced Parametric Railway Capacity Evaluation Tool. *Transportation Research Record*, 2117(1), 33–40. <https://doi.org/10.3141/2117-05>
- Lindfeldt, A. (2015). *Railway capacity analysis: Methods for Simulation and Evaluation of Timetables, Delays and Infrastructure*.
- Lundberg, Å. (2016). *Kapacitetshandledning för järnväg*. Trafikverket.
- Lundberg, Å. (2020). *Trafikverkets modell för beräkning av linjekapacitet*. <https://bransch.trafikverket.se/contentassets/19d85cfc691b4df3bff6c851d4097623/2020/metoder/trafikverkets-modell-for-berakning-av-linjekapacitet-2020.pdf>
- Lundgren, J., Rönnqvist, M., & Värband, P. (2008). *Optimeringslära* (3. utg.). Studentlitteratur.
- Lundström, F., Söderström, U., Backman, M., & Mattisson, J. (2023). *Järnvägens kapacitetsutnyttjande 2022 (Nr TRV 2022/78242)*. <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1734939/FULLTEXT02.pdf>
- Marchet, G., Melacini, M., & Perotti, S. (2014). Environmental sustainability in logistics and freight transportation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 25(6), 775–811. <https://doi.org/10.1108/jmtm-06-2012-0065>
- Modica, T., Colicchia, C., Tappia, E., & Melacini, M. (2021). Empowering freight transportation through Logistics 4.0: a maturity model for value creation. *Production Planning and Control*, 34(12), 1149–1164. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1988176>

- Nelldal, B.-L. (2017 mars). *Line capacity and train capacity for future rail freight corridors*.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1651030/FULLTEXT01.pdf>
- Nilsson, J., & Bertling, L. (2007). Maintenance Management of wind power systems using Condition Monitoring Systems—Life Cycle Cost Analysis for two case studies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *22*(1), 223–229.
<https://doi.org/10.1109/tec.2006.889623>
- Nissen, A. (2009a). Classification and cost analysis of switches and crossings for the Swedish railway: a case study. *Journal of quality in maintenance engineering*, *15*(2), 202–220. <https://doi.org/10.1108/13552510910961147>
- Nissen, A. (2009b). LCC analysis for switches and crossings : a case study from the Swedish Railway Network. *International Journal of COMADEM*, *12*(2), 10–19.
<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:977592>
- O'Connor, P. P., & Kleyner, A. (1992). Practical Reliability Engineering. *Technometrics*, *34*(4), 487. <https://doi.org/10.2307/1268949>
- Olsson, H., & Sörensen, S. (2011). *Forskningsprocessen*. Liber.
- Patel, R., & Davidson, B. (2019). *Forskningsmetodikens Grunder: Att Planera, genomföra och rapportera en undersökning* (5th). Studentlitteratur.
- Patra, A. (2007 december). *RAMS and LCC in Rail Track Maintenance*.
- Patra, A. P., Söderholm, P., & Kumar, U. (2008). Uncertainty estimation in railway track life-cycle cost: a case study from Swedish National Rail Administration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, *223*(3), 285–293. <https://doi.org/10.1243/09544097jrrt235SFS-2007:515>. *Myndighetsförordning*. Finansdepartementet.
https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/myndighetsforordning-2007515_sfs-2007-515/
- Sharma, A. (2020). Sustainability research in business-to-business markets: An agenda for inquiry. *Industrial Marketing Management*, *88*, 323–329.
<https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.05.037>

