

Linköpings universitet | Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling
Masteruppsats, 30 hp | Industriell ekonomi, energi- och miljöteknik
Höstterminen 2016 | ISRN-nummer: LIU-IEI-TEK-A--17/02711—SE

Beräkningsverktyg till strategisk planering av framtidens ledningsbundna infrastruktur

- Utveckling av modell för LCC- och LCA-
analyser av ledningsbunden infrastruktur

2017-02-10

Filip Bergman
Niklas Olsson

Handledare: Joakim Krook
Examinator: Niclas Svensson

Strategic tool for calculation of subsurface infrastructure in the future

- Development of a model for combined LCA- and LCC-analyses of subsurface infrastructure

Sammanfattning

En ny lag kring hållbarhetsredovisning för företag med samhällsbärande verksamhet innebär att företagen behöver rikta ett större fokus på hållbarhet och därmed minska miljöpåverkan. För att öka hållbarheten och medvetenheten kring vilka kostnader och vilken miljöpåverkan företagets aktiviteter leder till kan ett livscykelperspektiv leda till ökad kunskap och förståelse.

Ledningsbunden infrastruktur som el, opto, vatten och avlopp är idag en förutsättning i samhället. Flera av näten som idag används installerades i mitten på 1900-talet vilket innebär att de snart har uppnått sin förväntade livslängd. Med detta följer ökade underhållsarbeten och kostnader för företagen som förvaltar näten. Exempelvis innebär förnyelsen av svenska vatten- och avloppsledningar en årlig investering på 1,9 miljarder kr, något som kommer behöva dubbleras de närmsta 50 åren. 50 % av kostnaderna för att utföra underhållsåtgärder vid konventionell förläggning beror på trafikavstängning och schaktning.

Till följd av ovanstående problematik har Tekniska verken arbetat fram en ny lösning för förläggning av ledningsbunden infrastruktur som innebär att ledningsnät för el, opto, vatten, avlopp, sopsug och fjärrvärme förläggs i en kulvert. Kulverten är den första i sitt slag och är gjord av plast med kammare i betong för att sammankoppla rören och dra ut servisledningar. Den första plats som denna infrakulvert installerats på är Vallastaden i Linköping som exploateras för bo- och samhällsexpo 2017.

För att utvärdera denna teknik utvecklades i detta examensarbete en modell som kan användas till att beräkna livscykelkostnaderna och miljöpåverkan för infrakulverten och jämföra detta med konventionell förläggning. I examensarbetet begränsades datainsamlingen till att endast studera kostnader och miljöpåverkan har därför inte studerats. Modellen har utvecklats för att ta hänsyn till infrastrukturens stokastiska karaktär och kan beräkna medelkostnader och standardavvikelser samt genomföra detaljerade känslighetsanalyser. Denna typ av modell har ett flertal användningsområden för förvaltande företag då det ger en uppfattning om förväntade kostnader och kan utvärdera risker i samband med investeringar.

Abstract

A new law concerning sustainability reporting for companies with important functions in society means that companies need a greater focus on sustainability and thus reduce environmental impacts. To enhance sustainability and awareness of the costs and the environmental impacts from its activities, a life-cycle perspective can lead to increased knowledge and understanding.

Subsurface infrastructure such as electricity, fiber, water and sewage is now a prerequisite in society. Several of the networks used today was installed in the mid-1900s, which means that they soon have reached their life expectancy. With this follows increased maintenance work and costs for the companies that manage the networks. For example, the renewal of Swedish water and sewage means an annual investment of 1.9 billion SEK, which will have to be doubled over the next 50 years. 50% of the costs to perform maintenance operations with conventional technique is due to traffic shutdown and excavation.

As a result of the problems above Tekniska verken has developed an innovation for the installation of piped infrastructure, which involves systems for electrical, optical, water, sewage, waste suction and district heating, placed in a culvert. The culvert is the first of its kind and is made of plastic with concrete chambers to connect the pipes and pull out the service lines. The first place that this infra-culvert is installed in is Vallastaden in Linköping, which is exploited for Bomässan 2017.

To evaluate this technology a model was developed in this thesis that can be used to calculate the life cycle costs and environmental impact of infrastructure positioned in the culvert and compare this with conventional technique. The thesis had a limited data collection that only studied the costs and the environmental impact has not been studied. The model has been developed to take into account the infrastructure stochastic nature and can calculate the average cost and standard deviations, and performing detailed sensitivity analyzes. This type of model has a number of uses for companies managing infrastructure as it gives an idea of the expected costs and can evaluate the risks associated with investments.

Förord

Detta examensarbete genomfördes under höstterminen 2016, vår avslutande termin på civilingenjörsprogrammet energi – miljö – management vid Linköpings universitet. Arbetet har varit en del av ett forskningsprojekt med fokus på hållbar infrastruktur där Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling vid Linköpings universitet samarbetar med Tekniska verken.

Vi vill rikta tack till våra handledare på Tekniska verken, Johan Sedin och Stefan Jakobsson, som framförallt hjälpt oss att knyta kontakt med övrig personal på Tekniska verken vilket underlättat datainsamlingen. På Tekniska verken har numera pensionerade Gunnar Rydin varit en nyckelperson. Hans övergripande kunskaper kring infrakulverttekniken och framtagandet av denna nya teknik har varit ovärderliga för vårt arbete. Även vår opponent Mikaela Granberg Lomyr ska ha tack för ett, genom hela arbetsprocessen, gott samarbete.

Vår handledare från universitet, Joakim Krook, och vår examinator, Niclas Svensson, förtjänar även de stora tack. De båda har visat ett genuint intresse och engagemang för vårt examensarbete och de har i högsta grad bidragit till arbetets fortskridande. Till sist vill vi tacka modelleringsexperten Bo Persson. Utan hans kunskaper kring Monte Carlo-simuleringar hade vi aldrig kunnat utveckla modellen som den ser ut idag.

Linköping, januari 2017

Filip Bergman & Niklas Olsson

Innehåll

| | |
|---|----|
| 1 Inledning..... | 1 |
| 1.1 Syfte, mål och frågeställningar..... | 2 |
| 1.2 Avgränsningar | 2 |
| 1.3 Disposition..... | 3 |
| 2 Bakgrund | 4 |
| 2.1 Studieobjekt..... | 4 |
| 2.1.1 Vallastaden | 4 |
| 2.1.2 Tekniska verken | 4 |
| 2.2 Introduktion till studerade infrasystem..... | 6 |
| 2.2.1 Skillnader mellan konventionell förläggning och infrakulvert..... | 7 |
| 3 Teoretiskt ramverk | 9 |
| 3.1 Livscykelperspektiv på infrastruktur..... | 9 |
| 3.2 Livscykelanalys - LCA..... | 10 |
| 3.3 Livscykelkostnadsanalys - LCC | 12 |
| 3.3.1 Prospektiv vs. Retrospektiv LCC | 14 |
| 3.3.2 Steady state vs. Dynamisk..... | 14 |
| 3.3.3 Beräkningar | 14 |
| 3.4 Monte Carlo-simulering | 15 |
| 3.5 Teori om datainsamling och datahantering | 16 |
| 4 Metodbeskrivning..... | 19 |
| 4.1 Metod för modellutveckling..... | 19 |
| 4.1.1 Modellutveckling utifrån teori..... | 20 |
| 4.1.2 Modellutveckling utifrån andra krav och önskemål | 21 |
| 4.1.3 Arbetsprocess för modellens utformning | 22 |
| 4.2 Metod för fallstudie | 24 |
| 4.2.1 Syfte och måldefinition | 24 |
| 4.2.2 Omfattning och avgränsningar | 24 |
| 4.2.3 Livscykelinventering | 26 |
| 4.2.4 Beräkningar och resultat..... | 30 |
| 4.3 Informationssökning..... | 30 |
| 4.4 Diskussion kring vald metod | 31 |
| 4.4.1 Fallstudie | 32 |
| 4.4.2 Metod för modellutveckling | 33 |
| 4.4.3 Alternativa metoder..... | 33 |
| 5 Resultat av inventeringsanalys | 34 |
| 5.1 Installation av infrakulverten i Vallastaden..... | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.2 | Installation vid konventionell förläggning | 37 |
| 5.3 | Studerat avloppsledningsnät..... | 38 |
| 5.3.1 | Infrakulvert..... | 38 |
| 5.3.2 | Konventionellt..... | 39 |
| 5.4 | Studerat vattenledningsnät | 39 |
| 5.4.1 | Infrakulvert..... | 39 |
| 5.4.2 | Konventionell förläggning..... | 40 |
| 5.5 | Studerat el - och optonät..... | 41 |
| 5.5.1 | El och opto i infrakulverten i Vallastaden | 41 |
| 5.5.2 | El och optoförläggning vid konventionell förläggning i Linköping..... | 41 |
| 5.6 | Studerat fjärrvärmenät..... | 41 |
| 5.6.1 | Fjärrvärmenät i kulverten i Vallastaden | 42 |
| 5.6.2 | Fjärrvärme konventionellt | 43 |
| 5.7 | Studerat sopsugssystem..... | 43 |
| 5.7.1 | Sopsugssystemet i kulverten i Vallastaden..... | 43 |
| 5.7.2 | Sopsugssystem vid konventionell förläggning | 44 |
| 5.8 | Installationskostnader | 44 |
| 5.9 | Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser och underhållskostnader..... | 45 |
| 5.9.1 | Underhåll för vatten- och avloppsledningar | 46 |
| 5.9.2 | Underhållsfrekvens på el- och optonät | 53 |
| 5.9.3 | Underhållsfrekvens på fjärrvärmenätet | 56 |
| 5.9.4 | Underhållsfrekvens på sopsugssystem | 58 |
| 6 | Modell | 61 |
| 6.1 | Ingångsparameterar | 61 |
| 6.2 | Installation..... | 63 |
| 6.2.1 | Installation input..... | 63 |
| 6.2.2 | Installation summering | 63 |
| 6.3 | Underhåll | 64 |
| 6.3.1 | Underhåll, kostnader och miljöpåverkan..... | 64 |
| 6.4 | Databaser..... | 67 |
| 6.4.1 | Material och miljöpåverkan..... | 67 |
| 6.4.2 | Arbete | 68 |
| 6.4.3 | Maskinanvändning | 68 |
| 6.4.4 | Diskontering | 68 |
| 6.5 | Ifyllda scheman | 68 |
| 6.6 | Resultat..... | 69 |
| 6.6.1 | Kollektorer..... | 70 |

| | |
|---|-----|
| 6.6.2 Diagram | 70 |
| 7 Resultat från modellen..... | 74 |
| 7.1 Resultat för Scenario 1 och Scenario 2 i fallstudien..... | 74 |
| 7.2 Känslighetsanalys av bakomliggande antaganden | 81 |
| 7.2.1 Ökade underhållskostnader vid konventionell förläggning | 82 |
| 7.2.2 Gynnsam miljö för ledningar i infrakulvert..... | 82 |
| 7.3 Inverkan av möjliga tekniska förbättringar av kulvert-tekniken | 83 |
| 7.3.1 Trycksättning kontra självfall för avloppssystemet i infrakulverten | 83 |
| 7.3.2 Längdförhållandet mellan konventionellt nät och kulvert-nät..... | 84 |
| 7.3.3 Infrakulvertförläggning utan kammare eller fellehus | 85 |
| 7.4 Diskussion kring infrakulverten i fallstudien | 87 |
| 8 Analys av utformad modell | 90 |
| 8.1 Val av simuleringsstorlek..... | 90 |
| 8.2 Val av osäkerhetsfaktor | 91 |
| 8.3 Val av maxantalsfaktor..... | 93 |
| 8.4 Val av åldersfördelning | 94 |
| 8.5 Inverkan av att inkludera förnyelse av elnät och sopsugssystem | 95 |
| 8.6 Teoretisk validering av modellen | 98 |
| 8.7 Diskussion kring utvecklad modell utifrån teori och önskemål | 99 |
| 9 Slutsatser | 101 |
| 9.1 Framtida studier..... | 102 |
| Referenser..... | 103 |

1 Inledning

Ledningsbunden infrastruktur som el, vatten och avlopp är en förutsättning för dagens samhälle och har format samhällsutvecklingen det senaste seklet. Flera av systemen utvecklades i början eller mitten på 1900-talet och i takt med samhällets expansion har en omfattande utbyggnad skett. I synnerhet i samband med miljonprogrammet 1965-1975 ökade utbyggnadstakten på vatten- och avloppsledningar (Malm et al., 2011b) och även fjärrvärmeledningar (Fjärrensyn, 2013) i Sverige. Detta innebär att delar av systemen snart har uppnått sin förväntade livslängd vilket gör att det kommer krävas omfattande reparationer och förnyelse för att upprätthålla de samhällskritiska funktioner som de idag erbjuder. Exempelvis innebär förnyelsen av svenska vatten- och avloppsledningar i dagens takt en årlig investering på 1,9 miljarder kr. Denna investering kommer dessutom behöva dubbleras de närmsta 50 åren för att motsvara den ökade längden ledningar som behöver förnyas varje år (Malm et al., 2011b). Till följd av detta finns det nu en stor möjlighet för ledningsägarna att göra andra teknikval och strategiska beslut kring förläggning av infrastruktur för att på sikt undvika problematiken de står inför idag.

Vid reparationsarbeten idag står avstängning av gator och schaktarbete för över 50 % av kostnaderna (Hammarström muntligt, 2016) samtidigt som det är förknippat med belastning på både närmiljö och klimat. Då det samtidigt ställs allt högre krav på hållbarhet i branscherna, exempelvis genom en ny lag om hållbarhetsredovisning för större företag och företag med "samhällsbärande verksamhet" som trädde i kraft den 1 december 2016 (Svensk handel, 2016), är det därför aktuellt att undersöka möjligheter att öka hållbarheten för ledningsbunden infrastruktur. För att öka hållbarheten för systemen blir det därför intressant att studera tekniker som möjliggör en reducerad miljöpåverkan tillsammans med minskade ekonomiska och sociala kostnader.

I Vallastaden i Linköping har Tekniska verken, tillsammans med Uponor, utvecklat en ny lösning för förläggning av infrastruktur inför bomässan som ska hållas där i september 2017. Lösningen innebär att infrasytem för el, fiber, vatten, avlopp, fjärrvärme och sopsug är förlagda i en gemensam kulvert istället för att vara nedgrävda i gatorna. Anledningarna till att kulverten utvecklades var flera, bland annat möjligheten att bygga en tät stadsdel i ett område med geologiskt svåra förutsättning och bättre möjligheter till att genomföra underhållsarbeten utan att behöva göra ingrepp i mark, vilket kan reducera direkta kostnader för utförandet men även minska indirekta kostnader för tredje part (exempelvis längre restid till arbetsplatser när gator är avstängda), är motiv som ligger bakom utvecklandet av kulverten (Vallastaden, 2016). Dessutom dyker möjligheter till minskad resursanvändning och ökad återvinning av material upp som motiv. Motiven till kulverten är alltså flera, allt från stadsplanering till miljömässiga- och sociala aspekter finns i de bakomliggande argumenten. Förhoppningarna med denna lösning är många men hittills har ingen djupare utredning gjorts.

Att analysera och jämföra tekniker över lång tid kan genomföras med antingen fokus på miljö, livscykelanalys (LCA), eller med fokus på kostnader, livscykelkostnadsanalys (LCC). Dessa metoder fokuserar på hela eller delar av en produkts livscykel, från produktion till bortscaffande, och studerar produkten eller tjänstens funktion snarare än en fysisk vara (EU kommissionen, 2010). Med detta perspektiv vägs olika produkters livslängd in i studien för att kunna jämföra produkter med olika lång livslängd på en gemensam bas. För LCA-studier finns framtagna ISO-standarder för hur de ska genomföras med en tydlig arbetsgång, något som saknas för LCC. Dock finns riktlinjer och rekommendationer från IEC som föreslår en liknande arbetsprocess för LCC som för LCA (IEC, 2004).

Genom att applicera dessa metoder på ledningsbunden infrastruktur kan de förvaltande företagen skaffa sig en uppfattning över vilka kostnader och vilken miljöpåverkan deras aktiviteter leder till på

lång sikt. Då infrastrukturen har en lång livslängd blir det viktigt att kunna planera i en föränderlig miljö och Frangopol et al. (2004) förespråkar därför modellering med livscykelperspektiv där underhållskostnader för olika scenarios tas fram. Detta kan sedan användas som beslutsunderlag vid strategisk planering av teknikval, underhållsplanering eller nyinvesteringar. Genom att dessutom inkludera miljöpåverkan i en sådan modell kan även dessa aspekter vägas in vid besluten vilket möjliggör för minskade utsläpp och en mer hållbar verksamhet på sikt.

Uppdraget som ligger bakom denna rapport är att utveckla ett verktyg som kan utföra livscykelberäkningar för att jämföra kulverten med konventionell förläggning. Eftersom funktionerna som infrasytemen erbjuder behöver upprätthållas under en lång tidsperiod ska verktyget utvecklas i enlighet med LCA- och LCC-metodik.

1.1 Syfte, mål och frågeställningar

Syftet med detta examensarbete är att utveckla ett verktyg som kan användas för att beräkna ekonomisk och miljömässig prestanda för ledningsbunden infrastruktur. Grunden till detta verktyg baseras på en fallstudie och ska utvecklas för att kunna beräkna LCA och LCC. Fallstudien innebär en jämförelse av livscykelkostnaderna för konventionell förläggning och en ny typ av förläggning i kulvert som utvecklats i Vallastaden i Linköping. Fallstudien genomförs för att samlas in data från ett konkret fall och utveckla modellen därefter. Detta används till att bygga upp två scenarier vars resultat används till att illustrera hur verktyget fungerar.

För att uppnå syftet ska följande frågeställningar besvaras:

- Vad behöver ett kombinerat LCA- och LCC-verktyg ta hänsyn till vid modellering av ledningsbunden infrastruktur?
- Hur kan livscykelkostnaderna för förläggning i infrakulvert jämfört med konventionell förläggning beräknas och redovisas i en modell, utifrån en fallstudie?
 - Hur påverkas livscykelkostnaderna av olika förutsättningar som geologi, underhållsfrekvenser etc.?

Målet för projektet är således att bygga en modell som kan genomföra delar av de beräkningar för LCA och LCC som krävs för att besvara frågeställningarna. Hur modellen hanterar detta exemplifieras på två scenarier som baseras på information från en fallstudie.

1.2 Avgränsningar

Denna rapport är en del av ett större forskningsprojekt kring hållbar infrastruktur som finansieras av Tekniska verken i samarbete med Linköpings universitet. Detta examensarbete är inledningen på projektet och har därför inte som slutmål att leverera en fullständig modell. Arbetet syftar snarare till att identifiera viktiga parametrar att arbeta vidare med inom forskningsprojektet samt att genomföra en inledande LCC-beräkning på genomförd fallstudie.

De geografiska avgränsningarna för studien begränsas till Linköping då den studerade infrakulverten endast finns i Vallastaden i Linköping samt att det som genomgående benämns som ”konventionell förläggning” syftar till det som är ”konventionellt” för Tekniska verkens arbetsförfarande. Bakgrunden till dessa avgränsningar är att examensarbetet utförs i Linköping och att Tekniska verken erbjudit assistans som underlättat datainsamlingen. Resultaten för fallstudien speglar alltså kostnader för Tekniska verkens arbetsprocesser och är därmed inte generella för hela Sverige. Mer detaljerade tekniska avgränsningar kring de ledningsnät som studeras och för fallstudien beskrivs i kapitel 5 *Resultat av inventeringsanalys* respektive avsnitt 4.2.2 *Omfattning och avgränsningar*.

Då fokus ligger på att utveckla verktyget har detta gått i första hand vilket gjort att datainsamlingen anpassats till de tidsramar som gäller för examensarbetets 20 veckor. Detta speglas bland annat av att fullständig förnyelse inte inkluderas i fallstudien och att det endast är kostnader och inte

miljöpåverkan som inkluderas. Fallstudien används således för datainsamling och för att exemplifiera vad modellen kan utföra i dess nuvarande utformning vilket görs via två scenarier.

1.3 Disposition

Denna uppsats inleds med en bakgrund där det ges en introduktion till teknikerna vid förläggning av infrastruktur i en kulvert respektive konventionellt för att underlätta läsarens förståelse för efterföljande kapitel. Dessutom belyses skillnaderna mellan teknikerna och vilka potentiella för- och nackdelar infrakulverten har. Kapitel 2 *Bakgrund* fortsätter med en beskrivning av de studieobjekt som studien behandlar. Detta följs av en presentation av relevant teori, i kapitel 3 *Teoretiskt ramverk*, som använts under arbetet.

Efterföljande kapitel, 4 *Metodbeskrivning*, beskriver metoden för detta arbete genom att först beskriva modellutvecklingen och sedan den fallstudie som genomförts. Detta för att ge läsaren kännedom om vilken process som lett fram till de avgränsningar och resultat som presenteras senare. Först redovisas resultatet av den inventeringsanalys, kapitel 5 *Resultat av inventeringsanalys*, som utförs i fallstudien innan resultatet av modellutvecklingen presenteras i kapitel 6 *Modell*. Därefter presenteras resultatet från den LCC-studie som baseras på fallstudien i kapitel 7 *Resultat från modellen* vilket sedan, tillsammans med modellen, analyseras i kapitel 8 *Analys av utformad modell*. I kapitel 8 *Analys av utformad modell* förs också en diskussion som leder fram till slutsatserna som presenteras i kapitel 9 *Slutsatser*.

2 Bakgrund

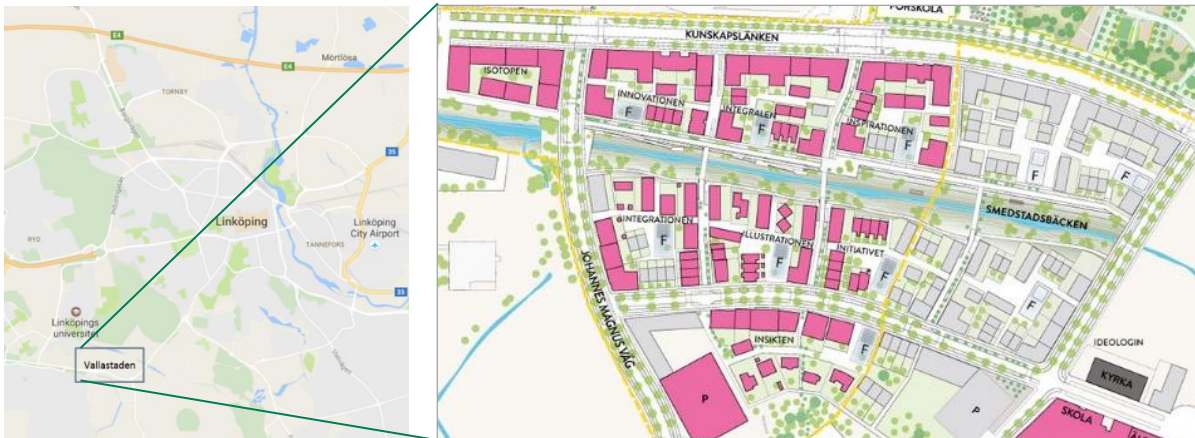
I detta kapitel ges information kring studieobjekten och en introduktion till de ledningsnät som studeras.

2.1 Studieobjekt

I detta projekt finns i huvudsak två studieobjekt, Tekniska verken och Vallastaden. Tekniska verken är företaget som ligger bakom infrakulvert-tekniken och Vallastaden är det område där den är installerad. Studieobjekten används främst till datainsamling från verkliga processer för de system som studeras i fallstudien.

2.1.1 Vallastaden

Vallastaden byggs i sydvästra delarna av Linköping, se *Figur 1*, och är ett område som exploateras för bo- och samhällsexpo 2017. Beslutet att bomässan skulle hållas i Linköping togs i 2012 varpå det följde en arkitekttävling om hur området skulle utformas. Utgångspunkten för det vinnande förslaget var ”människan bygger staden” vilket tillsammans med en vision om en tydlig samhällsbyggnadsmodell och en idé om hur framtidens samhälle kan se ut lett till ett antal nya lösningar inom samhällsbyggnad. Bland de nya idéer som förverkligats och gör expoområdet speciellt är hur olika boendeformer blandas inom området, där varje kvarter innehåller allt från hyreslägenheter till radhus och villor. Dessutom har varje kvarter en gemensam byggnad, kallad felleshus, som ska fungera som möteslokal och erbjuda bl.a. växthus för att uppmuntra de boende till fler möten med sina grannar. Målet med dessa idéer är att främja mångfald inom området och öka den sociala hållbarheten. (Vallastaden, 2016)



Figur 1: Karta över Linköping med detaljkarta över Vallastaden. Rosa byggnader byggs under etapp 1 och grå under etapp 2

Just den sociala hållbarheten lyfts fram som ett fokus som ska spegla livet i området (Vallastaden, 2016). Bland annat nämns att det kommer finnas mötesplatser på tre olika nivåer: i den egna bostaden, i felleshusen och i en större park som anläggs i anslutning till bostadsområdet. Bostadsområdet är även medvetet tätbebyggt ”för att skapa fler naturliga möten i vardagen” (Vallastaden, 2016). Utöver den sociala hållbarheten uppmuntras även ett miljömässigt fokus då bland annat fotgängare och cyklisterna prioriteras över biltrafik. En detaljerad bild över Vallastaden och stadsdelens placering i Linköping visas i *Figur 1*.

2.1.2 Tekniska verken

Då den första detaljplanen över Vallastaden var klar 2013 fick Tekniska verken i uppdrag att förse området med infrastruktur. Som en följd av de nya idéerna och den samhällsmodell som byggts upp i

Vallastaden är bebyggelsen tätare än i de flesta andra stadsdelar. Detta ledde tillsammans med de geologiska förutsättningar som råder på området till att konventionell förläggning av infrastruktur var komplicerat. Då inflyttning skulle ske 2016 var det relativt ont om tid att arbeta fram en ny lösning (Rydin muntligt, 2016). På området är grundvattennivån hög (1,5m under markytan) och marken består främst av lera vilket leder till att eventuella schakt behöver breda slänter, alternativt spont, för att inte rasa (Johansson och Björk, 2012). Att anlägga med spont innebär att slå ner metallplåtar för att motverka förskjutningar i jordlager vilket är kostsamt och försvårar tillgången till ledningarna vid underhållsarbeten. Den täta bebyggelsen hade försvårat möjligheten att öppna upp schakten igen vid eventuella underhållsarbeten och därför utvecklades en ny metod för att förlägga infrastruktur, vilket resulterade i infrakulverten (Rydin muntligt, 2016).

Tekniska verken är ett kommunalt bolag med 885 anställda som ägs av Linköpings kommun och har som uppdrag ”att tillhandahålla och utveckla ledningsbunden infrastruktur och energilösningar för den resurseffektiva regionen”. Företaget erbjuder tillsammans med sina dotterbolag lösningar inom el, biogas, fjärrvärme, fjärrkyla, vatten, avlopp och bredband och har produktionsanläggningar för samtliga system utom bredband. För samtliga ledningsnät äger Tekniska verken distributionsnät i Linköping och företaget har dessutom distribution av fjärrvärme i andra orter i Östergötland samt Katrineholm. Den uttalade vision som företaget arbetar mot är att ”bygga världens mest resurseffektiva region” och genom den kommunala ägaren finns tydliga ägardirektiv för vad Tekniska verken ska erbjuda Linköpingsborna. (Tekniska verken, 2015)

Kulverten är utvecklad av Tekniska verken tillsammans med rör-tillverkaren Uponor. I nuläget är den ca 1800 m lång och dess sträckning visas i *Figur 2* med de röda linjerna. De svarta kvadraterna i figuren är kammare, de gröna rektanglarna är fellethus som det i nuläget finns sju stycken av. De tre längst till höger i figuren, inom det orangea, är områden som inte byggts ut än. Ledningarna i kulverten är anslutna till Linköpings huvudledningar i det övre vänstra hörnet i figuren.

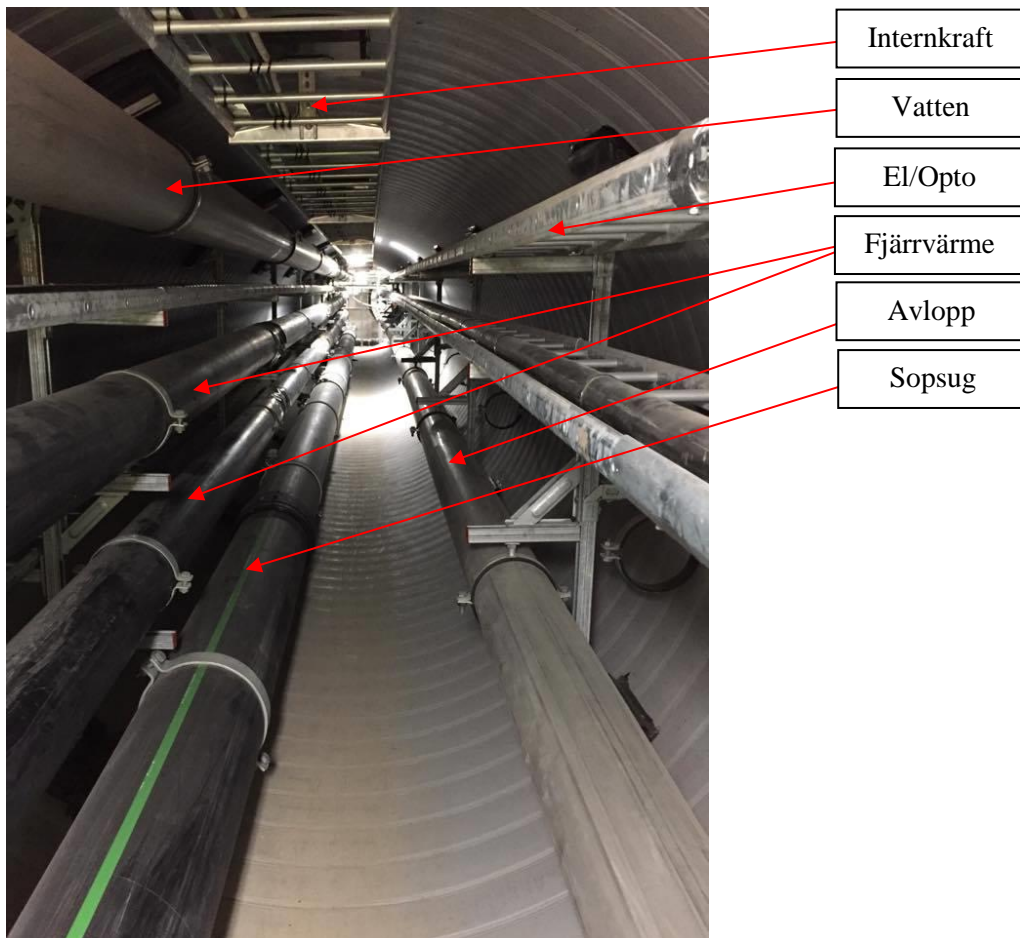


Figur 2: Karta över Vallastaden med kulverttrör (röda streck), kammare (svarta kvadrater) och fellethus (gröna rektanglar) utritade. Orangea markering är områden som inte exploaterats än

2.2 Introduktion till studerade infrasystem

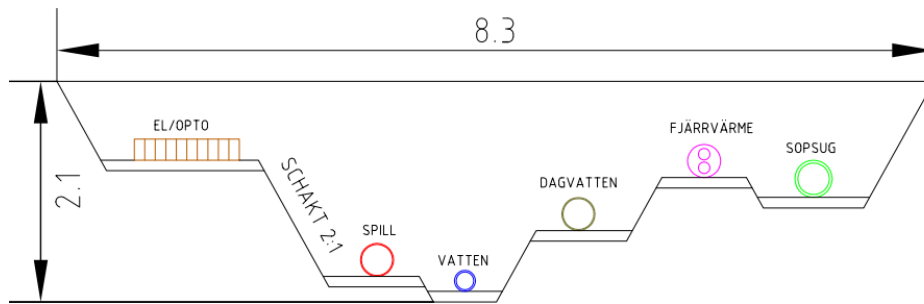
Infrakulverten i Vallastaden är den första i sitt slag och innehåller ledningar och kablar för el, opto, fjärrvärme, sopsug, vatten och avlopp. Infrakulverten är gjord av polyeten (PE) och har en innerdiameter på 2,2 m (Vestman, 2016). För att sammanlänka två kulvertar används en kammare i betong där ledningarna kan förgrenas och dras ut till serviser. I Vallastaden ligger det totalt ca 1800m kulvert fördelat mellan 76 st. kammare och 7 s.k. fellehus, en större kammare med utrymme för teknisk utrustning och möjlighet till nedstigning till kulverten via trappa. Kulverten är nedgrävd på ca 4,5 m djup med lokala avvikelser (Johansson och Björk, 2012).

I *Figur 3* ges ett exempel på hur ledningarna är förlagda i kulverten. Dessutom finns idag tomma fästen som i framtiden kan komma till användning för nya system som kan förläggas i kulverten. Utöver ledningsslagen i kulverten finns också utrustning för internkraft och larmutrustning som varnar vid översvämning, rök- och gasutveckling (Wiklund muntligt, 2016).



Figur 3: Exempel på infrasystemens placering i infrakulverten

Konventionellt grävs infrastruktur i stadsmiljö ner i gator. Ett ”normalsegment” över hur infrasystemen fördelas i gator kan se ut som i *Figur 4* men beroende på gatans bredd varierar deras position något.



Figur 4: Exempel på normalsegment vid konventionell förläggning i gata. Mått för bredd och djup är i m

Som kan ses ligger de olika infrasystemen på olika djup och är utspridda över gatans bredd, där el och opto ofta är förlagt i trottoaren. Vattenledningarna ligger djupast för att minska risken att de andra systemen blir skadade vid läckage. En mer detaljerad beskrivning av infrakulverten sker i kapitel 5 *Resultat av inventeringsanalys*. Där framgår även hur motsvarande system med konventionell teknik ser ut.

2.2.1 Skillnader mellan konventionell förläggning och infrakulvert

I dokumentet "Villkor för arbete inom offentlig plats i Linköpings kommun" från Linköpings kommun (2016) framkommer flertalet aspekter som påverkar ledningsägarens möjlighet att utföra schakt- och grävarbete i stadsmiljö. Bland annat framgår det att "ledningarna och annan underjordisk infrastruktur bör förläggas utanför grönytor med träd och buskar". I en stadsmiljö med begränsade grönytor leder detta till att ledningarna hänvisas till gator och i många städer har därför infrastruktur under lång tid grävts ner i gatorna. I takt med att ny infrastruktur introducerats har det dock blivit allt trängre i marken vilket leder till komplikationer och ökade kostnader vid underhållsarbete. Schaktarbete i gatumiljö är dessutom förknippat med kostnader kopplat till omledning och avstängning av trafik för att garantera säkerheten för både arbetare och trafikanter (Hammarström muntligt, 2016).

De höga kostnaderna för schaktarbete i stadsmiljö leder också till att uttjänta kablar och ledningar tillåts ligga kvar i marken trots att de inte används (Krook et al., 2015). Enligt Andersson (2013) ligger det över 200 ton koppar- och aluminiumkablar i dvala i Linköping, vilket motsvarar 10 % av den totalt nedgrävda mängden. Detta är material som hade kunnat återvinnas men på grund av de höga kostnaderna och låga intäkterna görs det inte. En metod kopplat till ökad återvinning av infrastruktur är urban mining, som innebär återvinning av material nedgrävd i urban miljö (Wallsten, 2015). Fördelarna med återvinning av dessa material bör enligt Andersen (2007) baseras på tre element: marknadsvärdet av det återvunna materialet, den minskade bördan förknippat med utebliven avfallshantering och den minskade bördan förknippat med utvinning av råmaterial.

Att sluta materialflöden och återvinna material för att ersätta jungfrulig produktion av råvaror är även en av delarna i cirkulär ekonomi. Cirkulär ekonomi syftar till att frikoppla dagens icke-hållbara konsumtion från välfärd vilket exempelvis kan göras genom att designa produkter som är gjorda för att hålla längre, vara enklare att underhålla eller lätta att återvinna (Sauvé, Bernard och Sloan, 2016). En följd av dessa förändringar är att definitionen av hållbar utveckling blir mer lättuppnåelig och cirkulär ekonomi kan ses som ett verktyg för att uppnå hållbar utveckling på nationsnivå. Det ska dock noteras att cirkulär ekonomi främst kan användas till den ekonomiska och miljömässiga delen av hållbarhetens tre pelare då den sista pelaren, de sociala aspekterna, inte ryms inom begreppet (Sauvé, Bernard och Sloan, 2016).

Ovanstående problem och utmaningar är kopplade till konventionell förläggning och infrakulverten är ett exempel på en ny produkt som utmanar det traditionella tillvägagångssättet vid förläggning av ledningsbunden infrastruktur. Tekniken har flera potentiella fördelar då ledningarna bland annat ligger

i en mer skyddad miljö än i marken vilket kan reducera underhållsbehovet och öka livslängden på ledningarna. Dessutom innebär den skyddade miljön en möjlig fördelaktig arbetsmiljö jämfört med arbete i gatumiljö då risken för trafikolyckor exkluderas. Det är trängre i kulverten än i ett öppet schakt vilket kan leda till sämre arbetsförutsättningar sett ur ett ergonomiskt perspektiv. Dessutom innebär miljön att mer arbete måste utföras med handkraft då större maskiner som används vid konventionella schakt inte kan användas vilket leder till att arbetsmoment tar längre tid att utföra.

Om ett underhåll behövs är ledningarna mer lättillgängliga i kulverten än då de är nedgrävda i gatorna. Detta innebär att läckorna kan upptäckas tidigare, åtgärdas snabbare och framförallt behövs inget schakt-arbete. Schakt-arbete vid konventionell förläggning medför ökade kostnader, ökad miljöpåverkan och ökad störning i stadsmiljön vilket kan undvikas vid förläggning i kulvert. Kulverten erbjuder även en högre flexibilitet då uttjänta kablar och ledningar kan tas upp och ersättas med nya utan att schaktarbete behöver utföras. Detta underlättar återvinning av material och ökar även möjligheten att introducera nya tekniker och system.

Infrakulverten kan också möjliggöra exploatering av områden som tidigare undvikits på grund av svåra markförhållanden då ledningarna som sagt blir skyddade och att schakt inte behöver öppnas igen vid underhåll, något som leder till problem vid konventionell förläggning under svåra markförhållanden. Att inte behöva öppna schakt igen leder även till att den byggbara ytan ökar. Konventionellt behövs en gatubredd + eventuell yta att placera maskiner på för att gräva fram ledningar men vid förläggning i kulvert försvinner detta behov och dessutom är det möjligt att bygga över kulvert-rören (inte kammare/felleshus). Detta leder till att det är möjligt att bygga tätare stadsdelar och att längden för ledningar och kablar kan reduceras då de konventionellt följer gatunätet men i kulverten kan passera under byggnader och genom innergårdar.

Det är inte bara möjliga fördelar med infrakulverten utan det finns även risker och nackdelar med den nya tekniken. Miljön, som tidigare nämnts kan ha positiv inverkan på ledningar och för arbetsmiljön, kan också få direkt motsatt effekt. Om en arbetsmiljörelaterad olycka skulle hända i den instängda miljön försvåras hjälparbetet. Dessutom kan den instängda miljön leda till att en läcka på ett system påverkar övriga ledningsnät vilket leder till en ökad risk för att flera system slås ut samtidigt jämfört med konventionell förläggning. Om brand skulle bryta ut i kulverten skulle inte bara alla ledningsnät påverkas och släckningsarbetet vara komplicerat utan hela kulvertssystemet skulle riskera att kollapsa och skapa ett slukhål. Detta är aspekter som är av minst lika stor betydelse att utreda som de möjliga fördelarna med tekniken.

3 Teoretiskt ramverk

I detta avsnitt presenteras relevant teori som använts under arbetet. Modellen utvecklas för att kunna hantera både livscykelanalys och livscykelkostnader och därför presenteras relevant teori kring dessa metoder och hur den studerade infrastrukturen påverkar dessa teorier. Dessa metoder har också inverkan på modellens utformning. För att ge en inblick i hur modellen ska kunna hantera den karakteristik infrasystemen har presenteras sedan teori om simulering och datainsamling.

3.1 Livscykelperspektiv på infrastruktur

Varje produkt eller tjänst har en livscykel från tillverkning till återvinning eller förbrukning och genom att studera denna kan viktiga aspekter för produkten identifieras, både miljömässiga och ekonomiska. De olika faserna som passerar under livscykeln kan grovt delas in i:

- Idé och koncept
- Design och utveckling
- Tillverkning
- Installation
- Drift och underhåll
- Bortskaffande (IEC, 2004)

Under dessa olika faser sker aktiviteter som påverkar både kostnader och miljöpåverkan för tjänstens eller produktens totala belastning. Vissa faser har mer ekonomisk aktivitet än andra och några är förknippade med en högre miljöbelastning men genom att gå igenom dessa faser kan resultatet exempelvis användas som beslutsunderlag till förändringar eller för att jämföra två olika produkter med samma funktion. (IEC, 2004)

Livscykelperspektiv på infrastruktur kan bidra med en ökad kunskap kring investeringar över tid och vilket underhåll som kan förväntas vilket underlättar vid beslutsfattande (Frangopol et al., 2004). Investeringar i infrastruktur påverkas av infrastrukturens ekonomiska karaktär:

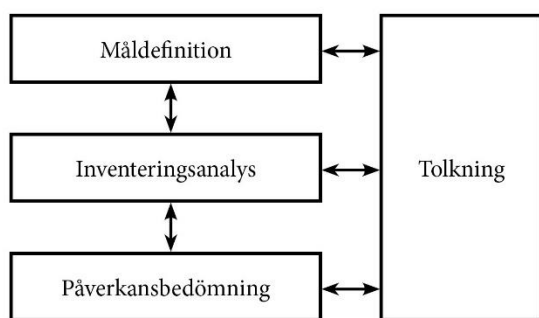
- Investeringar i infrastruktur är sunk costs d.v.s. en investering är irreversibel. När en vattenledning eller väg byggs flyttas den inte eller används till annat än syftet med investeringen
- Infrastrukturprojekt har långa ledtider. Detta innebär att den inledande fasen av ett projekt har negativa kassaflöden och det tar lång tid innan de blir positiva. De långa ledtiderna innebär därför ekonomiska osäkerheter för ledningsägarna
- Projekten innefattar ofta hög risk. I monopol-projekt är risken dessutom asymmetrisk där en lyckad investering inte leder till ökade intäkter men en misslyckad investering leder till ökade kostnader
- Infrastrukturens långa fysiska livslängd leder till lång pay off-tid. Det innebär också risker kring att regler som rör ledningsnäten förändras över tid
- Investeringar kan inte ske stegvis utan måste ske i färre men större steg. Orsakerna till detta är att kapaciteten för ledningsnäten måste vara väl tilltagna för att undvika de stora framtida kostnader en utökad kapacitet innebär.
- Efterfrågan på tjänsterna är oelastiska. Detta innebär att efterfrågan på ledningsnätens tjänster inte påverkas av konkurrens (förutom opto-fiber) och därmed påverkas inte varans pris utifrån utbudet. (van Dijk, 2008)

Av ovan nämnda karakteristiker är det endast oelastisk efterfrågan som minskar risken, övriga aspekter leder till ökad risk i samband med investering (van Dijk, 2008). En ytterligare aspekt som ökar risken vid investeringar är infrastrukturens stokastiska karaktär då den påverkas av oförutsedda yttre händelser. För att medvetandegöra vilka risker en investering innebär eller för att jämföra två

olika investeringar kan modellering av systemen bidra med värdefull kunskap och information till beslutsfattare. Det är inte bara kostnader som är intressant utan även miljöpåverkan är en faktor som spelar in vid beslutsfattande vilket gör det intressant att modellera även detta. Då det verktyg som utvecklas ska ta hänsyn till både miljöpåverkan och kostnader behövs kunskap om både miljömässiga och ekonomiska livscykelanalyser.

3.2 Livscykelanalys - LCA

För att sammanställa den sammanlagda miljöpåverkan en produkt eller tjänst ger upphov till under dess livslängd kan livscykelanalyser utföras. Resultatet från sådana analyser kan bland annat användas för att jämföra miljöpåverkan från olika produkter eller tjänster. För att sammanställa detta finns en etablerad metodik för hur data samlas in och kategoriseras som internationella standardiseringsorganisationen (ISO) tagit fram i två olika standarder, ISO 14040 och 14044. Dessa standarder har något olika syfte då 14040 innehåller övergripande principer och strukturer medan 14044 innehåller detaljerade krav och rekommendationer på utförandet (EU kommissionen, 2010). EU kommissionen sammanfattar dessa standarder i sin General guide for life cycle assessment från 2010, som uttryckligen är skriven för att vägleda LCA-studier i praktiken vilket gör att den ligger till grund för detta kapitel. Metoden för en LCA-studie enligt dessa anvisningar utgår från momenten i *Figur 5*:

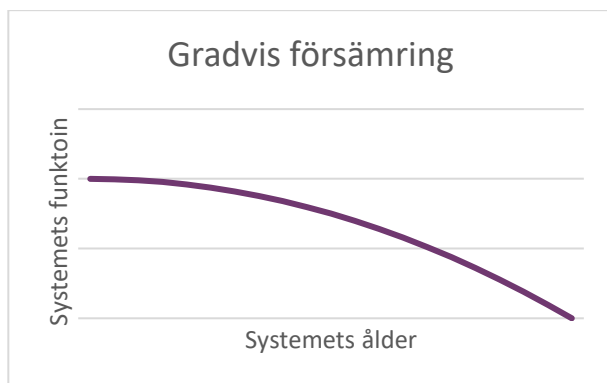


Figur 5: Ramverk för LCA-metodikens olika steg (översatt från EU kommissionen, 2010). Tolkningen sker under samtliga steg och metoden är iterativ där samtliga moment återupprepas och revideras under arbetets gång

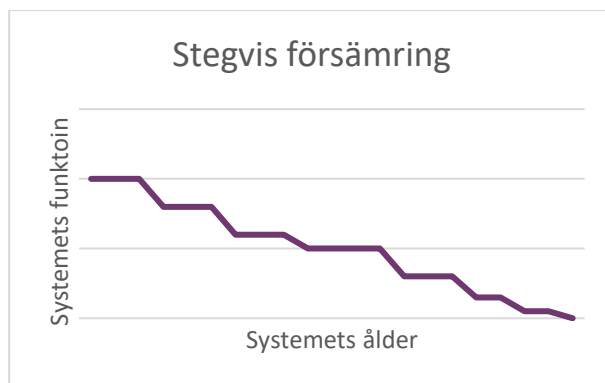
Första steget vid LCA är att definiera målet och syftet studien. I denna fas definieras studiens avsedda målgrupp och användningsområde och det är avgörande för resten av studien att måldefinitionen är tydlig. När användningsområdet bestäms bör även begränsningar till studien i form av metodval och antaganden tas i beaktande (EU kommissionen, 2010). Beroende på användningsområde kan en LCA svara på tre olika frågor: vad kommer hända, vad kan hända eller hur kan målet nås (Finnveden et. al, 2009). Den första, prediktiva, frågan ställer högre krav på datainsamling. Den andra frågan är mer spekulativ och syftar till att ge en bredare uppfattning kring möjliga utfall medan den sista frågan kan användas för att utreda vilka förändringar som krävs för att nå ett uttalat mål. Då syftet med modellen som utvecklas är att utföra spekulativa analyser kring vad som kan hända i framtiden är det denna typ av frågor som inkluderas i fallstudien.

Nästa steg i LCA-metodiken är att bestämma studiens omfattning, alltså vad som ska analyseras och hur. Här beskrivs det i detalj vilka produkter eller tjänster som ska analyseras och vilken funktionell enhet som ska studeras. Funktionell enhet är ett centralt begrepp i LCA-studier då det är det som gör det möjligt att jämföra olika produkter på ett konsekvent sätt. För att kunna göra jämförelser med olika produkter som uppfyller samma funktion är det viktigt att den funktionella enheten är kvantitativ, mätbar och besvarar frågor som ”vad”, ”hur mycket”, ”hur bra” och ”under hur lång tid” (EU kommissionen, 2010). När dessa frågor besvarats kan även ett referensflöde bestämmas, alltså hur mycket energi och material det behövs för att uppnå den funktionella enheten. Ett referensflöde för ledningsbunden infrastruktur innebär de material och komponenter som behövs för att upprätthålla funktionen infrasytemen erbjuder. En svårighet med att kvantifiera detta flöde är att infrastrukturens åldrande beror på många faktorer där både periodiska och icke-periodiska underhåll krävs. Páez-Pérez

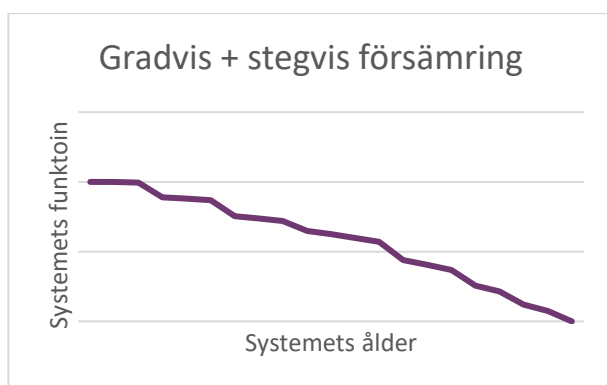
och Sánchez-Silva (2016) konstaterar att teknikens åldrande kan modelleras på tre olika sätt (Figur 9-11) beroende på vilka faktorer som inkluderas:



Figur 6: Gradvis försämring av infrasystem över tid (från Páez-Pérez och Sánchez-Silva, 2016)



Figur 7: Stegvis försämring av infrasystem över tid (från Páez-Pérez och Sánchez-Silva, 2016)



Figur 8: Gradvis och stegvis försämring av infrasystem kombinerat över tid (från Páez-Pérez och Sánchez-Silva, 2016)

I *Figur 6* representeras systemets försämring endast utifrån en ökad ålder och gradvis försämring, *Figur 7* representerar en stegvis försämring genom oförutsedda händelser och *Figur 8* är en kombination av de två. Beroende på modellens syfte kan enskilda eller samtliga typer av åldrande inkluderas i modellen (Páez-Pérez och Sánchez-Silva, 2016). Utöver dessa typer av försämringar finns även system med endast två stadier: fungerande och icke-fungerande, exempelvis en elkabel (Frangopol et al., 2004).

Detta leder fram till nästa del av omfattningen, nämligen systemgränserna. När den funktionella enheten bestäms behöver även systemgränserna definieras för att bestämma vad som ska studeras och vad som kan avgränsas bort (EU kommissionen, 2010). Enligt Finnveden et. al (2009) kan systemgränserna sättas på tre olika nivåer: mellan det tekniska systemet och omgivningen, mellan betydande och icke-betydande processer samt mellan det tekniska system som studeras och andra system.

När både funktionell enhet och systemgränser definierats är det möjligt att börja med nästa steg i metodiken, livscykelinventeringen. I detta steg samlas data och information systematiskt in genom att identifiera processer inom systemgränserna, samla in data kring processerna och modellera systemet. De data som framförallt är av intresse är material och energiflöde till och från de olika processerna och stödprocesserna som ligger inom systemgränserna (EU kommissionen, 2010). En utmaning med denna fas är detaljnivån på informationen som krävs. För att kunna beräkna miljöpåverkan från en produkt behöver information samlas in med hög detaljnivå vilket försvårar arbetsgången och ofta är tidskrävande. För att underlätta detta arbete finns databaser med utsläppsdata från

tillverkningsprocesser och produkter som kan användas till att skaffa information från liknande processer som de som studeras. Ytterligare en utmaning med datainsamling är att det på förhand inte går att avgöra vad som är betydande eller obetydligt vilket gör att mer information måste samlas in än vad som behöver användas (Finnveden et. al, 2009).

Det sista steget i metodiken är beräkningen av miljöpåverkan och tolkning av resultatet. I detta steg beräknas miljöpåverkan som sker från de material och energiflöden som identifierats i det tidigare steget för att sedan analyseras och tolkas. Tolkningssteget är nödvändigt för att sätta studien i relation till dess avgränsningar och omfattning. I analysen bör även en känslighetsanalys genomföras där olika parametrar och antaganden analyseras separat för att bedöma deras inverkan på det totala resultatet. (EU kommissionen, 2010)

Slutligen bör samtliga steg i metoden upprepas då en LCA-studie är en iterativ process där varje iteration möjliggör för små justeringar och insamlande av mer specifik data vilket i slutändan leder till en mer komplett LCA. (EU kommissionen, 2010)

LCA-metoden ställer ett antal krav på utvecklingen av modeller som ska utföra beräkningarna av miljöpåverkan. För produkter med lång livslängd, likt ledningsbunden infrastruktur, blir osäkerheterna större och i synnerhet då produkterna kan påverkas av yttre, slumpmässiga, händelser (van Dijk, 2008) blir osäkerheterna betydande. Förhållandet till omgivningen gör det också svårare att sätta en tydlig systemgräns runt infrastrukturen då omgivningen har inverkan på ledningar och kablers livslängd. Enligt Finnveden et. al (2009) finns det tre olika sätt att hantera dessa relationer och osäkerheter: antingen genomförs ytterligare datainsamling för att minska osäkerheterna, osäkerheterna diskuteras med inblandade parter för att nå samförstånd om vilka val som ska göras eller så inkluderas osäkerheterna genom att representeras av sannolikhetsfördelningar och behandlas statistiskt. Samtliga tillvägagångssätt har utmaningar där ytterligare datainsamling kräver tid, samförstånd kan ske under felaktiga antagande och leda till missvisande information och sannolikhetsfördelningar är svåra att göra representativa (Finnveden et. al, 2009), speciellt för system som påverkas av många faktorer.

Infrastrukturens karakteristik ställer ett antal krav på en modell som ska beräkna miljöpåverkan. Dels krävs det att modellen kan hantera de osäkerheter kopplade till livslängden och omgivningen som förekommer och dels krävs det även att osäkerheter kopplade till hur representativ data och information är kan hanteras. För att kontrollera hur modellen överensstämmer med verkligheten behövs också validering för att tolka resultatet och kontrollera dess rimlighet (Páez-Pérez och Sánchez-Silva, 2016). Enligt Finnveden et. al (2009) är validering av LCA-modeller uppenbarligen viktigt men det råder delade meningar kring genomförbarheten då en fullständig validering kräver validering av varje enskild enhetsprocess och relation vilket är svårt att utföra. Validering kan även ses som nästa iteration i LCA-metodiken där data kan förfinas och modellen vidareutvecklas. Slutligen menar Finnveden et. al (2009) därför att validering av LCA-modeller är något som behöver mer uppmärksamhet i framtida forskning.

3.3 Livscykelkostnadsanalys - LCC

Livscykelkostnadsanalys (LCC) är en metod som används för att beräkna samtliga kostnader som uppstår under en livscykel för en produkt eller tjänst. Till skillnad från LCA finns det ingen ISO standard som anger vilka delmoment som skall ingå och liknande men trots detta finns enligt Lichtenvor et al. (2008) en konsensus kring vilka steg en LCC bör innehålla. Dessutom finns andra guidelines att följa som t.ex. IEC 60300-3-3: Dependability management – Life cycle costing (2004), vilket gör det möjligt att tala om LCC som en bred och använd metodik. Det finns också tydliga likheter med metodiken för LCA då en LCC, precis som LCA, bör innehålla måldefinition, datainsamling och kostnadsberäkning (IEC, 2004).

Enligt riktlinjerna från IEC (2004) kan en LCC antingen göras för samtliga faser i livscykeln eller begränsas till utvalda delar av livscykeln beroende på vad studien är intresserad av. Dock framhävs att

en LCC-modell är en förenklad bild av verkligheten och för att göra denna realistisk bör följande punkter tas hänsyn till:

- Produktens egenskaper bör representeras så att omgivningens inverkan på produkten framgår, exempelvis hur omgivningsmiljön påverkar underhållsfrekvens eller vilka stödsystem som behövs för produktens funktion.
- Modellen bör vara så pass omfattande att alla faktorer som är relevanta för LCC-analysen inkluderas och framhävs.
- Modellen bör vara enkel att förstå och använda för att kunna användas som beslutsunderlag och även enkel att utveckla och modifiera.
- Den bör även vara utformad så att det går att analysera enskilda moment separat. (IEC, 2004)

För att uppnå dessa punkter bör arbetsprocessen för LCC-modelleringen utgå från nedbrytning av kostnadskategorier, fortsätta med nedbrytning av arbetskategorier, val av kostnadskategorier och -element. Därefter kan en uppskattning av kostnader göras för att slutligen presentera resultatet. När det är möjligt kan även miljö- och säkerhetsaspekter, osäkerheter och risk tillsammans med känslighetsanalys för att identifiera kostnadsdrivare utföras. (IEC, 2004)

En svårighet med att applicera ovanstående punkter på infrastruktur är dels att det finns olika sätt att modellera systemens funktion men även olika metoder för att modellera kostnaderna. Enligt Frangopol et al. (2004) kan dessa antingen modelleras som konstanta och oberoende av orsak till underhållet eller så kan de modelleras för att bero på flera faktorer, som systemets funktion före och efter underhållet utförts. Att bedöma systemets funktion för ledningsbunden infrastruktur är svårt, då en läckande ledning fortfarande kan anses fungera tillräckligt.

Vid uppskattning av kostnader för nya produkter eller beslut som leder till förändringar i produktionen kan tre olika metoder användas beroende på vilken information som finns tillgänglig. Om det finns detaljerad information från liknande processer kan en ingenjörsmässig kostnadsuppskattning göras. Detta innebär att produkten bryts ned i enskilda komponenter eller delar och kostnader uppskattas separat för att ge en total kostnad. En annan metod för att uppskatta kostnaderna är att granska historik för äldre, liknande produkter och utifrån detta dra slutsatser kring vad det kommer kosta idag. Denna metod kallas analog kostnadsuppskattning. Den sista metoden kallas parametrisk kostnadsuppskattning och bygger på att kostnader bryts ned till samband och ekvationer som sedan kan användas för att beräkna olika scenarier. (IEC, 2004)

Enligt Lichtenvor et al. (2008) är det speciellt intressant att genomföra LCC vid jämförelser av två liknande produkter eller tjänster. Då olika LCC-studier kan ha olika omfattning och syfte kan LCC delas in i tre olika kategorier baserat på vad omfattningen av analyserna (Lichtenvor et al. 2008):

- Konventionell LCC
 - Vid en konventionell LCC sammanställs alla kostnader som är kopplade till den huvudsakliga producenten och/eller användaren. Sammanställningen fokuserar på verkliga, interna kostnader och tar inte alltid hänsyn till samtliga steg i livscykeln utan kan välja att fokusera på utvalda faser.
- Miljö-LCC
 - En miljö-LCC skiljer sig från den konventionella då miljö-LCC sker i samband med att en LCA utförs. Dessutom möjliggör en miljö-LCC för att ta med ekonomiska kostnader för utsläpp, s.k. internalisering av externaliteter, något som inte görs i en konventionell LCC. Därigenom tar en miljö-LCC också hänsyn till fler aktörer än endast de huvudsakliga producenterna och/eller användarna, som är fallet för en konventionell LCC.
- Social-LCC

- En social-LCC tar hänsyn till samtliga kostnader för en produkt på samhällsnivå, oavsett vilken aktör som betalar eller när betalningen måste ske. Således kan en social-LCC ses som en utveckling av en miljö-LCC med tilläggen att även kostnader som uppstår efter produktens fysiska livslängd är slut skall tas med och att samtliga aktörer som berörs på samhällsnivå skall tas med. Detta är den mest omfattande typen av LCC.

3.3.1 Prospektiv vs. Retrospektiv LCC

En LCC-studie kan genomföras under olika delar av en produkts livsscykel och med olika tidsperspektiv, antingen prospektiv eller retrospektiv. En prospektiv LCC genomförs vanligtvis i ett tidigt skede av livscykeln för att beräkna framtida kostnader och kan användas som underlag vid produktionsplanering. En retrospektiv LCC genomförs däremot senare i livscykeln och har för avsikt att analysera de befintliga kostnaderna för en produkt. En prospektiv LCC är förknippad med större osäkerheter då den är framtidsorienterad och därmed inte kan räkna med befintliga kostnader. (Lichtenvor et al. 2008)

3.3.2 Steady state vs. Dynamisk

En skillnad mellan LCA och LCC är hur tidsperspektivet för livslängden hanteras. En LCA bygger vanligtvis på en statisk modell där en miljöpåverkan alltid är lika allvarlig och har samma konsekvens oavsett när i tiden den sker. En konventionell LCC är däremot ofta kvasi-dynamisk, ett mellanting mellan statiskt och dynamiskt där vissa variabler är konstanta över tiden medan andra tillåts variera. Detta för att kunna hantera bland annat pengars olika värde i tiden och risker kopplade till investeringar etc. (Lichtenvor et al. 2008)

3.3.3 Beräkningar

Vid beräkningar i en LCC måste man ta i beaktande att många kostnader och intäkter sker i framtiden. Detta gör att det är nödvändigt att omvandla värdet av dessa framtida pengaflöden till nuvärde genom diskontering (Boussabaine och Kirkham, 2008). Om livscykeln för produkten som analyseras dessutom är lång måste ett beslut tas kring hur inflationen behandlas. Enligt Boussabaine och Kirkham (2008) bör en diskonteringsränta som tar hänsyn till förväntad inflation användas vid diskontering av nominella livscykelkostnader. För reella livscykelkostnader bör räntan anpassas för att eliminera effekterna av inflation vilket kan göras genom att subtrahera förväntad inflation från en nominell ränta. Historisk har den reala räntan följt konsumentprisindex (KPI) (Lagerwall, 2008), alltså prisutvecklingen på varor och tjänster, vilket innebär att sådana prognoser beräknar vilket värde investeringar får i framtiden (Statistiska centralbyrån, 2016).

För att omvandla framtida kostnader till dagens värde används nuvärdesmetoden för hela livscykeln:

$$LCC = G + \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+d)^t}, \text{ där} \quad (1)$$

LCC = samtliga livscykelkostnader

n = antal tidsperioder, ofta förväntad livslängd

C_t = summan av intäkter och kostnader för varje tidsperiod

d = diskonteringsränta

G = grundinvestering. (Boussabaine och Kirkham, 2008)

En LCC som beräknas enligt formeln ovan utgår från att alla värden går att bestämma deterministiskt. I verkligheten är det ofta svårt att göra då det inte går att med säkerhet säga hur framtida kostnader

kommer se ut och ju längre livscykel, desto mer osäkerheter träder in i beräkningarna. För att hantera detta kan en stokastisk beräkning (vilket innebär att variablernas värde slumpas fram inom givna sannolikhetsfördelningar) av LCC göras genom att utvidga formeln ovan till:

$$f(LCC) = f(G) + \sum_{t=0}^n \frac{f(C_{ti})}{(1+f(d))^t}, \text{ där} \quad (2)$$

$f(LCC)$ = sannolikhetsfördelning av samtliga livscykelkostnader

n = antal tidsperioder, ofta förväntad livslängd

$f(C_{ti})$ = sannolikhetsfördelning för summan av intäkter och kostnader för varje tidsperiod och kostnadspost (i)

$f(d)$ = sannolikhetsfördelning av diskonteringsränta

$f(G)$ = sannolikhetsfördelning av grundinvestering. (Boussabaine och Kirkham, 2008)

För att använda denna stokastiska beräkningsmetod, ekvation (2), behöver de inkommande variablerna ha en sannolikhetsfördelning och resultatet som erhålls kan betraktas som en riskprofil som visar på möjliga utfall (Boussabaine och Kirkham, 2008). En utmaning med denna metod är att representera de inkommande variablerna med tillförlitliga fördelningar som representerar vad som händer. *Figur 6- Figur 8* i föregående avsnitt illustrerar de olika typer av föråldring som förekommer för infrastruktur och beroende på vilken som anses mest representativ för det studerade fallet modelleras de med olika fördelningar. Dessutom kan systemen modelleras med endast fungerande och icke-fungerande och periodiska eller icke-periodiska underhåll (Frangopol et. al, 2004).

Med tanke på infrastrukturens ekonomiska karaktär och de osäkerheter som finns kan LCC-modeller ge en holistisk bild som kan användas som beslutsunderlag vid nyinvestering och underhållsplanering. I slutskedet av modellutvecklandet lyfter Páez-Pérez och Sánchez-Silva (2016) fram validering som en nödvändighet för att tolka resultatet och kontrollera hur det stämmer överens med de verkliga system som studeras. Följande fem valideringsaspekter rekommenderas:

1. Validering av den bakomliggande teorin mot de verkliga system som undersöks
2. Validering av modellen mot teorin
3. Validering av simuleringsprogrammet kontra modellen
4. Validering av koncepten i modellen mot mätbara indikatorer i de verkliga systemen
5. Empirisk validering av resultaten i modellen mot observationer i de verkliga systemen (från Páez-Pérez och Sánchez-Silva, 2016).

Genom att utföra dessa valideringar i slutskedet av modellutvecklingen kontrolleras resultatets rimlighet och modellens förhållande till de verkliga system som studeras. Utmaningar med validering enligt ovanstående punkter är att det finns risk för cirkelresonemang, alltså att den bakomliggande teori som ligger till grund för modellen är den teori modellen valideras mot. Validering av modellen utförs i avsnitt 8.6 *Teoretisk validering av modellen*.

3.4 Monte Carlo-simulering

En metod att basera beräkningen på sannolikhetsfördelad input och stokastiska värden är Monte Carlo-metoden. Att den är stokastisk innebär att inkommande variabler slumpas fram utifrån sannolikhetsfördelningar vilket gör att olika iterationer väljer olika värden slumpmässigt. Beräkningar enligt denna metod blir ofta väldigt stora och komplexa men fördelarna med att bygga en kvantitativ modell snarare än en kvalitativ, som grundas på subjektiva bedömningar, är att det är lättare att bilda en (oberoende) uppfattning av vilket resultat som är mest troligt. En utmaning med metoden är att representera de inkommande variablerna med lämplig sannolikhetsfördelning eftersom desto mer lik verkligheten den är, desto mer pålitligt blir resultatet. (Boussabaine och Kirkham, 2008)

Ytterligare utmaningar med Monte Carlo-simulering är skillnaden på osäkerheter och variationer. Faktorer som har en tydligt dokumenterad variation, som energianvändning i bostäder t.ex., blir mer pålitliga att simulera medan faktorer med stora osäkerheter, som hur ofta eller länge underhåll behöver göras, i vissa situationer kan vara okänt och därmed svårt att simulera ”korrekt”. Detta beror på att modellen inte gör skillnad på osäkerheter och variationer utan betraktar de på samma sätt, vilket kan leda till missvisande resultat om inte de inkommande variablerna utformas för att behandla detta. Även korrelationer mellan faktorer är svåra att simulera p.g.a. slumpmomentet (Boussabaine och Kirkham, 2008).

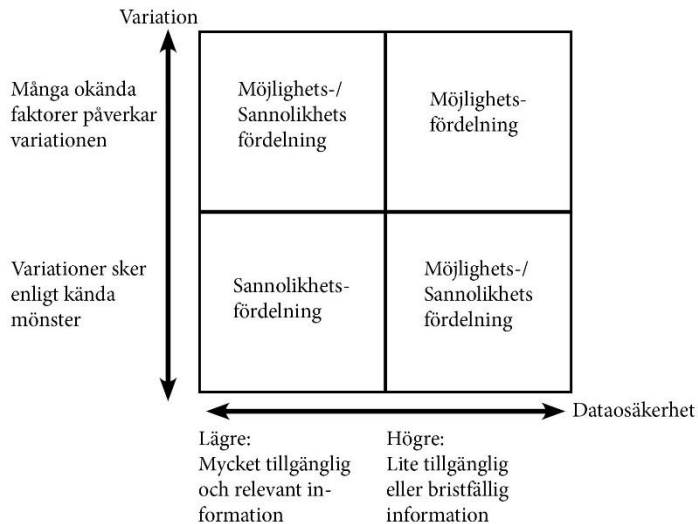
3.5 Teori om datainsamling och datahantering

Eftersom en viktig del av både LCA och LCC är datainsamlingen finns det ett antal aspekter att ta hänsyn till inom detta område. Speciellt vid användning av stokastiska metoder som Monte Carlo-simulering i samband med datainsamling via intervjuer är det viktigt att underlaget behandlas på rätt sätt (Hedbrant och Sörme, 2001). Hedbrant och Sörme (2001) lyfter fram fyra situationer där statistiska metoder inte räcker till:

- om det finns för lite data
- om data baseras på subjektiva uppskattningar via intervjuer
- om data inte är oberoende
- om data är osäker

Vid situationer med för lite dataunderlag blir statistiska fördelningar omöjliga att göra representativa och generaliserande. Vid sådana situationer är intervjuer lockande för att få erfarenheter av experter inom området. Detta leder till Hedbrant och Sörmes andra situation: datainsamling via intervjuer. När data samlas in via intervjuer kan den bli påverkad av flera omkringliggande faktorer som hur frågan formuleras, omständigheterna vid intervjutillfället och möjligheten för intervjuobjektet att tänka igenom sitt svar. Dessutom lyfter Hedbrant och Sörme (2001) fram svårigheterna med att tolka numeriska uppskattningar via intervjuer. Till exempel kan en uppskattning på 10 betyda både *värdet* 10 (att skilja från 9,8 och 10,2) eller *storleken* 10 (att skilja från 5 och 20). Om data inte är oberoende från olika, separata källor är den inte lika trovärdig att basera slutsatser på och kan ses som mer betydande än den egentligen är. (Hedbrant och Sörme, 2001)

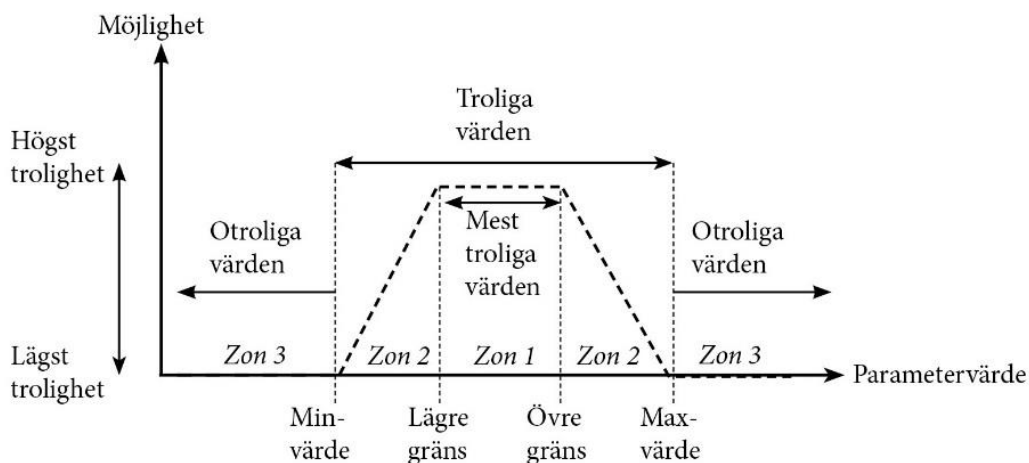
Den sista situationen Hedbrant och Sörme (2001) lyfte fram, osäker data, kan bero på ett antal olika faktorer. För datainsamling via intervjuer uppkommer osäkerheter i flera led, allt från situationerna runt intervjun till hur korrekt och representativt svaret är, vilket gör osäkerheterna till något som måste tas hänsyn till under studiens fortsättning. Feiz (2016) skiljer på två olika sätt att hantera detta: antingen genomför man ytterligare datainsamling för att minska eller undanröja osäkerheterna eller så inkluderar man osäkerheterna i sitt fortsatta arbete. Vidare föreslår Feiz fyra olika sätt, se *Figur 9*, att inkludera osäkerheterna beroende på hur mycket som är okänt eller osäkert med avseende på variation och tillgänglig information:



Figur 9: Val av representativ fördelning beroende på variation och osäkerheter i data (översatt från Feiz, 2016). Större osäkerheter och okända variationer innebär alltså att s.k. möjlighetsfördelningar kan användas

För parametrar med kända variationer och med gott om tillgänglig information lämpar sig alltså, utifrån Figur 9, någon form av sannolikhetsfördelning väl för att representera de möjliga utfallen. Dock menar Feiz att då osäkerheterna för både variation och tillgänglig information ökar har det mindre betydelse vilken distribution som används och därmed kan ”möjlighetsfördelningar” användas snarare än statistiska sannolikheter. Dessa möjlighetsfördelningar representerar därmed karaktären på parametrarna men är inte lika exakta i median- och medelvärde som en sannolikhetsfördelning. (Feiz, 2016)

En sådan möjlighetsfördelning kan se ut som Figur 10. Om de data och information som finns tillgänglig inte är tillräcklig för att behandlas statistiskt kan fyra subjektiva värden (minsta värde, lägre och övre gräns för mest troliga värden och maximalt värde) användas till att ge en representativ bild av möjliga utfall. (Feiz, 2016)



Figur 10: Möjlighetsfördelning på trapets-form som definierats av fyra (subjektiva) parametrar som skapar tre olika zoner. Zonerna innebär olika troligheter där zon 1 är mest trolig och zon 3 otrolig (översatt från Feiz, 2016)

Utifrån dessa fyra värden bildas tre olika zoner (1, 2, 3) där zon 1 innehåller de värden som är mest troliga att de inträffar och därmed har ”möjligheten” 1. Zon 3 å andra sidan representerar de värden

som aldrig inträffar och därmed har en möjlighet på 0. Möjligheten för zon 2 blir således en rät linje där möjligheten ökar från 0 till 1.

Andra sätt att behandla osäkerheter är att frångå traditionella intervall som \pm (typ 100 ± 30) och istället använda $*/-$ operatorer (multipliserat och dividerat) (Hedbrant och Sörme, 2001). När osäkerheterna och variationen blir större riskerar den minsta uppskattningen att bli negativ vid användning av \pm (ex. 100 ± 300), något som inte kommer inträffa för $*/$ (eftersom multipliserat och dividerat med en faktor aldrig blir negativt). Hedbrant och Sörme presenterar också olika osäkerhetsnivåer och lämpliga $*/-$ faktorer att använda beroende på källan till informationen i Tabell 1:

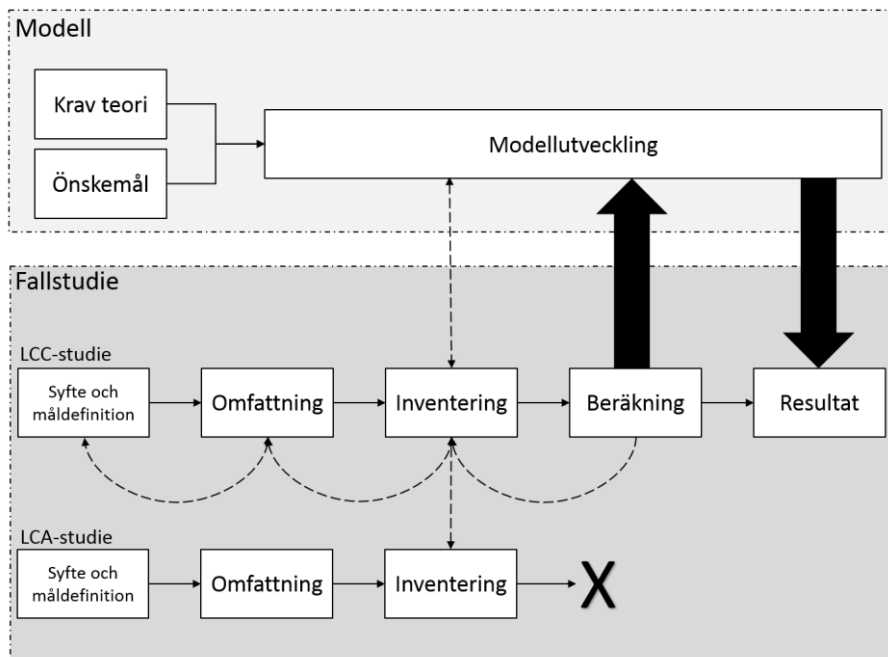
Tabell 1: Osäkerhetsnivå beroende på källa och motsvarande intervall (översatt från Hedbrant och Sörme, 2001)

| Osäkerhets-nivå | Källa | Intervall |
|-----------------|---|-----------|
| Nivå 1 | Officiell statistik på lokal nivå. Information från myndigheter/industri. | $*/ 1,1$ |
| Nivå 2 | Officiell statistik på regional och nationell nivå. Information från myndigheter/industri. | $*/ 1,33$ |
| Nivå 3 | Officiell statistik på nationell nivå nerskalad till lokal nivå. Information på begäran från myndigheter/industri. | $*/ 2$ |
| Nivå 4 | Information på begäran från myndigheter/industri. | $*/ 4$ |
| Nivå 5 | | $*/ 10$ |

Som kan ses i tabellen ovan ökar intervallet exponentiellt och för högre nivåer blir intervallet även mer osymmetriskt (ett värde på 1 för nivå 5 får intervallet 0,1-10 medan ett värde på 1 för nivå 1 får intervallet 0,909-1,100). Dessa faktorer kan användas för att skapa intervall utifrån enskilda värden och beroende på källan. De högre nivåerna motsvarar mer osäkra källor där informationen inte är lika exakt eller tillämpbar som de lägre nivåernas källor. (Hedbrant och Sörme, 2001)

4 Metodbeskrivning

Figur 11 ger en bild över arbetsgången för detta examensarbete. Ansatsen inledningsvis var att utveckla en modell samt att genomföra fallstudie med både LCA- och LCC-analyser. Enligt IEC (2004) kan en LCC-analys följa LCA-metodikerna och därför följde arbetsprocessen för fallstudien LCA-metodikerna för båda studierna. Halvvägs genom arbetet avslutades LCA-delen då det krävde en detaljnivå på datainsamlingen som inte var möjlig att genomföra inom projektets tidsramar. Vid denna tidpunkt hade metoden bestämts och arbetet kommit så långt att LCC-delen fortsatte följa LCA-metodikerna. Modellutvecklingen har gått i första hand och är kopplad till fallstudien genom de data som samlats in till LCC-studien och de beräkningar som utförs.



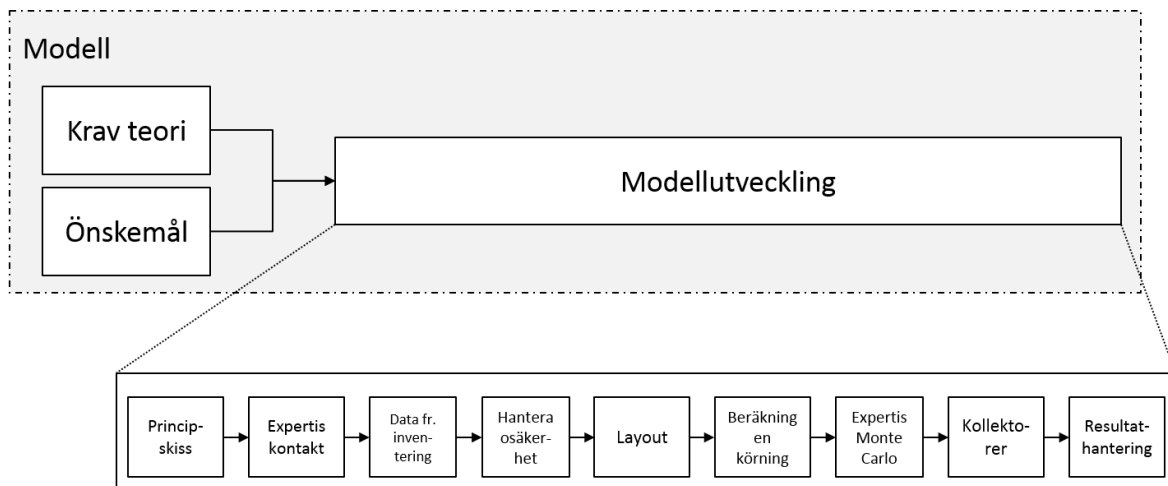
Figur 11: Metodbeskrivning för arbetsgången. Modellutvecklingen har gått i första hand och appliceras på en fallstudie i form av en LCC-studie. Fallstudien används som grund för modellutvecklingen då inventeringen i fallstudien används som grund för vilken data och vilka beräkningar modellen behöver kunna utföra. Resultaten från modellen används för att visa vad den kan utföra och hur verktaget kan appliceras på en LCC-studie

Vid modellutvecklingen identifierades inledningsvis krav kring modellutveckling från teori och önskemål från uppdragsgivarna. Dessa krav och önskemål har påverkat utvecklingen av modellen även om inte alla identifierade aspekter inkluderats.

Som kan ses utfördes modellutveckling och fallstudie parallellt och det finns även starka kopplingar. Fallstudien används både som grund och tillämpning av modellen då den information som samlas under inventeringen speglar vad modellen behöver klara av. På samma sätt motsvarar beräkningarna som utförs i modellen resultatet av fallstudiens LCC-del, som därigenom illustrerar vad modellen kan utföra i nuläget. Metod för både modellutveckling och fallstudie beskrivs nedan tillsammans med den litteratursökning som genomfördes.

4.1 Metod för modellutveckling

Modellen utvecklades parallellt med fallstudien. Inledningsvis samlades krav och önskemål från såväl teori som uppdragsgivare för att måla upp en bild över vad modellen skulle klara av att genomföra i slutändan. Efter detta skedde utvecklingen av modellen enligt Figur 12. I detta avsnitt beskrivs denna metod, först hur kraven och önskemålen från teori och uppdragsgivare påverkat modellen och sedan arbetsgången.



Figur 12: Flödesschema för modellutvecklingen som inleds med en kartläggning av krav från teori och önskemål från uppdragsgivare. De aspekter som identifierats i detta inledande skede genomsyrade den efterföljande arbetsgången

4.1.1 Modellutveckling utifrån teori

Riktlinjerna för LCC-modeller från IEC (2004) ställer ett antal krav på utvecklandet av modeller som ska utföra LCC-beräkningar. Det första som IEC (2004) rekommenderar är att identifiera de faser i livscykeln som ska modelleras. För en modell som ska representera kulverten och konventionellt förlagd infrastruktur motsvarar detta de systemgränser som gäller för fallstudien som visas i *Figur 16* (under rubrik *4.2.2 Omfattning och avgränsningar*), d.v.s. processerna för ”installation” och ”drift/underhåll”.

Under ”installation” förekommer ett antal processer och kostnadskategorier uppdelade på material, arbete och maskinanvändning. Förutom det material som köps in till ledningsnäten sker det under installationsfasen också materialkostnader kopplade till schakt och andra processer som krävs för att få ett fungerande ledningsnät på plats. Samtliga material är förknippade med en miljöpåverkan vilket gör att vikten och miljöpåverkan kan specificeras för framtida LCA-studier. Under installationsfasen sker även en hel del arbete vid schaktning, sammanfogning av rör och återställning av mark. För miljöanalysens skull är det av intresse att skilja på arbete och maskinanvändning för dessa processer och därför delas de även upp i olika kostnadskategorier. För denna inledande livscykelphas kunde en ingenjörsmässig kostnadsuppskattning göras då kostnaderna för varje ledningsnät kunde identifieras separat.

”Drift/underhåll” är den sista livscykelphas som studeras och även den tidsmässigt längsta. Det är därmed under denna fas som störst osäkerheter träder in i modellen. För att modellera vad som kan hända under den studerade tidsperioden görs därför en analog kostnadsuppskattning över de underhållsarbeten som sker. Detta baseras på historik och information kring tidigare skador på de olika ledningsnäten. Utifrån denna information kan en bild skapas kring hur ofta det är rimligt att olika skador sker och även vad de kostar att reparera. Dock skiljer sig den verklighet modellen ska simulera från den verklighet som råder för de ledningar som legat i marken en längre tid då förläggningstekniker och ledningsmaterial utvecklats. För att hantera dessa osäkerheter och variationer används Sörme och Hedbrandts (2001) osäkerhetsfaktorer där uppgifter om hur många avbrott som i snitt sker per år omvandlas till intervall. Genom dessa intervall kan modellen påvisa osäkerheterna i data och resultat, i enlighet med Feiz (2016) möjlighetsfördelning.

Beräkningarna i modellen modelleras med de samband för stokastiska beräkningar som Boussabaine och Kirkham (2008) föreslår:

$$f(LCC) = G + \sum_{t=0}^n \frac{f(C_{ti})}{(1+f(d))^t}, \text{ där} \quad (3)$$

$f(LCC)$ = sannolikhetsfördelning av samtliga livscykelkostnader

n = antal tidsperioder

$f(C_{ii})$ = sannolikhetsfördelning för summan av kostnaderna för varje tidsperiod och kostnadspost (i)

$f(d)$ = sannolikhetsfördelning av diskonteringsränta

G = grundinvestering.

Sannolikhetsfördelningen för kostnaderna i varje tidsperiod och kostnadspost baseras på hur det förväntade antalet underhåll modelleras. Diskonteringsräntan hanteras i modellen genom en faktor som multipliceras med kostnaderna i varje tidsperiod och kan därför anpassas av användaren beroende på om det är nominella eller reala kostnader som är av intresse. Det ska noteras att grundinvesteringarna i nuläget inte är uppbyggda av någon sannolikhetsfördelning, till skillnad från ekvation (2) av Boussabaine och Kirkham (2008).

Förutom att vara en funktion för livscykelkostnaderna behandlar modellen miljöpåverkan på liknande sätt. Funktionen som modellen använder för att beräkna miljöpåverkan ser alltså ut som nedan:

$$f(LCA) = Mp_{initial} + \sum_{t=0}^n f(Mp_{ti}), \text{ där} \quad (4)$$

$f(LCA)$ = sannolikhetsfördelning av miljöpåverkan från hela livscykeln

n = antal tidsperioder

$f(Mp_{ii})$ = sannolikhetsfördelning för miljöpåverkan från varje tidsperiod och kostnadspost (i)

$Mp_{initial}$ = initial miljöpåverkan

Ekvation (3) tillsammans med ekvation (4) är de beräkningar som modellen utför för att beräkna kostnader respektive miljöpåverkan för infrastrukturens livscyklar. Det är dessa ekvationer som Monte Carlo-simuleringen bygger på då det är i de av användaren fördefinierade sannolikhetsfördelningarna för underhåll som slump-momentet sker. Underhållsfrekvenserna och komponenters livslängd beräknas utifrån två separata sannolikhetsfördelningar: antal underhåll som förväntas under 100-årsperioden och när underhållen sker i tiden.

Orsaken till att LCA och LCC-beräkningarna sker separat och att underhållsfrekvenserna beräknas utifrån två olika sannolikhetsfördelningar är för att följa de rekommendationer IEC (2004) föreslår. Genom att separera dessa variabler blir modellen mer flexibel och möjliggör en tydligare representation av omgivningens inverkan på produkten. Dessutom öppnar det för fler typer av känslighetsanalyser då många olika processer kan analyseras separat inom både kostnader och miljöpåverkan.

Det sista steget i både LCC och LCA-analyser är att tolka resultatet. För att göra detta finns ett antal diagram att studera och det är upp till användaren att identifiera vad som är intressant. De resultat som används i denna studie framgår i kapitel 7 *Resultat*.

4.1.2 Modellutveckling utifrån andra krav och önskemål

Förutom rekommendationer från teori har ett antal önskemål och aspekter från uppdragsgivarna tagits hänsyn till vid modellutvecklandet. Uppdragsgivarna har även bidragit med råd kring tillvägagångssättet rent praktiskt.