- Sherif, Y. S., & Kolarik, W. J. (1981). Life cycle costing: Concept and practice. *Omega*, 9(3), 287–296. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(81\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0305-0483(81)90035-9)
- Shi, Y., Zhu, W., Xiang, Y., & Feng, Q. (2020). Condition-based maintenance optimization for multi-component systems subject to a system reliability requirement. *Reliability Engineering and System Safety*, 202, 107042. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107042>
- Stenström, C., Norrbin, P., Parida, A., & Kumar, U. (2015). Preventive and corrective maintenance – cost comparison and cost–benefit analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(5), 603–617. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1032983>
- Stenström, C., Parida, A., & Kumar, U. (2016). Measuring and monitoring operational availability of rail infrastructure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(5), 1457–1468. <https://doi.org/10.1177/0954409715592189>
- Swedish Standards Institute. (2000). *Tillförlitlighet - Ordlista*. <https://www.sis.se/produkter/terminologi-och-dokumentation/ordlistor/elektroteknik/ss-4410505-02f77d5e/>
- Swedish Standards Institute. (2004). *Ledning av tillförlitlighet – Del 3-3: Vägledning –Livstidskostnad (STANDARD SS-EN 60300-3-3)*. <https://www.sis.se/api/document/get/3337597>
- Swedish Standards Institute. (2017a). *Järnvägstillämpningar - Specifikation och demonstration av tillförlitlighet, tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet (RAMS) - Del 1: Generell RAMS-process*. <https://www.sis.se/api/document/get/80000348>
- Swedish Standards Institute. (2017b). *Underhåll - Underhållsterminologi*. <https://www.sis.se/produkter/terminologi-och-dokumentation/ordlistor/tjanster/ss-en-133062017/>
- Söderholm, P., Eliasson, J., Eriksson, L., Granström, R., Hedgren, E., Johansson, K., Morant Estevan, A., Nygårds, J., & Syk, M. (2021). *Förstudie -*

- Innovationsupphandling: Nya digitala lösningar för bättre koll på järnvägsanläggningen och ökad punktlighet.* <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1551200/FULLTEXT01.pdf>
- Tillväxtverket. (2023, 25. oktober). *Nyindustrialiseringen och samhällsomvandlingen i Norrbotten och Västerbotten.* <https://tillvaxtverket.se/tillvaxtverket/omtillvaxtverket/pressochnyheter/aktuelltfrantillvaxtverket/nyhetsarkiv/nyindustrialiseringenochsamhallsomvandlingeninorrbottenochvasterbotten.5653.html>
- Trafikverket. (2019). *Kapacitet på järnväg – en kunskapsöversikt.*
<http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1365518/FULLTEXT01>
- Trafikverket. (2020a). *Prognos för persontrafiken 2040 - Trafikverkets Basprognoser 2020-06-15.*
<http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1442656/FULLTEXT01.pdf>
- Trafikverket. (2020b, 24. augusti). *UNDERHÅLL.* Hämtad 15 april 2024, från https://bransch.trafikverket.se/contentassets/49a43f5eddd545b0ac187293e348e84c/gus-termer-och-definitioner_200824.pdf
- Trafikverket. (2023a). *Prognos för godstransporter 2040 – Trafikverkets Basprognoser 2023.* <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1749263/FULLTEXT01.pdf>
- Trafikverket. (2023b, 1. juni). *Trafikbestämmelser för järnväg - Termer.*
https://bransch.trafikverket.se/contentassets/18aa4c18f60e48c398afa22e65079111/1_termer_2024.pdf
- Wajzman, J., & Nelldal, B. L. (2012). *Persontrafik och godstransporter 2010–2030 och kapacitetsanalys för järnväg.*
https://www.kth.se/polopoly_fs/1.309106.1550155986!/Menu/general/column-content/attachment/12_003RR_rapport.pdf
- Wohlin, C. (2014, 13. maj). *Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering.*
<https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>

- Woodward, D. (1997). Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335–344.
[https://doi.org/10.1016/s0263-7863\(96\)00089-0](https://doi.org/10.1016/s0263-7863(96)00089-0)
- Yin, R. K. (1989 februari). *Case Study Research: Design and Methods (Applied Social Research Methods)* (2nd). SAGE Publications, Inc.

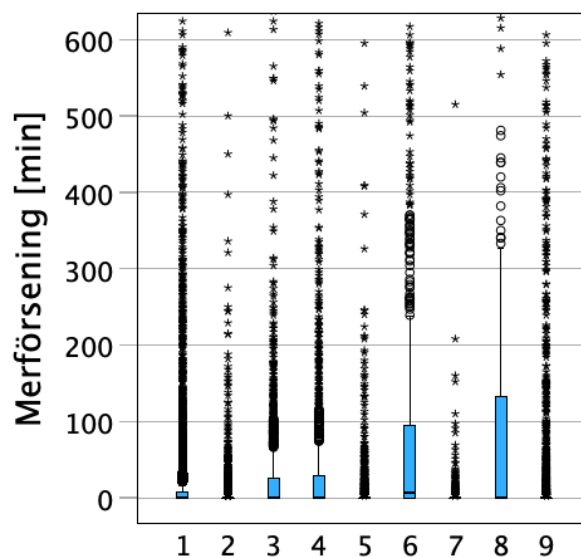
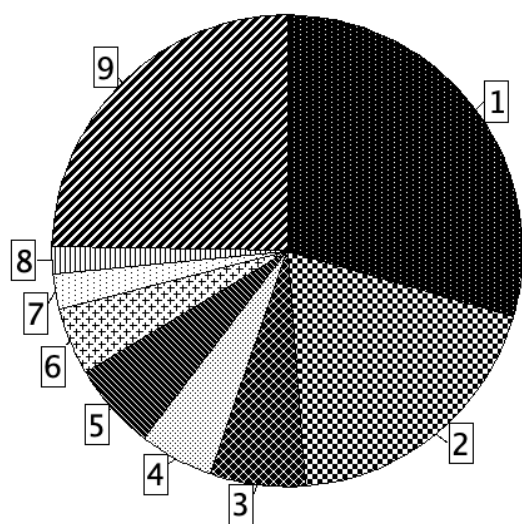
Bilaga A
Översikt Malmbanan

Stråk	Bandel	Sträckning	Banlängd [km]	Spår [km]	Växlar [antal]
21	111	Peuravaara – Riksgränsen	125	187	58
21	112	Peuravaara – Kiruna Mbg	5	14	32
21	113	Gällivare – Peuravaara	96	137	57
21	114	Gällivare – Koskullskulle	14	19	29
21	116	Råtsi – Svappavaara	38	47	9
21	117	Murjek - Gällivare	77	128	32
21	118	Buddbyn - Murjek	81	115	39
Sum			436	648	256

Bilaga B

Samtliga funktionsfel

Felorsak	Felfrekvens [Antal]	Procent	Ackumulerad procent
1. Spårväxel	7 226	29.5	29.5
2. Djur i spår	4 694	19.2	48.7
3. Positioneringssystem	1 612	6.6	55.3
4. Signalsystem	1 472	6.0	61.3
5. Signal	1 234	5.1	66.4
6. Spår	1 139	4.7	71.0
7. Balisgrupp	590	2.4	73.4
8. Kontaktledning	445	1.8	75.2
9. Annat	6 036	24.7	100
Totalt	24 458	100	