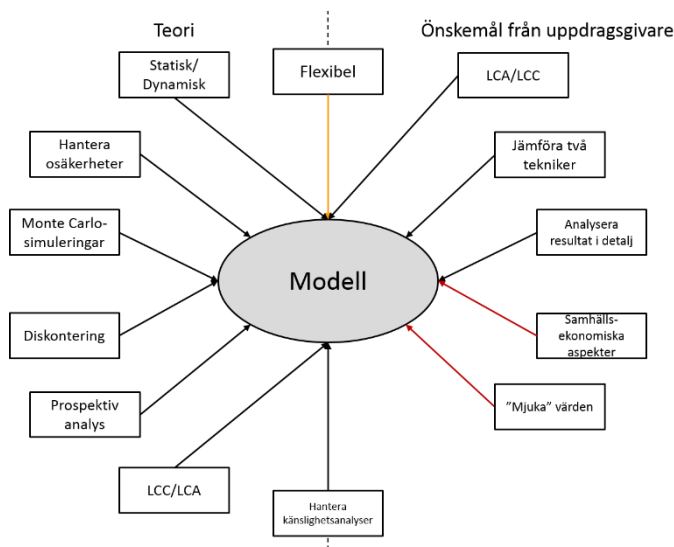
Precis som teorin lyfter fram fanns även från uppdragsgivarna önskemål om att modellen skulle utvecklas för att vara flexibel. Detta för att möjliggöra en vidareutveckling av verktyget i framtiden där fler aspekter ska kunna implementeras. Sådana aspekter skulle kunna vara samhällsekonomiska analyser och kulvertens möjlighet till utökad markanvändning. Även möjligheten att genomföra

känslighetsanalyser var önskemål som överensstämmer med den studerade teorin. Då dessa aspekter lyftes fram i ett tidigt skede av projektet fanns de även tidigt med i den uppmålade målbilden över vad modellen skulle klara av.

De önskemål som uppdragsgivarna lämnade var av mer övergripande karaktär som gällde för projektet i stort, exempelvis att det skulle utvecklas ett verktyg som kan beräkna LCA och LCC och att det var en jämförelse av två tekniker som skulle genomföras.

4.1.3 Arbetsprocess för modellens utformning

De krav och önskemål som presenterats under de två föregående rubrikerna sammanfattas i *Figur 13*. Önskemålen var av mer vägvisande karaktär medan teorin angav hur de olika momenten kunde genomföras.

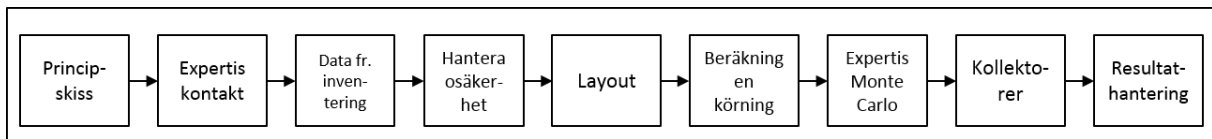


Figur 13: Krav och önskemål från teori och uppdragsgivare som påverkat modellutvecklingen och den färdiga modellens utförande och funktion. Röd pilar innebär aspekter som inte inkluderats i modellen, orange har delvis inkluderats och svarta pilar är inkluderade

Kraven ovan har integrerats i modellen i olika utsträckning enligt färgerna på pilarna (svart är inkluderade aspekter, orange delvis inkluderade och rött innebär ej inkluderade aspekter). De teoretiska kraven gällande hantering av osäkerheter och Monte Carlo-simulering finns i modellen i de beräkningar som beskrivits i ekvation (3) och (4) i föregående avsnitt. Modellen kan dessutom hantera både statistiska och dynamiska variabler då underhållsfrekvenser kan varieras med förväntad föråldring av ledningsnäten medan miljöpåverkan modelleras vara en statisk variabel kopplad till underhållsarbetet. På samma sätt kan även diskontering hanteras av modellen och en prospektiv analys är möjlig att genomföra (men kan kräva en förfinad datainsamling).

Önskemålen från uppdragsgivarna har som nämnts varit av mer övergripande och vägledande karaktär och alla önskemål som uppkommit finns inte representerade i modellen i dess nuvarande utformning. De beräkningar som kan utföras i dagsläget inkluderar inte samhällsekonomiska aspekter eller mjuka värden vilket innebär att det inte går att analysera kulvertens potentiella fördel kring till exempel minskade bilköer då schakt inte behövs. Däremot går resultatet att analysera i detalj vilket även är ett försök att uppnå den från teorin identifierade flexibiliteten och möjligheten att utföra känslighetsanalyser. Modellen är så pass öppen att det i framtiden skulle vara möjligt att inkludera både samhällsekonomiska aspekter och mjuka värden (med flera) vilket är intressant för att kunna beräkna och jämföra de potentiella fördelar kulverten har med konventionell teknik (som identifierades i 2.2.1).

När dessa krav identifierats inleddes arbetet med modellutvecklingen. Som kan ses i *Figur 14* påbörjades modellutvecklingen med att det målades upp en principiell skiss över hur modellen skulle se ut och vilka önskvärda funktioner som skulle finnas. Detta gjordes i huvudsak utifrån de krav som identifierats ovan men även utifrån tankar om vilken layout som skulle kunna användas.



Figur 14: Detaljerad bild över arbetsgången för modellutvecklingen

Efter skissen gjorts kontaktades expertis inom denna typ av modellering i form av Bo Persson. Detta för att ha en dialog kring vad som skulle vara möjligt att genomföra och framförallt hur det var möjligt att genomföra. Utifrån detta möte erhöles ytterligare riktlinjer att arbeta efter och mer kunskap kring vad modellen behövde klara av. Även information kring beräkningar erhöles vid detta möte.

Nästa steg i utvecklingsfasen av modellen var kopplat till inventeringen i fallstudien. I takt med att data samlades in kunde en uppfattning om vilken typ av data modellen behövde kunna hantera skapas. Då det visade sig att det förekom data på väldigt olika form med olika detaljnivå, allt från fakturor till muntliga uppskattningar, utvecklades därför modellen för att kunna separera enstaka arbetsmoment från varandra. Under detta skede utvecklades även modellens förmåga att hantera osäkerheter genom att kombinera Sörme och Hedbrandts (2001) teori om osäkerhetsnivåer och Feiz (2016) teori om möjlighetsfördelningar med de data som erhöles om underhållsfrekvenser. Detta gav modellen förmågan att hantera olika typer av input för både installation och underhåll med avseende på kostnader, miljöpåverkan och underhållsfrekvenser.

Efter det blivit tydligare vilka data som fanns tillgängliga och modellen utvecklats utefter detta gjordes en layout med funktioner för hur beräkningarna skulle ske. Målet med detta var att skapa en lättöverskådlig modell där användaren enkelt kan se resultat och bakomliggande data. För att kunna genomföra de känslighetsanalyser som rekommenderas och efterfrågas introducerades även konceptet med ”skruvar”. ”Skruvarna” innebär faktorer som kan användas till att variera införda värden utan att behöva ändra bakomliggande data. Detta för att möjliggöra snabba analyser av hur stor påverkan olika kostnader, miljöpåverkan och antal underhåll har på totalresultatet och för att kunna identifiera viktiga aspekter att utveckla med teknikerna. När detta gjorts genomfördes de första testkörningarna av modellen.

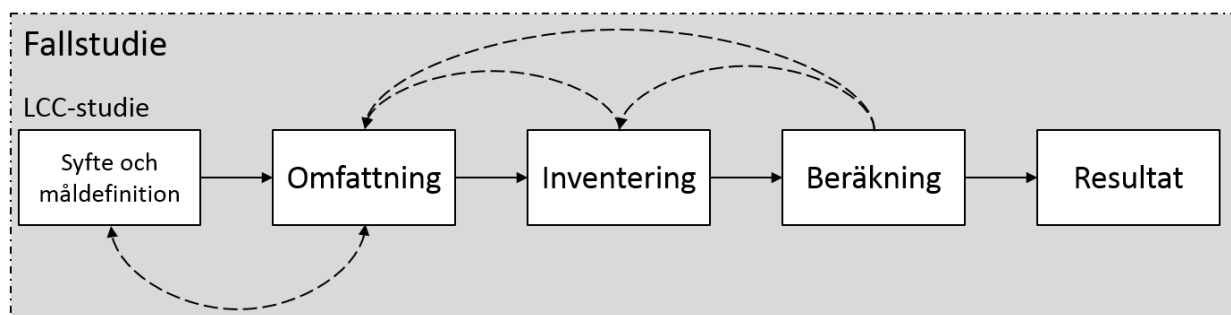
Inledningsvis gjordes testkörningarna för enstaka fall utan kollektorer, som sammanställer resultat från flera simuleringar, men i takt med att fler bitar föll på plats behövdes även denna funktion inkluderas. Därför kontaktades återigen expertis (Bo Persson) som bidrog med programvara för Monte Carlo-kollektorer vilket möjliggjorde att spara resultatet från flera simuleringar och därmed beräkna medelvärden och standardavvikelse. Detta är viktigt för att kunna presentera resultat som baseras på osäker data. Denna del av modellutvecklingen var också nära kopplat till beräkningsfasen i fallstudien då det är en av modellens funktioner, att beräkna LCC-resultat. När kollektorerna var på plats var det sista steget resultat-hantering där det bestämdes vilka resultat som är intressanta att plocka ut och analysera vidare.

Det är till mångt och mycket upp till användaren att avgöra vad som är intressant att studera och eftersom modellen i framtiden kan få andra användningsområden lämnas därför även detta öppet och flexibelt. Utifrån modellen nuvarande utformning är det möjligt att genomföra flertalet känslighetsanalyser på resultatet. Detta är en viktig del av LCA- och LCC-studier och har identifierats både som krav i teori och önskemål från uppdragsgivare. För modellens användande i detta arbete utförs känslighetsanalyser av både teknikerna som studeras och modellen som utvecklas.

Avslutningsvis är det också värt att nämna att denna arbetsprocess inte enbart varit ett rakt spår framåt utan många delar har reviderats och itererats till följd av LCC-studiens iterativa karaktär och den ökade modelleringskunskap som erhållits under arbetets gång.

4.2 Metod för fallstudie

Figur 15 ger en bild över arbetsgången för fallstudiens LCC-studie med koppling till teorin för LCA-metodik. Denna LCC-del ligger till grund för modellens utveckling då modellens datahantering baseras på de data som samlas in under inventeringen. LCC-delen används även för att exemplifiera vilka resultat modellen kan presentera.



Figur 15: Metod för fallstudiens LCC-studie. Streckade pilar indikerar iterativa processer och samband medan heldragna pilar representerar arbetsflödet

Studien inleddes med syfte och måldefinition och fortsatte därefter i enlighet med LCA-metodiken. I enlighet med denna metodik var studien också iterativ där omfattningen reviderades efter hand som data föll på plats, något som också påverkade syfte och måldefinition. De streckade pilarna i Figur 15 syftar till att visa just detta, den iterativa arbetsprocess som tillämpats.

4.2.1 Syfte och måldefinition

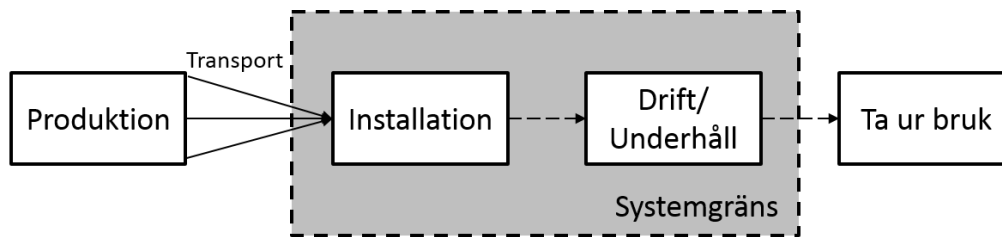
Syftet med LCC-studien var att jämföra vilka kostnader som kan uppstå för ledningsbunden infrastruktur som är förlagd i en kulvert med infrastruktur som är förlagd med konventionell teknik. Målet blir således att visa de olika systemens kostnader, vilket ska göras i den beräkningsmodell som utvecklas parallellt med LCC-studien. Det fall som används för att illustrera modellens funktion och användbarhet är en konventionell LCC-studie då det inte utförs några beräkningar av miljöpåverkan. Målgruppen för studien är uppdragsgivarna, dvs. Tekniska verken och Linköpings universitet, som ska kunna använda resultatet för vidareutveckling av infrakulverten, strategisk planering och mer ingående analyser av miljömässig och ekonomisk prestanda för ledningsbunden infrastruktur.

4.2.2 Omfattning och avgränsningar

Studien omfattar kulverten tillsammans med infrastrukturen som är förlagd i den samt motsvarande infrastruktur förlagd med konventionell teknik. Det innebär att det är el, fiber, vatten, avlopp, fjärrvärme och sopsug som ingår i studien. Dessa ska studeras under en tidsperiod på 100 år då detta är den livslängd som tillverkaren ålderstestat kulvertroret för (Vestman, 2016). Vad som händer efter detta går således endast att spekulera i och varken Tekniska verken eller Uponor har i dagsläget någon plan för hur kulverten ska hanteras efter dess livslängd är uppnådd (Rydin muntligt, 2016; Vestman, 2016). Av denna anledning sätts tidsperioden till 100 år.

Den funktionella enheten för det system som modelleras blir därför att förse ett bostadsområde bestående av flerfamiljshus med ledningsbunden infrastruktur för avlopp, vatten, el, opto, fjärrvärme och sopsug under 100 år via ett matarnät på 1783 m och 249 servisanslutningar (vilket motsvarar antalet fastigheter). Ledningsnätets längd är därmed 1783 m för samtliga system förutom el och opto som läggs med dubbla kablar. Referensflödena blir de materialflöden som krävs för att upprätthålla

infrastrukturens funktion vid förläggning i kulvert kontra konventionellt. För att göra detta krävs ett antal avgränsningar och *Figur 16* ger en övergripande bild över de systemgränser som gäller för fallstudien:



Figur 16: Översikt över systemgränserna för de studerade infrasystemen i fallstudien

Som kan ses är det processerna för installation och drift/underhåll som studeras inom systemgränserna. ”Produktion”, som ligger utanför systemgränserna för fallstudien, innebär tillverkningsprocesserna av kulverten och de ledningar som används både i kulvert och konventionellt. Detta ligger utanför systemgränserna då det främst är intressant ur ett miljöperspektiv vilket inte inkluderas i fallstudien. Kostnaderna för produktionen av de material som används vid installation och underhåll antas reflekteras av priset på ledningar och komponenter. Modellen skiljer sig här mot fallstudien då den kan hantera miljöpåverkan om information kring detta skulle framkomma vid ytterligare datainsamling. Anledningen till att ”ta ur bruk” ligger utanför systemgränserna är att funktionen som de studerade systemen erbjuder antas vara nödvändig även i framtidens samhälle och därmed inte tas ur bruk även om enskilda rör tas ur bruk och byts ut. Dessutom råder det som sagt stor oklarhet kring vad som händer med kulverten efter dess tekniska livslängd är uppnådd.

För mindre, avhjälpande underhållsarbeten antas överblivet material från reparationen tas upp vid konventionell förläggning. Då detta antas ske på liknande sätt i kulverten blir återvinningen likvärdig och lämnas därför utanför systemgränserna för fallstudien, även om modellen kan hantera det. Förnyelse av matarnätet antas inte ske under den studerade perioden då förnyelsetakten på flera av ledningsnäten är för låg för att rymmas inom den studerade tidsperioden (se avsnitt 5.9 *Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser*). Förnyelsetakt är ett mått på efter hur lång tid hela nätet har bytts ut och därmed förnyats. Ytterligare motiv till varför detta inte inkluderas i fallstudien är att det saknas information kring kostnader för att utföra sådana arbeten. Detta är en svaghet med fallstudien då förnyelse leder till större kostnader än avhjälpande underhåll och det är troligt att delar av systemen förnyas under perioden. Hur detta påverkar fallstudiens resultat testas därför för sopsug och elnät där kostnaderna för förnyelse kunnat identifieras via EBR-katalogen¹. Detta kan visa på skillnaderna mellan att inkludera förnyelse och att utesluta det, samt hur det påverkar resultatet beroende på om det är ett rörbaserat eller kabelbaserat system som förnyas. Det visar även på hur modellen kan hantera förnyelse. ”Installation” är de processer som sker i samband med förläggning av kulvert och ledningar i ett inledande skede och precis som för ”produktion” kan modellen hantera miljöpåverkan från dessa aktiviteter medan fallstudien avgränsas till att enbart studera kostnader.

De kostnader som studeras i fallstudien är endast de kostnader som uppstår för Tekniska verken och inte för tredje part eller underentreprenörer. I framtida utveckling av modellen kan det vara intressant att möjliggöra identifiering av kostnader för olika aktörer för att redovisa vilka som står för kostnader och vilka intäkterna tillfaller. Fallstudiens avgränsningar leder även till att den LCC som genomförs begränsas till att vara en konventionell-LCC som inte kan utreda samtliga delar av de krav och önskemål som presenterats i 4.1.3 *Arbetsprocess för modellens utformning*. Bland de aspekter som inte ryms inom fallstudien är samhällsekonomiska aspekter, ”mjuka” värden, diskontering samt LCA-

¹ EBR-katalogen: Kostnads katalog för lokal- samt optonät, utgiven av Svensk Energi. Används till att beräkna kostnader och produktionstider för olika åtgärder på lokal- och optonät.

analyser. Detta, tillsammans med de avgränsningar som presenterats ovan, leder till att fallstudien inte kan utreda samtliga delar av de potentiella fördelar som presenterats i 2.2.1 *Skillnader mellan konventionell förläggning och infrakulvert*.

Bland annat kan fallstudien inte utreda om det blir någon skillnad i återvinning mellan kulvertförläggning och förläggning i mark. Som tidigare nämnts antas återvinning vid mindre avhjälpande underhåll vara likvärdig för båda förläggningsteknikerna men vid förnyelse är detta inte lika självklart. Med tanke på att 10 % av de nedgrävda kablarna ligger kvar i marken trots att de inte används (Andersson, 2013) innebär detta att återvinning inte sker vid förnyelse i det konventionella nätet. I kulverten kan det begränsade utrymmet, samt de minskade kostnaderna till följd av att ingen schaktning behövs, leda till att kablar som inte används tas upp för att ersättas av nya. Denna möjliga fördel ligger alltså utanför fallstudien. Även värdet av kulvertens flexibilitet när det gäller införande av nya system ligger utanför fallstudien då det inte antas införas några nya system. Detta antagande grundas på att det är svårt att sja om teknikutveckling.

Andra potentiella fördelar som ligger utanför fallstudien är exempelvis hur den byggbara ytan förändras och vilka kostnader och intäkter det innebär. Även värdet av att kunna exploatera nya områden lämnas utanför studien och kan inte heller beräknas av modellen i dagsläget. Dessa aspekter är intressanta ur samhällsbyggnadsperspektiv och är därför viktiga att inkludera i framtida utvecklingar av modellen.

Hur ledningarnas livslängd och underhållsbehov förändras till följd av att de ligger i en kulvertmiljö snarare än nedgrävda i marken har inte kunnat fastställas i fallstudien. För att undersöka hur detta skulle kunna påverka resultatet testas detta påstående i analyser av de scenarios som används. Även hur den förändrade miljön påverkar arbetsmiljön för montörer lämnas utanför fallstudien och modellen. Detta är intressant att studera vidare ur arbetsmiljösynvinkel då det kan påverka kostnader för arbetsgivaren om riskerna bedöms större eller mindre än arbete i schakt-miljö.

Slutligen studeras inte de möjliga nackdelarna med infrakulvert-tekniken i fallstudien. De läckor som uppstår i fallstudien antas inte påverka andra system och större haveriet utesluts. Modellen kan hantera korrelationer mellan skador på olika system och detta skulle kunna inkluderas i framtida utvecklingar om information kring hur de samverkar framkommer. Att större haveriet utesluts beror på att det är ett worst case-scenario, vilket inte är intressant utifrån syftet med detta arbete.

Inom varje ”box” i *Figur 16* sker det ett antal avgränsningar och det görs även avgränsningar inom varje studerat infrasystem, både för kulvert och konventionell förläggning. Dessa tekniska avgränsningar och förenklingar beskrivs mer ingående i fallbeskrivningen, se avsnitt

4.2.3 Livscykelinventering

Nästa steg i den LCA-metodik som ISO tagit fram är livscykelinventeringen där data och information samlas in. De huvudsakliga processer som identifierats i denna studie är som tidigare presenterats installation och drift/underhåll. För dessa processer har sedan data samlats in för respektive ledningsnät via mail, intervjuer och litteratur för att få information kring vilka delprocesser som faller inom huvudprocesserna. Eftersom fallstudien är en konventionell-LCC-studie är det kostnaderna för dessa delmoment som är av intresse. Denna information erhöles via en rad intervjuer med personal på de olika ledningsnäten men även via en genomgång av Tekniska verkens fakturor från Vallastaden-projektet. De personer från de olika ledningsnäten som bidragit med information beskrivs mer i detalj i avsnitt 4.2.3.1 *Intervjuobjekt*.

Intervjuerna som genomfördes var av semi-strukturerad karaktär där ämnet som skulle diskuteras och ett antal frågor bestämts på förhand. Svaren fick sedan leda diskussionen framåt och följdfrågor ställdes för att förtydliga svaren. Detta ledde också till att information som inte var känd på förhand kunde erhållas och en bredare uppfattning kring ledningsnäten kunde därmed skapas. Denna möjlighet

till öppna svar och följdfrågor är en av styrkorna med denna typ av intervjuer men ställer samtidigt krav på den som genomför intervjuerna (Sallnäs, 2007). Då det dessutom efterfrågades både kvantitativa och kvalitativa svar lämpade sig denna typ av intervju bättre än en mer strukturerad intervju som har förutbestämda frågor i en given ordningsföljd och svaren ges enligt givna svarsalternativ (Wilson, 2014). En mindre strukturerad intervjuteknik hade å andra sidan kunnat leda till att för få kvantitativa aspekter identifierats då en sådan intervju lämpar sig bäst vid kvalitativa analyser där det är av intresse att skaffa en bred information kring ett ämne (Wilson, 2014). Detta ställer ännu högre krav på intervjuaren än semi-strukturerade då det är upp till intervjuaren att tolka svaren och avgöra vad som är intressant (Sallnäs, 2007).

Eftersom det är en framtidsorienterad studie som ska genomföras är det en prospektiv studie där en prognos för frekvenser behöver tas fram med hur ofta olika typer av underhåll kan förväntas ske för de olika ledningsnäten, vilket är förknippat med flertalet osäkerheter. Enligt Feiz (2016) och Finnveden et. al (2009) kan ett val göras att antingen inkludera osäkerheterna eller utföra ytterligare informationsökning för att reducera dem. I denna studie väljs att inkludera osäkerheterna då ytterligare informationsökning inte ryms inom tidsramen och att studien ska besvara en spekulativ fråga kring vilka kostnader som *kan* uppstå för de två förläggningsteknikerna. Då den information som erhålls via intervjuer i viss grad är osäker efterfrågades det i första hand intervall i enlighet med Feiz (2016) metod för att få fram "möjlighetsfördelningar". I de fall då detta inte var möjligt eller då informationen från intervjuerna var väldigt osäker kompletterades detta med statistik på både lokal- och nationell nivå. Då denna statistik i sig är förknippad med osäkerheter användes de faktorer som Hedbrant och Sörme (2001) tagit fram för att omvandla enskilda statistiska värden till intervall. Studien är kvasi-dynamisk och låter vissa variabler variera i tiden medan andra är konstanta. Framförallt är det variabler kopplade till underhållsfrekvenser, alltså hur ofta och när underhållen sker, som tillåts variera medan kostnader behandlas som konstanter med samma värde oavsett när i tiden de uppkommer.

4.2.3.1 Intervjuobjekt

För att ta fram förväntade livslängder och kostnader för olika arbetsprocesser till fallstudien användes ett antal olika källor som kombinerades för att ge en så representativ bild som möjligt. För att få en grundläggande uppfattning hölls i första hand intervjuer med erfaren personal som arbetar med systemet i fråga. Detta kompletterades sedan med intervjuer eller mailkorrespondens med andra aktörers erfarenhet av liknande system, leverantörsinformation kring teknisk livslängd och litteratur från nationella intresseorganisationer och universitet. I *Tabell 2* redovisas vilka personer som intervjuats om de olika ledningsnäten och resultatet från denna informationsökning kan ses i kapitel 5 *Resultat av inventeringsanalys*. I tabellen anges även för vilken förläggningsteknik intervjuobjekten bidragit med information.

Tabell 2: Översikt över intervjuobjekt, deras befattning inom Tekniska verken och om de bidragit med information kring infrakulvert (IK) eller konventionell förläggning (Konv.)

| Infrasystem | Intervjuobjekt | Befattning | IK | Konv. |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|----|-------|
| VA | Mats Johansson | Enhetschef VA | x | x |
| | Åke Bäcklund | Projektcontroller | | x |
| | Carl-Fredrik Jönsson | Driftansvarig | x | x |
| | Anders Svensson | Avdelningschef plan & projekt | x | x |
| | Roger Kallskog | Projektsamordnare | x | |
| Fjärrvärme | Lars-Erik Hammarström | Projektledare underhåll | x | x |
| | Mikael Wiklund | Projektledare Vallastaden | x | |
| | Lars Jigered | Ingenjör installation | | x |
| El och Opto | Mats Grebner | Projektör | x | x |
| | Johan Danielsson | Projektör | | x |
| | Kent Kaiser | Utvecklingsingenjör | x | x |
| | Conny Andersson | Driftledare | | x |
| | Håkan Lövefors | Nätstrateg | | x |
| Sopsug | Andreas Ferm | Energiingenjör | x | x |
| | Jan-Erik Johansson (MariMatic) | Technical director | x | x |
| Övergripande | Gunnar Rydin | F.d. projektledare infrakulvert | x | x |

Under intervjuerna med personerna i tabellen ovan fördes ofta breda diskussioner kring ledningsnätet i fråga och vad som kan tänkas skilja mellan infrakulverten och konventionell förläggning. Beroende på vad personen jobbade med följde sedan mer konkreta frågor kring kostnader och underhållsfrekvenser. I vissa fall räckte det inte med intervjuerna för att få tillräcklig information, speciellt vid frågor kring skadestatistik. I dessa fall kompletterades informationen från intervjuerna med statistik och information från allt från avdelningen i frågan till branschorganisationer och universitet.

Informationen från dessa intervjuer berör samtliga fyra situationer som enligt Hedbrant och Sörme (2001) innebär att statistiska metoder inte räcker till. För infrakulverten finns lite data kring vad som förväntas ske och därför baseras informationen på subjektiva bedömningar. Då kulverten endast finns i Vallastaden har det därmed också varit svårt att få oberoende uppgifter då samtliga informatörer jobbar på Tekniska verken. Hur osäkerheter hanteras i modellen beskrivs under 6.3 *Underhåll*.

4.2.3.2 Sammanställning av insamlad data

Dataunderlaget som var tillgänglig har varierat mellan de olika ledningsnäten. På några nät har det funnits mycket information från källor på lokal nivå medan det för andra nät har krävts bredare informationsökning och mer information som baseras på intervjuer. *Tabell 3* ger en bild över hur mycket information som bedöms ha samlats in under fallstudien och kvaliteten på källan på varje ledningsnät och livscykel fas. Det som bedöms som en mer eller mindre säker källa beror på hur nära det studerade systemet källan varit, dels geografiskt och dels vilka förenklingar som behövts göra för att anpassa informationen. (*Tabell 4* är en nyckel som förklarar de olika markeringarna i *Tabell 3*.)

Tabell 3: Insamlad data med avseende på kostnad och underhållsfrekvens för infrakulvert konventionell förläggning, uppdelad på de livscykel faserna som studeras i fallstudien. (Tabell 4 anger hur denna tabell tolkas)

| | Infrakulvert | | | Konventionellt | | |
|-------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | Installation | Underhåll | | Installation | Underhåll | |
| <i>Infrsystem</i> | <i>Kostnad</i> | <i>Kostnad</i> | <i>Frekvens</i> | <i>Kostnad</i> | <i>Kostnad</i> | <i>Frekvens</i> |
| <i>Vatten</i> | xx | x | xx | xx | xx | xxx |
| <i>Avlopp</i> | xx | x | xx | xx | xx | xxx |
| <i>Fjärrvärme</i> | xx | x | x | xx | x | xx |
| <i>Sopsug</i> | xx | xx | x | xx | xx | x |
| <i>El</i> | x | x | x | x | xx | xx |
| <i>Opto</i> | x | x | x | x | xx | x |
| <i>Kulvert</i> | xx | x | x | - | - | - |

Tabell 4: "Nyckel" till Tabell 4 ovan

| | |
|------------------|--------------|
| xxx =Mycket data | Säker källa |
| xx | |
| x =Viss data | Osäker källa |

Som kan ses har det i många fall funnits mer information för konventionell förläggning än för kulverten och dessutom har denna ofta bedömts som mer pålitlig. Detta är naturligt då Tekniska verken länge arbetat med konventionell teknik och kulverten är en helt ny, unik lösning.

Vatten och avlopp är de ledningsnät där det bedömts att mest information kunnat samlas in för konventionell förläggning och för infrakulverten. Dessutom har källorna som använts varit antingen från Tekniska verken själva eller ett examensarbete utfört på Tekniska verken 2013, vilket anses trovärdigt. Detta gäller främst konventionell förläggning då infrakulverten innebär ny teknik och nya material vilket gör att de bedöms som mer osäkra inom denna förläggningsteknik. För fjärrvärme förekom det sparsamt med information kring underhållen men källan bedöms som trovärdig då det är den ansvariga på Tekniska verken som bistått med information. Då information kring underhållsfrekvenser saknades på lokal nivå användes information från ett examensarbete i Lund, därav en något mer osäker källa.

Sopsugssystemet är en ny teknik och därmed finns det sparsamt med information gällande underhållsfrekvenser och underhållskostnader som därför baseras på av tillverkaren uppgiven livslängd och förväntad kostnad. Kostnaderna för installationen är också hämtade från tillverkaren vilket anses trovärdigt och speglar kostnaderna i Vallastaden respektive vid konventionell förläggning. För el och opto finns väl dokumenterade kostnader för installation och underhåll vid konventionell förläggning i EBR-kataloger vilket anses vara en trovärdig källa. Denna säger inget om hur kostnaderna påverkas vid kulvert-förläggning och därför är bedömningen att informationen är mer osäker. Dessutom var det utdrag av skadestatistik som erhöles sparsam och endast gällande elnätet

vilket gör optonätets underhållsfrekvens osäker. Statistiken gäller dessutom endast för konventionell förläggning och inte förläggning i infrakulvert. Slutligen baseras informationen kring installationen av kulverten på fakturor från Vallastaden vilka anses trovärdiga. Då kulverten är ny har inte det förväntade årliga underhållet genomförts än vilket gör att kostnaderna blir mer osäkra.

4.2.4 Beräkningar och resultat

De beräkningar och resultat som bedömdes som intressanta är de som speglar frågeställningarna och fallstudiens syfte att visa på vad modellen kan utföra. Därför genomfördes först beräkningar för insamlad data, vilket speglar infrakulverten i Vallastaden och konventionell förläggning vid ”normala” förutsättningar i Linköping, detta kallas Scenario 1. Då markförhållandena i Vallastaden, där infrakulverten är förlagd, är mer svårhanterliga än vid ”normala” förutsättningar kan Scenario 1 visa hur olika markförhållanden påverkar jämförelsen. Då infrakulverttekniken är en helt ny teknik finns det ingen statistik på antal underhåll. Detta medförde svårigheter att modellera underhållet i kulverten och för att hantera detta antogs i Scenario 1 samma underhållsfrekvenser som vid konventionell förläggning.

Scenario 2 används för att visa på vad modellen kan göra och användas till genom att förändra insamlad grunddata och undersöka livscykelkostnader vid förutsättningar som efterliknar Vallastaden. Under detta scenario antas dubbelspont krävas vilket leder till ökade installations- och underhållskostnader för konventionell förläggning. En generell uppfattning som identifierats hos samtliga ledningsnät men inte kunnat kontrolleras mot statistik är att ledningarna i kulverten bör hålla bättre än de som är nedgrävda i marken. Vid intervjuer med Hammarström (muntligt, 2016), Johansson (muntligt, 2016) och Rydin (muntligt, 2016) uppgavs förhoppningar om att antalet underhåll kan halveras och livslängder dubbleras. I Scenario 2 antas miljön i kulverten gynna ledningarna och antalet underhåll förändras enligt ovanstående förhoppningar. Dessa antagandens inverkan på livscykelkostnaderna undersöks i resultat och analys. De komponenter som gynnas av miljön beskrivs under varje ledningsnät i 5.9 *Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser*. Värt att notera är att det endast är kostnader som inkluderas i studien och inga eventuella intäkter. Beräkningarna som utförs av modellen sker enligt hur det beskrivs i avsnitt 4.1.3 *Arbetsprocess för modellens utformning* och resultatet redovisas i kapitel 7 *Resultat* från modellen.

I enlighet med LCA- och LCC-metodiken utförs därefter känslighetsanalyser på dessa resultat där olika variabler och antaganden varieras så att deras effekt på slutresultatet kan utvärderas. De analyser som utförs undersöker också hur infrakulvertens potentiella fördelar speglas av resultaten. Bland annat undersöks en förändrad underhållsfrekvens till följd av gynnsam miljö för ledningar, förändrad underhållskostnad för konventionell förläggning till följd av spont och möjligheten att lägga ledningarna en kortare sträcka än konventionellt. Dessutom undersöks vilken inverkan möjliga utvecklingar av tekniken har på livscykelkostnaderna via en granskning av trycksystemet och borttagning av kammare och fellehus. Analyserna av fallstudien presenteras i kapitel 7 *Resultat från modellen*. Utöver detta analyseras även hur valen som görs vid modelleringen inverkar på resultatet i kapitel 8 *Analys av utformad modell* där även en teoretisk validering av modellen utförs.

4.3 Informationssökning

För att skaffa fördjupade kunskaper om både LCA och LCC-metoderna genomfördes en litteratursökning på Linköpings universitetsbibliotek databas UniSearch. De söktermer som användes var ”life cycle assessment”, ”life cycle costing”, ”LCA analysis” och ”LCC analysis” vilket gav flertalet träffar på både vetenskapliga artiklar och böcker.

Gällande LCA-metodiken bedömdes handboken ”General guide for life cycle assessment” från EU-kommissionen (2010) innehålla all önskvärd information då den baseras på ISO 14040 och ISO 14044 samt är skriven för att vägleda LCA-studier. För att kontrollera innehållet gjordes en översiktlig jämförelse med annan litteratur inom området, bland annat Rebitzer et. als. ”Life cycle assessment –

part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis and application” från 2003 och Pennington et. als. ”Life cycle assessment – part 2: Current impact assessment practice”, även den från 2003, vilka innehöll samma metod-rekommendationer som handboken från EU-kommissionen. Slutligen gjordes en utblick över genomförda LCA-studier, bland annat examensarbeten vid Linköpings universitet, som även de visat sig ha använt liknande metod som föreslogs i handboken. Därför beslutades att handbokens rekommendationer var användbara och relevanta. För att införa lite mer nyans till detta användes ”Recent developments in Life Cycle Assessment” av Finnveden et al. (2009).

Sökningarna på LCC-metodiken gav ett något mer utspritt resultat. De publikationer som slutligen sågs som mest användbara för detta arbete var Lichtenvor et al. (2008), Boussabaine och Kirkham (2008) och riktlinjer för LCC-studier från IEC (2004). De riktlinjer som IEC (2004) presenterar ansågs på liknande sätt som handboken för LCA-studier vara relevant då det ger en grundläggande uppfattning om LCC-metoden. Boken Lichtenvor et al. (2008) skrivit ansågs användbar då den beskriver LCC-studiernas bakgrund, utveckling och hur de kan utvecklas ytterligare. Boussabaine och Kirkhams (2008) bok är skriven med metod för hur LCC-studier kan göras för byggnader med speciellt fokus på riskhantering. Då byggnader har vissa likheter med infrastruktur livscykelmässigt, exempelvis hög investering, återkommande underhåll och lång livslängd, bedömdes därför denna litteratur användbar och risker och riskhantering är även relevant för de studerade systemen. Utöver de texter som valdes ut och användes gjordes även här en utblick över genomförda LCC-analyser, via bl.a. ”Life cycle costing: a review of published case studies” (Korpi och Ala-Risku, 2008), vilket gav inspiration och inblick i hur andra studier genomförts.

För information om de olika ledningsnäten och hur infrastruktur kan modelleras gjordes också litteratursökningar på UniSearch, både på engelska och svenska. Resultaten som ansågs mest relevanta var främst andra examensarbeten vilket ledde vidare till information från branschorganisationer. Branschorganisationernas publikationer gav en mer övergripande inblick i ledningsnäten vilket kompletterades av examensarbetena med mer detaljerad information. De vetenskapliga artiklar som bidrog med insikt kring modellering av infrastruktur var framförallt ”Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions” av Frangopol et. al (2004) och ”A dynamic principal-agent framework for modeling the performance of infrastructure” av Páez-Pérez och Sánchez-Silva (2016). Då båda artiklar syftar till modellering av infrastruktur ansågs de relevanta och användbara.

Utöver denna litteratursökning hölls även en serie intervjuer med personal på Tekniska verken. Syftet med dessa intervjuer var att samla information kring Tekniska verkens arbetsförfarande inom de olika ledningsnäten och vad de har för kostnader. De personer som intervjuats under arbetet redovisades i *4.2.3.1 Intervjuobjekt*. Då det ofta var svårt att på förhand veta vilken information som informanten hade och att det dels efterfrågades kvalitativa svar och dels kvantitativa var dessa intervjuer semi-strukturerade där diskussionerna fick leda fram till vilken information som kunde tas med.

Alternativen hade varit mer eller mindre strukturerade intervjuer där en mer strukturerad intervju kunnat erbjuda mer likartade svar och lättanalyserad data (Wilson, 2014). Detta hade skett på bekostnad av bredare diskussioner som ger en mer övergripande bild av arbetsförfarandet. En mer ostrukturerad intervju hade å andra sidan ställt högre krav på intervjutekniken (Wilson, 2014), något som kunnat påverka utfallet då det saknades erfarenhet av detta moment sedan tidigare.

4.4 Diskussion kring vald metod

Metoden som valdes har påverkat utgången av detta arbete. Därför förs här en diskussion kring valda metoder och även resonemang kring alternativa som skulle kunna använts.

4.4.1 Fallstudie

Fallstudien som genomfördes följde LCA-metodiken då den inledande ambitionen var att utföra både LCC- och LCA-analyser. För LCC-studien behövs inte samma detaljnivå på data och om utgångspunkten för fallstudien från början varit att endast genomföra en LCC hade troligtvis mer information kunnat erhållas. Som arbetet utvecklades nu blev datainsamlingen för LCC-studien påverkad av tidsåtgången som LCA-studien krävde i början av arbetet.

Något som genomsyrade hela inventeringsfasen för fallstudien var osäkerheten på data. Kulverten är en helt ny teknik och i och med detta fanns begränsat med information tillgänglig, både mängdmässigt men även antalet källor blev begränsat vilket påverkade hur oberoende källorna är. Denna osäkerhet träder in både för installationsfasen och underhållet. Installationen är uteslutande baserat på tillvägagångssättet i Vallastaden och då det finns förbättringsmöjligheter rent tekniskt finns det även möjlighet att reducera kostnaderna. Detta är lärdomar som de involverade företagen lär sig efter hand och har därmed inte kunnat fångas upp under detta projekt.

Osäkerheterna kring kulvert-tekniken är fler och större under underhållsfasen då det råder osäkerheter både kring arbetsförfarande, kostnader och underhållsfrekvenser. Under arbetets gång har det framkommit att personalen på de olika ledningsnäten inte med säkerhet vet hur olika skador och avbrott ska repareras i infrakulverten vilket försvårat datainsamlingen. Kostnaderna blir därigenom också de osäkra då de är direkt kopplade till arbetsförfarandet. Osäkerheterna kring antalet underhåll som kan förväntas uppstå är den enda av ovanstående osäkerheter som kunnat reduceras med vidare litteraturstudier av ledningar förlagda i liknade miljö som kulverten. Detta är något som kan vara viktigt att utforska vidare för att få en mer rättvisande bild kring antalet underhåll och framförallt skillnaderna mellan konventionell förläggning och infrakulverten.

Även metoden för datainsamlingen är förknippad med osäkerheter. Den information som erhöles via möten och intervjuer med personal kan ha påverkats av faktorer som ligger utom författarnas kontroll. Exempelvis förekom i enstaka fall en, av författarna uppfattad, negativ inställning till kulverttekniken vilket kan ha påverkat informationen som erhöles. Dessutom förekommer även osäkerhet förknippat med hur författarna tolkat informationen, något som upplevts som oundvikligt då intervjuobjekten ofta sitter på detaljerad teknisk kunskap. Författarnas brist på erfarenhet av detta moment kan ha påverkat utgången då de semi-strukturerade intervjuerna ställer högre krav på intervjuarens teknik.

Den statistik som använts innehåller också osäkerheter då statistiken ger ett förväntat medelfel på ledningsnätet som det ser ut idag. Alltså finns olika storlekar på kablar och ledningar samt förläggning i både gata och grönytor i de bakomliggande siffrorna som förenklas och anses motsvara det konventionella nät som används i fallstudien. Mer detaljerad information kan leda till mer rättvisande resultat.

De systemgränser som sattes för LCC-studien kan diskuteras då produktion och ta ur bruk är livscykel-faser som kan vara förknippade med stora kostnader, något som i nuläget är oklart. Under ta ur bruk-fasen skulle även en beräkning av restvärde och intäkter genom återvinning vara intressant att ta hänsyn till. Detta genomfördes inte då information kring intäkter i samband med återvinning, hur stor del av infrastrukturen som faktiskt återvinns och om det kommer vara någon skillnad mellan kulvert och konventionell förläggning inte inkluderades i informationssökningen som utfördes. Dessutom förekom det svårt att beräkna restvärde på infrastruktur då den kan ha väldigt varierande funktion efter dess tekniska livslängd är uppnådd. Det försvåras även av infrastrukturens ekonomiska karaktär som bland annat innebär att investeringar är sunk costs och inte kan ske stegvis utan måste ske i större steg. Med detta som bakgrund valdes därför dessa aspekter att bortses från i LCC-studien. Det är viktigt att inkludera i framtida utvecklingar av modellen för att utreda kulvertens potentiella fördelar.

4.4.2 Metod för modellutveckling

Då modellutvecklingen utfördes parallellt med fallstudien följde den en liknande process. Den litteratur som studerades i samband med fallstudien innehöll också information kring modellutveckling, dock specifikt för modellering av infrastruktur och LCC-modeller men inte för modeller i stort. Det genomfördes alltså ingen bredare litteratursökning för modellutveckling generellt. En sådan sökning hade kunnat resultera i en mer användarvänlig, avancerad eller snabbare modell. Detta kan anses vägas upp av den expertis (Be Persson) som fanns som stöd under utvecklingen då dennes erfarenhet och kunskap kring modellutveckling i allra högsta grad bidrog till modellens utformning.

4.4.3 Alternativa metoder

Alternativa metoder som kunde använts till detta projekt skulle kunna involvera en mer omfattande litteratursökning. Att genomföra en mer omfattande litteraturstudie hade tagit tid från andra moment i projektet och slutresultatet hade därför förmodligen sett annorlunda ut. Om en mer omfattande litteraturstudie hade bidragit med mer, eller annorlunda, information än den som genomfördes i detta projekt är svårt att säga något om. Det hade kunnat resultera i ett mer generaliserbart resultat från fallstudien än det nuvarande som är mer specifikt för Linköpings förutsättningar.

Även de intervjuer som genomfördes hade kunnat utformas enligt en mer strukturerad metod. Ofta var det på förhand svårt att avgöra vilken information intervjuobjekten hade vilket gjorde att intervjuerna hölls semi-strukturerade och det var diskussionerna som fick leda fram till vilken information som kunde erhållas. Den öppna diskussion som fördes bidrog dessutom med att andra uppfattningar kring kulverten och vad den innebär kunde fångas upp vilket gav en intressant inblick i personalens inställning. Möjligheten till detta är en av styrkorna med semi-strukturerade intervjuer. Ibland krävdes dessutom återkommande intervjuer med samma person innan önskad information erhöles. Mer strukturerade intervjuer hade kunnat leda till att den information som efterfrågades inte erhöles och då hade intressanta diskussioner kring infrasystemen i stort kanske uteblivit.