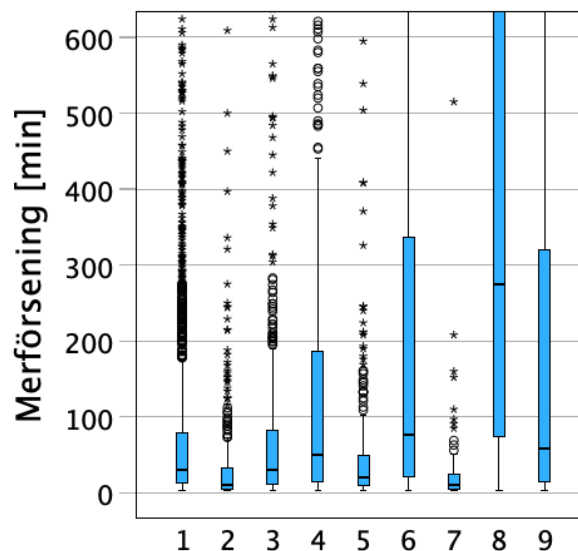
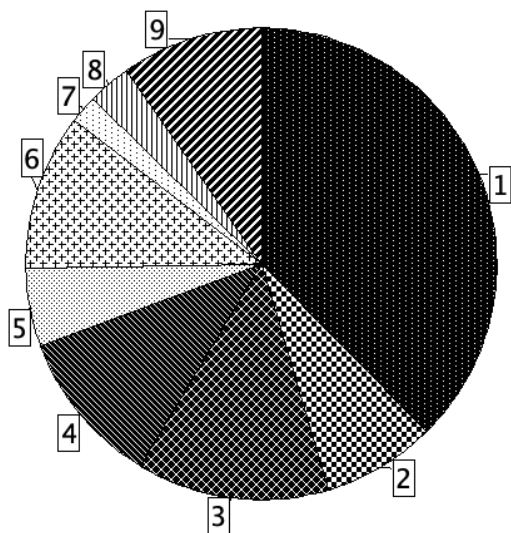


Kommentar. Till vänster: Felfrekvens avseende anläggningstyp. Till höger: Merförsening avseende anläggningstyp.

Bilaga C

Tågstörande funktionsfel

Felorsak	Felfrekvens [Antal]	Procent	Ackumulerad procent
1. Spårväxel	2 148	37.6	37.6
2. Djur i spår	442	7.7	45.3
3. Positioneringssystem	754	13.2	58.8
4. Signalsystem	615	10.8	69.4
5. Signal	305	5.3	74.7
6. Spår	608	10.7	85.4
7. Balisgrupp	111	1.9	87.3
8. Kontaktledning	168	1.8	90.3
9. Annat	556	9.7	100
Totalt	5 707	100	

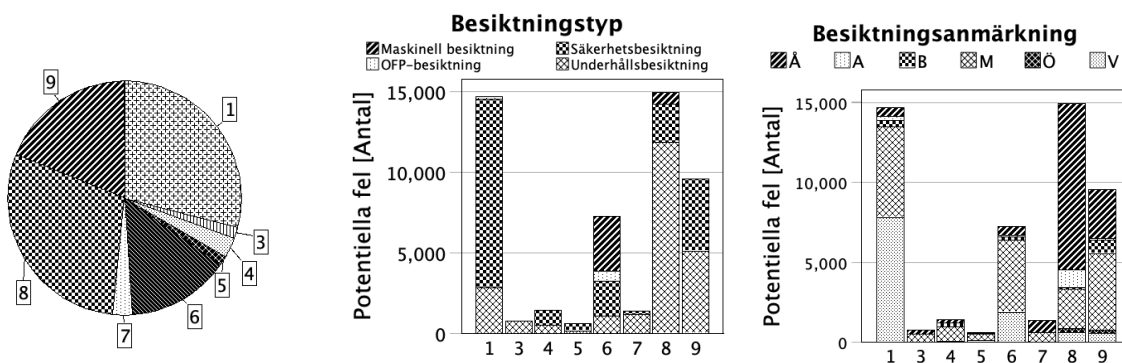


Kommentar. Till vänster: Felfrekvens avseende anläggningstyp. Till höger: Merförsening avseende anläggningstyp.

Bilaga D

Besiktningsdata

Felorsak	Åtgärdade anmärkningar [Antal]	Procent	Ackumulerad procent
1. Spårväxel	14 687	29.0	29.0
2. Djur i spår	-	-	-
3. Positioneringssystem	780	1.5	30.5
4. Signalsystem	1 426	2.8	33.4
5. Signal	619	1.2	34.6
6. Spår	7 261	14.3	48.9
7. Balisgrupp	1 363	2.7	51.6
8. Kontaktledning	14 949	29.5	81.1
9. Annat	9 577	18.9	100
Totalt	50 672	100	



Kommentar. Till vänster: Åtgärdade anmärkningar avseende anläggningstyp. Mitten: Åtgärdade anmärkningar avseende besiktningstyp. Till höger: Åtgärdade anmärkningar avseende typ av anmärkning.

Bilaga E

Driftplatser Malmbanan

Driftplatser Buddbyn - Gällivare

Driftplats	Avstånd	Nhs	Ah	Es	SI	Längd SI	plf	spår	växel-hst
Buddbyn (Bud)	3,9	862	862	-	ESIK	762	0	2	80
Holmfors (Hfs)	4,7	759	759	-	ESIK	659	0	2	80
Ljuså (Lså)	9,7	1 091	1 091	-	ESIK	991	0	2	80
Gransjö (Grs)	13,3	951	867	867	ESIK	767	0	3	80
Sandträsk (Stä)	8,2	756	756	-	ESIK	656	0	2	40
Gullträsk (Glt)	10,0	777	778	779	ESIK	679	0	3	80
Lakaträsk (Lkä)	9,7	772	770	788	ESIK	688	0	3	80
Näsberg (Nb)	11,6	567	517	517	ESIK	417	0	2	40
Tolickberget (Tet)	7,0	923	769	769	ESIK	669	0	3	80
Murjek (Mk)	8,6	601	514	521	ESIK	421	1	2	40
Polcirkeln (Pc)	11,9	761	761	-	ESIK	661	0	2	80
Koskivaara (Kva)	9,0	870	870	-	ESIK	770	0	2	80
Nattavaara (Ntv)	13,2	999	999	999	ESIK	899	1	3	80
Kilvo (Klv)	9,6	752	753		ESIK	653	0	2	80
Nuortikon(Nrt)	7,0	595	512	512	ESIK	412	0	2	40
Ripats (Rps)	10,5	771	771	771	ESIK	671	0	3	80
Harrträsk (Hrt)	7,9	561	524	524	ESIK	424	0	2	40
Gällivare (Gv)	12,9	836	797	772	ESIK	697	2	3	80

Kommentar. Nhs: Normalhuvudspår, Ah: Avvikande huvudspår, Es: Extraspår, SI: Samtidig

Infart, plf: plattformsspår, växel-hst: STH genom växel.

Driftplatser Gällivare – Kiruna

Driftplats	Avstånd	Nhs	Ah	Es	SI	Längd SI	plf	spår	växel-hst
Gällivare (Gv)	-	836	797	772	ESIK	697	2	3	80
Sikträsk (Stk)	-	880	880	-	ESIK	780	0	2	40
Linaälv (Lin)	12,8	661	532	520	ESIK	432	0	2	40
Håkmojåkk (Håk)	9,8	520	523	-	ESIK	423	0	2	70
Harrå (Har)	11,6	749	759	-	ESIK	659	0	2	40
Fjällåsen (Fjä)	13,1	532	527	-	ESIK	427	0	2	40
Lappberg (Lab)	9,7	880	880	880	ESIK	780	0	3	40
Gäddmyr (Gy)	11,1	530	530	-	ESIK	430	0	2	40
Kalixfors (Kx)	7,7	535	535	-	ESIK	435	0	2	40
Råtsi (Rsi)	-	824	-	-	ESIK	-	0	1	80
Kirunavaara (Kia)	12,0	842	842	902	ESIK	802	0	3	80
Peuravaara (Pea)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kiruna mb (Kmb)	12,9	850	500		ESIK	400	0	-	40

Kommentar. Nhs: Normalhuvudspår, Ah: Avvikande huvudspår, Es: Extraspår, SI: Samtidig Infart, plf: plattformsspår, växel-hst: STH genom växel.