Om utgångspunkten för arbetet varit att endast genomföra en LCC och inte både LCC och LCA hade metoden för arbetet förändrats. Som tidigare nämnts behövs inte samma detaljnivå på datainsamlingen för en LCC-studie som för en LCA-studie. Därmed hade grövre uppskattningar kunnat göras från början vilket troligtvis gjort datainsamlingen mer tidseffektivt. Dessutom hade fallstudien inte nödvändigtvis följt LCA-metodiken lika strikt som den gjort i detta arbete utan istället kunnat följa de riktlinjer från IEC som presenteras i teorin tätare. Effekterna av detta hade förmodligen även resulterat i att modellen sett annorlunda ut. Dock hade den antagligen fått ett mer begränsat användningsområde om inte möjligheten att utföra LCA-beräkningar inkluderats, något som dessutom var ett önskemål från uppdragsgivarna.

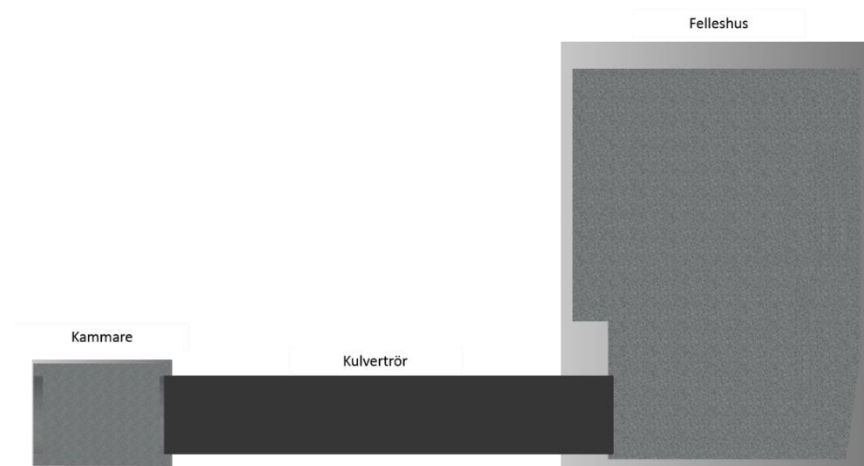
5 Resultat av inventeringsanalys

I detta avsnitt presenteras resultatet av inventeringsanalysen genom att först beskriva de identifierade installationsprocesserna, de studerade systemen, vilka förenklingar som görs samt underhållsfrekvenser och –kostnader. De system som presenteras i detta avsnitt motsvarar fallstudien och ligger till grund för modellens utveckling i form av vilken typ av data den kan hantera. Detta steg har alltså verkat som en länk mellan fallstudien och modellen där data identifierats i fallstudien och modellen sedan utvecklats för att kunna hantera detta.

5.1 Installation av infrakulverten i Vallastaden

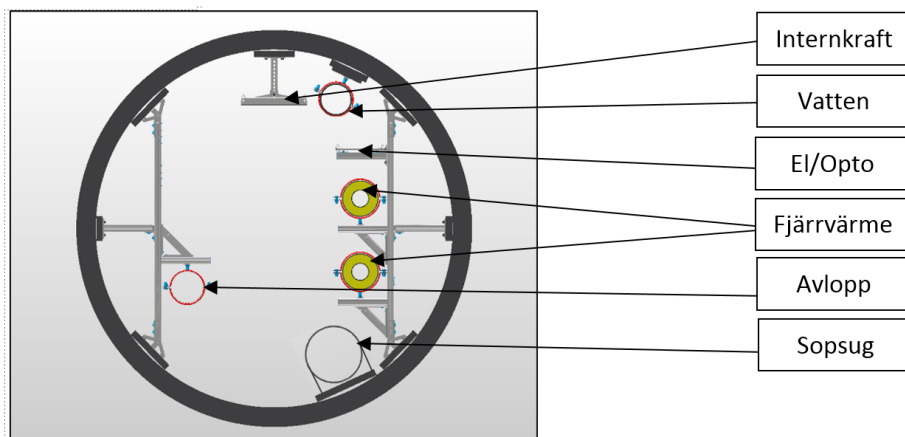
Infrakulverten beskrivs kortfattat under rubrik 2.1 ”Introduktion till studerade system” men här beskrivs tekniken ytterligare.

I Vallastaden finns ca 1800 meter kulvert fördelad på 76 kammare, 7 fellellshus och 83 kulvertrör. Kulvertens förläggning kan ses i Figur 4 och där ses att nätet har många böjar och förgreningar. För att förenkla modelleringen av infrasystemet har nätet i fallstudien antagits gå helt rakt. Antalet kulvertrör (med antagen snittlängd 17m), kammare och fellellshus är samma som i Vallastaden och längden på det modellerade systemet blir 1783 meter. Kulverten är uppbyggd av kulvertrör av plast och kammare och fellellshusens källarplan i betong. I Figur 17 visas en bild på hur delarna ser ut och tillsammans bildar ett segment:



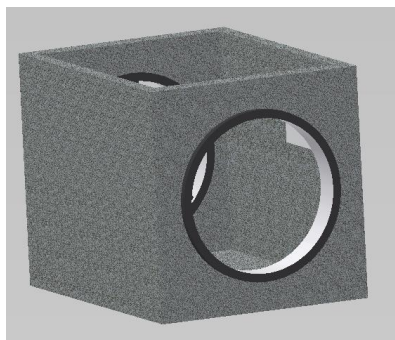
Figur 17: Kammare, kulvertrör och fellellshus som tillsammans bygger upp infrakulvert-systemet. I det förenklade system som studeras i fallstudien antas nätet vara helt rakt och bestå av 76 kammare, 7 fellellshus och 83 kulvertrör med en snittlängd på 17 m

I kulvertröret hängs infrastrukturen upp med antingen klamrar eller läggs på kabelstege, som tillsammans benämns som konsoler för upphängning. VA, fjärrvärme och sopsugen hängs upp med klamrar medan optofiber och el läggs på kabelstege. Upphängningen av infrasystemen ses i Figur 18 och infrastrukturen går alltid rakt genom kulvertrören.



Figur 18: Upphängning av infrasystem i kulverten via konsoler. Systemens position kan variera då ställningarna är modifierbara

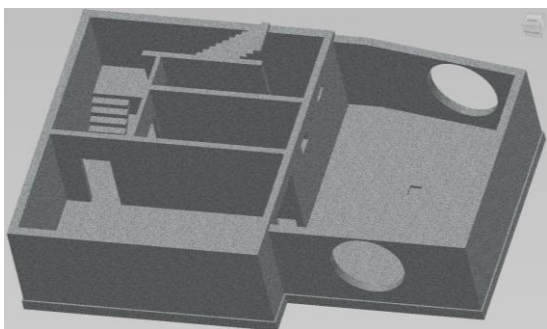
Som nämns ovan sammanlänkas två kulverttrör med antingen en kammare eller i källaren på ett felleshus. I kamrarna görs förgreningar och böjar av infrastrukturen. Kammare och källaren i felleshusen är inget måste för infrakulvert-tekniken utan om området har källare under fastigheterna kan dessa användas som kammare. Så var dock inte fallet i Vallastaden och således inkluderas kammare och felleshusens källare i fallstudien. I *Figur 19* ses en bild på hur en kammare kan se ut i Vallastaden.



Figur 19: Exempel på en tom kammare med två "ingångar" för kulverttrör. Som ses i *Figur 2* kan det finnas "ingångar" för kulverttrör i samtliga väggar.

Det finns dock många olika typer av kammare i Vallastaden. Storleken på kammarna kan skilja och vissa kammare har ytterligare ett eller två kulverttrör som ansluts från de två sidoväggarna i *Figur 19*. Eftersom LCC-studien analyserar ett rakt ledningsnät så är dessa typer av kammare inte med. För att komma ner till kammaren finns ett brunnslöck i locket av kammaren.

Felleshusets källare fungerar i grunden på samma sätt som en kammare. Den är större för att få plats med centraler och annan teknik som inte ryms i den mindre kammaren. Det finns, som ses i *Figur 20*, även en trappa ner till källarplanet vilket underlättar underhåll av tekniken i källaren.



Figur 20: Exempel på ett fellehus källarplan. Den högra delen motsvarar en kammare likt den i Figur 19 medan vänstra delen är konstruerad för att rymma teknisk utrustning och trappa

I kammare och fellehus sker även servisanslutningarna som ansluter fastigheter till matarnätet. Serviserna i kulverten dras från matarnätet genom betongväggen vid en så kallad servisplatta. I varje kammare och fellehus finns det möjlighet till fyra servisanslutningar. Tre stycken på ena kammarväggen och en på kammarväggen på motsatt sida. De serviser som går till samma kammarvägg har snarlik utformning medan den servis som går till motsatt vägg ofta ser helt olik ut. För att underlätta modelleringen av serviser analyseras enbart de tre serviserna som går till samma kammarvägg. Utanför kammaren läggs de olika ledningsnäten i skyddsrör i gemensamt schakt i så stor utsträckning det går. Att servisledningarna dras i skyddsrör innebär att schakten inte behöver öppnas igen vid underhåll då ledningarna kan kapas och dras in i kammaren och ersättas med nya (Kallskog muntligt, 2016). Servisplattornas placering och utformning genom kammar- och fellehusvägg ses i Figur 21:



Figur 21: Servisplatta med servisledningar genom kammarvägg sett utifrån

Infrakulverten i Vallastaden är en ny teknik för att lägga infrastruktur. Det finns andra typer av kulvertlösningar men en kulvert med plaströr och betongkammare för ett så pass litet område som Vallastaden finns inte. Eftersom tekniken är ny och det är den första gången den används i Vallastaden är kostnaden för vissa moment dyrare än för framtida förläggningar när erfarenheten är större (Rydin muntligt, 2016). Tidsramen för tekniken var också, som beskrivs under rubrik 2.1 *Studieobjekt*, kort vilket även det påverkat installationskostnaden för kulverten. Sammanfogningen mellan plaströr och betong är ett exempel på ett sådant moment. Sammanfogningstekniken hann inte testas innan kulverten installerades i Vallastaden och det har uppkommit flertalet problem med den vilket lett till inläckage. Dessa faktum är svåra att förhålla sig till i LCC-analysen och en diskussion kring vad som möjligtvis kan minska installationskostnaden görs under rubriken 7.3.3 *Infrakulvertförläggning utan kammare eller fellehus*.

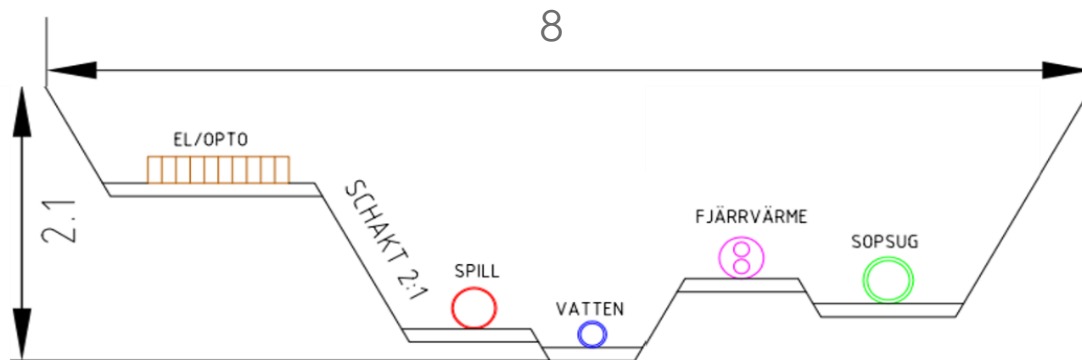
I början av kulvertförläggningen var kulverttröret helt tomt när det sammanfogades med kammare och fellehus. Upphängningskonsoler monterades sedan i kulverten och ledningsnäten kom på plats. I ett senare skede av förläggningen i Vallastaden köptes kulverttrören in med konsolerna färdigmonterade men ledningsnäten kom fortfarande på plats efter förläggningen av kulverten (Wiklund muntligt,

2016). Enligt Tekniska verken och Uponor är framtidsvisionen att leverera kulvertrören med prefabricerade konsoler samt infrasystem. Detta för att underlätta installationen och således minska kostnaden. I LCC- analysen har kostnaden för installation beräknats för prefabricerade konsoler men inte för för-installerade infrasystem. Det hade varit önskvärt att räkna med både prefabricerade konsoler och infrasystem men eftersom det inte utförts av Uponor än var kostnaden svårt att identifiera.

5.2 Installation vid konventionell förläggning

Inom flera av de ledningsbundna infrasystem som beskrivs nedan finns föreskrifter och rekommendationer från nationella branschorganisationer för hur förläggningen bör utföras. Informationen nedan utgår från hur Tekniska verken utför dessa arbeten, eftersom det är Tekniska verkens nät som jämförs i studien. Det som refereras som ”konventionellt” är hur det sker i Linköping.

I stadsmiljö grävs infrastruktur traditionellt ner i gator. Ett ”normalsegment” över hur infrasystemen fördelas i gator kan se ut som i *Figur 22* men beroende på gatans bredd varierar deras position något, dock representerar bilden en typisk fördelning.



Figur 22: Normalsegment vid konventionell förläggning i gata med motsvarande infrasystem som i kulverten. Det är detta som refereras till som konventionell förläggning under ”normala” förutsättningar. Om spontning behövs blir schaktet smalare och ledningarna placeras mer ovanpå varandra

Som kan ses ligger de olika infrasystemen på olika djup och är utspridda över gatans bredd, där el och opto ofta är förlagt i trottoaren. Vattenledningarna ligger djupast för att minska risken att de andra systemen blir skadade vid läckor. Eftersom det inte ligger några ledningar för dagvattenhantering i kulverten antas dessa inte heller finnas för den konventionella förläggningen (jämför *Figur 4*). Vid nyproduktion grävs inledningsvis schaktet för VA-ledningarna upp och fylls igen innan så kallade hyllor grävs fram för övriga ledningsnät. Därefter sker en återställning av marken och eventuell beläggningssyta läggs på (Bäcklund muntligt, 2016). Om förutsättningarna innebär att dubbelspont krävs leder detta till en trängre förläggning där samtliga system skjuts mot mitten av gatan. Kostnaden för förläggning med dubbelspont blir ca 5 gånger så hög som ett schakt utan och medför dessutom ökade kostnader vid underhållsarbeten (Svensson muntligt, 2016).

En skillnad mellan kulverten och konventionell förläggning är hur ledningarna dras. Vid konventionell förläggning följer ledningarna gatunätet medan infrakulverten går rakt igenom innergårdarna och under byggnader i området. Dessutom behöver ett konventionellt nät ta hänsyn till befintlig vegetation vid underhållsarbete (Linköpings kommun, 2016). Följden av detta blir att ett konventionellt nät blir längre än motsvarande nät i kulverten. Vid en tidig kalkylering över infrakulvertens sträcka jämfört med konventionell förläggning beräknades det konventionella nätet behöva vara uppemot 50 % längre (Svensson muntligt, 2016). I det studerade systemet har ledningarna i det konventionella nätet antagits följa samma sträcka som kulverten då varje område ser annorlunda ut och det är därmed svårt att hitta ett rättvisande konventionellt nät. Hur detta antagande påverkar livscykelkostnaderna undersöks närmre i 7.3.2 *Längdförhållandet mellan konventionellt nät och kulvert-nät*

Vid konventionell förläggning läggs serviserna på samma sätt som matarnätet fast i enskilda schakt istället för samförläggning, främst på grund av att det är olika delar av Tekniska verken som anlägger de olika serviserna. Serviserna kan även se olika ut för olika fastigheter då vissa serviser endast går till en byggnad medan andra kan vara anslutna till flera byggnader. Dessutom kan längderna skilja sig mellan ledningsslagen beroende på anslutningspunkterna på fastigheten från matarnätet. (Kallskog muntligt, 2016)

För att motsvara de serviser som finns i kammare och fellehus i kulverten antas det konventionella nätet ha samma antal serviser. Håltagningen som sker vid förläggning i kulverten sker naturligtvis inte vid konventionell förläggning. En mer detaljerad bild över hur de ser ut ges under informationen för varje ledningsnät nedan.

5.3 Studerat avloppsledningsnät

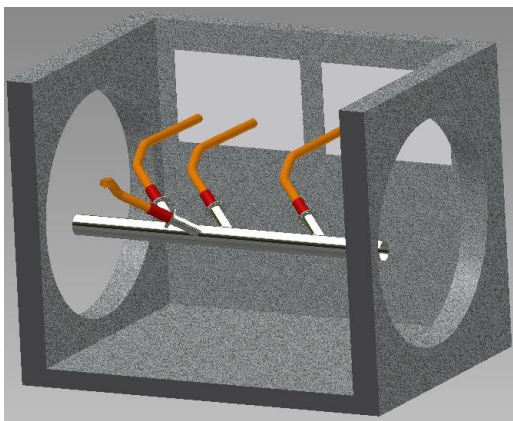
Det avloppsledningsnät som finns i kulverten beskrivs nedan och följs av de förenklingar som gjorts i LCC-studien. Därefter beskrivs hur ett motsvarande konventionellt nät kan se.

5.3.1 Infrakulvert

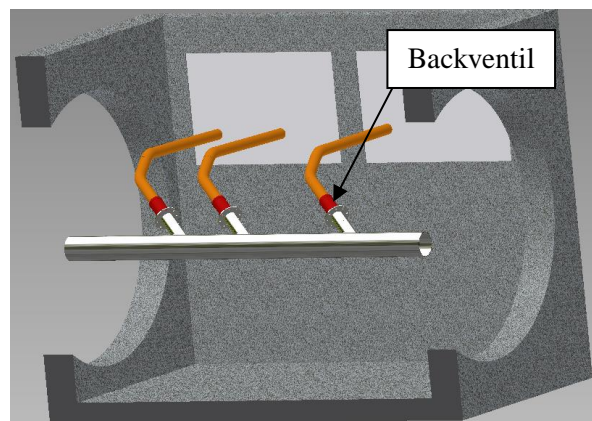
I kulverten hänger ledningar för spillvatten. Matarnätets rör är tillverkade av rostfritt stål och går rakt, precis som övriga nät, i kulverttröret. Rören har en dimension på DN200 och sammanfogas med svetsning. Stålet valdes för att upphängningen gör att ledningarna måste kunna bära belastningen utan att svikta, något som plaströr inte klarar (Johansson muntligt, 2016).

Eftersom höjden på kulverten är begränsad kan inte ledningarna läggas med självfall och därför sitter det pumpar med jämna mellanrum som pumpar upp vattentrycket vid behov. Totalt finns det 6 pumpstationer i kulvertsystemet i Vallastaden som är placerade i fellehusen (Jönsson muntligt, 2016) och samma antal antas behövas i fallstudien.

Det är, som tidigare beskrivits, i kammare och fellehus som anslutningarna till fastigheter görs. Servisledningarna för avloppssystemet i kulverten är PVC-rör och har två dimensioner, DN100 och DN160, beroende på fastighetens storlek. För att tillgodose det bostadsområde som antagits i studien antas det krävas DN160 rör. Eftersom spillvattensystemet är trycksatt krävs backventiler vid varje servis som ser till att avloppsvatten inte trycks tillbaka i fastigheten vid pumpning. I *Figur 23* och *Figur 24* ses ett exempel på servisernas utförande i kamrarna. *Figur 23* visar på hur det ser ut i Vallastaden enligt CAD-fil från Lindner (2016) och i *Figur 24* ses hur servisernas utformning antagits i analysen.



Figur 23: Avloppsservis i kammare



Figur 24: Förenklad avloppsservis

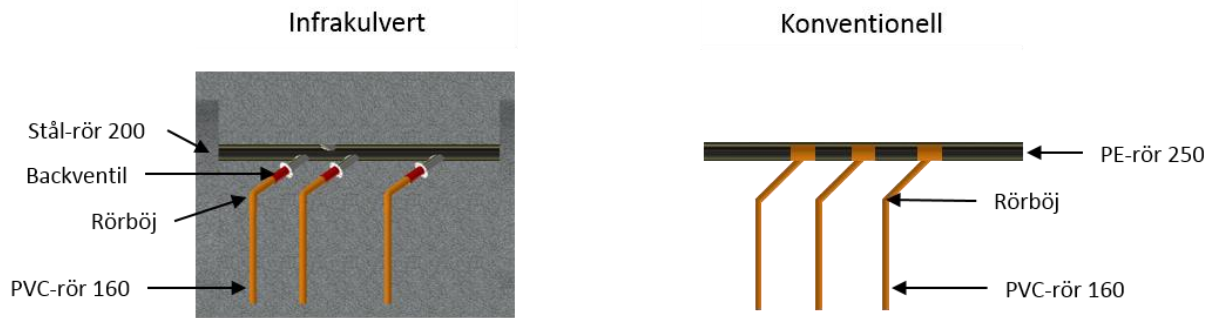
Servisledningarna i fellehusen är utformade på liknande vis som i kamrarna med skillnaden att längden till servisplattan är längre i fellehusen.

5.3.2 Konventionellt

Vid konventionell förläggning läggs spillvattenrören ner i schakt på ett djup av 1,8 m men djupare schakt förekommer, speciellt vid självfallsledningar (Alesand 2013). Vid nyproduktion idag är det nästan uteslutande plaströr som används (Alesand 2013) och således är det PE-rör som valts till studien. Dimensionen på rören i studien är DN250 vilket matchar funktionen för spillvattenledningarna i infrakulvert (muntligt Johansson, 2016).

Vid konventionell förläggning läggs oftast ledningarna med självfall vilket innebär att systemet inte är trycksatt. Således krävs inga pumpstationer och backventiler likt de i infrakulverten (muntligt Svensson, 2016). Beroende på områdets förutsättningar kan enstaka större pumpstationer krävas för att pumpa avloppsvattnet till huvudledningar belägna på högre nivå. I fallstudien inkluderas därför en större pumpstation i det konventionella nätet.

Servisernas utformning i kamrarna i infrakulverten har matchats för konventionell förläggning. I *Figur 25* ses att längden för servisledningarna är densamma för de olika förläggningsteknikerna i studien. Servisledningarnas dimension och rörtyp är även de samma. Den största skillnaden är, som ovan nämnt att backventilerna inte behövs vid konventionell förläggning. Detta har gjorts på samma sätt för fellehusen.



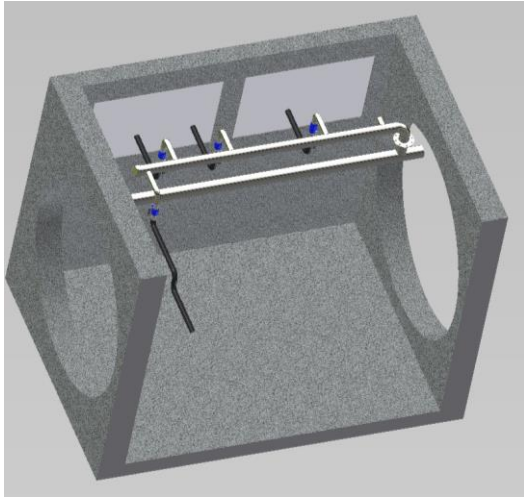
Figur 25: Jämförelse av avloppsserviser för infrakulvert och konventionell förläggning i det system som analyseras i fallstudien

5.4 Studerat vattenledningsnät

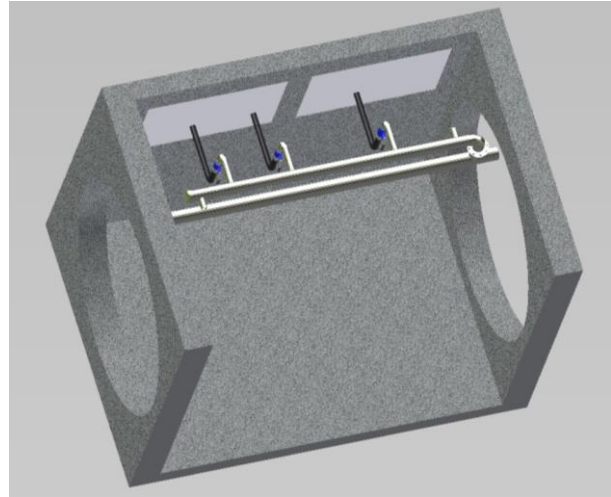
I detta avsnitt beskrivs vattenledningsnätet i kulverten, de förenklingar som gjorts i studien och slutligen hur ett konventionellt nät med samma funktion kan se ut.

5.4.1 Infrakulvert

Vattenledningarna i kulverten är av samma typ som avloppsledningarna, alltså stål-rör med dimension DN200. På matarledningen sitter ett t-stycke till ett stål-rör med dimension DN110, därefter sitter en 90 graders rörböj och sedan går röret parallellt med huvudledningen. Från detta rör förgrenas sedan serviserna till fastigheterna ut och på varje servisledning sitter en kulventil. Servisledningarnas dimension kan som ovan nämnts skiljas beroende på vilken fastighets som ska försörjas men i LCC-studien har DN50 antagits. Detta är till följd av fastigheterna som finns i Vallastaden. *Figur 26* visar på hur det ser ut enligt CAD-filen och i *Figur 27* ses hur servisernas utformning antagits i analysen.

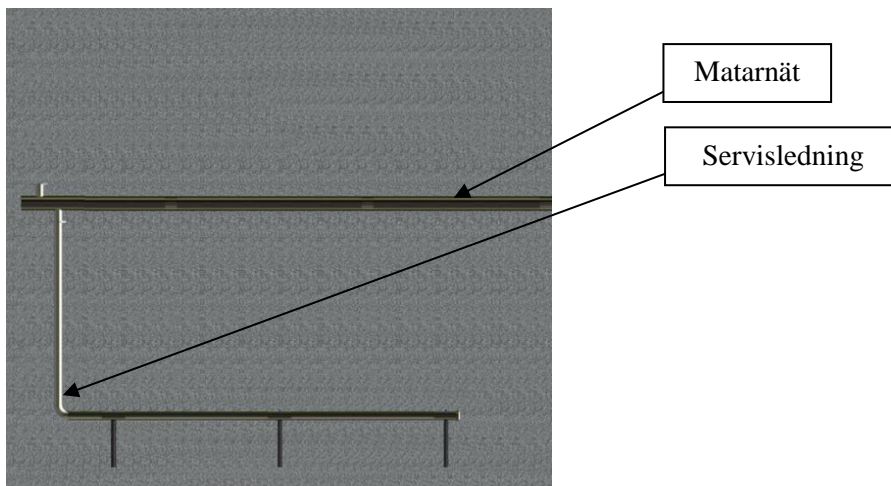


Figur 26: Vattenservis i kammare



Figur 27: Förenklad vattenservis

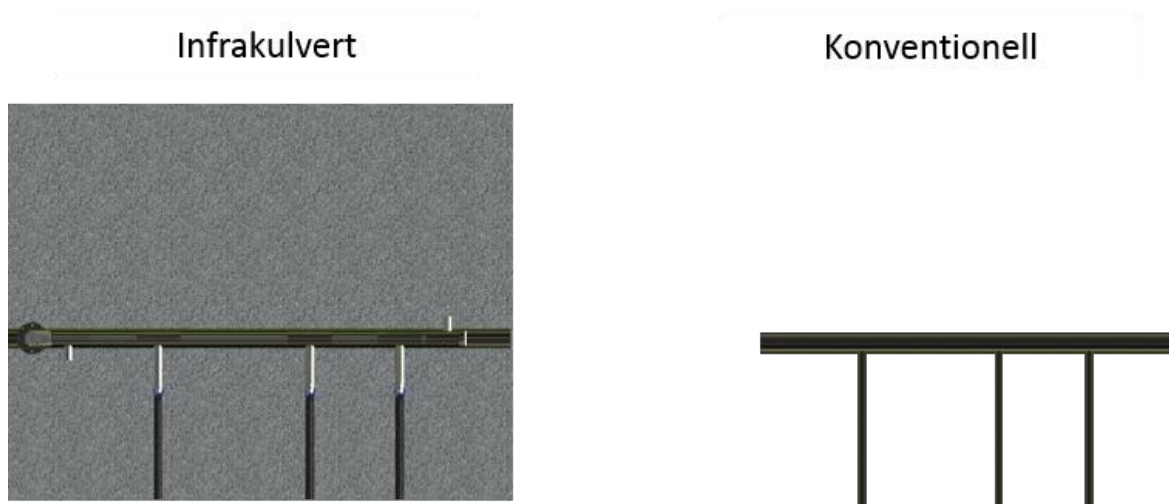
Fellehusens serviser har snarlik utformning. Istället för att den större servisledningen går rakt ovanför huvudledningen går den längs kammarväggen till väggen med servisplattan. I *Figur 28* ses en bild på fellehusens servisförläggning.



Figur 28: Exempel på utformning av vattenservis i fellehus

5.4.2 Konventionell förläggning

Vattenledningarna läggs ner i schakt på ett djup av cirka 1,8 m (Alesand 2013). Materialen för vattenledningarna har haft samma utveckling som avloppsledningar och precis som för avloppsledningar används idag oftast ledningar av plast. Således analyseras även här PE-rör med dimensionen DN250. Servisledningarnas dimension är densamma som för förläggning i kulverten men vid konventionell förläggning är det enbart PE-rör. Vid konventionell förläggning läggs inte ett rör över matarnätet som leder vattnet och sedan förgrenas ut till fastigheterna och ventiler på servisledningar används inte heller vid konventionell förläggning. I *Figur 29* ses servisledningarnas utformning för infrakulverten och hur det matchats till den konventionella förläggningen. För fellehusen matchas servisledningarna på samma sätt.



Figur 29: Jämförelse av vattenservis i infrakulvert och vid konventionell förläggning

5.5 Studerat el - och optonät

Utgångspunkten för de studerade el- och optonäten är de som finns i kulverten. Detta har sedan matchats med motsvarande nät med konventionell förläggning som krävs för att upprätthålla samma funktion.

5.5.1 El och opto i infrakulverten i Vallastaden

El och opto ligger, som Figur 18 visar, monterade på kabelstegar i "taket" på kulverten. I en del av kulverten går en högspänningsledning på 12 kV men i majoriteten går lågspänningsledningar på 0,4 kV. I kulvertssystemet går en matningskabel till varje fellehus där det finns mindre elcentraler. Från dessa elcentraler dras sedan servisledningarna till kamrarna där anslutning till fastigheterna sker (Muntligt Grebner, 2016). Optokablarna går på liknande sätt som elkablarna från en större central till mindre centraler i fellehus och sen vidare till kammare.

Då varje fellehus har en egen matningskabel skiljer sig antalet elkablar åt mellan olika delar av kulvertssystemet. Därför har ett snitt på två kablar antagits till studien enligt rekommendation från Grebner (2016). Serviskablarnas längd i kulvertssystemet varierar kraftigt då det beror på längden från fellehus till kammare och dessutom har olika fastigheter olika stora kablar. I det studerade systemet avgränsas därför servisledningarna bort och det studerade systemet blir alltså endast matarnätet i kulverten med dubbla elkablar och motsvarande för opto.

5.5.2 El och optoförläggning vid konventionell förläggning i Linköping

Traditionellt förläggs el och fiber läggs i trottoaren på minst 0,25 m djup och djupet är bl.a. beroende på spänningen i kabeln (Bengtsson et al. 2006). Vid konventionell förläggning beror längden på serviskablarna på avståndet från närmsta elskåp till fastigheten, något som kan variera stort (Muntligt Grebner, 2016).

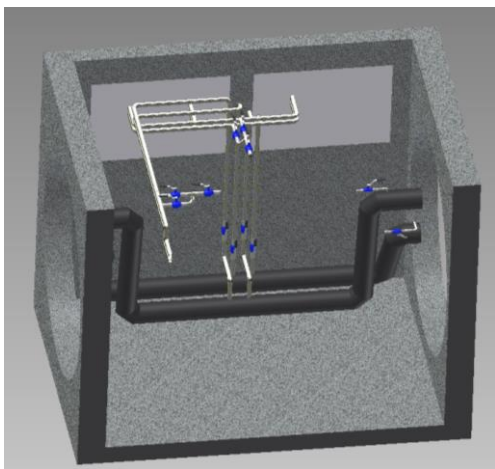
För att få ett konventionellt nät med motsvarande funktion som det i kulverten krävs dubbla elkablar och optokablar som läggs i raka spår i schakt. Precis som för infrakulverten finns inga servisanslutningar för el- och optonätet i de studerade systemen. Då kablarna för både el och opto är markkablar i kulverten antas dessa användas även i det konventionella nätet.

5.6 Studerat fjärrvärmenät

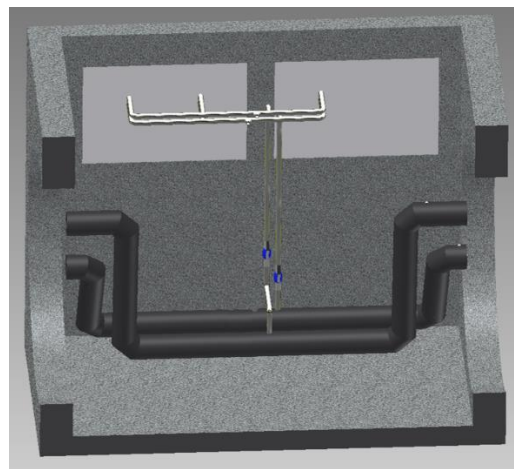
Det befintliga fjärrvärmenätet i kulverten har förenklats och vad som krävs för motsvarande funktion har sedan identifierats för konventionell teknik.

5.6.1 Fjärrvärmenät i kulverten i Vallastaden

Fjärrvärmenätet i kulverten är ett sekundärnät med framledningstemperatur på 60 grader. Ledningarna är enkelrör av stål med DN100/225 som sammanfogas med svetsning (Hammarström muntligt, 2016). Matar nätet kommer in i kammaren och dras sedan längs golvet för att frigöra utrymme i kammaren och för att rören ska kunna expandera. Det sitter även två ventiler på huvudnätet som används för att lufta systemet och ett t-stycke där två servisledningar ansluts, en som går till fastigheten och en som går till returledningen. Servisledningarna är stålrör med dimension DN50 och leds uppåt längs kammarväggen och på dessa ledningar sitter kulventiler. När de två rören är i höjd med servisplattan förgrenas rören ut till varje fastighet innan ledningarna går genom kammarväggen. I *Figur 30* visas ett exempel på hur servisernas utformning i en kammare kan se ut. För att förenkla datainsamlingen och på ett enklare sätt modellera förenklades servisernas utformning enligt *Figur 31*. Precis som för övriga ledningsnät har servisen som går till motsatt vägg, till skillnad mot de tre övriga servisanslutningarna, tagits bort. Även ventilerna för luftning utesluts.

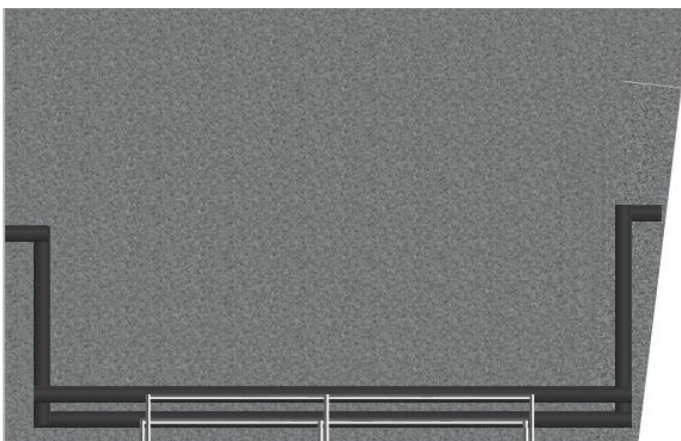


Figur 30: Fjärrvärmeservis i kammare



Figur 31: Förenklad fjärrvärmeservis

Förläggningen i fellehusen ser, som för vatten och avlopp, snarlik ut. Skillnaden mellan kammare och fellehus för fjärrvärmenätet är att matarledningarna blir längre eftersom fellehusen är större. I *Figur 32* ses en bild på hur förläggningen i fellehusen har modellerats.

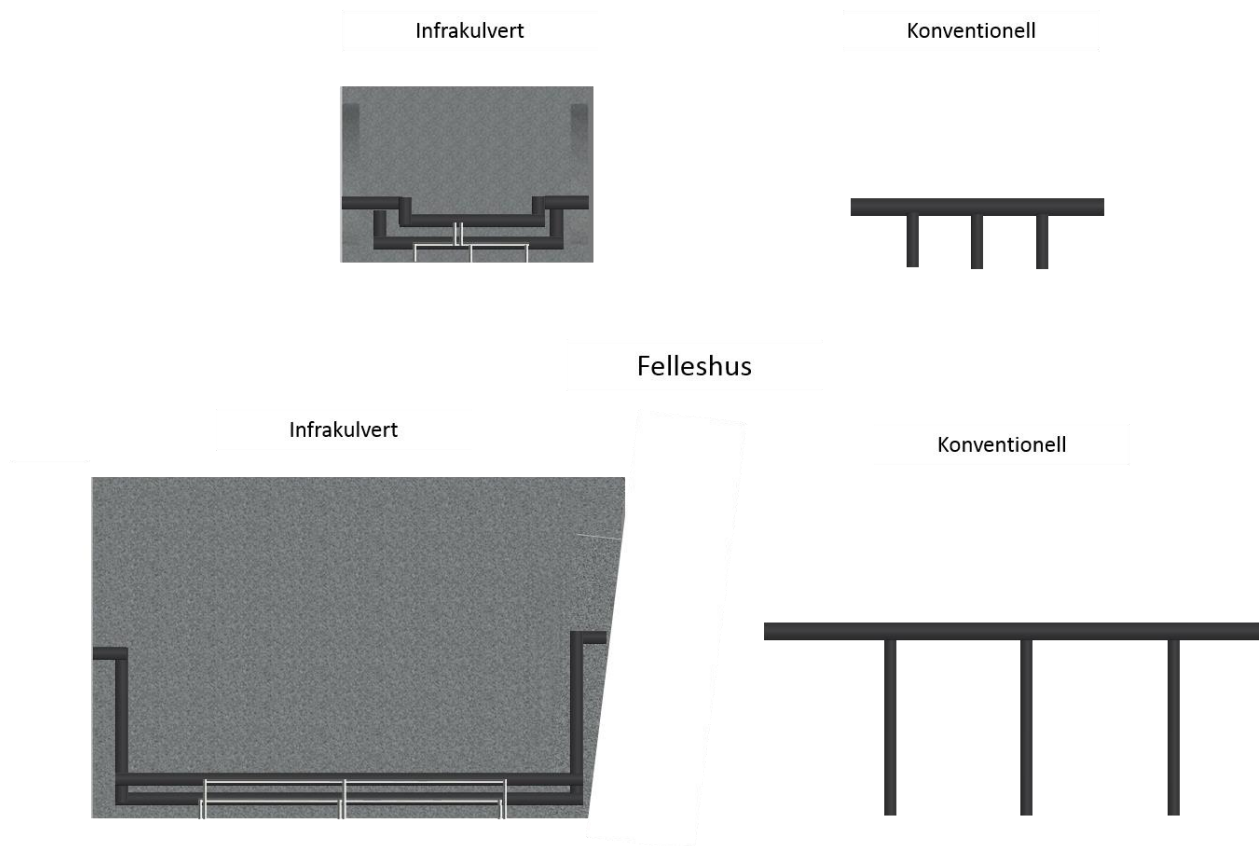


Figur 32: Förenklad servis i fellehus

5.6.2 Fjärrvärme konventionellt

Fjärrvärme läggs traditionellt ner på 1 m djup med hjässan ca 60 cm under markytan. För att skydda isoleringen mot omgivningen läggs ett lager polyetylen (PE) utanpå röret, en s.k. mantel. (Jigered muntligt, 2016)

Vid konventionell förläggning av fjärrvärmerör används sällan enkelrör. Istället används dubbelrör både på matarnätet och servisledningarna där de två ledningar ligger med gemensam isolering och mantel (Jigered muntligt, 2016). Rören i det matchande konventionella fjärrvärmenätet har samma dimension som i kulverten, DN100, men eftersom det är dubbelrör blir ytterdimensionen DN315. Ventilerna som sitter på servisledningarna i kammare och fellehus finns inte vid konventionell förläggning då det endast finns ventiler intill fastigheten (Jigered muntligt, 2016), vilket är utanför systemgränserna. *Figur 33* visar hur serviserna i kammare och fellehus samt hur motsvarande serviser i konventionellt nät ser ut.



Figur 33: Fjärrvärmeledningar och serviser i kulvertssystemet och motsvarande system vid konventionell förläggning

5.7 Studerat sopsugssystem

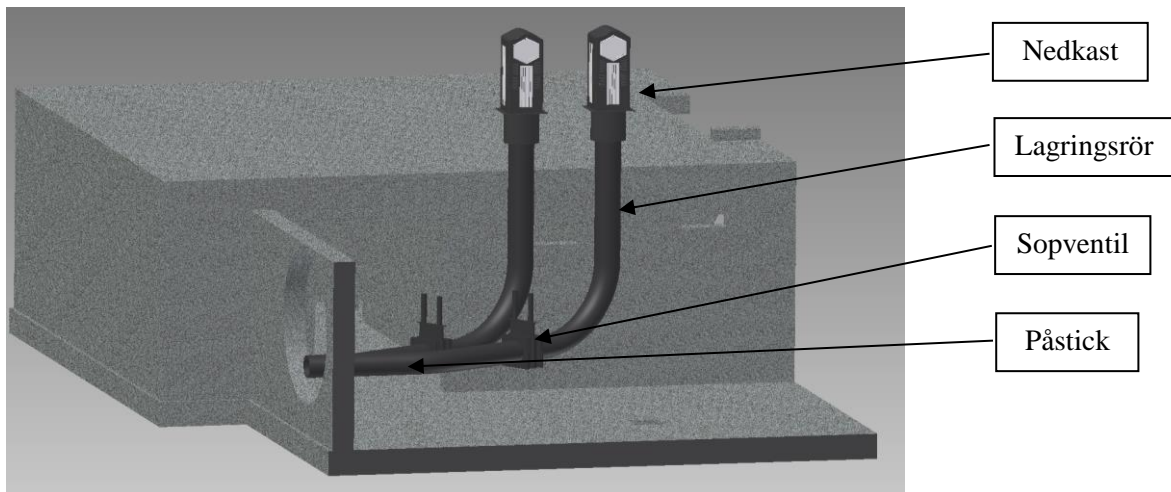
Sopsugssystemet i kulverten är levererat av MariMatic och är det första plaströrssystemet i Sverige. Nedan beskrivs hur det ser ut och hur motsvarande system ser ut vid konventionell förläggning.

5.7.1 Sopsugssystemet i kulverten i Vallastaden

I kulverten är sopsugssystemet från MariMatic och rören gjorda av plastkomposit. Plastkomposit leder enligt tillverkaren till lägre energianvändning för systemet på grund av den låga friktionen som möjliggör att rören kan ha mindre dimensioner, nämligen DN350 mm, än stålrör som ofta är DN500.

När användaren kastar sitt avfall i nedkastet komprimeras det och lagras innan det transporteras i röret till avfallsterminalen (MariMatic, 2015).

I Vallastaden finns det två nedkast per fellehus som placeras i locken vid fellehusen för att underlätta åtkomst vid underhåll (Johansson, J.E., 2016). Under varje nedkast sitter ett lagringrör och en sopventil. När sopventilen är stängd lagras soporna i röret tills de öppnas och sugs iväg mot en avfallscontainer. Efter sopventilen sitter ett påstick där de två rören från nedkasten ansluts till matarledningen. Lagringsrören, sopventilerna och påsticken är i huvudsak gjorda av stål. I *Figur 34* ses hur sopsugsystemet ser ut i fellehusen.