Driftplatser Svappavaara – Råtsi

Driftplats	Avstånd	Nhs	Ah	Es	SI	Längd SI	plf	spår	växel-hst
Svappavaara (Svv)	-	780	780	-	ESIK	680	0	2	40
Mertainen (Mtn)	-	988	988	-	ESIK	888	0	2	80
Aptas(Apt)	-	752	752	-	ESIK	652	0	2	80
Råtsi (Rsi)	-	824		-	ESIK	-	0	1	80

Kommentar. Nhs: Normalhuvudspår, Ah: Avvikande huvudspår, Es: Extraspår, SI: Samtidig Infart, plf: plattformsspår, växel-hst: STH genom växel.

Driftplatser Kiruna - Riksgränsen

Driftplats	Avstånd	Nhs	Ah	Es	SI	Längd SI	plf	spår	växel-hst
Peuravaara (Pea)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kiruna mb (Kmb)	12,9	850	500		ESIK	400	0	-	40
Krokvik (Kv)	10,5	892	783	783	ESIK	683	0	3	80
Rautas (Rut)	10,3	798	798		ESIK	698	0	2	40
Rensjön (Rsn)	10,4	827	756	759	ESIK	659	0	3	80
Bergfors (Bfs)	9,3	753	753	-	ESIK	653	0	2	40
Torneträsk (Tnk)	10,4	761	761	-	ESIK	661	0	2	80
Stenbacken (Sbk)	9,5	846	845	-	ESIK	745	0	2	80
Kaisepakte (Kpe)	9,8	958	995	-	ESIK	895	0	2	80
Stordalen (Soa)	12,1	767	767	-	ESIK	667	0	2	40
Abisko östra (Ak)	10,2	760	760	891	ESIK	791	2	3	80
Björkliden (Bln)	9,3	908	908	-	ESIK	808	1	2	80
Kopparåsen (Kå)	9,2	888	887	-	ESIK	787	0	2	80
Vassijaure (Vj)	10,8	764	762	-	ESIK	662	1	2	80
Riksgränsen (Rgn)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Björnfjäll* (Bjf)	9,0	1 396	1 228	1 109	-	0	0	3	80

Kommentar. Nhs: Normalhuvudspår, Ah: Avvikande huvudspår, Es: Extraspår, SI: Samtidig Infart, plf: plattformsspår, växel-hst: STH genom växel. * Första driftplasten på den norska sidan.

Bilaga F
Investeringskostnad

Kostnadstyp [tkr] Alternativ för anläggning Pilsjö	JA	A1	A2	A3
Projektadministration	3 889	7 455	8 898	12 790
Projektplanering	1 458	2 787	3 327	4 782
Överlämnande och avslut	499	721	810	1 053
Generella osäkerheter	640	1 252	1 505	2 113
Projektering	6 486	12 215	14 540	20 738
Markarbete	2 250	4 883	8 199	8 910
Ban	10 392	16 250	17 200	32 172
El	0	1 402	2 012	2 439
Signal	11 656	23 889	27 981	36 083
Tele	0	31	55	96
Generella osäkerheter	3 005	5 716	6 812	9 842
Inköp och installation	27 303	52 171	62 259	89 542
Totalt	33 799	64 387	76 800	110 280

Kommentar. Från Trafikverkets GKI-mall. Prisnivå i tkr. Januari 2024.

Bilaga G

Periodiskt förebyggande underhåll

Anläggning	Periodiskt förebyggande underhåll [klass/år]				
	B1	B2	B3	B4	B5
Spårväxel	1	2	2	2	2
Spår och isolerskarv	1	1	1	1	2
Signalsystem	1	1	1	1	1
Signaler	1	1	1	1	1
Positioneringssystem	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Balisgrupp	-	-	-	-	-
Kontaktledning	-	-	-	-	-

Kommentar. För signal och signalsystem skattas periodiskt förebyggande underhåll efter byte av reläer och lampor.

Bilaga H

Besiktningsklasser