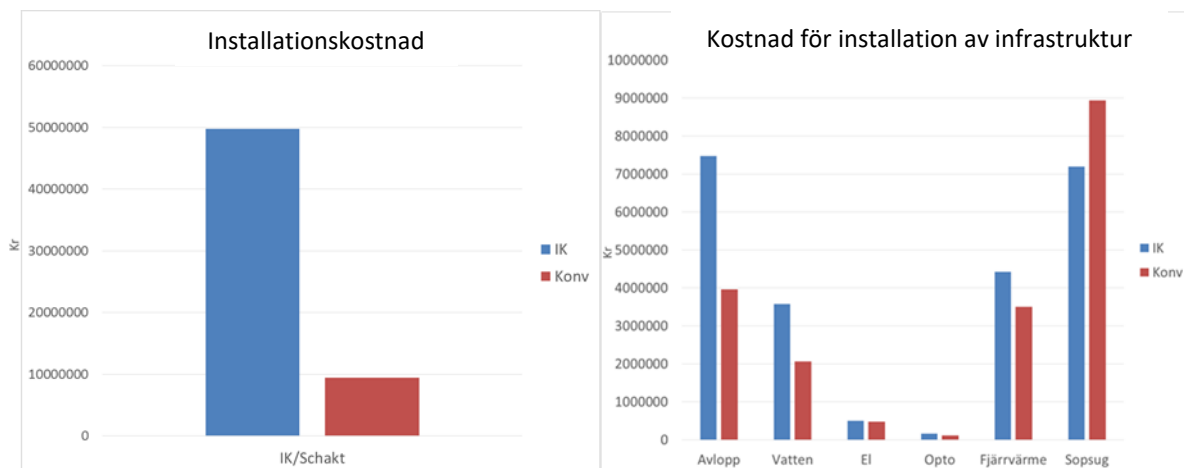
Figur 34: Sopsugens olika komponenter vid fellehusen. Vid konventionell förläggning motsvaras detta av en betong- eller stålammare

5.7.2 Sopsugssystem vid konventionell förläggning

Sopsugsystemet förläggs på samma sätt vid konventionell förläggning där rören är nedgrävda. Skillnaden är att det inte finns några fellehus att placera nedkasten på och tillhörande komponenter i. Istället för ett fellehus används en 4x2,4x2,2 m stor kammare som kan vara antingen i betong, stål eller plast (Johansson, J.E., 2016). I fallstudien antas denna kammare vara i betong och innehålla samma komponenter som sopsugssystemet i kulvertsystemet.

5.8 Installationskostnader

Kostnaderna för installationen av de ovan beskrivna infrasystemen presenteras i *Figur 35*. I kostnaderna inkluderas material, arbete och maskin användning som krävs för att få de olika näten på plats. Som beskrivits i 4.2.3 *Livscykelinventering* behandlas kostnader som konstanter vilket innebär att de kostnader som anges nedan är samma vid alla simuleringar.



Figur 35: Installationskostnader för de olika förläggningsteknikerna och de olika ledningsnäten. Till vänster visas hur kostnaderna för att gräva ner och installera infrakulverten förhåller sig till schakt-kostnaderna vid konventionell förläggning. Till höger redovisas installationskostnaderna för varje ledningsnät för infrakulvert respektive konventionell förläggning

Kostnaderna för infrakulverten baseras främst på fakturor från förläggningen i Vallastaden. Installationskostnaden vid konventionell förläggning baseras på intervjuer, EBR-katalogen och interna budgetmallar. Det vänstra diagrammet i *Figur 35* innefattar schakt- och installationskostnader för att få kulverten på plats utan ledningsnät respektive schakt-kostnaderna vid konventionell förläggning. Det högra diagrammet redovisar installationskostnaderna för respektive ledningsnät och förläggningsteknik. Skillnaderna mellan installationskostnaderna för de olika ledningsnäten beror på de olika material och stödsystem som används för de olika förläggningsteknikerna, vilket beskrivits i *5.1 Installation av infrakulverten i Vallastaden-5.7 Studerat sopsugssystem*.

5.9 Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser och underhållskostnader

Frekvenserna för hur ofta underhåll sker för de olika ledningsnäten grundas i förväntat antal underhåll per 100 år och den sträcka som fallstudien studerar. Vid vilket år underhållen inträffar utgår från en angiven eller beräknad åldersfördelning. Varje ledningsnät har sin egen karakteristik och därför redovisas frekvenserna för ledningsnäten separat. De bakomliggande data som används för att ta fram frekvenserna är av tre olika typer: statistikbaserat, livslängdsbaserat och årligt. Statistikbaserat innebär att det är statistik som ligger bakom det antal underhåll som modelleras. Denna typ av underhåll kräver två typer av data, dels antal underhåll som sker och dels när de sker (åldersfördelning). Livslängdsbaserade underhåll baseras på information från antingen leverantör eller uppfattningar från intervjuer. Till skillnad mot statistikbaserade underhåll är det enbart livslängdsdata som krävs för att modellera både antalet underhåll och när de sker. En typ av livslängdbaserat underhåll som inte inkluderas för ledningarna är förnyelse. Detta beror på databrist kring i vilken utsträckning ledningsnäten förnyas på 100 år och vad ett sådant arbete kostar att utföra. För att undersöka vilken inverkan sådana förnyelser skulle kunna ha på livscykelkostnaderna undersöks detta i känslighetsanalyser för sopsugens rörsystem och elnätet.

Utöver underhåll på varje ledningsnät finns även ett årligt underhåll av kulverten i form av rondering. Dessutom kommer larmsystem och stödfunktioner bytas ut vid behov, något som inte inkluderas i studien på grund av databrist. Plaströret kulverten är tillverkad av är åldercyklad för 100 år och antas därför hålla hela den studerade perioden vilket även gäller för betongkamrarna (Rydin muntligt, 2016).

Varje underhåll ger upphov till kostnader och beroende på ledningsnät är kostnaderna olika stora. I grova drag finns det ett antal gemensamma aktiviteter som ger upphov till kostnader vid underhåll för konventionell förläggning:

- Identifiering och lokalisering av skada
- Eventuell trafikavstängning beroende på var läckan uppstår
- Schaktarbete för att gräva fram ledning/kabel
- Material för reparationen
- Arbetsutförandet
- Återfyllnad av schakt
- Återställning av ytskikt/beläggning. (Alesand, 2013)

Vilka kostnadsposter som inkluderas och inte har kraftigt påverkats av datainsamlingen och vilken data som var tillgänglig för varje ledningsnät. Dessutom finns en skillnad i dataunderlag mellan kostnaderna för konventionell förläggning och infrakulvert då kulverten är en ny teknik med många nya moment (se 4.2.3.2 *Sammanställning av insamlad data*). Detta leder till att arbetsmoment tar längre tid att utföra vilket leder till ökade kostnader. Utöver detta är den största skillnaden att inga kostnader för schakt förekommer vid arbete i kulvert. En grov överblick över vilka kostnadsposter som inkluderats för kulvert och konventionellt ges i *Tabell 5*.

Tabell 5: Kostnadsposter som inkluderas i fallstudien för underhållsarbete i infrakulvert (IK) respektive konventionell förläggning (konv)

| Kostnadspost: | IK | Konv |
|-----------------------|----|------|
| Lokalisering | | |
| Trafikavstängning | X | X |
| Schaktning | | X |
| Materialanvändning | X | X |
| Reparationsarbete | X | X |
| Återfyllnad schakt | | X |
| Återställning ytskikt | | X |

Som kan ses tas inte kostnadsposten för identifiering och lokalisering med i beräkningarna. Detta beror på bristfällig information kring hur läckor ska lokaliseras i infrakulverten och att kostnaden för lokaliseringen beror på var i nätet läckan uppkommer. Vad gäller trafikavstängning måste det ske både vid arbete i kulvert och vid schakt. Det blir en mer omfattande trafikavstängning vid konventionell förläggning då en gata behöver stängas av jämfört med en punktavstängning kring infrakulverten. Materialanvändningen antas vara samma för både konventionell förläggning och kulvert då samma orsak till läcka antas lagas med samma metod. Dock skiljer sig arbetstiden åt där arbete i kulvertmiljö, enligt montörer på plats, tar längre tid än vid konventionell förläggning. De två sista kostnadsposterna, återfyllnad och återställning av ytskikt, sker endast vid konventionell förläggning då de är kopplade till schakt-arbete. Hur detta påverkar underhållskostnaderna för varje ledningsnät beskrivs i kommande avsnitt.

5.9.1 Underhåll för vatten- och avloppsledningar

Beroende på rörets material och miljön den är förlagd i uppkommer brott av olika anledningar. Enligt Malm et al. (2011a) påverkas plaströrs livslängd i huvudsak av fyra faktorer: materialets egenskaper, belastningen på ledningen, temperaturen och miljön. Miljön vid konventionell förläggning är dock inget som påverkar plaströrets livslängd i praktiken då normala jordförhållanden eller avloppsvatten inte påverkar materialet. Dessutom är temperaturen i marken inget som påverkar plaströren då det framförallt är vid temperaturer över 20°C som materialets egenskaper påverkas. För nedgrävda plaströr är det alltså materialets egenskaper och belastningen som i huvudsak bestämmer livslängden.

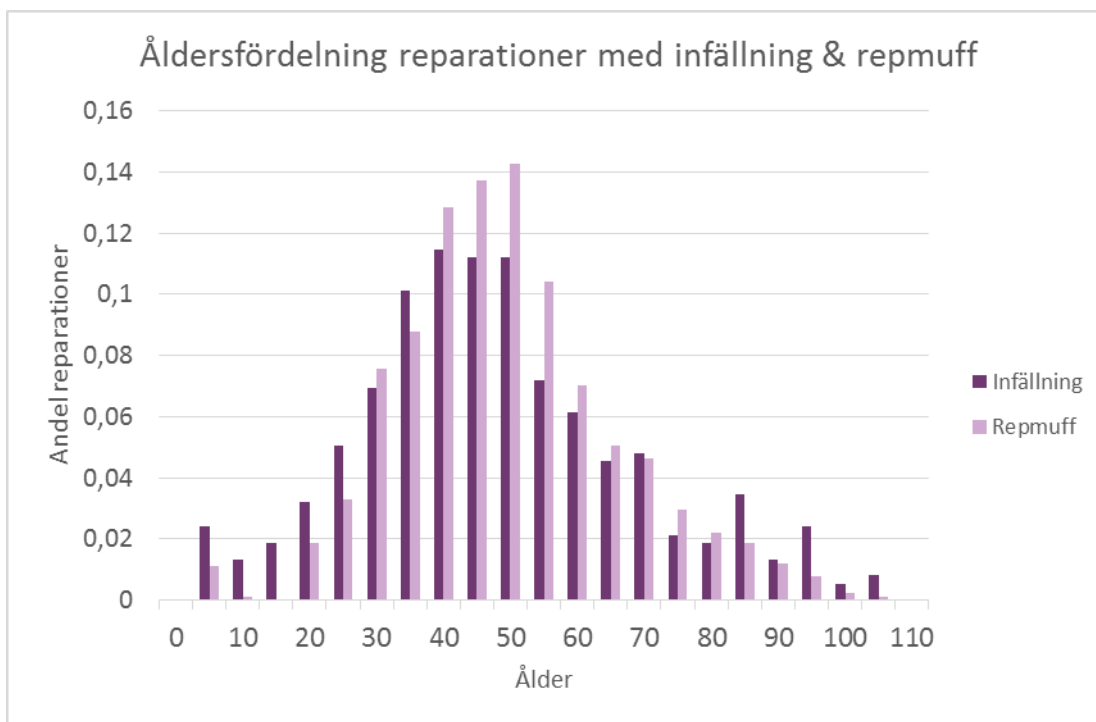
Belastningen som verkar på röret bestäms av hur nära ytan det ligger, hur det är övertäckt och vilka belastningar som sker ovan mark från byggnader, trafik etc. Materialets egenskaper bestäms av tillverkningen och faktorer som påverkar livslängden är hållfasthet och motståndskraft mot krypning. (Malm et al. 2011a)

De brott som sker på en plastledning beror till stor del på ledningens ålder och kan grovt delas upp i tre olika faser. Under rörets dimensionerade livslängd är det främst sega brott med utbuktningar som följd som sker, därefter börjar en långsam spricktillväxt innan röret åldrats och det uppstår sprickor av den anledningen. Beroende på ledningens ålder, storleken på brottet och konsekvensen av läckan sker antingen ett avhjälpande underhåll, en förnyelse eller ingenting. Avhjälpande underhåll innebär att läckan lagas genom att röret tätas med muffar eller infällning medan förnyelse innebär att en längre sträcka av ledningen byts ut mot en ny. Alla läckor är dock inte ekonomiskt motiverade att reparera då marginalkostnaderna blir höga och därför läcker idag ca 15 % av det producerade dricksvattnet i Sverige (Malm et al. 2011a). Då det inte finns någon information kring hur många läckor detta motsvarar antas därför de reparationer som utförs motsvara alla läckor som uppstår. Dessutom innebär 15 % läckage att infrakulverten blir vattenfylld vilket innebär att även små läckor repareras i större utsträckning än vid konventionell förläggning.

Avdelningen för vatten på Tekniska verken har dokumentation på skador som lagats på deras nät från 1984 och framåt. Ur denna statistik framgår hur gammal ledningen var, ledningens material, skadeorsak och reparationsmetod. Totalt finns det 1883 skador (t.o.m. 2016-11-14) registrerade men bland dessa finns ett antal skador som saknar viss information. Efter att skador som saknar någon information (exempelvis reparationsmetod eller anläggningsår) sorterats bort kan statistiken struktureras efter reparationsmetod för de återstående 1432 skadorna.

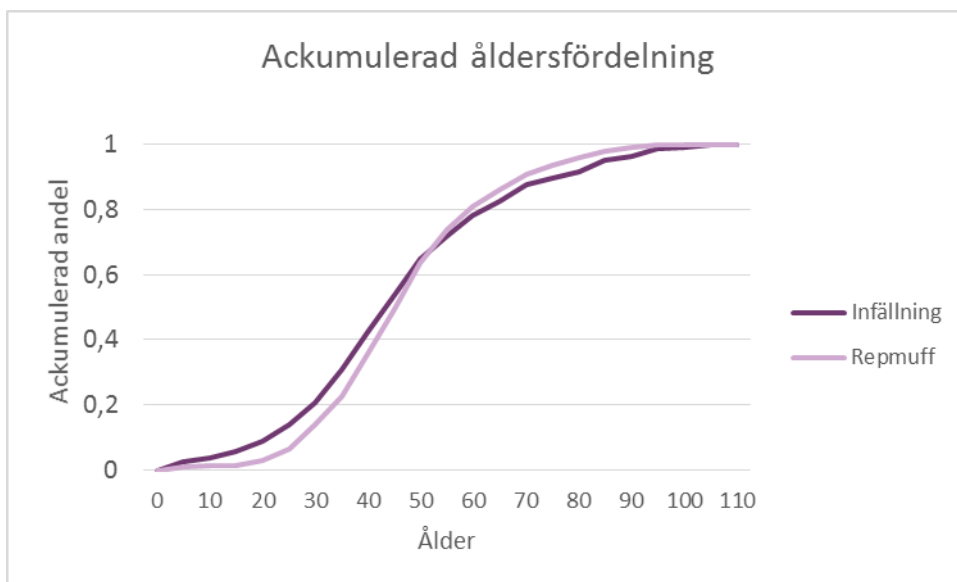
Denna statistik visar att lagning med repmuff eller infällning är de absolut vanligaste reparationsmetoderna och tillsammans står de för 90 % av de lagningarna som utförts. Av dessa har 30 % lagats med infällning och resterande med repmuff. Tillsammans med den statistik som Tekniska verken skickar till VA-branschens statistiksystem (VASS) kring antal läckor per kilometer ledning kan detta användas till att skapa ett förväntat antal läckor och vilken reparationsmetod som mest troligt kommer användas. I snitt har Tekniska verkens vattenledningar haft 0,073 avbrott per kilometer de senaste tre åren och spillvattenledningarna 0,031 avbrott per kilometer. Ur statistiken som skickas till VASS framkommer också att förnyelsetakten de senaste tre åren i snitt varit 0,26 % per år.

För att få en åldersfördelning över när avbrotten sker i tiden sorteras läckorna efter ledningens livslängd vid skadetillfället. Detta ger en indikation på vid vilken ålder de flesta reparationer utförs och fördelningen för infällning respektive repmuff ser ut som i *Figur 36*.



Figur 36: Åldersfördelning över reparationer som utförts med infällning och repmuff. Staplarna motsvarar de fem föregående åren d.v.s. skadorna som sker vid ålder 10 är de som inträffar mellan år 6 och 10

Som kan ses sker de flesta reparationer på avlopps- och vattennätet med infällning på ledningar som är 31-50 år gamla medan det för repmuff sker något färre tidiga underhåll och några fler senare men återigen sker merparten mellan 31-50 år. Detta syns tydligare i Figur 37 där den ackumulerade fördelningen framgår.



Figur 37: Ackumulerad åldersfördelning för reparationer med infällning och repmuff utifrån den statistik vattenavdelningen på Tekniska verken samlat in sedan 1984

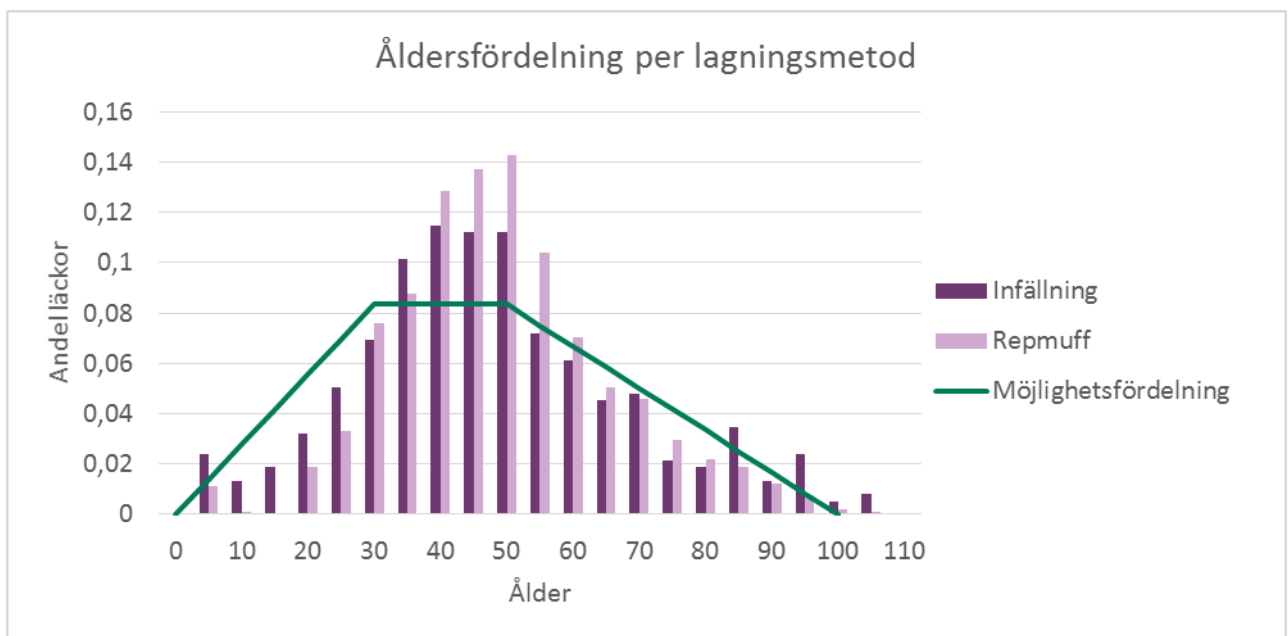
Som kan ses sker reparationer med infällning något tidigare än med repmuff som repareras något senare. Brytpunkten där linjerna skär varandra visar att det vid 50 år skett i princip lika stor andel reparationer av respektive metod.

Denna data är för samtliga rörmaterial och eftersom de äldsta ledningarna är gjorda av gjutjärn är en stor del av skadorna just på gjutjärnsledningarna. Dock förekommer skador även på PE- och PVC-ledningarna trots att de främst introducerades på 60- och 70-talet. När denna statistik betraktas är det viktigt att notera att det endast är skador som uppstått och reparerats som är med, för ledningar som håller eller som läcker men inte åtgärdas finns ingen information för Linköping.

Eftersom avloppssystemet i kulverten är trycksatt finns flera pumpar, med förväntad livslängd på 15 år (Jönsson muntligt, 2016), samt en backventil på varje servis. Enligt tillverkaren har backventilerna en förväntad livslängd på 10-15 år (Magnusson, 2016). Pumpstationerna som krävs vid konventionell förläggning har även de en förväntad livslängd på 15 år (Jönsson muntligt, 2016).

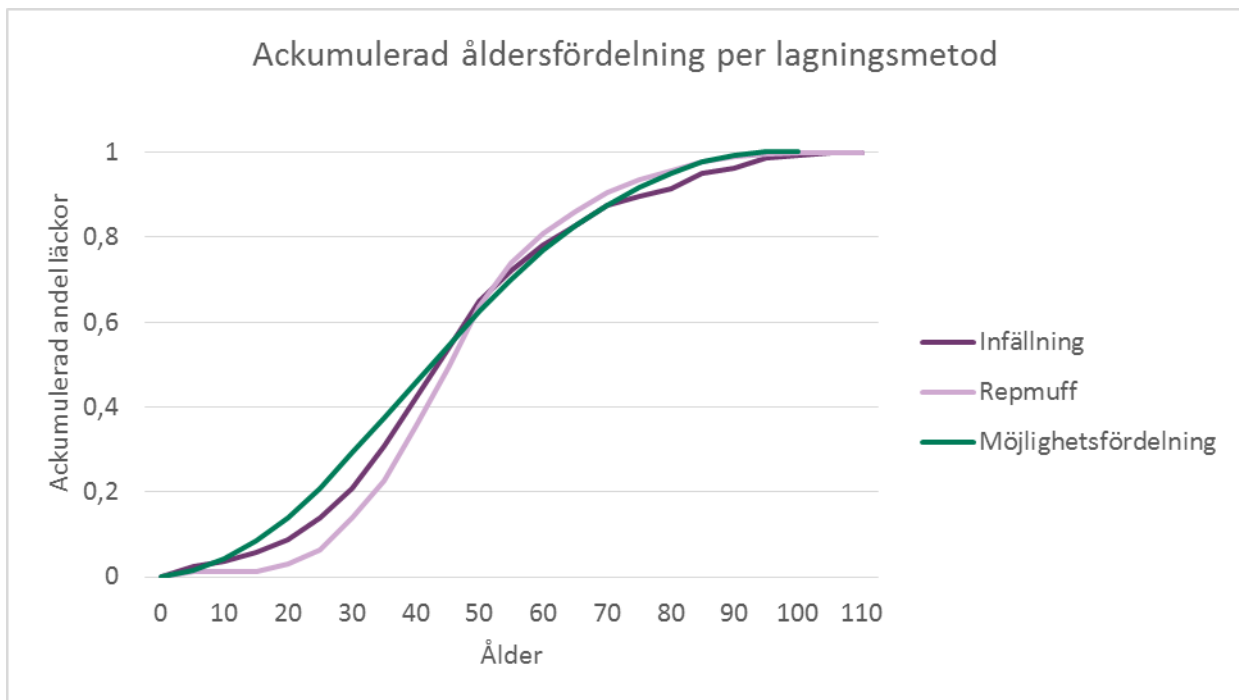
5.9.1.1 Modellerad underhållsfrekvens och underhållskostnad för vatten- och avloppssystem

Utifrån statistiken till *Figur 36* och *Figur 37* kan en bild skapas över vilka reparationer som utförs, hur ofta och med vilken åldersfördelning. Hur underhållens åldersfördelning modelleras för både avlopps- och vattensystem framgår i *Figur 38* och *Figur 39*:



Figur 38: Statistikbaserad åldersfördelning av infällning och repmuffsarbeten jämfört med den möjlighetsfördelning som används för avlopps- och vattensystemet i fallstudien

Figur 38 visar hur den antagna trapetsfördelningen förhåller sig till statistiken för när lagningar med infällning respektive repmuff utförs. Trapetsfördelningen bygger, i enlighet med Feiz (2016), på fyra värden: minsta värde, lägre gräns, övre gräns och maxvärde. I möjlighetsfördelningen som används i simuleringen för infällning och repmuff används värdena 0, 30, 50 och 100. Utifrån den ackumulerade åldersfördelningen i *Figur 39* syns skillnaden mellan möjlighetsfördelningen och statistiken.



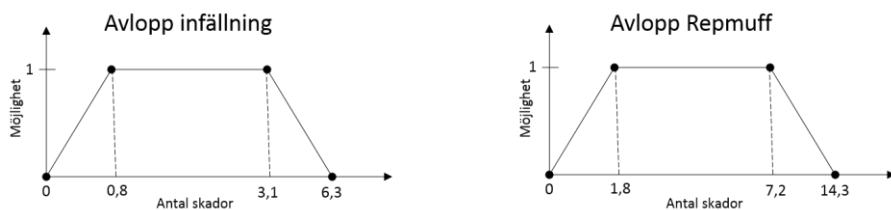
Figur 39: Ackumulerad åldersfördelning för infällning, repmuff och möjlighetsfördelningen som används som modelleringen i fallstudien

För möjlighetsfördelningen sker något fler reparationer tidigt i livscykeln men från år 40 och framåt visar sig möjlighetsfördelningen matcha statistiken på ett bra sätt och följer under denna period statistiken för både infällning och repmuff.

Antalet skador som förväntas uppstå under den studerade perioden baseras på de ovan nämnda snittantalet skador per km ledningsnät, vilket för avloppsledningarna innebär 0,031 skador/km och år. Samtliga skador som uppstår modelleras lagas med repmuff eller infällning då övriga reparationsmetoder endast står för 10 % av samtliga underhållsarbeten som utförts sedan 1984. Då 30 % lagas med infällning och 70 % med repmuff resulterar detta i att medelvärdet för infällning är 0,009 reparationer/km och år och för repmuff 0,022. Denna information baseras uteslutande på historisk statistik för konventionell förläggning och säger därmed inget om hur ledningarna håller i kulvertmiljö. Matarnätets ledningsmaterial i kulverten skiljer sig dessutom mot vad som används konventionellt men hur detta påverkar antalet underhåll saknas information.

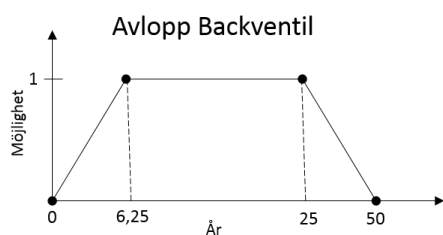
För att modellera möjliga variationer används Sörme och Hedbrants (2001) osäkerhetsfaktorer på dessa medelvärden. Den information som statistiken ger baseras på äldre ledningar och därför används osäkerhetsfaktor 2 på medelvärdet för att skapa zon 1 i Feiz (2016) trapetsfördelning. Denna osäkerhetsfaktor motsvarar Nivå 3 i *Tabell 1* och används eftersom informationen som erhållits på begäran från industri behöver skalas om då fallstudiens förutsättningar inte är desamma som statistikens. Max-värdet antas till det dubbla av övre gränsen för att fånga upp extremfall som kan förekomma och av samma anledning sätts min-värdet till 0 för att representera de extremfall då ledningarna håller länge (vilket resulterar i få underhåll). Den antagna osäkerhetsfaktorn och max-värdets inverkan på livscykelkostnaderna undersöks närmre i avsnitt 8.2 *Val av osäkerhetsfaktor*.

Skadorna som identifierats i statistiken räknas om från skador/(km, år) till skador/100 år för vald längd på studerat system då de förs in i modellen. För det avloppssystem som studeras i fallstudien blir det antal underhåll som krävs på avloppsnätets 1783 m under 100 år en möjlighetsfördelning enligt *Figur 40*:



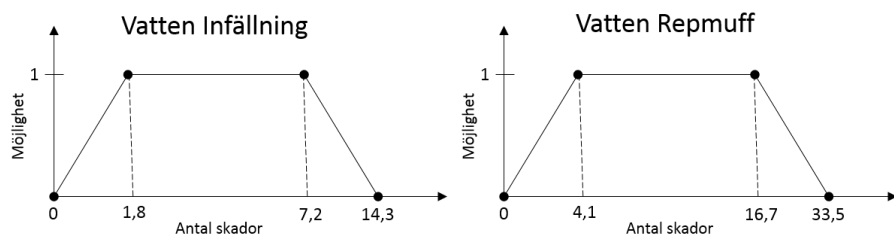
Figur 40: Modellerat antal underhåll för avloppssystemet i det studerade systemet i fallstudien

En skillnad mellan infrakulverten och konventionell förläggning är de backventiler som finns i avloppssystemet i kulverten. Den förväntade livslängden på dessa komponenter modelleras vara 12,5 år med osäkerhetsfaktor 2 för att matcha tillverkarens angivna livslängd. Detta resulterar i att backventilernas möjliga livslängd modelleras enligt *Figur 41*:



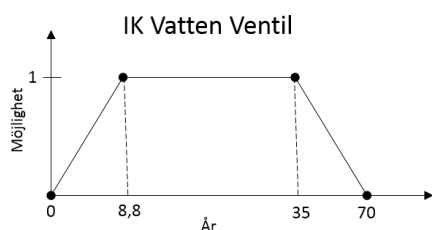
Figur 41: Modellerad livslängd på backventilerna i fallstudien

För vattenledningarna modelleras skadorna på samma sätt som avloppet enligt åldersfördelningen i *Figur 38*. Antalet skador som uppstår är 0,073/km och år. Infällning och repmuff står även här för 90 % av reparationsarbetena och samtliga skador som uppstår i fallstudien antas därför repareras med antingen repmuff eller infällning. Precis som för avloppsledningarna är fördelningen 30 % infällning och 70 % repmuff vilket resulterar i medelvärden på 0,022 för infällning och 0,051 för repmuff. Osäkerhetsnivåerna är desamma på vatten som för avlopp och systemet lika långt. Detta resulterar i en fördelning för antal underhåll enligt *Figur 42*:



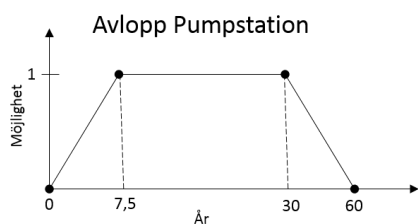
Figur 42: Modellerat antal underhåll för vattensystemet i fallstudiens avlopps- och vattensystem

Precis som det för avloppet finns backventiler i kulvertlösningen som inte förekommer vid konventionell förläggning finns det ventiler i vattensystemet i kulverten som inte finns för konventionell teknik. Vattenventilerna är av samma typ som de som används i fjärrvärmenätet och deras livslängd bedömdes enligt Hammarström (muntligt, 2016) vara 15-20 år och därför används 17,5 som snitt och den modellerade livslängden ser ut enligt *Figur 43* då max-värdet sätts till den dubbla övre gränsen:



Figur 43: Modellerad livslängd för ventiler i vattensystemet i kulverten

Till sist modelleras även pumpstationerna som sitter i avloppsledningsnätet. Då de har en förväntad livslängd på 15 år (Jönsson muntligt, 2016) antas medellivslängden till 15 år. Detta ger en åldersfördelning enligt *Figur 44* med osäkerhetsfaktor 2 för att matcha Jönssons erfarenhet (den äldsta pumpstationen i drift i Linköping är 54 år) och max-värde den dubbla övre gränsen:



Figur 44: Modellerad livslängd för pumpstationer i avlopps nätet

Fördelningen gäller för samtliga pumpar, oavsett storlek, som analyseras i LCC-studien.

Av ovanstående ledningar och komponenter påverkas inte pumpstation eller backventilerna av den möjligen bättre miljön i kulverten då den bakomliggande informationen kommer från liknande miljöer. Ventiler och ledningar påverkas däremot av en förändrad miljö.

De kostnader som i fallstudien fastställts för att utföra de underhållsarbeten som beskrivits ovan presenteras i *Tabell 6*:

Tabell 6: Identifierade underhållskostnader för avlopp och vatten i kulvert respektive konventionell förläggning

| | | IK | Konv. |
|--------|------------|-----------|------------|
| Avlopp | Infällning | 68073 kr | 144673 kr |
| | Repmuff | 29000 kr | 75600 kr |
| | Backventil | 11528 kr | |
| | Byte pump | 197400 kr | 1000450 kr |
| Vatten | Infällning | 68073 kr | 141390 kr |
| | Repmuff | 29000 kr | 75600 kr |
| | Ventil | 21000 kr | |

Informationen som ligger bakom kostnaderna för infällning och repmuffsarbete för både avlopp och vatten kommer från ett examensarbete utfört vid Tekniska verken med syftet att ”ta fram en formel som beskriver hur man kan förutspå kostnaden för att reparera en läcka” (Alesand, 2013). Kostnaderna som används i fallstudien är baserade på denna formel där skillnaderna mellan infrakulvert och konventionell förläggning beror på schakt-arbete, trafikavstängning, uppbrytning och återställning av marken. Informationen säger inget om hur stor en sådan läcka är men baseras på 40 reparationsarbeten utförda av Tekniska verken i Linköping och anses därmed vara typkostnader.

Kostnaden för att byta en backventil i avloppssystemet är hämtad från en faktura från inköp av backventil till infrakulverten i Vallastaden. Utöver detta tillkommer en kostnad för avstängning kring kulverten som antagits motsvara en punktavstängning på en lågt trafikerad gata i EBR-katalogen.

Skillnaden i kostnad för underhållsarbete för pumpbyte beror på att pumpen i det konventionella nätet är större. Informationen för kostnaderna kommer från Jönsson (muntligt, 2016) för infrakulverten och Svensson (muntligt, 2016) för konventionell förläggning. Kostnaderna avser inköp av pumparna och inte montage-arbete som inte kunnat identifieras under fallstudien. Arbetskostnaderna bör vara små i jämförelse med materialkostnaderna och därför anses inköpskostnaderna vara tillräckliga för att representera kostnaderna för utförandet av utbytet.

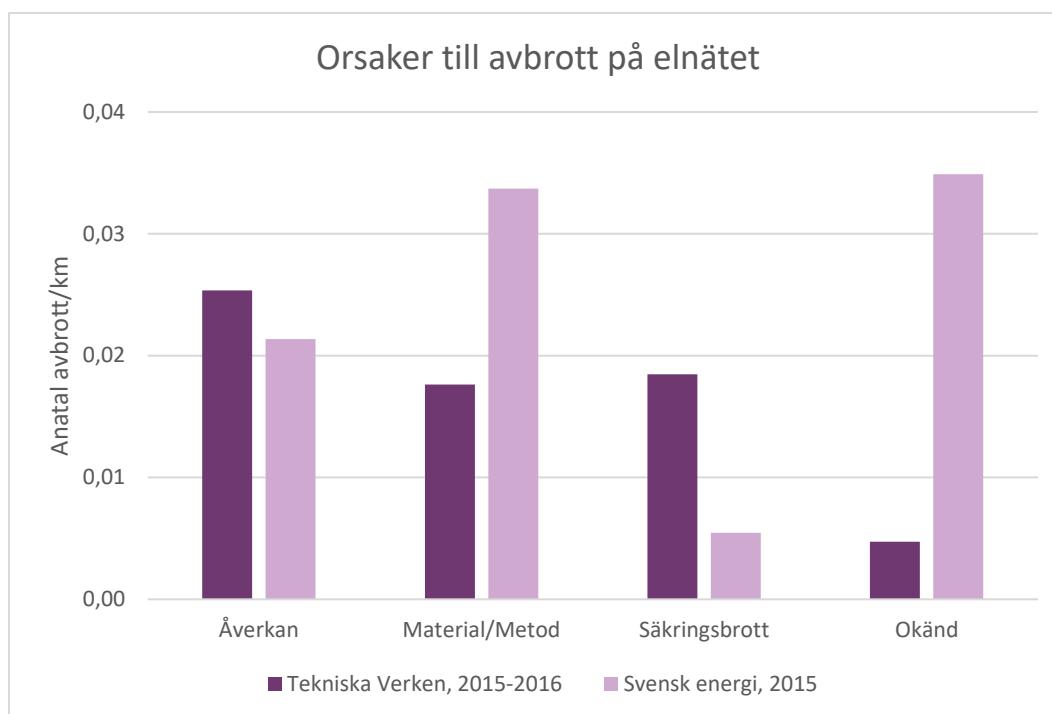
Vattenventilen är av samma typ som ventilerna som används i fjärrvärmesystemet och informationen kring livslängd och kostnader härstammar därför från Hammarström (muntligt, 2016) som är underhållsansvarig på fjärrvärmeavdelningen. Kostnaderna inkluderar arbete och material.

5.9.2 Underhållsfrekvens på el- och optonät

Elkablar har högst antal fel i början respektive slutet av livslängden. Orsaken bakom detta är att produktionsfel ofta ger utslag tidigt i användningsfasen och att en åldrad kabel löper större risk för fel än en fungerande, ostörd kabel. Fel kan uppkomma på olika delar av kabeln och har ofta olika anledningar. Skador på de yttre delarna av en kabel, manteln, kan få följd effekter där isoleringen påverkas vilket kan leda till fel. Fel som beror på kabelns ålder är ofta förknippade med att isoleringsmaterialet påverkas av väta vilket påverkar isoleringsegenskaperna så pass mycket att ledaren kommer i kontakt med omgivningen och leder till kabelfel. (Roxbergh, 2014)

Livslängden på moderna elkablar som förläggs i mark är enligt Svenska kraftnät cirka 35 år (Svenska kraftnät, 2016). Detta stöds också av flera studier som Roxbergh (2014) sammanfattat och konstaterar att moderna PEX-kablar bör hålla 40 år, trots att några av studierna visade på en betydligt kortare genomsnittlig livslängd på 22 år. Förnyelsetakten på elnätet i Linköping har inte kunnat identifieras och som tidigare nämnts inkluderas inte fullständiga förnyelser i fallstudien, trots att det i detta fall mycket väl skulle kunna ske. Hur mycket en förnyelse av elnätet påverkar livscykelkostnaderna undersöks därför i en känslighetsanalys i 8.5 *Inverkan av att inkludera förnyelse av elnät och sopsugssystem*.

Tekniska verken äger elnätet i Linköping vilket innebär att de måste föra statistik på hur många och hur långa avbrott de har för att ta ut rätt nätavgift från konsumenterna enligt energimarknadsinspektionens regelverk (Energimarknadsinspektionen, 2014). Totalt rapporterades 154 avbrott på Tekniska verkens markförlagda lågspänningsnät 2015 - oktober 2016 vilket ger en skadefrekvens på 0,07 avbrott/km och år. Som jämförelse har det i snitt varit 0,10 avbrott/km i den nationella statistiken för lågspänningsnätet de senaste tre åren (Svensk energi, 2016). I *Figur 47* visas fördelningen på de fyra vanligaste orsakerna till avbrott på elnätet enligt Tekniska verkens respektive Svensk energis statistik.



Figur 45: Orsaker till avbrott på elnätet i Tekniska verkens nät respektive Svensk energis statistik

De vanligaste orsakerna till avbrott, både nationellt och i den lokala statistiken, är åverkan och material-/metodfel som tillsammans stod för 65 % av alla avbrott i Tekniska verkens nät och för 58 % i den nationella statistiken. I den nationella statistiken är hela 36 % markerat som ”okänd”. Motsvarande siffra för Tekniska verken är endast 7 %. Resterande fel uppges bero på säkringsbrott. Orsaksidentifieringen bygger på bedömningar av montörer på plats vilket gör att olika avbrott kan tillskrivas olika kategorier, trots att de egentligen beror på samma orsak. Detta kan också vara en av förklaringarna till variationerna mellan nationell statistik och Tekniska verkens information, speciellt för kategorin ”okänd”.

Precis som för elkablar beror felen på en fiberkabel antingen på yttre omständigheter som åverkan eller produktionsfel eller inre fel som främst uppkommer i takt med ökad ålder och beroende på belastning som kabeln utsätts för (van Vickle, 2014). Enligt fibertillverkaren OFS (2011) kan fiberkablar mycket väl ha en livslängd på 50-60 år men konstaterar även att de första kablarna installerades för 40 år sedan och det finns därmed ingen statistik som stödjer detta. Vidare nämner de att livslängden på en kabel beror på tre komponenter: mekanisk pålitlighet, optisk pålitlighet och bandbreddspålitlighet. Den mekaniska pålitligheten beror främst på materialet som omger fibern, optisk pålitlighet beror på glaset i fibern och bandbreddspålitligheten beror på hur hastigheterna i systemet utvecklas. Av dessa tre delar är det den mekaniska pålitligheten som idag är lägst (OFS, 2011)

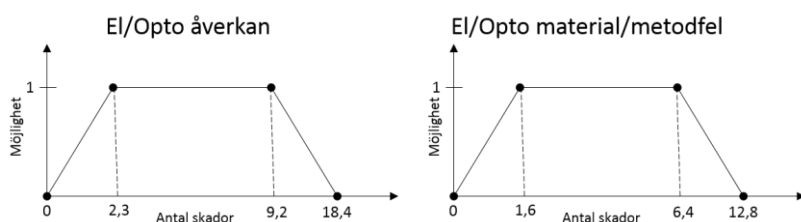
För optonätet har ingen underhållsdata erhållits, varken på lokal eller nationell nivå. Eftersom det finns tydliga likheter i förläggningsteknikerna och att de ligger tätt i gatan antas åverkan ha samma skadestatistik som elnätet. Även antal material/metodfel antas ha samma skadestatistik på grund av databrist.

5.9.2.1 Modellerad underhållsfrekvens och underhållskostnad på el- och optonätet

Eftersom Tekniska verkens statistik bygger på information kring deras eget nät är det detta som används vid modelleringen av underhållsfrekvensen. Dock är det endast information kring antalet

avbrott som går att urskilja och ingen information ges om åldersfördelningen för kablarna som går sönder. Då både variationen och informationen kring kablarnas åldersfördelning därmed är okänd är det enligt Feiz (2016) mindre relevant att försöka göra en exakt avbildning av sannolikheterna och därmed karakteriseras nätets åldersfördelning på samma vis som vattenledningarna.

Då det endast är matarnätet som inkluderas i fallstudien bortses fel på grund av säkringsbrott och det är således åverkan och material/metod som inkluderas i studien, med frekvens som i *Figur 45*. Antalet fel som sker i det system som studeras i fallstudien modelleras utifrån statistiken från Tekniska verken med möjlighetsfördelning enligt *Figur 46*. Observera att elkablarna går dubbelt i kulverten och att längden därför blir dubblerad jämfört med övriga nät. Osäkerhetsfaktorn är även för dessa system 2 då statistiken innefattar äldre kablar och förläggningstekniker, liksom vatten- och avlopp. Som kan ses modelleras både elnätet och optonätet med samma antal underhåll.



Figur 46: Modellerat antal underhåll för el och optonätet som sker i fallstudien, fördelat på åverkan och material- och montagefel

Då både åverkan och material/metodfel beror på förläggingsmiljön kan dessa underhållstyper få en lägre underhållsfrekvens i kulverten, om miljön skulle visa sig vara bättre för ledningarna.

Kostnaderna för att åtgärda dessa fel har identifierats utifrån kostnaderna i EBR-katalogen. *Tabell 7* redovisar de kostnader som inkluderas i fallstudien.

Tabell 7: Identifierade kostnader för att utföra underhållsarbete på el- och optonät i kulvert och vid konventionell förläggning

| | | IK | Konv. |
|------|----------------------|----------|----------|
| El | Åverkan | 10194 kr | 15713 kr |
| | Montage-/materialfel | 12130 kr | 25080 kr |
| Opto | Åverkan | 8745 kr | 14599 kr |
| | Montage-/materialfel | 9046 kr | 22954 kr |

För elnätet konsulterades Danielsson (muntligt, 2016) som bidrog med information kring vilka kostnadsposter i EBR-katalogens P2-nivå som borde ingå för att representera typiska fel som beror på åverkan eller montage-/materialfel. Enligt Danielsson kräver åverkan normalt ett mindre schakt och en mindre del kabel som byts ut än montage-/materialfel. Längden för de två felen sattes därför, i samråd med Danielsson, till 4 m för åverkan och 10 m för montage-/materialfel. Utöver materialkostnader inkluderades även kostnader för trafikavstängning, uppbyggnad och schakt för konventionell förläggning, kabelförläggning för båda teknikerna och slutligen återställning av mark och asfalt för konventionell förläggning.

EBR-katalogen innehåller endast kostnader för konventionell förläggning och behövdes därför anpassas för att stämma överens med kulvertens förutsättningar. Enligt montörer som utfört arbete i kulverten tar det tre gånger så lång tid att utföra vissa moment då mer arbete måste utföras med handkraft istället för maskiner. På grund av detta multiplicerades arbetskostnaden för kabelförläggning

i EBR-katalogen med en faktor 3 för infrakulverten. Skillnaderna mellan el och opto beror på skillnader i materialpris, i övrigt är samma arbetsmoment med avseende på kostnadskategori inkluderade för båda systemen.

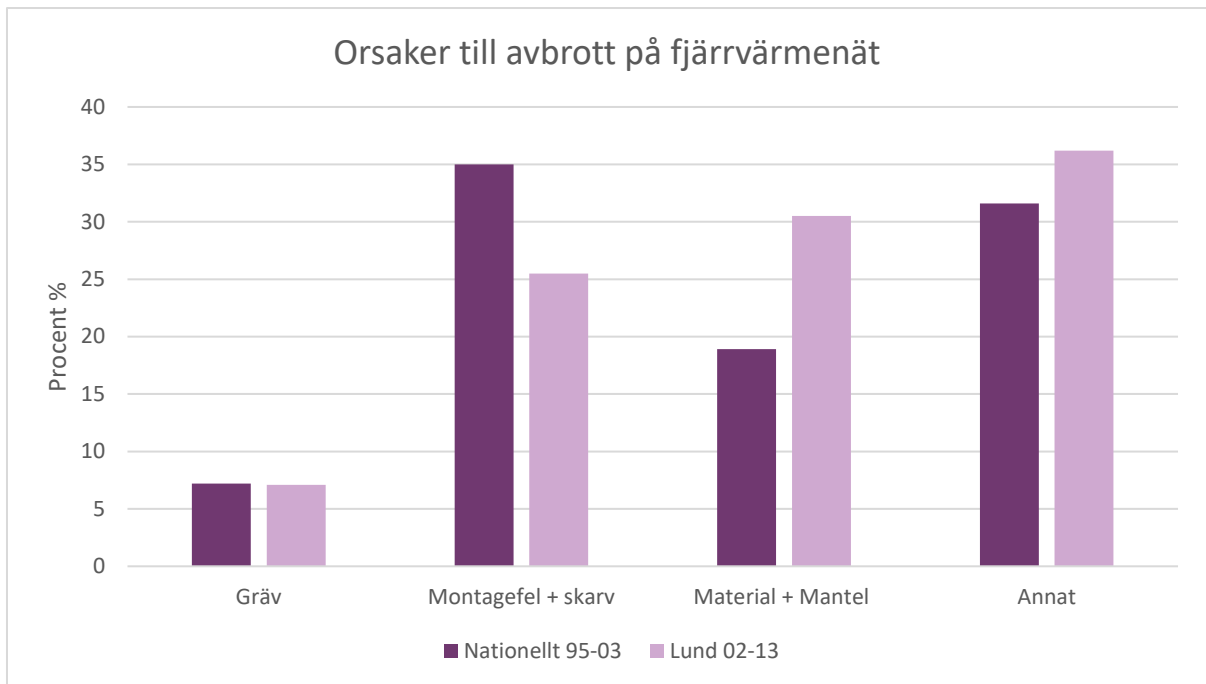
5.9.3 Underhållsfrekvens på fjärrvärmenätet

Livslängden för fjärrvärmerör begränsas till stor del på fukt och belastningsskador. Fukt som tränger in i isoleringen gör tillsammans med rörets höga temperatur att den utvändiga korrosionen på metalledningarna sker hastigt och enligt Hammarström (muntligt, 2016) tar det 5-7 år från dränkning av ledning till att läckage uppstår. Detta stöds även av Sund (2002) som konstaterar att korrosionshastigheten på fjärrvärmeledningar i stål kan vara upp till 0,5 mm/år, vilket betyder att en 5 mm tjock ledning går läck på 10 år. Andra faktorer som ytterligare påskyndar korrosion är intrång av vägsalt och andra föroreningar. De mest utsatta delarna på en ledning är skarvarna (Sund, 2002), dels för att de är mest utsatta för fuktintrång och dels för att de är ledningens svagaste del som påverkas mest av yttre belastningar. Enligt statistik från svensk fjärrvärme (2003) uppkommer nästan en femtedel av skadorna på skarvar.

Om ledningarna ligger i en tät miljö kan de ha en teknisk livslängd upp mot 80-100 år (Hammarström, muntligt 2016; Svensk fjärrvärme, 2016). Fjärrvärmeavdelningen på Tekniska verken uppger en förnyelsetakt av nätet på 160 år (Hammarström muntligt, 2016) vilket är längre än den tidsperiod som fallstudien omfattar. Hur stor del av nätet som eventuellt skulle behöva förnyas inom fallstudiens tidsperiod har inte kunnat fastställas och därför utesluts detta. Något som däremot ofta ger upphov till läckor och underhållsarbete är ventiler (Hammarström muntligt, 2016) som behöver smörjas och motioneras årligen. Om ventilerna inte underhålls och dessutom befinner sig i en fuktig miljö kan utbyte vara nödvändigt inom 10 år från installation, ibland redan efter 2 år (Hammarström muntligt, 2016). Baserat på erfarenheter förekommer dessutom produktionsfel oftare i ventiler än i övriga delar av fjärrvärmesystemet (Hammarström muntligt, 2016). Dock saknas det enligt Fjärrensyn (2016) pålitliga uppgifter kring hur ett fjärrvärmesystems komponenter åldras då det är många aspekter som spelar in i varför skador uppkommer.

Fjärrvärmeavdelningen på Tekniska verken saknar statistik för deras underhållsarbete senaste åren. Tidigare fanns det nationell statistik som Svensk fjärrvärme sammanställde men detta arbete upphörde 2003 för att återupptas 2015. Dock var responsen från företagen i denna undersökning sparsam och resulterade därför inte i någon sammanställning (Lummi, 2016). Äldre statistik samlades in 1995-2003.

Under 2014 gjordes ett examensarbete vid Högskolan i Halmstad på fjärrvärmenätet i Lund där fjärrvärmeleverantören fört statistik över avbrott som uppkommit mellan 2002-2013. I rapporten görs en jämförelse av orsaker till avbrott och hur stor andel av skadorna som beror på respektive orsak. Denna information har sammanställts i *Figur 47* där orsakerna sammanfattats i de fyra orsakskategorierna gräv, montage-/skarvfel, material-/mantelfel och annat (Andersson, 2014).



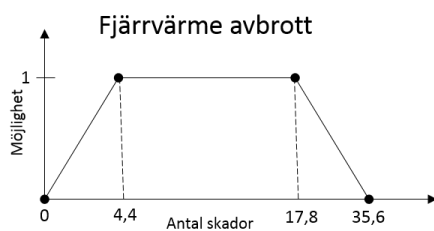
Figur 47: Orsaker till avbrott på fjärrvärmenätet från statistik på nationell nivå och från examensarbete i Lund (sammansatt från Andersson, 2014)

En svårighet med denna statistik är enligt Andersson (2014) att orsaken identifierats med en subjektiv bedömning som kan vara svår att utföra för montören på plats. Det ger däremot en grov uppfattning över vad som ger upphov till avbrott på fjärrvärmeledningar. Totalt rapporterades 0,056 skador/km fjärrvärmeledning i nationell statistik mellan 1995-2003 och 0,049 skador/km i Lund 2002-2013 (Andersson, 2014).

5.9.3.1 Modellerad underhållsfrekvens och underhållskostnad för fjärrvärme

För fjärrvärme saknas underhållsstatistik hos Tekniska verken och på nationell nivå finns endast äldre statistik tillgänglig. Med detta som bakgrund modelleras därför fjärrvärmeunderhållen utifrån statistiken från examensarbetet utfört i Lund 2014. Denna statistik säger inget om åldersfördelningen för de olika reparationsarbetena. De antas därför ha samma åldersfördelning som vattenledningarna. Precis som för el- och optonet är både variationen och informationen för fjärrvärmenätet osäker och därmed karakteriseras nätet på samma vis som vattenledningarna. När underhållen sker i tiden påverkar dessutom inte totalkostnaderna då alla kostnader räknas i nuvärde.

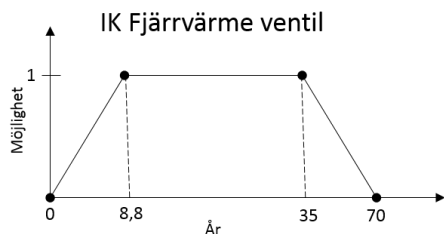
Medelvärde som modelleras i fallstudien är 0,049 skador/km och detta bedöms ha osäkerhetsfaktor 2 då det gäller för andra geologiska förutsättningar än i Linköping. Med den ledningslängd som fallstudien studerar resulterar detta i en möjlighetsfördelning enligt Figur 48:



Figur 48: Modellerat antal underhåll på fjärrvärmenätet i fallstudien

Dessvärre kunde ingen information kring vad olika typer av reparationer kostar identifieras och därför modelleras endast en typ av underhåll på fjärrvärmeledningarna. Detta underhåll representerar en läcka

som medför utbyte av en ”lite längre sträcka huvudstam” (Hammarström, 2017) (mer exakt information kring vilken längd det innebär har inte erhållits). Utöver ledningarna kan även ventiler ge upphov till underhåll. Då det är samma typ av ventil som används i fjärrvärmenätet som i vattensystemet modelleras de ha samma livslängd enligt fördelningen i *Figur 49*. Mediets temperatur kan påverka ventilens livslängd men i vilken utsträckning har inte kunnat fastställas.



Figur 49: Modellerad livslängd på de fjärrvärmeventiler som inkluderas i fallstudien

Miljön i kulverten kan komma att påverka båda typerna av underhåll som modelleras för fjärrvärme. Detta kan leda till en förlängd livslängd för ventilerna (förutsatt motionering och smörjning) och en lägre underhållsfrekvens på ledningarna.

Kostnaderna för att åtgärda dessa avbrott grundas på information från Hammarström (muntligt, 2016; 2017) och presenteras i *Tabell 8*.

Tabell 8: Kostnader för de underhållsarbeten på fjärrvärmenätet som identifierats i fallstudien för kulvert och vid konventionell förläggning

| | | IK | Konv. |
|------------|--------------------|----------|-----------|
| Fjärrvärme | Reparation avbrott | 8100 kr | 100000 kr |
| | Ventil | 21000 kr | |

I kostnaderna för reparationen ingår schakt, trafikavstängning, borttagning av isolering, utbyte av rör och återställning av mark och ytskikt för konventionell förläggning i stadsmiljö. För kulverten inkluderas borttagning av isolering, svetsarbete för att reparera röret och montering av ny isolering, därav de stora skillnaderna. Kostnaden för ventilutbyte i kulvert inkluderar material och arbete.

5.9.4 Underhållsfrekvens på sopsugssystem

De största riskerna med sopsug är att avfall ska fastna i röret vilket leder till stopp. Om detta inträffar kan systemet drivas baklänges för att få loss det som fastnat och om det inte hjälper får en sugbil åka till närmsta nedkast och suga upp det som fastnat. Livslängden på systemet är enligt tillverkare 50-60 år på rören och 15-20 år på de mekaniska komponenterna (ventiler, påstick, lagringsrör). Detta kan kortas beroende på om installationen sköts som den ska eller inte. (Ferm muntligt, 2016)

Sopsugssystemet i Vallastaden är det första i sitt slag som installeras i Sverige då det inte finns motsvarande kulvertlösning någon annanstans. Dessutom är de flesta stationära sopsugssystem installerade med stålrör istället för kompositrör vilket gör att det finns brist på tillförlitlig information kring vad som händer med rören på längre sikt, både för kulvertsystemet och för ett traditionellt system. Från tillverkarna anges en förväntad livslängd på de olika komponenterna i systemet. Som kan ses i *Tabell 9* varierar denna mellan 15 och 60 år.

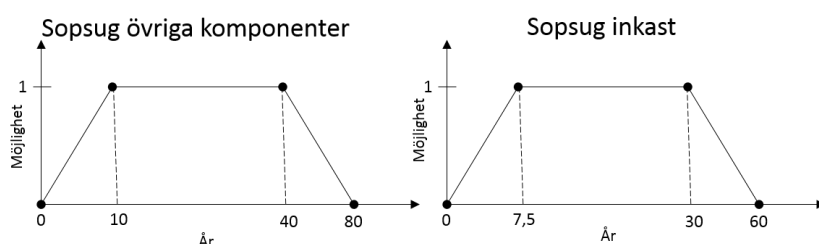
Tabell 9: Förväntade livslängder på komponenterna i sopsugssystemet (Johansson, J.E., 2016)

| Komponent | Livslängd |
|--------------------|-----------|
| Inkast | 15 år |
| Övriga komponenter | 20 år |
| Rörsystem | 60 år |

Utöver detta uppger Johansson, J.E. (2016) även att det finns ett årligt underhåll och tillsyn av nedkast som uppgår till 8h/nedkast och år.

5.9.4.1 Modellerad underhållsfrekvens och underhållskostnad på sopsugssystemet

Modelleringen av underhållsfrekvensen för sopsugssystemet skiljer sig från de övriga näten där någon typ av statistik ligger till grund för hur det modelleras. För sopsugen bygger underhållet istället enbart på den förväntade livslängden som därmed ger ett förväntat antal underhåll. Då statistik för avhjälpande underhåll saknas för rörsystemet utesluts detta ur fallstudien då enbart förnyelse inte anses representativt jämfört med övriga ledningsnät som bara inkluderar avhjälpande underhåll. Hur en eventuell förnyelse av detta system påverkar livscykelkostnaderna undersöks i känslighetsanalysen. För övriga komponenter används däremot livslängden för att spänna upp en möjlighetsfördelning över när utbyte sker på samma sätt som för ventiler och pumpar i övriga nät. Därmed fås både antal underhåll och när de sker baserat på den förväntade livslängden. Hur livslängden i systemet modelleras för övriga komponenter och inkast redovisas i *Figur 50*:



Figur 50: Modellerad livslängd för komponenterna i sopsugssystemet i fallstudien

Både sopsugens inkast och "övriga komponenter" bygger på information från liknande miljö som kulverten och därmed är det ingen skillnad mellan förläggning i kulvert och konventionellt. Det finns också ett årligt underhåll som omfattar 8h/nedkast och år (Johansson, J.E., 2016).

Kostnaderna för att utföra dessa underhåll, som presenteras i *Tabell 10*, är desamma för båda förläggningsteknikerna. Detta beror på att inkasten och de övriga komponenterna är monterade på samma sätt och i liknande miljö vid konventionell förläggning som i infrakulverten. Detta innebär även att det är samma arbetsprocesser som inkluderas för båda teknikerna. Kostnaden för det årliga underhållet grundas på det antal nedkast som inkluderas i fallstudien, d.v.s. 14 st.

Tabell 10: Kostnader för utbyte av komponenter i sopsugssystemet (Johansson J.E., 2016)

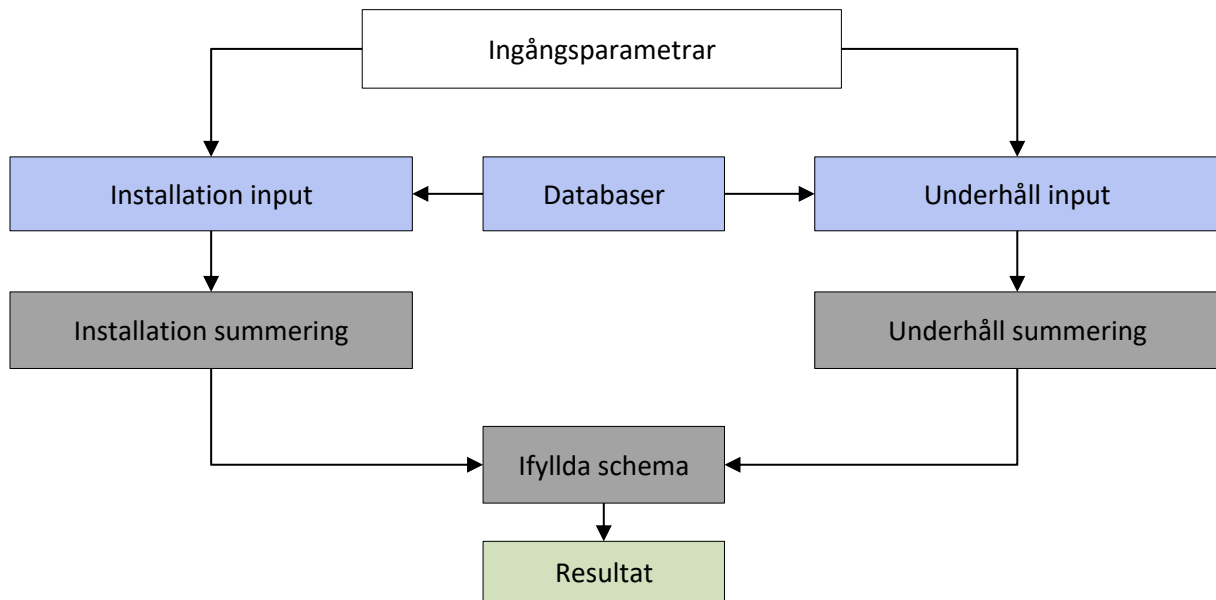
| | | IK | Konv. |
|--------|-------------------------|-----------|-----------|
| Sopsug | Byte inkast | 102000 kr | 102000 kr |
| | Byte övriga komponenter | 120000 kr | 120000 kr |
| | Årligt | 72800 kr | 72800 kr |

Kostnaderna baseras på uppgifter från leverantören av systemet via Johansson J.E., (2016) och står för både material och arbete som krävs. För det årliga underhållet är det tid och material som krävs för att utföra servicearbete av inkast och övriga komponenter som inkluderas.

6 Modell

I detta kapitel redovisas resultatet av modellutvecklingen.

Modellen är helt uppbyggd i excel. Simuleringarna av underhållet och resultathanteringen sker med hjälp av Bo Perssons program i Visual Basic. I *Figur 51* ses ett flödesschema som visar hur modellen fungerar i stort.



Figur 51: Flödesschema över modellen

Boxen högst upp i figuren innehåller blad där parametrar som berör simuleringen definieras. De boxar med ljusblå bakgrund är blad där olika typer av data för installation och underhåll förs in. Boxarna med grå bakgrund är blad där beräkningar och summeringar utförs för varje körning. Boxarna längst ner i *Figur 51* med ljusgrön bakgrund sparar data för varje körning och hanterar även resultatet i olika typer av diagram.

6.1 Ingångsparametrar

Ingångsparametrarna är uppbyggda av två blad: "start sida" och "manuell skruv". I startsidan förs en nätbeskrivning in med utgångspunkt i ett infrakulvertnät där antal fellehus, kulvertrör, kammare och serviser samt snittlängden på kulvertöret anges. Dessa data används för att bygga upp ett nät av infrakulverten och därefter bygger modellen ett matchande konventionellt nät utifrån faktorn "Förhållande längd Konv/IK". Även antal simuleringar och batcher väljs på startsidan och simuleringen startas från detta blad med knappen "simulate". *Figur 52* visar hur bladet ser ut.

| | | | |
|------|-----------|---------------|---------|
| Meny | Startsida | Manuell skruv | Diagram |
|------|-----------|---------------|---------|

Startsida

| Nätbeskrivning | |
|---------------------------|-------------|
| Antal serviser | 3 |
| Antal fellehus | 7 |
| Antal kammare | 76 |
| Antal kulvertrör | 83 |
| Snittlängd kulvertrör | 17 |
| Förhållande längd Konv/IK | 1 |
| | |
| Ledningslängd IK | 1783 |
| Ledningslängd Konv | 1783 |

Vad ska analyseras?

| | |
|---------------------|-----|
| Kostnad | Ja |
| Miljöpåverkan 1 | Nej |
| Miljöpåverkan 2 | Nej |
| Miljöpåverkan 3 | Nej |
| | |
| Infrakulvert | Ja |
| Konventionell förl. | Ja |

Simulering

| | |
|-----------------|-----|
| Antal batchar | 1 |
| Antal simulerin | 100 |

simulate

Figur 52: Startsidans utseende

I bladet ”manuell skruv” kan kostnader och miljöpåverkan för installation och underhåll ökas eller minskas (relativt grunddata). Kostnaderna och miljöpåverkan är uppdelade mellan material, arbete och maskinanvändning och det finns faktorer som kan öka eller minska dessa delar separat men även faktorer som ändrar totalkostnaden och totalpåverkan för varje process. I *Figur 53* visas ett exempel på hur kostnaden och miljöpåverkan för installation av infrakulvert kan ändras i bladen. Kostnaden och miljöpåverkan för olika typer av underhåll har samma uppbyggnad.

| Installation | | | | | | | | |
|--------------|-------------|----------------|------------|------------|------------|------------|--------------|------------|
| IK | Transport 1 | Installation 1 | Avlopp 2 | Vatten 1 | El 0,8 | Opto 1 | Fjärrvärme 1 | Sopsug 1 |
| | Material 1 | Material 1 | Material 1 | Material 1 | Material 1 | Material 1 | Material 1 | Material 1 |
| | Arbete 1 | Arbete 1 | Arbete 1 | Arbete 1 | Arbete 1 | Arbete 1 | Arbete 1 | Arbete 1 |
| | Maskin 1 | Maskin 1 | Maskin 1 | Maskin 1 | Maskin 1 | Maskin 1 | Maskin 1 | Maskin 1 |

Figur 53: Exempel på de ”manuella skruvarna” som användaren kan ändra. Avloppets installationskostnad har dubblerats och elnätets installationskostnad minskats med 20 %

Antal underhåll är som beskrivits i 5.9 *Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser* uppbyggt av ett värde som även det kan ändras med hjälp av faktorer. Faktorerna som kan ändras bygger upp en möjlighetsfördelning som sedan simuleras för varje körning. I *Figur 54* ses ett exempel på en typ av underhåll (infällning) och vilka faktorer som kan ändras.

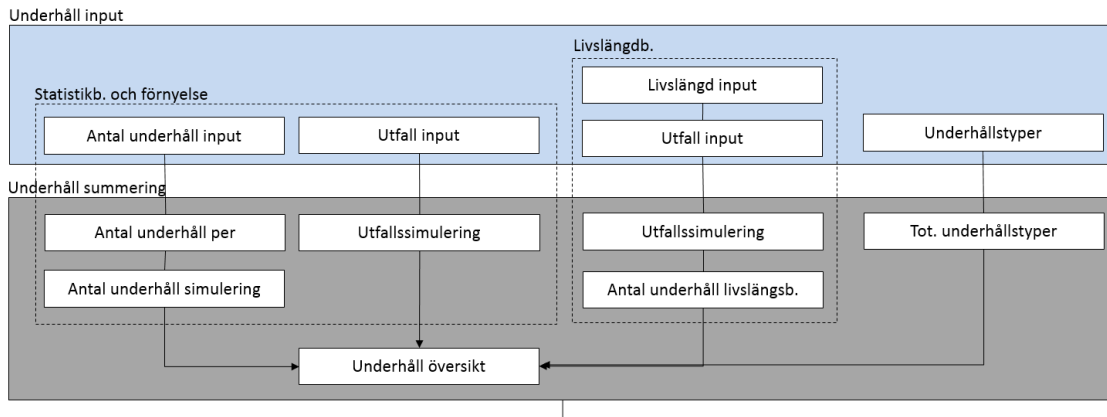
| 2 Infällning | |
|----------------|-----|
| Medelvärde | 0,2 |
| Maxantal | 1 |
| Osäkerhetsnivå | 10 |

Figur 54: Exempel på faktorer som kan ändras för antal underhåll

De ovan beskrivna faktorerna i ”manuell skruv” är ett bra hjälpmedel då känslighetsanalyser ska genomföras. Vad de olika faktorerna påverkar beskrivs med *Figur 55*:

6.3 Underhåll

För att hantera underhåll i modellen krävs flera delar. Det finns tre olika huvudtyper av underhåll: underhåll baserat på statistik, underhåll baserat på livslängd och årligt underhåll. Under rubriken 5.9 *Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser* beskrivs de olika typer av underhåll som används mer i detalj. För att simulera underhållet krävs således lite olika hantering för de olika underhållstyperna. På grund av den ökade komplexitet jämfört med installationen så beskrivs underhållet på en högre detaljnivå. *Figur 57* visar en mer detaljerad bild på hur underhållet hanteras i modellen:



Figur 57: Detaljerad flödesschema över hur modellen hanterar underhåll

6.3.1 Underhåll, kostnader och miljöpåverkan

I bladet ”Underhållstyper”, längst ut till höger i den ljusblå boxen, förs mängd material, arbete och maskinanvändning in för de olika typerna av underhåll som identifierats. Här finns en skillnad mellan underhållstyperna: statistikbaserat underhåll är uppdelat per lagningssätt och beror inte på hur stort ledningsnät som valts i ”startsidan”. Livslängsbaserat underhåll och förnyelse behöver däremot vara matchade med hur många komponenter det analyserade nätet har eller hur långt nätet är. I bladet ”Tot. Underhållstyper” samlas sedan kostnaden och miljöpåverkan för de olika underhållen. Detta för ge en överblick och för att lättare kunna hantera data i nästa steg.

6.3.1.1 Statistikbaserat underhåll

För att simulera det statistikbaserade underhållet används bladet ”Antal underhåll input”. Här förs ett statistiskt värde in för hur många underhåll som sker på 100 år per meter och underhållstyp in. Att antalet förs in med den enheten grundar sig i användarens valmöjligheter att bygga ett specifikt nät i startsidan. Antalet underhåll måste givetvis simuleras och för att göra det spänner modellen upp en trapetsfördelning i bladet ”Antal underhåll per”. Antal underhåll i detta blad är fortfarande per meter och det är först i nästa blad, ”Antal underhåll simulering”, värdena skalas upp till nätets storlek. I detta blad sker också simuleringen med hjälp av Bo Perssons program. I *Figur 58* visas ett exempel på hur simuleringen ser ut. Under rubriken ”distr.” väljs vilken typ av fördelning användaren har valt att använda. ”BoRoozbeh dist.” är benämningen på trapetsfördelningen som används genomgående genom hela modellen. Det finns möjlighet att använda andra typer av sannolikhetsfördelningar om så önskas.

| | | MC_INP_DIST | | | | | | | |
|--|------------|-----------------|-------------|----------------|---------------|-------------|-------------|------|-------------|
| | 2 | Skador (heltal) | Skador | sim value ref. | distr. | normal min | normal max | min. | max. |
| | Infällning | 0 | 0,178210521 | 0,178210521 | BoRoozbeh dis | 0,012523046 | 1,252304574 | 0 | 1,252304574 |

Figur 58: Exempel på hur bladet ”antal underhåll simulering” ser ut

Parallellt med hanteringen av antal underhåll hanterar modellen även data för när i livscykeln underhållet sker. För denna typ av underhåll infogas fyra värden som ska bygga upp trapetsfördelningen. I *Figur 59* ses ett exempel hur bladet är uppbyggt.

| Avlopp | | | | normal min | normal max | min. | max. |
|--------|--|--|--|------------|------------|------|------|
| 1 | | | | 30 | 50 | 0 | 100 |

Figur 59: Exempel på hur en åldersfördelning förs in i modellen

Utifrån dessa fyra värden byggs en trapetsfördelning upp i enlighet med Feiz (2016).

När utfallsdata, som representeras av angiven åldersfördelning, är infogat sker simuleringen i bladet ”Utfallssimulering”. Simuleringen är uppbyggd på samma sätt som för antalet underhåll men här simuleras 30 olika underhållsår fram, vilket är maximalt antal statistikbaserade underhållen modellen klarar av. Orsaken till att det är 30 år att det är tillräckligt för att använda modellen på ett nät som är i samma storleksordning som det som studeras i fallstudien. I *Figur 60* har simuleringen för 30 underhållsår gjorts men det är bara de tre första simuleringarna som skrivs in under rubriken ”År(heltal)”. Detta beror på att modellen i bladet ”antal underhåll simulering” fick fram att det endast ska ske tre underhåll av just den typen. Modellen sköter alla underhåll som är baserade på statistik på detta sätt.

Tre underhåll av denna typ ska ske enligt simuleringen av antal underhåll. Således skrivs inte året för det fjärde underhållet ut

| | 3 | År (heltal) | År | sim value ref. | MC_INP_DIST distr. | normal min | normal max | min. | max. |
|--|----|-------------|-------------|----------------|-----------------------|------------|------------|------|------|
| | 1 | 25 | 24,9187292 | 24,9187292 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 2 | 55 | 54,73261483 | 54,73261483 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 3 | 15 | 15,4638511 | 15,4638511 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 4 | | 58,59561027 | 58,59561027 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 5 | | 28,64997786 | 28,64997786 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 6 | | 78,72605159 | 78,72605159 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 7 | | 26,62696347 | 26,62696347 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 8 | | 31,76899161 | 31,76899161 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 9 | | 28,41511427 | 28,41511427 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 10 | | 15,190118 | 15,190118 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 11 | | 57,48115827 | 57,48115827 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 12 | | 23,46158409 | 23,46158409 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 13 | | 10,79480807 | 10,79480807 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 14 | | 67,86093072 | 67,86093072 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |
| | 15 | | 45,67499682 | 45,67499682 | BoRoozbeh dis | 30 | 50 | 0 | 100 |

Figur 60: Exempel på "utfallssimulering"

När de två delarna, antal och utfall, av statistikbaserat underhåll är ifyllda och simulerade fylls bladet ”Underhåll översikt” i. Där förs kolumnen ”År(heltal)” från utfallssimuleringen in och kopplas ihop med underhållsdata för kostnader och miljöpåverkan för varje underhåll i bladet ”Tot. Underhållstyper”.

6.3.1.2 Livslängdsbaserade underhåll

Livslängdsbaserade underhåll hanteras annorlunda jämfört med statistikbaserat underhåll. Vid simulering av denna typ av underhåll förs inte antal underhåll in utan ett värde för hur lång livslängd en typ av komponent i systemet har. Dessa data förs in i bladet ”Livslängd input” och detta värde spänns, med hjälp av faktorerna i ”manuell skruv”, upp i bladet ”Utfall input”. Data i ”utfall input” förs på samma sätt som för statistikbaserat underhåll in i ”utfallssimulering” där det, som ovan, sker 30 simuleringar för varje underhållsprocess. Den stora skillnaden mellan livslängdsbaserade underhåll och underhåll baserat på statistik är att antalet livslängdbaserade underhåll beräknas fram istället för att bygga på statistik. Detta gör modellen i bladet ”antal underhåll livslängdb.” där åren från ”utfallssimulering” förs in och ackumuleras upp till då de överstiger 100. När de ackumulerade åren överstiger 100 börjar ackumuleringen om för nästa komponent och antalet underhåll per komponent har därmed beräknats. I *Tabell 11* visas ett exempel på hur detta sker.

Tabell 11: Exempel på livslängdsbaserat underhåll

| Input från "utfallsimulering" | Akkumulerade år | Nummer på komponent |
|-------------------------------|-----------------|---------------------|
| 11 | 11 | 1 |
| 9 | 20 | 1 |
| 15 | 35 | 1 |
| 5 | 40 | 1 |
| 10 | 50 | 1 |
| 9 | 59 | 1 |
| 9 | 68 | 1 |
| 13 | 81 | 1 |
| 8 | 89 | 1 |
| 16 | 16 | 2 |
| 15 | 31 | 2 |
| 1 | 32 | 2 |
| 13 | 45 | 2 |
| 12 | 57 | 2 |
| 10 | 67 | 2 |
| 12 | 79 | 2 |
| 6 | 85 | 2 |
| 14 | 99 | 2 |
| 10 | 10 | 3 |
| 16 | 26 | 3 |
| 0 | 26 | 3 |
| 5 | 31 | 3 |
| 15 | 46 | 3 |
| 12 | 58 | 3 |
| 13 | 71 | 3 |
| 7 | 78 | 3 |
| 7 | 85 | 3 |
| 1 | 86 | 3 |
| 8 | 94 | 3 |
| 15 | 15 | 4 |

Då användaren kan bygga nätet i startsidan är risken att antalet komponenter blir stort. För att hantera det sker en hopklumpning av komponenter. Om *Tabell 11* granskas och det exempelvis finns 9 komponenter missar modellen att ta med alla underhåll för komponent 4 och uppåt. Därför sker en hopklumpning där varje komponent listad i tabellen ovan motsvarar tre hopklumpade komponenter. Därmed fås underhållet för samtliga 9 komponenter fram genom komponenterna med nummer 1, 2 och 3 i tabellen. Detta innebär i förlängningen att kostnaden och miljöpåverkan, för varje underhåll av denna typ, måste multipliceras med tre i exemplet ovan.

6.3.1.3 Årligt underhåll

De årliga underhåll som sker under infrastrukturens livstid hanteras på ett eget sätt i modellen. Eftersom det sker varje år behövs ingen simulering för utfall eller antal som i de andra typerna av underhåll och istället förs ettor in på alla år i "schemat". En detaljerad förklaring vad som sker i "Schemat" ges nedan under rubriken "Ifyllda scheman" men *Figur 61* ger en bild av hur det ser ut i modellen. Kostnaden för denna typ av underhåll förs in på samma sätt i bladet "Underhållstyper".

Material miljöpåverkan

| Material | Enhet | Miljöpåverkan 1 | Miljöpåverkan 2 | Miljöpåverkan 3 |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Stål | kg | 1000 | 1000 | 1000 |
| PE | kg | 10000 | 10000 | 1000 |

Figur 64: Exempel på databas för miljöpåverkan

6.4.2 Arbete

Databasen för arbete ser ut som *Figur 65*:

| Arbete databas | | | | |
|----------------|--------|------|-------|--|
| Typ | Område | Pris | Enhet | |
| Rundsvets 100 | Vatten | 218 | st | |
| Rundsvets 160 | Avlopp | 290 | st | |
| Rundsvets 200 | VA | 365 | h | |

Figur 65: Exempelbild för arbetsdatabasen

Rubrikerna fylls i på samma vis som för material. Skillnaden är att arbetet inte antas ge något upphov till miljöpåverkan.

6.4.3 Maskin användning

Databasen för maskin användning ser ut som *Figur 66*.

| Maskin användning | | | | | |
|-------------------------------|-------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Typ | Enhet | a'pris | Miljöpåverkan 1 | Miljöpåverkan 2 | Miljöpåverkan 3 |
| Kabelschaktmaskin Huddig | | 650 | 100 | 100 | 100 |
| Hjulburen grävmaskin Volvo EW | | 614 | | | |

Figur 66: Exempel på maskindatabasen

Detta blad hanterar miljöpåverkan på ett annorlunda sätt jämfört med materialdatabasen. Här förs miljödata in direkt. Denna skillnad grundar sig i svårigheten med olika typer av maskin användning vilket gör det svårt att föra in miljöpåverkan på gemensam bas som tidigare.

6.4.4 Diskontering

Modellens LCC-del är i grunden uppbyggd på nuvärdeskostnader. Det finns en funktion där användaren kan föra in sin prognos för hur kostnaderna kommer ändras över tid. Denna del är även här uppdelade mellan material, energi och maskin användning. När analyser av nuvärdeskostnaden görs är tabellen fylld med enbart ettor.

6.5 Ifyllda scheman

All data för både installation och underhåll finns nu att tillgå. Vid en körning av modellen hämtas dessa data in till flera olika "scheman". Först finns ett blad som för in det antal processer som sker varje år. Det kan se ut som i *Figur 67*.

| År | Installation | | | | | | | Avlopp | | | | | | | Vatten | | | | | | | |
|----|--------------|---------|--------|--------|----|------|------------|--------|---|---|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|---|--|
| | Transport | Kulvert | Avlopp | Vatten | EI | Opto | Fjärrvärme | Sopsug | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figur 67: Exempelbild på schema

Det finns även blad för kostnad och varje miljöpåverkanskategori. Varje blad innehåller två scheman, ett för konventionell förläggning och ett för kulverten, och det är här kostnaden eller miljöpåverkan förs in från ”installation summering” och ”Underhåll översikt”. Modellen fungerar på samma sätt för miljöpåverkan. Övre vänstra delen av kostnadsschemat för infrakulverten kan se ut som i *Figur 68*.

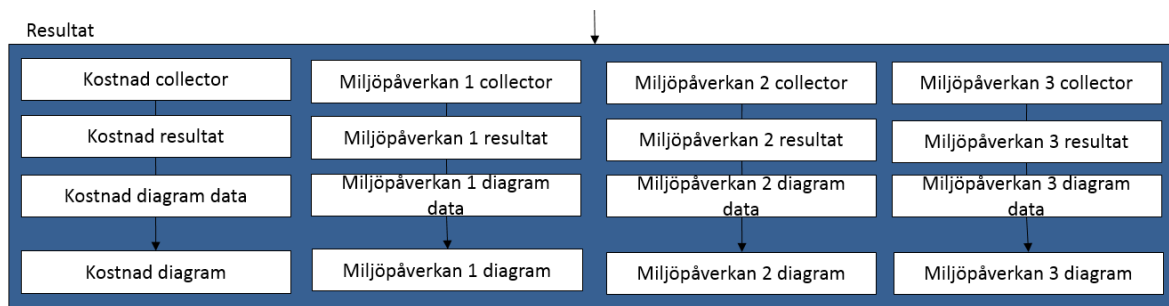
| År | Installation | | | | | | | Avlopp | | | | | | | Vatten | | | | | | | |
|----|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|---|---|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|--|--|--|
| | Transport | Kulvert | Avlopp | Vatten | EI | Opto | Fjärrvärme | Sopsug | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| 0 | 23395766 | 5231073,2 | 1703247,5 | 168689,97 | 67452,653 | 1544240,7 | 3594800 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figur 68: Exempelbild på kostnadsschema

Som ses förs kostnaderna för installation och underhåll in i *Figur 68* på motsvarande år som det sker i *Figur 67*.

6.6 Resultat

De ovan ifyllda scheman visar på resultatet för en körning av modellen. För att spara flera olika körningar används Bo Perssons kollektorer som programmerats i Visual Basics. Därefter hanteras resultatet från kollektorerna och presenteras i relevanta diagram. Det är viktigt att notera att värdena i diagrammet nedan inte är relevanta utan syftet med bilden är att visa hur denna typ av diagram ser ut. *Figur 69* ger en detaljerad bild på hur resultathanteringen fungerar i modellen.



Figur 69: Resultathantering i modellen

6.6.1 Kollektorer

Kollektorerna ger ett medelvärde av de körningarna som gjorts och även standardavvikelsen för körningarna. Det som modellen sparar är: kostnads- och miljöpåverkansscheman, ackumulerad kostnad och miljöpåverkan för varje år och antalet underhåll av varje underhållsprocess. Figur 70 ger ett exempel på hur kollektorn fungerar då den ackumulerade kostanden hanteras:

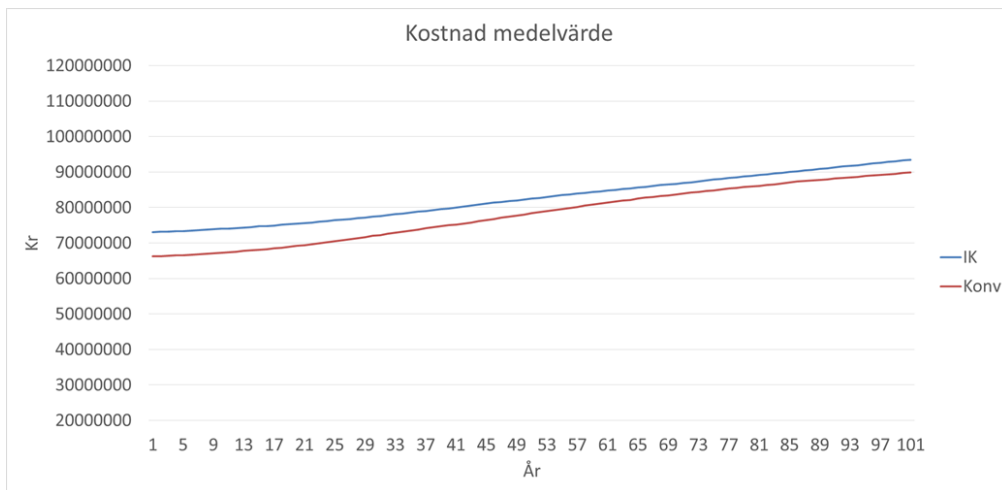
| | LN | LO | LP | LQ | LR | LS | LT |
|----|-------------|------------|---------|----|------------|--------------|--------------|
| | MC_RES_STDV | IK | | | | | |
| | result | mean | stdv | | mean | mean - 1stdv | mean + 1stdv |
| 0 | 35705270 | 35 705 270 | 0 | | 35 705 270 | 35 705 270 | 35 705 270 |
| 1 | 35758350 | 35 758 350 | 0 | | 35 758 350 | 35 758 350 | 35 758 350 |
| 2 | 35811430 | 35 843 640 | 89 769 | | 35 843 640 | 35 753 871 | 35 933 409 |
| 3 | 35864510 | 35 902 593 | 89 390 | | 35 902 593 | 35 813 203 | 35 991 982 |
| 4 | 35917590 | 35 991 590 | 115 126 | | 35 991 590 | 35 876 464 | 36 106 716 |
| 5 | 35970670 | 36 157 128 | 172 123 | | 36 157 128 | 35 985 005 | 36 329 251 |
| 6 | 36023750 | 36 210 208 | 172 123 | | 36 210 208 | 36 038 085 | 36 382 331 |
| 7 | 36076830 | 36 358 741 | 239 907 | | 36 358 741 | 36 118 834 | 36 598 648 |
| 8 | 36129910 | 36 444 603 | 229 597 | | 36 444 603 | 36 215 006 | 36 674 201 |
| 9 | 36530810 | 36 564 675 | 258 286 | | 36 564 675 | 36 306 389 | 36 822 961 |
| 10 | 36885114 | 36 835 179 | 304 553 | | 36 835 179 | 36 530 627 | 37 139 732 |
| 11 | 36938194 | 36 954 377 | 302 376 | | 36 954 377 | 36 652 000 | 37 256 753 |
| 12 | 37501274 | 37 088 579 | 368 115 | | 37 088 579 | 36 720 464 | 37 456 694 |

Figur 70: Exempel på resultatkollektor

Under rubriken ”result” hämtas värden från varje simulering in. Under ”mean” visas medelvärdet för alla simuleringar som körts och under ”stdv” visas standardavvikelsen för körningarna. Alla kollektorer som används i modellen har samma utformning som *Figur 70*. Resultatet formateras i bladet ”resultat” för en enklare hantering och lättare översikt över resultaten.

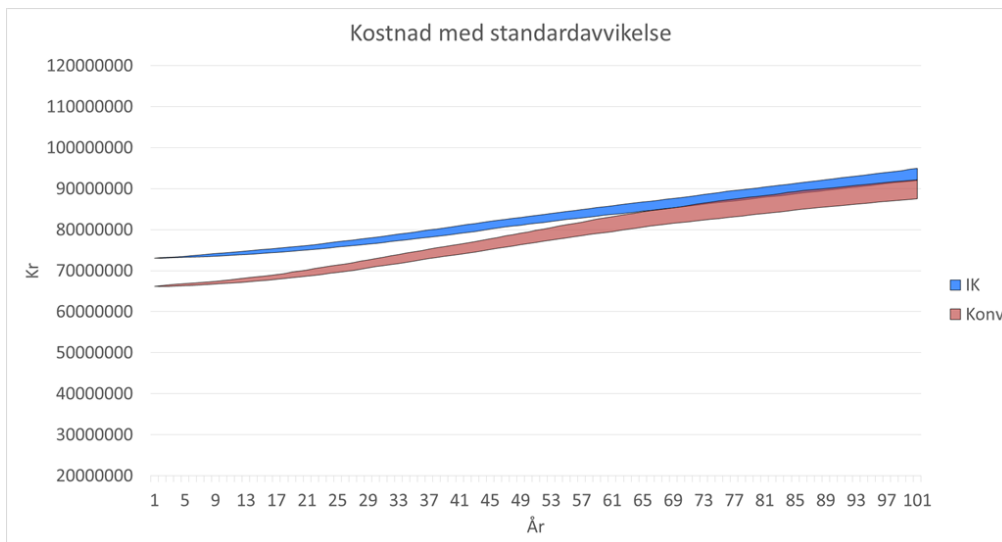
6.6.2 Diagram

För att visa resultatet av simuleringen som gjorts tillverkar modellen flera olika diagram och tabeller. Medelvärdet från simuleringarna, där ackumulerad kostnad eller miljöpåverkan visas, kan ses i *Figur 71*.



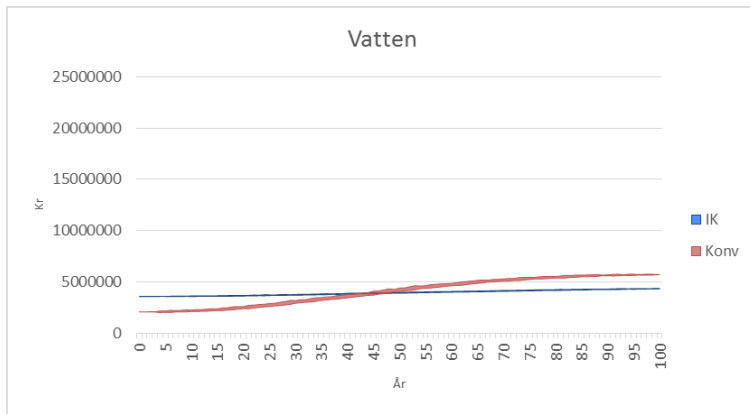
Figur 71: Exempel på medelvärdesresultat från modellen

Via kollektorerna ges även standardavvikelsen för resultatet. För att användaren ska få en känsla för hur spridning av resultatet ser ut visar modellen på figurer där resultatet plus och minus standardavvikelsen presenteras. I *Figur 72* visas ett exempel hur detta diagram ser ut.



Figur 72: Exempel på hur standardavvikelsen på medelvärdet från simuleringarna hanteras i modellen.

Det finns även diagram som visar på hur varje typ av infrastruktur förhåller sig över tiden. *Figur 73* visar ett exempel och även här är värdena i diagrammet inte relevanta.



Figur 73: Exempel på diagram för enskilda ledningsnät

Ett av målen med modellen är att kunna analysera infrastrukturen i detalj. Resultatet från kollektorerna kan se ut som i *Figur 74* där de röda rutorna indikerar stor kostnad eller miljöpåverkan och de gröna liten kostnad eller miljöpåverkan.

| | Konv | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|---|---|--------|---|---|----|---|---|------|---|---|----|---|--------|---|---|
| | Avlopp | | | Vatten | | | EI | | | Opto | | | FV | | Sopsug | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 | 3 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 42 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 52 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 54 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 56 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 61 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 62 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 63 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 66 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 67 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 69 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 71 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 74 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 77 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 78 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 81 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 83 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 84 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 85 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 89 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 91 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 92 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 93 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 94 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 95 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 98 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 99 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figur 74: Exempel på hur resultatet presenteras i ett "underhållschema" för konventionell förläggning

De ovan visade diagrammen är bara förslag på vad som kan vara intressant för användaren att analysera. Användaren har dock möjlighet att på egen hand analysera resultatet med ytterligare diagram men tillverkningen av dessa görs manuellt.

7 Resultat från modellen

I detta avsnitt presenteras resultat för två scenarier där Scenario 1 representerar ett scenario med grunddata som presenterats i kapitel 5 *Resultat av inventeringsanalys*. Grunddata som samlades in under livscykelinventeringen står för ett scenario där kulverten jämförs med konventionell förläggning under ”normala” omständigheter. Detta används för att visa på hur denna data skiljer sig mellan de olika förläggningsteknikerna och vilka extrakostnader infrakulverten innebär. Dessa skillnader är viktiga att vara medveten om för att förhålla sig till resultatet från Scenario 2.

Scenario 2 används för att visa på vad modellen kan göra och användas till genom att förändra insamlad grunddata och undersöka livscykelkostnader vid modifierade förutsättningar. Anledningen till att det är dessa två scenarier som presenteras är att det första representerar infrakulverten jämfört med en ”normal” förläggning. Det andra scenariot kan ses som representativt för möjliga kostnader en konventionell förläggning inneburit på det område kulverten anlagts och visar på hur modellen kan användas för att undersöka andra resultat utan att behöva ändra bakomliggande data.

Till detta scenario modifieras indata till modellen via de ”manuella skruvar” som beskrivs i kapitel 6.1 *Ingångsparametrar*. De förhållanden som antas råda för detta scenario är hög grundvattennivå och tät bebyggelse, vilket antas kräva dubbelspont som ökar både installationskostnader och underhållskostnader. För att efterlikna dessa omständigheter höjs schaktkostnaden för den konventionella förläggningen i Scenario 2 med en faktor 5 jämfört med Scenario 1.

Underhållskostnaderna vid konventionell förläggning dubblas jämfört med Scenario 1 till följd av dubbelsponton (dock inte för nedkast och komponenter i sopsugssystemet då de inte påverkas av sponton (Johansson, J.E., 2016)).

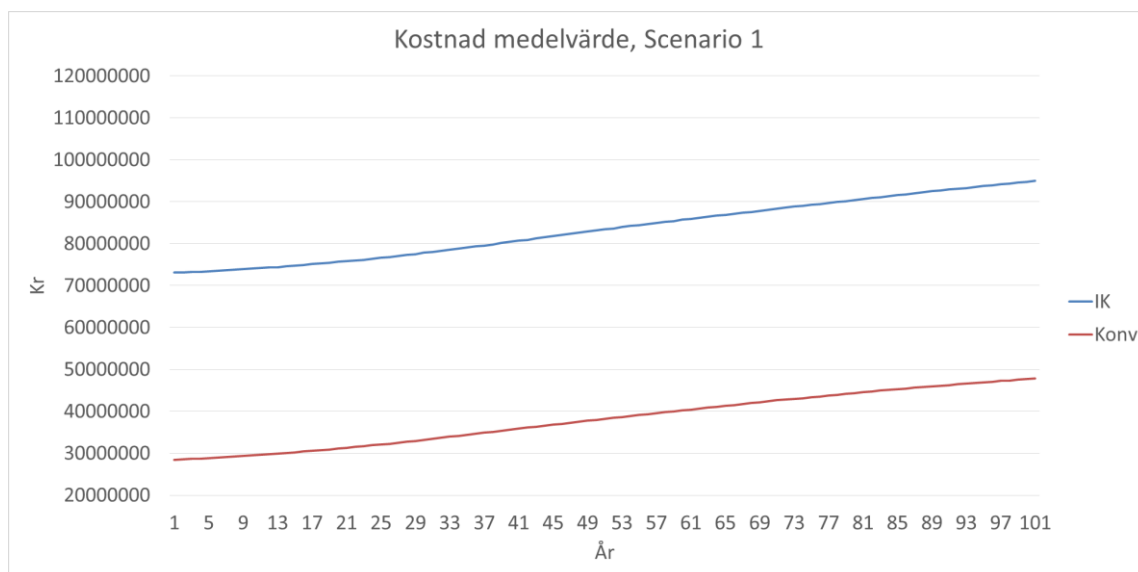
Under de intervjuer som genomförts under arbetet har dessutom en genomgående uppfattning hos personalen på de olika ledningsnäten varit att ledningarna bör hålla bättre i kulverten. Antalet underhåll vid förläggning i infrakulvert halveras därför för de statistikbaserade underhåll som förväntas hålla bättre i kulvertmiljö. De komponenter vars underhåll beror på livslängd får därför en dubblad livslängd. Detta gäller inte för komponenter vars underhåll bygger på information från liknande miljöer eller liknande förläggningsteknik, d.v.s. backventiler, pumpbyte i avloppssystemet, inkast för sopsug och övriga komponenter i sopsugssystemet.

De avgränsningar som gäller för fallstudien och modellen innebär att antalet potentiella fördelar med kulvert-tekniken som kan undersökas begränsas. Av de fördelar som beskrivs i avsnitt 2.2.1 *Skillnader mellan konventionell förläggning och infrakulvert* är det endast de kopplade till direkta kostnader för Tekniska verken som kan beräknas i nuläget. Eventuella nyttor från återvinning, ökad byggbar yta eller samhällsekonomiska aspekter samt förnyelse undersöks alltså inte vilket är viktigt att ha i åtanke då resultaten i detta kapitel studeras.

Data och inställningar för simuleringarna är de som beskrivits i kapitel 5 *Resultat av inventeringsanalys* och 6 *Modell* och det är av stor vikt att vara införstådd med innehållet där för att ta del av resultatet nedan. Simuleringsstorleken för samtliga resultat är 100 vilket innebär att 100 körningar av modellen sparas i kollektorerna.

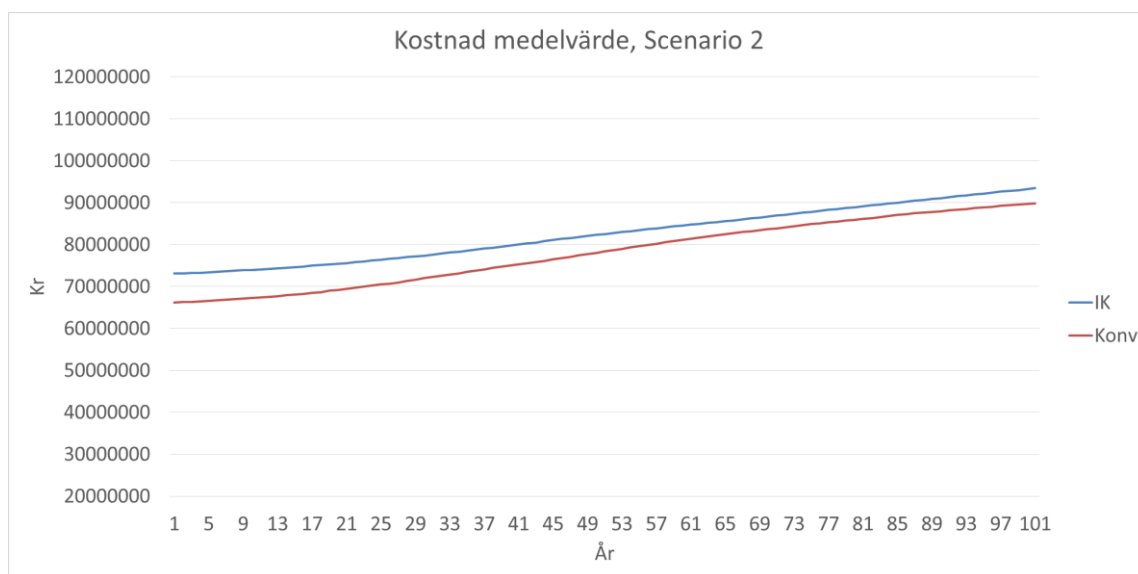
7.1 Resultat för Scenario 1 och Scenario 2 i fallstudien

När modellen används kan flera olika typer av resultat erhållas. *Figur 75* visar hur medelvärdet för livscykelkostnaderna kan presenteras för att få en förståelse över kostnadernas utveckling över tid. Som det tydligt framgår i *Figur 75* har kulverten en klart högre livscykelkostnad än konventionell förläggning vid Scenario 1. En stor anledning till detta är den höga installationskostnaden för infrakulverten. Detta förklaras av att den konventionella förläggningen i detta scenario förläggs under bättre omständigheter än kulverten.



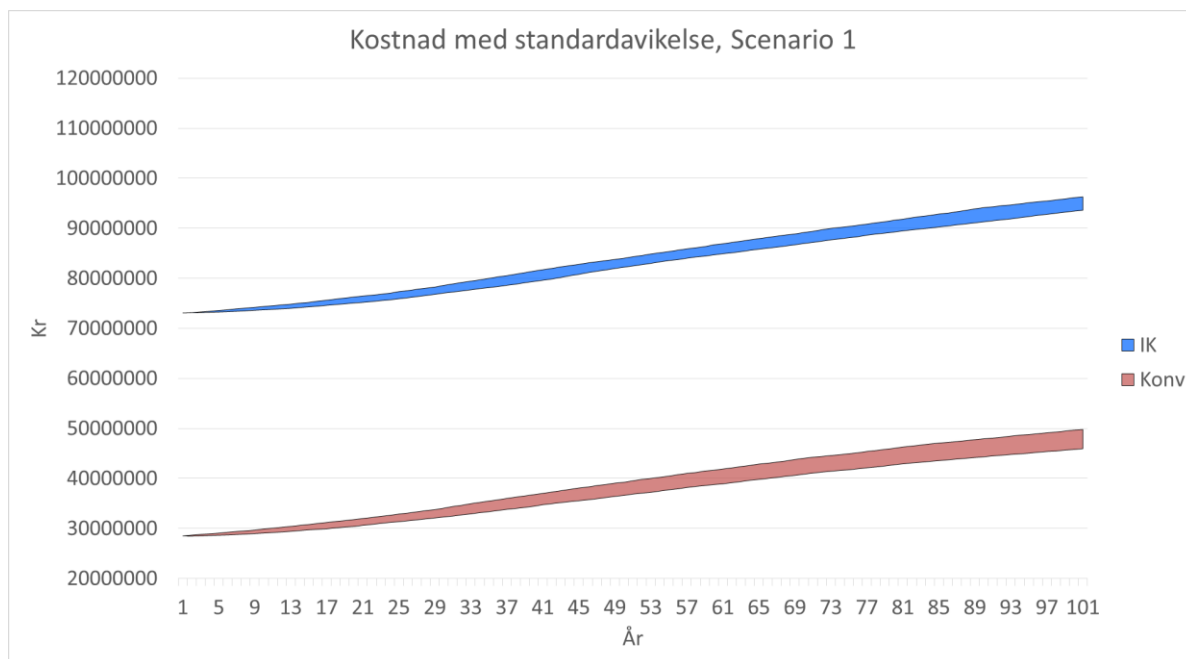
Figur 75: Exempel på hur modellen kan redovisa förväntat medelvärde och utveckling av livscykelkostnaderna utifrån Scenario 1 i fallstudien

I Figur 76 visas medelvärdet av livscykelkostnaderna för simuleringarna vid Scenario 2. Ur denna framgår att den konventionella förläggningen nu får en högre kostnad än under Scenario 1 men kulvertens livscykelkostnader är fortsatt högre, trots de förändrade förutsättningarna som antas råda.



Figur 76: Exempel på hur modellen kan redovisa medelvärdet av livscykelkostnaderna utifrån Scenario 2 i fallstudien

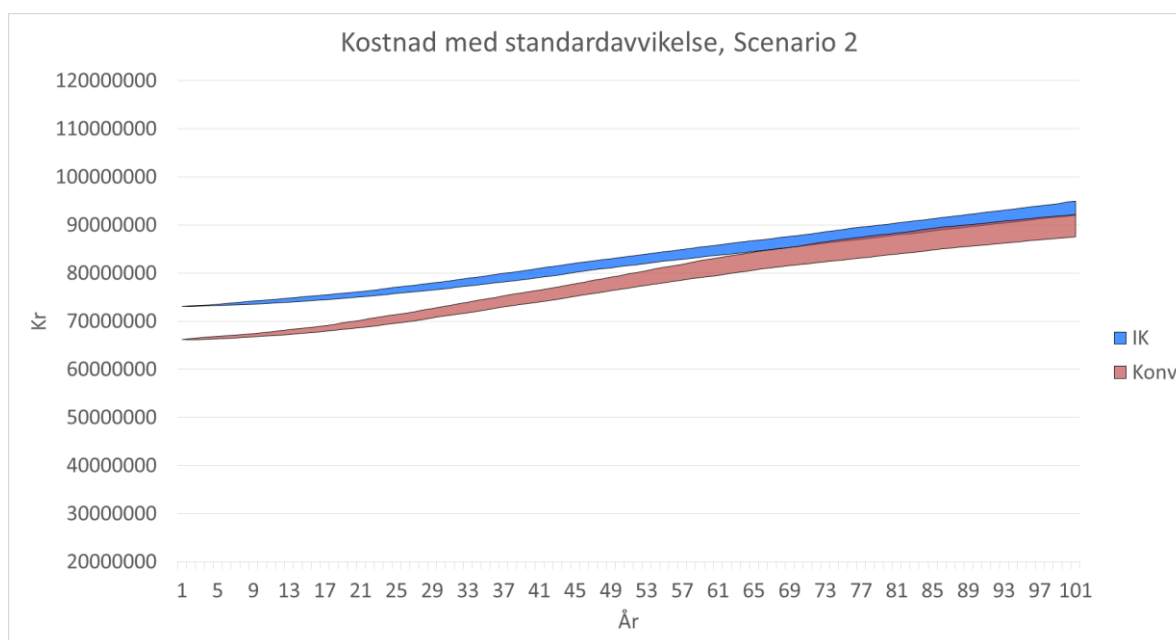
Figur 77 presenterar medelvärdet \pm en standardavvikelse (34 %) för samtliga simuleringar i Scenario 1. Detta intervall motsvarar därmed 68 % av samtliga simuleringar och ger därför en uppskattning av vilka resultat som är troliga. Ett resultat som presenteras på denna form inkluderar de osäkerheter som förekommer i fallstudien tydligare än Figur 75 och Figur 76 där endast medelvärdet redovisas. Därigenom kan frågor av mer spekulativ karaktär svaras på vilket är relevant vid prospektiva studier över en lång tidsperiod. Det ger även en indikation på vilken risk som kan förväntas under livscykeln.



Figur 77: Exempel på hur modellen kan presentera resultat med medelvärde \pm standardavvikelse för Scenario 1

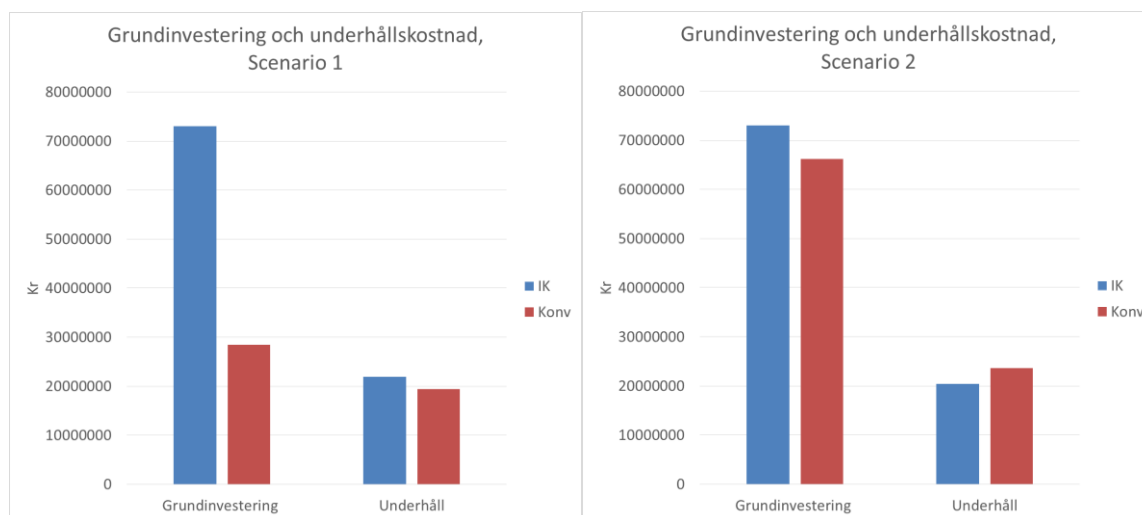
Noterbart är att standardavvikelsen är något större för konventionell förläggning, vilket beror på att de underhåll som sker generellt är dyrare (se 5.9 *Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser och underhållskostnader*) vilket leder till att skillnaden mellan simuleringarna blir större. Det kan därmed tolkas som att det förekommer en högre risk för konventionell förläggning.

Livscykelkostnaderna med standardavvikelser för Scenario 2 presenteras i *Figur 78*. Ur denna framgår att standardavvikelsen blir större för konventionell förläggning än vid Scenario 1 till följd av de högre underhållskostnaderna som antas. Då standardavvikelsen tas i beaktande kan även olika investeringar jämföras för att se om de når break-even vid några av de simulerade körningarna. Utifrån fallstudiens resultat för Scenario 2 skulle detta kunna inträffa efter 65 år, förutsatt att kulverten hamnar i det nedre spannet av standardavvikelsen och den konventionella i det högre.



Figur 78: Exempel på hur modellen kan presentera resultat med medelvärde \pm standardavvikelse för Scenario 2

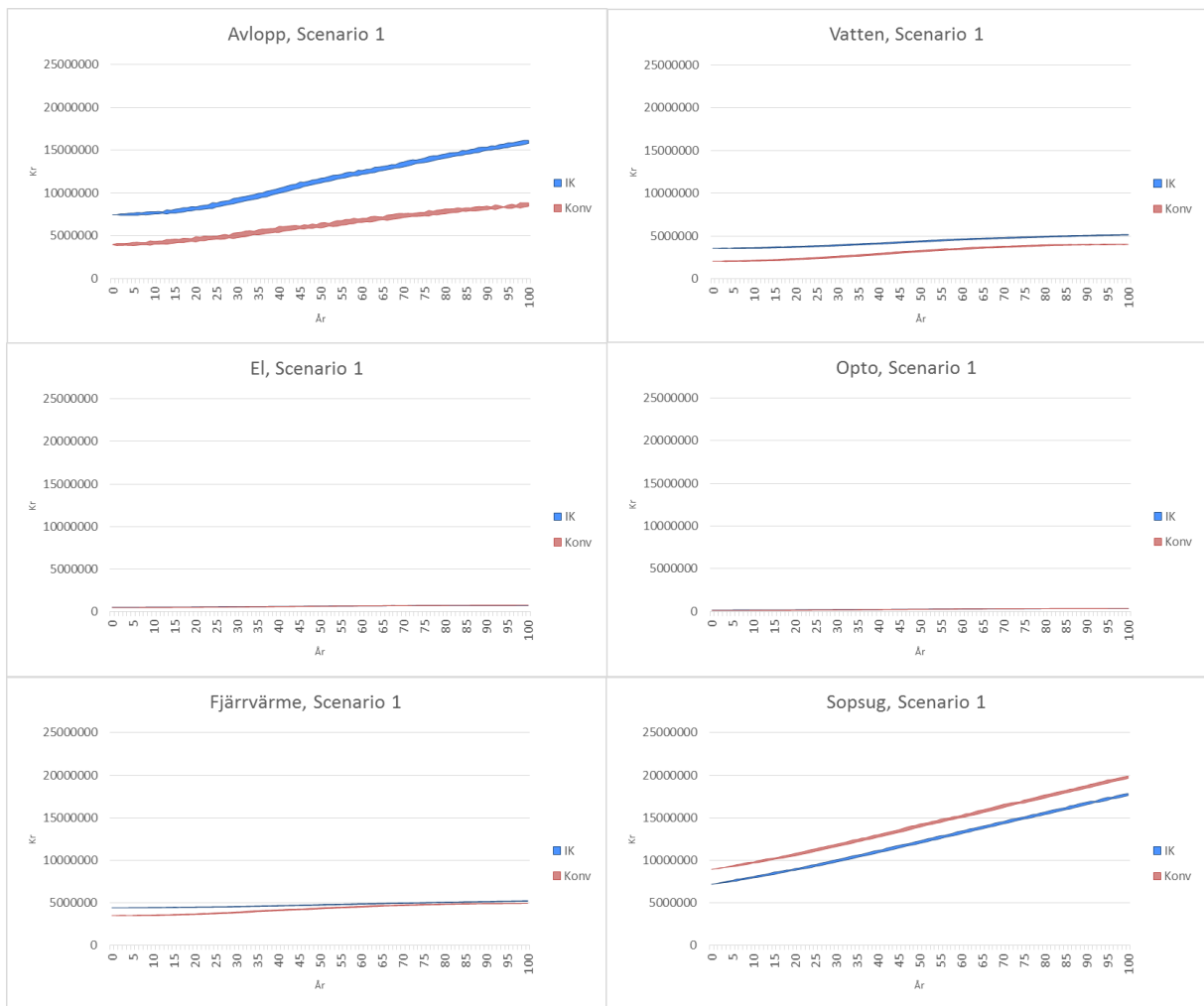
Vid en närmre titt på medelvärdet av kostnadsfördelningen mellan investeringskostnader och underhållskostnader, *Figur 79*, framgår att grundinvesteringen för kulverten är cirka 72 miljoner mot 29 miljoner för konventionell förläggning vid Scenario 1. Denna typ av resultat kan vara av intresse vid jämförelser av olika investeringar för att skaffa sig en uppfattning kring vilken livscykel som är kostsam.



Figur 79: Exempel på och jämförelse av hur modellen presenterar resultatet för sammanlagd grundinvestering och underhållskostnad för Scenario 1 och Scenario 2

De förändrade kostnaderna och antalet underhåll leder till förändringar i grundinvestering och medelunderhållskostnader under Scenario 2. Infrakulverten står fortfarande för en större grundinvestering men underhållskostnaderna för konventionell förläggning är nu något högre än för infrakulverten. Beroende på hur beslutsfattare förhåller sig till om de vill investera idag eller i framtiden kan därmed denna typ av resultat vara till hjälp för att medvetandegöra förväntade kostnader. Fallstudiens resultat för Scenario 2 representerar ett fall där ett sådant investeringsbeslut kan vara svårt att ta då det är en liten skillnad i livscykelkostnader.

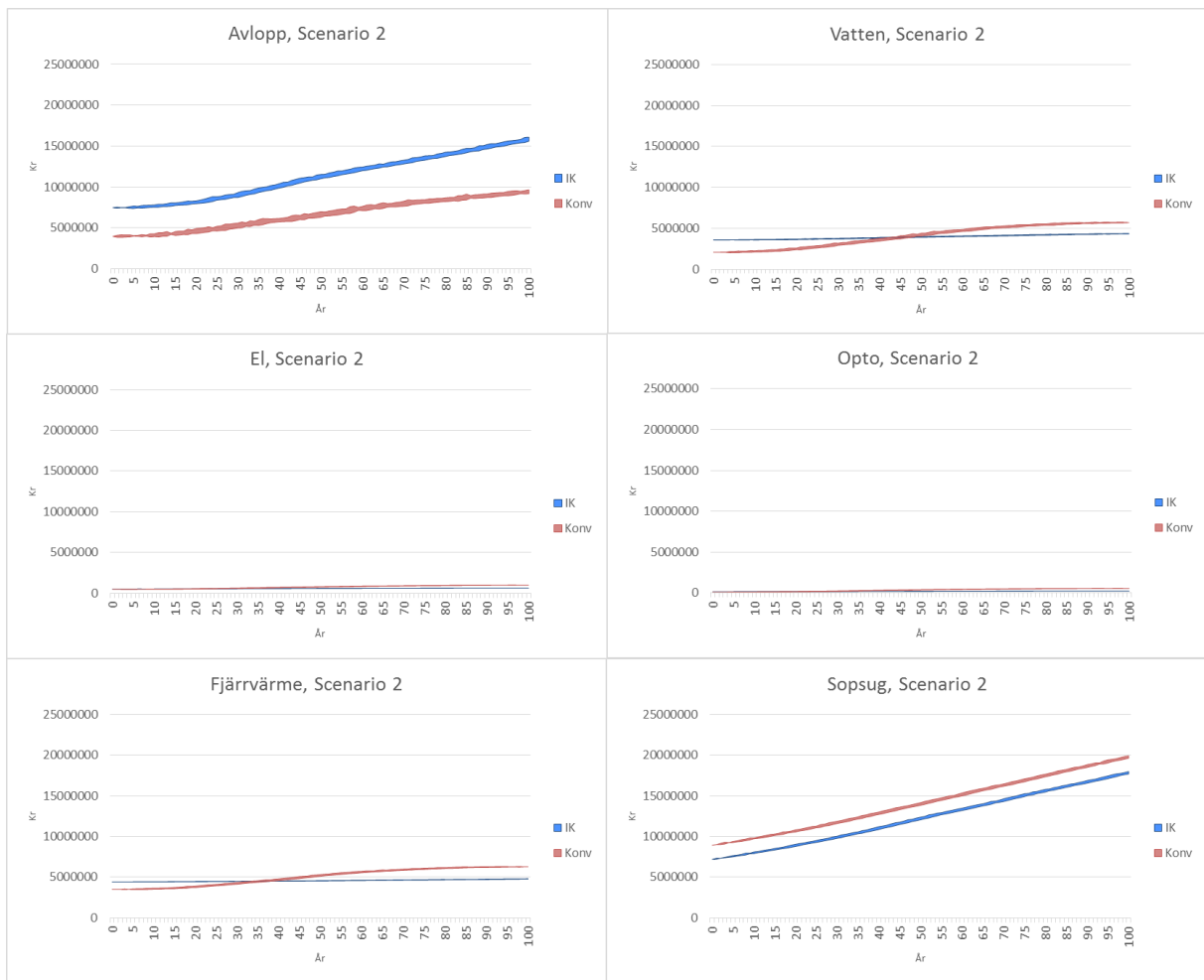
Medelvärdet för livscykelkostnaderna för varje ledningsnät under Scenario 1 presenteras i *Figur 80*. Kostnaden för dessa diagram innehåller inte kostnaden för förläggningen av kulverten och inte det konventionella schaktet. I detta scenario görs ingen skillnad på indata för hur många underhåll som sker i kulvert respektive vid konventionell förläggning, vilket resulterar i att el-, opto- och fjärrvärmenäten har liknande livscykelkostnader för båda förläggningsteknikerna. Att vattensystemet har dyrare livscykelkostnader i kulverten än vid konventionell förläggning kan förklaras av att de ledningsmaterial som används är dyrare, det finns ventiler som behöver bytas ut då deras livslängd är uppnådd samt att servis-utformningen är mer komplicerad. Även avloppssystemet är dyrare i kulverten vilket framförallt beror på att systemet är trycksatt vilket kräver backventiler och pumpstationer (det finns en pumpstation även vid konventionell förläggning). Sopsugssystemet är det enda system som är dyrare vid konventionell förläggning än i kulverten. Då underhållskostnaderna är samma för båda teknikerna beror detta på en dyrare installationskostnad, vilket är en följd av de betongkammare som behövs byggas vid inkasten i det konventionella nätet men inte i kulverten där kostnaden för kammaren tillfaller hela systemet.



Figur 80: Redovisning av hur modellen kan presentera livscykelkostnadernas utveckling för varje studerat ledningsnät i Scenario 1

Med denna ökade detaljnivå jämfört med de resultat som presenterats tidigare möjliggör modellen för mer förståelse kring varje systems enskilda kostnadsfördelning över livscykeln. Detta kan användas för att identifiera vilka områden som är mest intressanta att vidareutveckla för att reducera underhållskostnaderna.

Hur kostnaderna för de olika ledningsnäten ser ut vid antagandena i Scenario 2 redovisas i *Figur 81*. I figuren framgår att livscykelkostnaderna i detta scenario är högre vid konventionell förläggning för samtliga ledningsnät utom avlopp. Avloppssystemets höga kostnader beror även i detta scenario på att systemet är trycksatt.



Figur 81: Redovisning av hur modellen kan presentera livscykelkostnadernas utveckling för varje ledningsnät vid Scenario 2

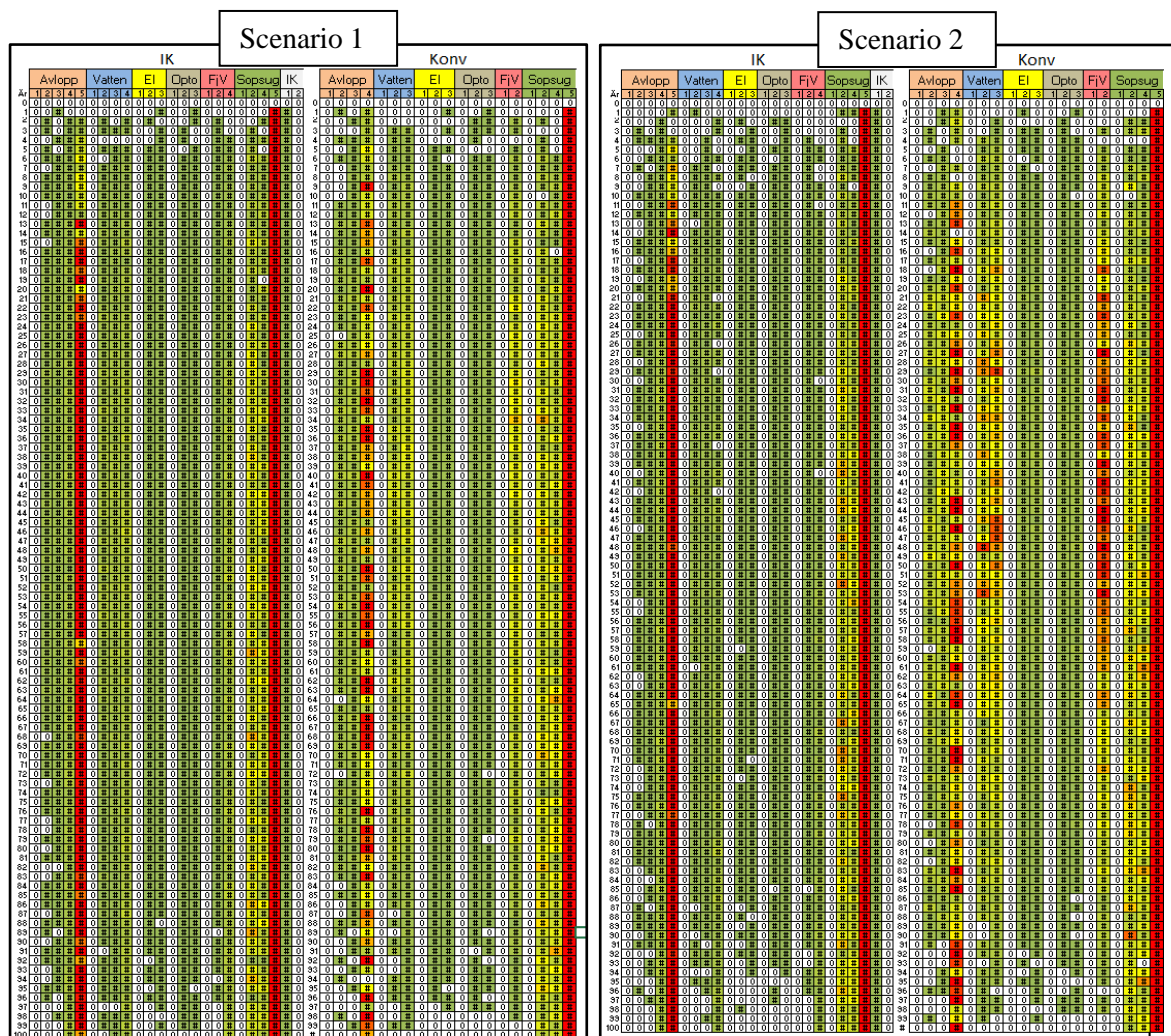
Vilka underhållsåtgärder det är som påverkar kostnaderna mest framgår ur *Figur 84* som visar de relativa medelkostnaderna för varje underhåll och år för Scenario 1 respektive Scenario 2. Det är alltså en kombination av antalet underhåll som sker i snitt under simuleringarna och kostnaderna för dessa underhåll. Röda rutor innebär således år med höga förväntade snittkostnader och gröna innebär lägre kostnader. *Figur 82* och *Figur 83* ger en förklaring till vilken åtgärd som representeras av vilken siffra under varje ledningsnät.

| Avlopp | Vatten | EI | Opto | Fjärrvärme | Sopsug | IK |
|-------------------|---------------|---------------------|---------------------|--------------|------------------|----------|
| 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Årligt |
| 2 Infällning | 2 Infällning | 2 Åverkan | 2 Åverkan | 2 Reparation | 2 Byte inkast | 2 |
| 3 Repmuff | 3 Repmuff | 3 Material/metodfel | 3 Material/metodfel | 3 | 3 Byte rörsystem | 3 |
| 4 Byte backventil | 4 Byte ventil | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 5 Byte av pump | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 Årligt | 5 |

Figur 82: Förklaring till vilka underhållsåtgärder siffrorna överst i Figur 84 motsvarar för infrakulverten

| Avlopp | Vatten | EI | Opto | Fjärrvärme | Sopsug |
|----------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Förnyelse | 1 Förnyelse |
| 2 Infällning | 2 Infällning | 2 Åverkan | 2 Åverkan | 2 Reparation | 2 Byte inkast |
| 3 Repmuff | 3 Repmuff | 3 Material/montage | 3 Material/montage | 3 | 3 |
| 4 Byte av pump | 4 Byte ventil | 4 | 4 | 4 | 4 Byte komponenter |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 Årligt |

Figur 83: Förklaring till vilka underhållsåtgärder siffrorna överst i Figur 84 motsvarar för konventionell förläggning

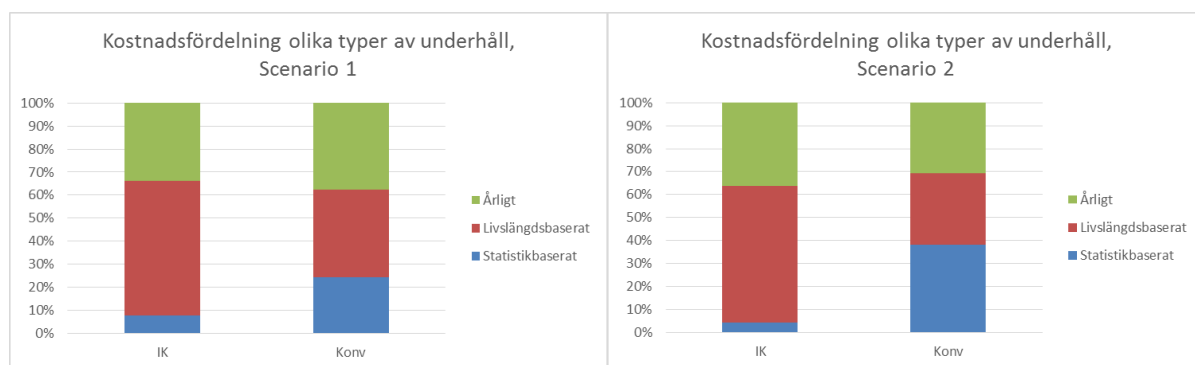


Figur 84: Exempel på hur modellen kan redovisa detaljerat resultat över vilka underhållsarbete som är mest kostsamma och vid vilken tidpunkt höga kostnader kan förväntas utifrån informationen i fallstudien

De relativa kostnaderna för de olika underhållsåtgärder som utförs i Scenario 1 visar att det är utbyte av pumpsystemet i avloppsnätet tillsammans med det årliga underhållet av sopsugen som är de underhållsåtgärder som kostar mest i kulverten. För det konventionella nätet är det samma åtgärder som är mest kostsamma men genomsnittskostnaden för pumputbytet är lägre då det finns färre pumpar och därmed sker färre utbyten.

Vid Scenario 2 framgår att underhållet för det konventionella nätet generellt blivit dyrare i förhållande till kulverten. Detta syns tydligast för fjärrvärmereparationen som i Scenario 2 är röd och i Scenario 1 gul. Detta visar på att denna typ av resultat kan bidra med information kring vilka specifika underhåll som är intressanta att granska närmre för att minska kostnader. Denna fördjupade detaljnivå bidrar också med uppfattningar om när i tiden de högre underhållskostnaderna kan förväntas. Utifrån fallstudiens resultat för Scenario 2 kan det exempelvis förväntas höga kostnader mellan år 30 och 50 vid konventionell förläggning. Det är viktigt att notera att detta resultat, precis som övriga, återspeglar hur åldersfördelningen (när underhållen sker) modellerats.

Som presenterats i avsnitt 5.9 *Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser och underhållskostnader* modelleras tre olika typer av underhåll; statistikbaserat, livslängdsbaserat och årligt. Hur mycket de olika delarna inverkar på de totala underhållskostnaderna presenteras i *Figur 85*. Ur denna figur framgår att det statistikbaserade underhållet inte påverkar de totala underhållskostnaderna för infrakulverten i någon större utsträckning. För konventionell förläggning påverkar de mer vid Scenario 2 än vid Scenario 1 vilket kan förklaras av de högre underhållskostnaderna.



Figur 85: Redovisning av hur modellen kan presentera resultat över vilka underhållstyper som står för störst andel av de totala underhållskostnaderna i fallstudien

Denna typ av resultat indikerar vilka underhållstyper som är de mest kostsamma. Utifrån resultaten från fallstudien är framförallt livslängdsbaserat och årligt underhåll som påverkar kostnaderna för infrakulverten och därmed är mest intressanta att reducera. De årliga kostnaderna är nödvändiga och de livslängdsbaserade underhållen kan till viss del reduceras genom regelbunden motionering av ventiler och liknande åtgärder.

7.2 Känslighetsanalys av bakomliggande antaganden

Scenario 2 innehåller antaganden kring ökade underhållskostnader vid konventionell förläggning till följd av spont och ett minskat antal underhåll i infrakulverten till följd av att miljön anses gynnsam. I detta avsnitt utförs känslighetsanalyser på dessa antaganden för att analysera i vilken grad de påverkat slutresultaten för Scenario 2. Den gynnsamma miljön är dessutom en av de potentiella fördelar som identifierats för infrakulverten vilket gör den extra intressant att undersöka. Dessutom undersöks vilken inverkan avgränsningen från förnyelse kan innebära. De känslighetsanalyser som utförs visar också på hur modellen kan tillämpas för att utföra just dessa typer av analyser.

7.2.1 Ökade underhållskostnader vid konventionell förläggning

För vatten, el, opto och fjärrvärme fördubblas de totala underhållskostnaderna för samtliga konventionella underhållsarbeten vid Scenario 2. Då antagandet att spontningen medför en dubblerad underhållskostnad inte kunnat fastställas med säkerhet används *Tabell 12* för att analysera vilken effekt detta antagande får på de totala livscykelkostnaderna för konventionell förläggning vid förutsättningarna som råder för Scenario 2.

Tabell 12: Förändring av livscykelkostnader relativt Scenario 2 vid förändrad underhållskostnad till följd av dubbelspont vid konventionell förläggning.

| Förändring underhållskostnad vid konventionell förläggning | Procentuell förändring av livscykelkostnad | Förändring livscykelkostnad |
|--|--|-----------------------------|
| Oförändrat jämfört Scenario 1 | -5 % | -4,8 mkr |
| 3 gånger underhållskostnad | 6 % | 5,1 mkr |

Om spontningen inte skulle leda till någon förändring av underhållskostnaderna jämfört med Scenario 1 skulle livscykelkostnaden minska med 5 %, eller 4,8 miljoner kr, relativt Scenario 2. Om underhållskostnaderna däremot skulle visa sig leda till en trippel ökning istället för en dubbel skulle livscykelkostnaderna öka med 5,1 miljoner kr, 6 %.

Detta resultat speglar vikten av att ha pålitlig bakomliggande information till de antaganden som görs, i synnerhet då resultaten ska användas som beslutsunderlag. Vid dessa situationer kan modellen användas för att skapa uppfattningar om olika antagandens betydelse. Då det kan konstateras att detta antagande får en märkbar inverkan på slutresultatet för fallstudien är det något som behöver studeras djupare i framtida studier för att säkra ett rättvisande resultat.

7.2.2 Gynnsam miljö för ledningar i infrakulvert

Ett av de bakomliggande antagandena till Scenario 2 är att kulverten erbjuder en bättre miljö för ledningar och kablar vilket leder till färre underhåll för de underhåll som antas gynnas av detta. Detta antagande grundas på uppfattningar från intervjuad personal men har inte kunnat styrkas av statistik och hur mycket underhållen minskar har inte heller kunnat fastställas. Antagandet om en halverad underhållsfrekvens i kulverten jämfört med konventionell analyseras genom att studera kulvertens totala livscykelkostnad vid tre olika underhållsfrekvenser (0,5, 0,75 och 1) relativt konventionell förläggning. Resultatet presenteras i *Tabell 13* där Scenario 2 (0,5) är referensfall:

Tabell 13: Procentuell livscykelkostnadsförändring för förläggning i infrakulvert med olika antagande för antal underhåll.

| Antal underhåll jämfört med konventionell förläggning | Procentuell skillnad i livscykelkostnad jämfört med 0,5 | Skillnad i livscykelkostnad jämfört med 0,5 |
|---|---|---|
| 0,75 | 1 % | 0,8 mkr |
| 1 | 2 % | 1,4 mkr |

I tabellen syns att ett förändrat antal underhåll har en liten inverkan på de totala livscykelkostnaderna. Även om antalet underhåll i kulverten skulle vara detsamma som antalet underhåll vid konventionell förläggning påverkas infrakulvertens livscykelkostnad endast med 2 % eller 1,4 mkr jämfört med ett halverat antal underhåll. Detta indikerar att kulvertens miljö inte är det som är mest avgörande för att minska livscykelkostnaderna för de statistik- och livslängdsbaserade underhållsåtgärderna i fallstudien. Om förnyelse inkluderas i modellen kan antalet underhåll få större betydelse och därmed

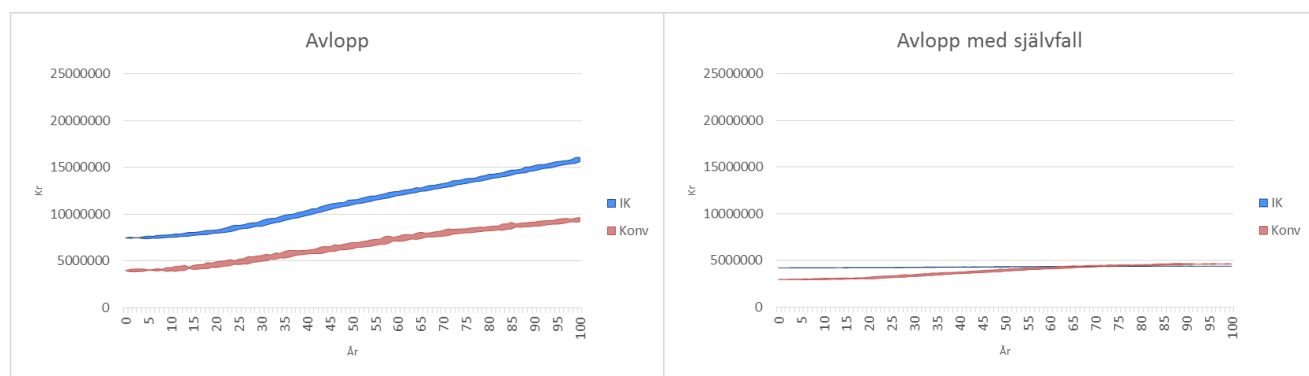
påverka livscykelkostnaderna mer. Detta undersöks i avsnitt 8.5 *Inverkan av att inkludera förnyelse av elnät och sopsugssystem*.

7.3 Inverkan av möjliga tekniska förbättringar av kulvert-tekniken

I detta avsnitt redovisas hur modellen kan användas för att utvärdera tekniska aspekter av kulvert-tekniken och deras effekter på livscykelkostnaderna. Detta görs genom att undersöka hur det trycksatta avloppssystemet, en ökad längd konventionellt nät och kulvertförläggning utan anläggning av kammare eller fellehus påverkar kostnaderna för kulverten. Analyserna kan även bidra med insikt kring möjliga fördelar med kulvert-tekniken.

7.3.1 Trycksättning kontra självfall för avloppssystemet i infrakulverten

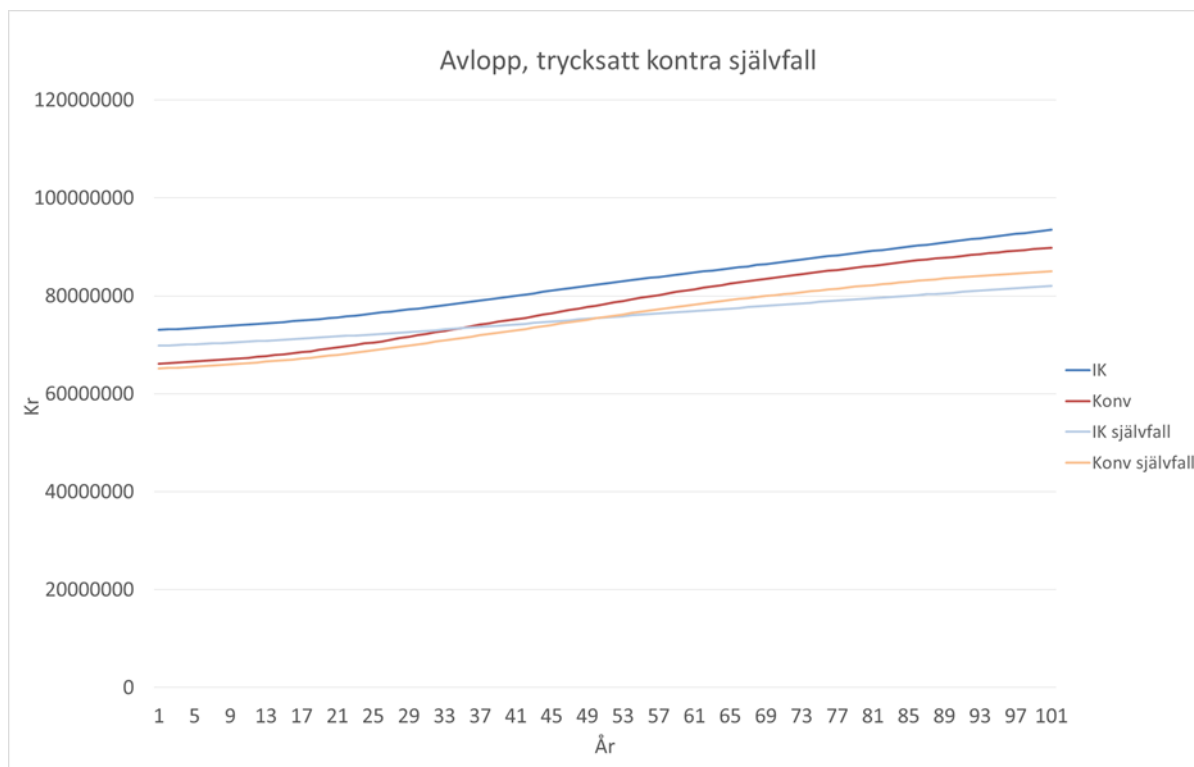
Jämfört med Scenario 1 resulterar antagandena bakom Scenario 2 att samtliga ledningsnät förutom avlopp blir dyrare för konventionell förläggning (jämför *Figur 80* och *Figur 81*). I avloppssystemet i kulverten ligger matarnätet utan något självfall vilket innebär att systemet måste trycksättas. För att trycksättningen ska fungera krävs, som förklaras i 5.3 *Studerat avloppsledningsnät*, pumpstationer och backventiler och underhållskostnaden av dessa är relativt stora (se *Figur 84*). Om förutsättningarna i området där en kulvert ska anläggas gör det möjligt att lägga rören med självfall blir således pumpstationerna och backventilerna i infrakulverten överflödiga. Även den större pumpstation som används vid konventionell förläggning antas inte behövas vid denna situation. För att utreda hur detta påverkar livscykelkostnaderna kan modellen användas till att modifiera bakomliggande data och i *Figur 86* ses skillnaden på avloppssystemets livscykelkostnad med och utan trycksättning.



Figur 86: Jämförelse av kostnaderna för det trycksatt avloppssystemet i kulverten med ett icke-trycksatt system

Livscykelkostnaderna minskar markant då rören kan läggas med självfall. Både installations- och underhållskostnaderna minskas och skillnaden mellan förläggning i infrakulvert och förläggning med konventionell teknik blir liten.

Modellen erbjuder även möjligheten att analysera hur avloppets minskade underhållskostnad påverkar den totala livscykelkostnaden jämfört med Scenario 2. Detta redovisas detta i *Figur 87*.



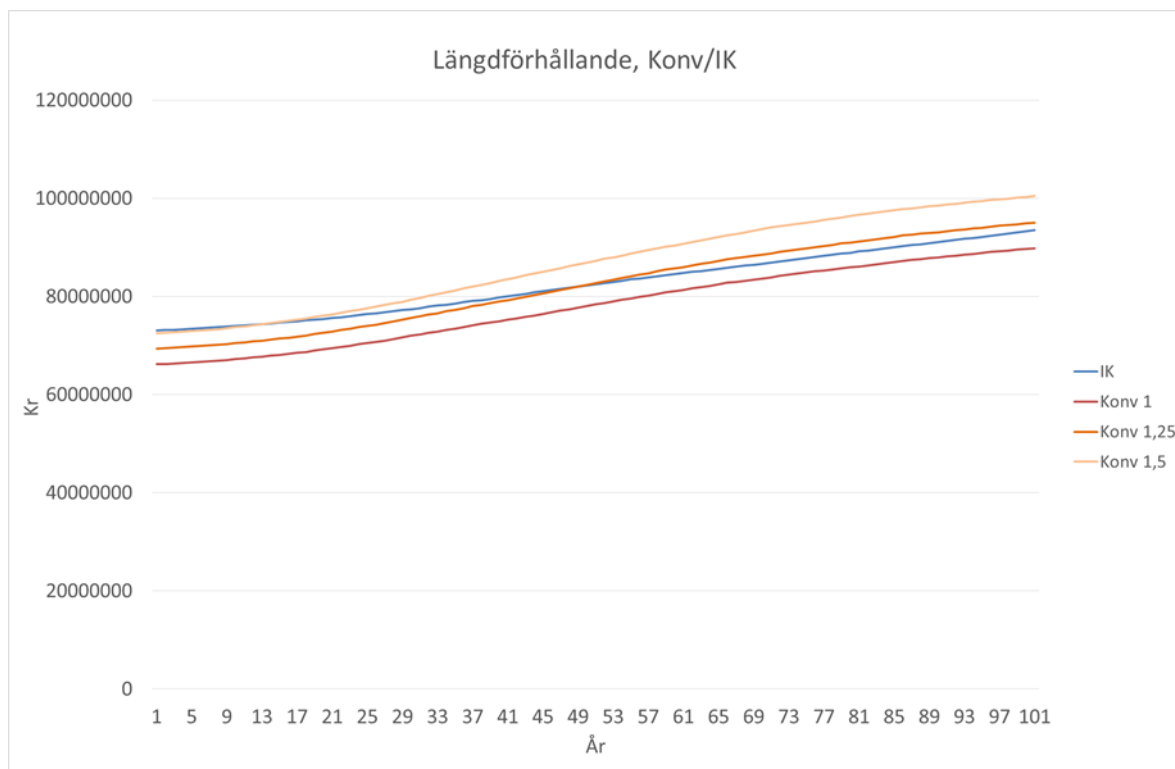
Figur 87: Medelkostnadskurvor för trycksatt kontra självfallssystem för avloppssystem i både kulvert och vid konventionell förläggning

Medelkostnaden för den totala livscykeln påverkas mest för förläggning med infrakulverttekniken då avloppssystemet läggs med självfall. Kostnaden minskar med 12 %, 11,5 miljoner kr, för infrakulverten och med 5 %, 4,8 miljoner kr, för konventionell förläggning.

Modellen kan på så vis användas till att motivera en vidare undersökning kring vad som krävs för att minska kostnaderna för det trycksatta systemet i kulverten. En aspekt på om rören kan läggas med självfall som inte är med i analysen ovan är att det kan medföra ökade kostnader för schaktning. Detta har inte undersökts ytterligare och det krävs en djupare datainsamling för att ge ett resultat som är mer rättvisande.

7.3.2 Längdförhållandet mellan konventionellt nät och kulvert-nät

I avsnitt 5.2 *Installation vid konventionell förläggning* förklaras att kulvertläggningen och konventionell förläggning inte nödvändigtvis läggs på samma plats i ett bostadsområde. Den konventionella förläggningen måste ske i en gata eller annan yta som inte är överbyggd och behöver komma nära fastigheterna. Infrakulverten måste däremot inte ta hänsyn till överbyggnad eller att schaktning måste kunna ske när kulverten är på plats. Detta faktum medför att längden vid konventionell förläggning kan bli längre än infrakulvertens längd. När avloppssystemet kalkylerades i ett planerings-stadie i kulvertprojektet krävdes det ett uppemot 50 % längre nät vid konventionell förläggning jämfört med kulverten (Svensson muntligt, 2016). I Scenario 1 och Scenario 2 antogs däremot näten vara lika långa. Modellen används här till att undersöka hur ett förändrat förhållande påverkar livscykelkostnaderna. Figur 88 analyseras detta antagande genom att öka längden på nätet som är förlagt med konventionell teknik med 25 och 50 %. Denna analys görs på Scenario 2.



Figur 88: Inverkan av ledningsnätets längd på totala livscykelkostnader

Som kan ses leder ett längre ledningsnät för den konventionella förläggningen till en ökad livscykelkostnad. Både installationskostnaden och underhållskostnaden påverkas eftersom det krävs längre schakt-sträcka och ett längre ledningsnät ger upphov till mer underhåll. Detta förhållande förtydligas i *Tabell 14* där det framgår att en ökning på ledningsnätet med 25 % innebär en kostnadsökning på 6 %, 5,2 miljoner kr. En ledningslängd som ökas med 50 % leder till en kostnadsökning på 12 %, 10,6 miljoner kr.

Tabell 14: Förhållande mellan ökad ledningslängd och ökade kostnader

| Procentuellt ökad längd konventionellt nät | Procentuell kostnadsökning konventionell förläggning | Kostnad |
|--|--|----------|
| 25 % längre | 6 % | 5,2 mkr |
| 50 % längre | 12 % | 10,6 mkr |

Ovanstående analys indikerar en potentiell fördel med infrakulverten jämfört med konventionell förläggning.

För att genomföra en rättvisande jämförelse är detta något som behöver tas i beaktande. Ovanstående analys visar också på ytterligare ett användningsområde för modellen och hur den kan användas för att jämföra teknikerna redan vid planeringsstadiet av nya områden. En utmaning med detta är att ledningsnät alltid är site-specifika vilket innebär svårigheter med generaliseringar kring förhållandet mellan längd för infrakulvert och konventionell förläggning.

7.3.3 Infrakulvertförläggning utan kammare eller fellehus

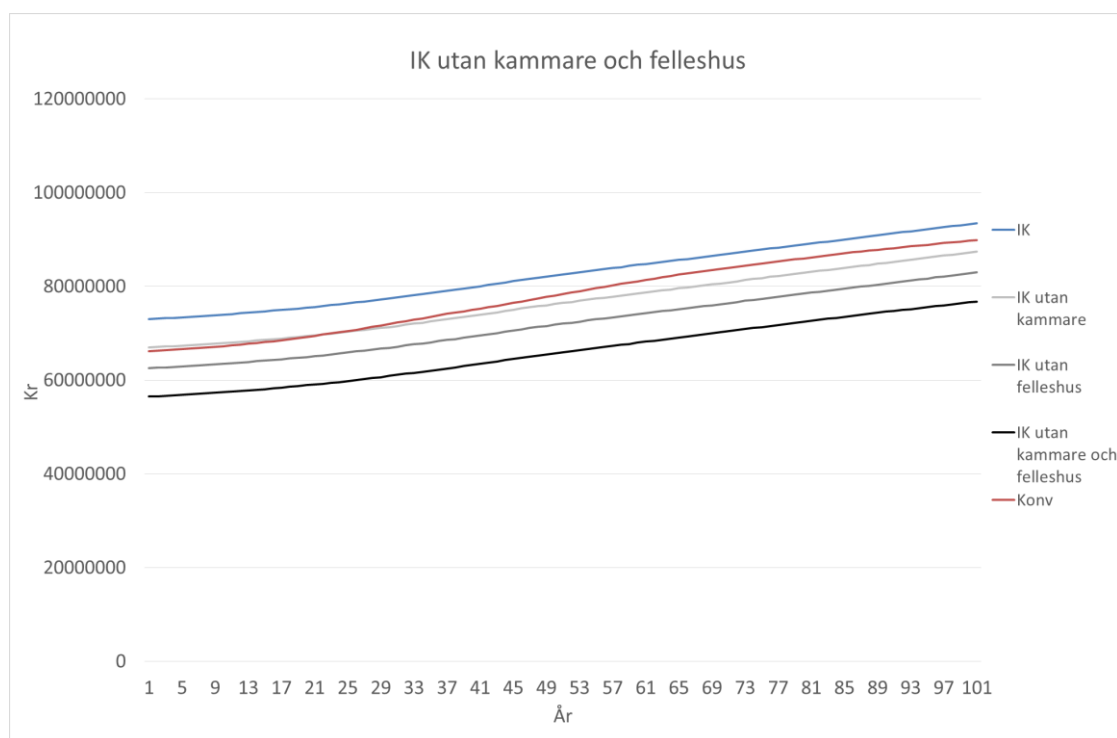
I avsnitt 5.1 *Installation av infrakulverten i Vallastaden* beskrivs behovet av någon typ av källarutrymme för kulvert-tekniken. Dessa utrymmen behövs för servisanslutningar, sammanfogning av kulvertrör och för placering av tekniska komponenter. I Vallastaden byggdes kammare och fellehus för att uppfylla detta behov då inga källare finns under fastigheterna i området. I områden där

källare finns eller kan byggas under fastigheterna finns således inte samma behov av anlagda kammare och fellehus. För att analysera kammarnas och fellehusens påverkan på den totala livscykelkostnaden gjordes tre olika simuleringar som jämförs med resultatet i Scenario 2. De simuleringar som gjordes var: infrakulvert utan fellehus, infrakulvert utan kammare och infrakulvert utan kammare och fellehus. I *Tabell 15* presenteras skillnaden i livscykelkostnad för infrakulverten i procent och i kostnader.

Tabell 15: Fellehusens och kamrarnas påverkan på livscykelkostnad uttryckt i procentuell skillnad jämfört med Scenario 2 samt skillnaden i total kostnad.

| | Skillnad i procent jämfört med Scenario 2 | Skillnad i total livscykelkostnad jämfört med Scenario 2 |
|---------------------------|---|--|
| Utan kammare | -6 % | -6,1 mkr |
| Utan fellehus | -10 % | -10,5 mkr |
| Utan kammare och fellehus | -18 % | -16,8 mkr |

I *Figur 89* redovisas hur medelvärdet av livscykelkostnaden förändras då kostnaden för antingen kammare, fellehus eller båda tagits bort.



Figur 89: Förändrad livscykelkostnad för kulverten i Scenario 2 då kammare eller fellehus inte behövs anläggas

Ur figuren framgår att en infrakulvert utan kammare motsvarar en liknande installationskostnad som konventionell förläggning med dubbelspont. Det är värt att notera att även om området har källare till fastigheterna behövs de troligtvis modifieras för att kunna användas tillsammans med kulverttekniken. Kostnaden kan därmed troligtvis inte helt tas bort men då kostnaden för en sådan modifiering är svår att identifiera gjordes ovanstående analys. En kulvertförläggning utan fellehus minskar installationskostnaderna ännu mer och leder till lägre installationskostnader än dubbelspont.

Om kulverten ska anläggas på andra platser i framtiden kan det vara värt att undersöka möjligheten att bygga källare till fastigheterna och knyta samman de med kulvertroren för att reducera kostnaderna för

kulvertens installation. Det är dock viktigt att dessa källare kan uppfylla samma funktion som kammarna. Om kostnaderna för att bygga källarna inkluderas i modellen kan den dessutom bidra med jämförelse av kostnaderna för detta och för att anlägga kammare och fellehus, vilket kan användas som beslutsunderlag.

7.4 Diskussion kring infrakulverten i fallstudien

Infrakulverten medför ett antal möjligheter för ledningsbunden infrastruktur och hanteringen av dessa. Bland annat blir ledningar och kablar synliga istället för att ligga nedgrävda vilket gör det lättare att samla information kring ledningsnätet status och vilka underhåll som är nödvändiga. Utifrån erfarenheterna anskaffade under fallstudien kommer troligtvis även mindre läckage upptäckas och repareras i kulverten då det annars leder till vattenfyllning vilket kan få konsekvenser för andra ledningsnät. Reparationsarbeten av sådana mindre läckor är dessutom billiga och enkla att utföra i kulverten. Då marginalkostnaderna för att reparera sådana små läckage i det konventionella nätet är höga hade ledningar i mark med liknande läckage inte reparerats. Genom att genomföra dessa arbeten och kontinuerligt hålla översikt över ledningarnas status kan ledningarnas funktion upprätthållas över längre tid vilket leder till en ökad leveranssäkerhet. En högre leveranssäkerhet kan också leda till att det är skäligen att ta en högre anslutningsavgift.

Då 15 % av det producerade dricksvattnet i Sverige idag läcker (Malm et al., 2011) leder kulverten även till en ökad resurseffektivitet inom detta system. Om vattenledningarna i kulverten skulle läcka 15 % skulle kulverten snart vattenfyllas vilket skulle få allvarliga konsekvenser för området då all teknisk utrustning i kulverten skulle vattendränkas. Troligtvis är det även enklare att ta upp utjänta ledningar och kablar ur kulverten än vad det är att ta upp motsvarande nedgrävda ledningar. Kulvertens begränsade utrymmer leder också till att det kan bli en nödvändighet att ta upp gamla system för att få plats med ny teknik. Alltså kan infrakulverten innebära att en del av de hinder mot urban mining som förekommer för nedgrävda kablar helt eller delvis kan reduceras. Detta innebär att infrakulverten kan leda till en ökad resurseffektivitet inom ex. vattensystemen och att mer material återvinns.

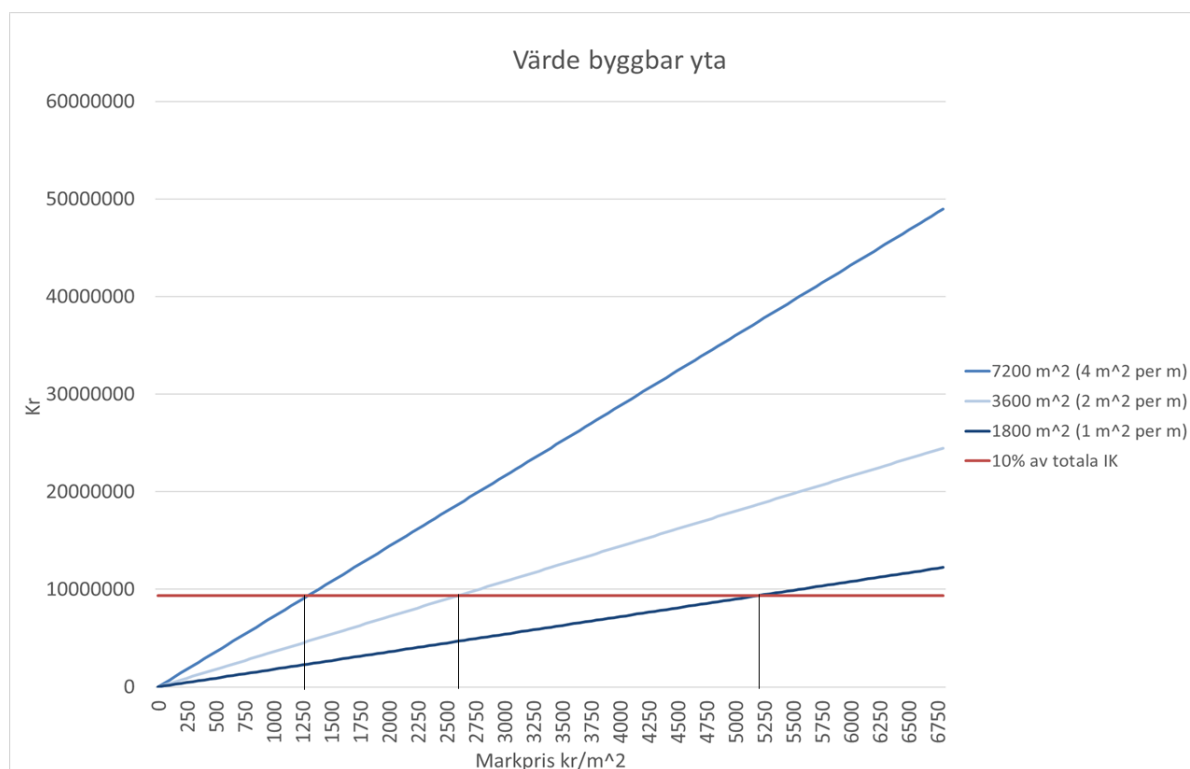
Om så blir fallet går det att tala om infrakulverten som en mer hållbar förläggningsteknik för ledningsbunden infrastruktur med aspekter från cirkulär ekonomi som gör det väldigt intressant ur ett framtida samhällsperspektiv. Dessvärre har flertalet av dessa aspekter inte kunnat kvantifieras i fallstudien då studien begränsades till att endast genomföra en konventionell-LCC. Dock förutsätter detta påstående att det finns en lösning för vad som händer med kulverten efter dess tekniska livslängd är uppnådd, något som inte kunnat identifieras under fallstudien. Kostnaden och miljöpåverkan för att gräva upp kulverten eller på annat sätt bortskaffa den kan innebära att all möjlig nytta under drift/underhållsfasen går förlorad.

Genom de analyser som gjordes i 7.2 *Känslighetsanalys av bakomliggande antaganden* framkommer att de förutsättningar som råder på platsen där en eventuell infrakulvert ska anläggas spelar stor roll för ekonomin. De aspekter som undersöks är hur längdförhållandet mellan kulvert och konventionellt nät samt minskat underhåll i kulverten till följd av en bättre miljö påverkar kostnaderna. Utöver dessa aspekter finns även de aspekter som beskrivs i Scenario 2 med merkostnader för spont under både installations- och underhållsfas och vilken inverkan kammare och fellehus har. Dessa analyser visar på vikten av att veta förutsättningarna för att kunna göra rättvisande jämförelser och att kulvertens ekonomiska prestanda jämfört med konventionell förläggning är starkt förknippat med rådande omständigheter.

Andra aspekter som kan tala till infrakulvertens fördel är övriga omständigheter som kan höja underhållskostnaderna för konventionell förläggning. Eftersom kulverten inte behöver några schakt kan ytskiktet vara stensättningar eller andra mer attraktiva alternativ. Hårt trafikerade gator leder också till högre underhållskostnader för konventionell förläggning då avstängningen blir mer omfattande för att kunna säkra arbetsmiljön och dessutom krävs tjockare lager asfalt. Slutligen kan även framtida

regelverk innebära högre underhållskostnader till följd av förändrade råvaru- och bränslepriser. För dessa förutsättningar påverkas kulverten mindre än konventionell förläggning och kan därmed bli ett attraktivt framtidsalternativ.

En potentiell fördel som inte undersökts under fallstudien är möjligheten till mer byggbar yta vid förläggning i infrakulvert. Hur stor den ökade byggbara ytan är beror, som för många andra aspekter, till hög grad hur stadsdelen är utformat. Som nämns under 5.2 *Installation vid konventionell förläggning* har kulvertröret byggts över vid fåtalet platser i Vallastaden. Enligt Rydin (2016) är det dock inget Tekniska verken strävar efter med infrakulverttekniken i kommande projekt. För att analysera den ökade byggbara ytans värde testades tre olika värden för hur mycket mer byggbar mark förläggning i infrakulvert kan ge jämfört med konventionell förläggning. De tre olika värdena är att för varje meter ledningsnät ger förläggning i infrakulvert 1 m², 2 m² eller 4 m² mer byggbar yta. Om schaktbredden för konventionell förläggning är 8 meter och schaktbredden för infrakulverten är 4 meter ger skillnaden en byggbar yta på 4 m² per meter. Eftersom konventionell förläggning oftast sker under gator och måste ha en viss bredd påverkas den byggbara ytan negativt (Liljedahl, 2017), därav antas även de två lägre värdena. De tre antaganden som gjorts blir i fallstudien blir det således 1800 m², 3600 m² och 7200 m² mer byggbar yta. Ett sätt att värdera hur mycket dessa tre areor är värda är genom att analysera markpriset. Den begränsade datainsamlingen inom detta medförde att värdet ses som en funktion av markpriset och *Figur 90* jämförs värdet av den byggbara ytan med 10 % av infrakulvertens totala livscykelkostnad vid Scenario 2.



Figur 90: Värdering av byggbar yta för tre olika antaganden kring hur mycket byggbar yta som kan frigöras i fallstudien. Detta jämförs med (den röda linjen) 10 % av Infrakulvertens totala livscykelkostnad vid Scenario 2. X-axeln utgörs av markpriset.

Markpriset behöver vara 1250 kr/ m² då 7200 m² byggbar yta frigjorts, 2600 kr/ m² för 3600 m² och 5200 kr/ m² för att värdet ska motsvara 10 % av infrakulvertens totala livscykelkostnad. 10 % av infrakulvertens totala livscykelkostnad för Scenario 2 motsvarar kostnadsbesparingen vid förläggning utan felleshus. När markpriserna för Vallastaden sattes 2012 var priset ca 1000 kr/ m² men nu uppskattas markpriset vara ungefär 2000-3000 kr/m² (Liljedahl, 2017). Att Vallastaden inte ligger i direkt närhet till stadskärnan ger ett lägre pris och markpriset vid mer centrala delar av Linköping kan

vara runt 6000-7000 kr/m². (Liljedahl, 2017). Infrakulvertens totala livscykelkostnad påverkas således var den är belagd och även vid Vallastadens låga markpriser kan värdet vara intressant att ta hänsyn till. En viktig aspekt att ta hänsyn till hos Tekniska verken är att denna potentiella fördel inte gynnar deras organisation utan det är antingen markägaren eller byggherrarna som tar del av den ekonomiska vinningen. Detta kan vara en del av kommande arbete kring infrakulvertens affärsmodell.

Rent tekniskt finns det ett antal aspekter som är viktiga att utveckla utifrån resultaten från fallstudien. Det som kunnat identifieras under fallstudien är framförallt att minskade kostnader för avloppssystemet är värt att undersöka närmre och att det är möjligt att reducera installationskostnaderna om det går att bygga kulvert utan att anlägga kammare eller felleshus. Utöver detta finns det troligtvis även mer tekniska lösningar som går att förbättra. Detta har inte studerats närmre då det kräver en väldigt djup teknisk kunskap om de olika ledningsnäten.

De svagheter med infrakulvert-tekniken som identifierats under fallstudien är främst kopplade till arbetsmiljön. Riskerna vid olyckor, till exempel fjärrvärmeläckage, är stora och det trånga utrymmet försvårar också utförandet av underhållsåtgärder. Bland annat används handkraft i högre utsträckning än i arbete i schakt där större maskiner kan utnyttjas. Detta är viktiga frågor som Tekniska verken pågående arbetar med att förbättra. Det är också en konsekvens av att kulverten i Vallastaden är ett pilotprojekt där det inte kan förväntas att det finns svar och lösningar på alla problem och situationer som uppstår.

Att det är ett pilotprojekt har också inverkat på fallstudiens resultat jämfört med konventionell förläggning då informationen bakom infrakulverten endast kan baseras på Vallastaden-projektet. Då en hel del av de situationer som förväntas hända under den studerade tidsperioden inte hänt tidigare är därför svaren mer spekulativa. Den konventionella förläggningen kunde däremot baseras på information och erfarenheter som Tekniska verken och dess personal anskaffat sig under en lång tid vilket kan anses mer trovärdigt.

8 Analys av utformad modell

Modellen som utformats och används för att beräkna resultaten i kapitel 7 Resultat från modellen har ett antal begränsningar. Vid modelleringen av de infrasytem som studeras gjordes ett antal val. Bland annat beräknades samtliga resultat utifrån ett snitt från 100 simuleringar och osäkerhetsfaktorer, maxantalsfaktorer och åldersfördelningar karakteriserar tillsammans infrastrukturen i fallstudien. I detta kapitel undersöks och diskuteras modellens begränsningar utifrån två perspektiv: först hur enskilda modelleringsval påverkar resultaten och sedan hur modellen kan valideras och vad den kan användas till.

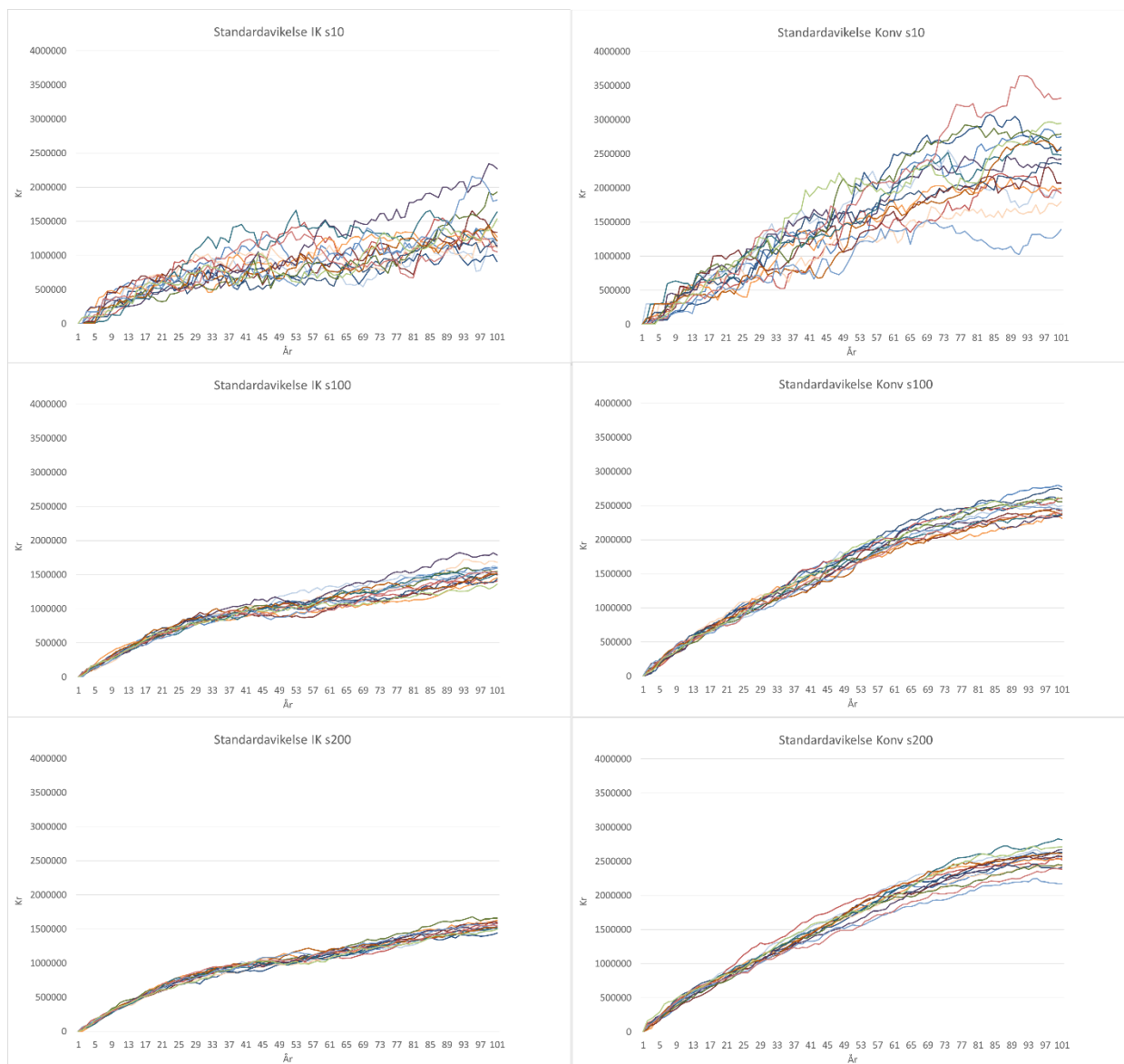
8.1 Val av simuleringsstorlek

Simuleringsstorleken, för Scenario 1 och 2, är 100. Det innebär att modellen kört 100 enskilda körningar och sedan sparar resultaten i kollektorer. Nedan analyseras hur detta val påverkar resultatet via en jämförelse med simuleringsstorleken 10 och 200. Simuleringsstorleken 10 betecknas nedan som s10 och övriga simuleringsstorlekar betecknas på samma sätt. I *Tabell 16* visas de procentuella skillnaderna i livscykelkostnad, både medelfel och max-fel, mellan 15 simuleringar för varje simuleringsstorlek.

Tabell 16: Största procentuella differensen mellan de 15 olika simuleringarna med olika simuleringsstorlekar samt medelskillnaden i procent.

| Simuleringsstorlek | IK | | Konv | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Medel | Max | Medel | Max |
| s10 | 0,4 % | 1,0 % | 1,7 % | 2,7 % |
| s100 | 0,2 % | 0,5 % | 0,3 % | 0,6 % |
| s200 | 0,1 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,6 % |

Som kan ses i tabellen minskar spridningen på medelkostnaden för livscykelanalysen beroende på valet av simuleringsstorleken. Den simuleringsstorlek som valts vid modelleringen (s100) ger, enligt erhållet medelfel från 15 simuleringar, ett medelfel på 0,2 % vid förläggning i infrakulvert och 0,5 % vid konventionell förläggning. S200 leder till ytterligare minskning av medelfelet men simuleringen tar längre tid att utföra. För att ytterligare analysera simuleringsstorlekens betydelse visas hur standardavvikelsen för 15 olika simuleringar av varje simuleringsstorlek skiljer sig under livscykeln i *Figur 91*.



Figur 91: Analys av simuleringsstorleken betydelse för standardavvikelsen. Som kan ses i rubrikerna har simuleringsstorleken 10, 100 och 200 testats. Lägre simuleringsstorlek leder till större spridning i standardavvikelse

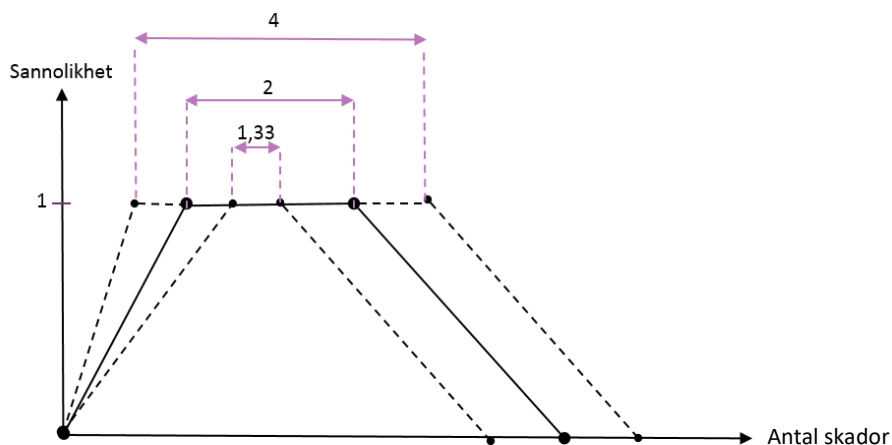
Standardavvikelsen skiljer, som ses under rubriken 7 Resultat, mellan förläggning i infrakulvert och konventionell förläggning. Vid simuleringsstorleken s10 kan standardavvikelsen skilja mycket relativt s100 och s200. Skillnaden mellan s100 och s200 är däremot inte lika tydliga. För denna LCC-studie antas därför s100 vara tillräcklig simuleringsstorlek då dataosäkerheten för studien bedöms som större än de fåtal procent som medelfelet är vi s100.

De analyser som gjordes för simuleringsstorlek gjordes manuellt. Det gjordes 15 simuleringar och för varje simulering hämtades resultatet manuellt till en annan excel-fil. Detta var en tidsödande analys och att lägga till en funktion i modellen så att den kan göra sådana analyser skulle ge användaren möjlighet att analysera detta mer ingående.

8.2 Val av osäkerhetsfaktor

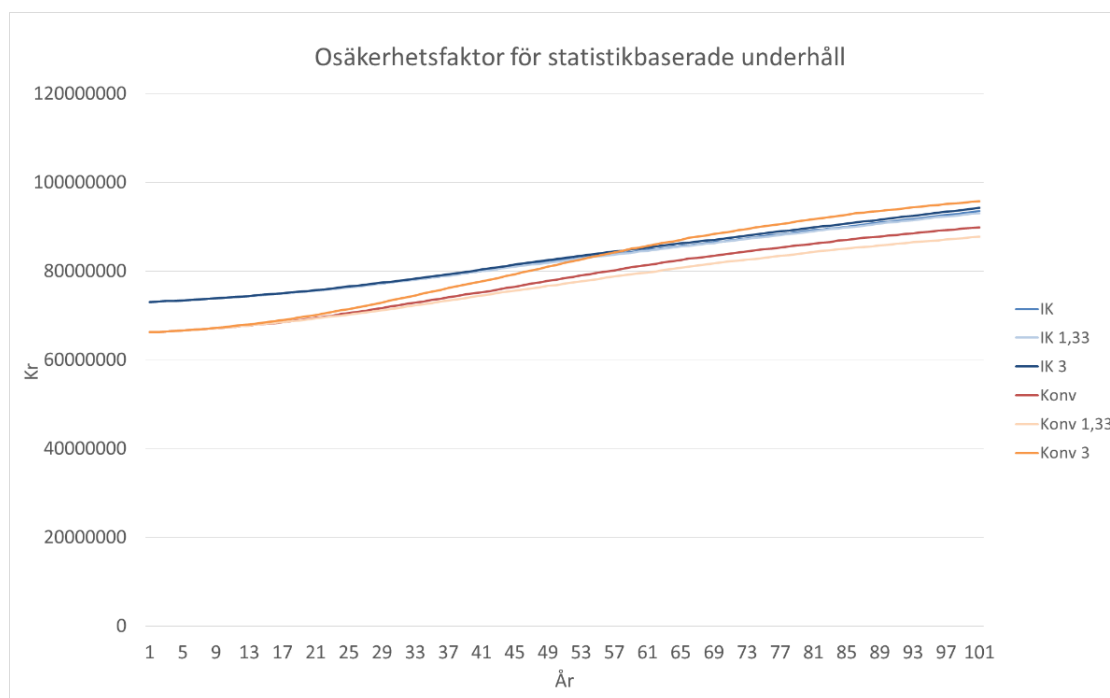
I kapitel 5.9 Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser och underhållskostnader beskrivs hur underhållen hanteras i LCC-studien och i kapitel 6.3 Underhåll hur de hanteras av modellen. Som beskrivs i kapitel 6 Modell spänns trapetsfördelningens zon 1 upp utifrån Hedbrant och Sörmes (2001) osäkerhetsnivåer. I Scenario 1 och Scenario 2 antogs osäkerhetsnivå 3, vilket motsvarar

osäkerhetsfaktor 2. Nedan analyseras hur detta antagande påverkar resultatet genom att ändra osäkerhetsnivån för de statistikbaserade underhållen i Scenario 2. Anledningen till att det bara är de statistikbaserade underhållen som testas är att övriga underhåll bygger på uppgifter från leverantörer som angivit gränserna för zon 1. Osäkerhetsnivå 2 och 4 testas vilket motsvarar faktorerna 1,33 och 4. Hur de olika osäkerhetsfaktorerna principiellt påverkar trapetsfördelning syns i *Figur 92*.



Figur 92: Trapetsfördelningens förändring vid osäkerhetsnivå 2 (faktor 1,33), 3 (faktor 2) och 4 (faktor 4)

Resultatet på livscykelkostnaderna i Scenario 2 efter dessa förändringar redovisas i *Figur 93*:



Figur 93: Medelkostnaden för hela livscykeln för Scenario 2 med osäkerhetsnivåerna 1,33, 2 och 4

Som kan ses i *Figur 93* leder en ökad osäkerhetsfaktor på antalet statistikbaserade underhåll till en högre livscykelkostnad vilket syns tydligast vid konventionell förläggning. Detta beror på att en ökad osäkerhetsfaktor leder till ett ökat antal underhåll och att underhållen är dyrare vid konventionell förläggning och därför påverkar totalkostnaden mer. Orsaken till att en ökad osäkerhetsfaktor leder till ett ökat antal underhåll beror på, som Hedbrant och Sörme (2001) konstaterar, att intervallen blir mer osymmetriska för högre nivåer. Detta leder i sin tur till att medelvärdet som används som input till underhållsberäkningarna förskjuts och blir större än det ursprungliga värdet. Hur mycket de olika osäkerhetsfaktorerna påverkar slutresultatet jämfört med osäkerhetsfaktor 2 framgår i *Tabell 17*.

Tabell 17: Förändring av totala livscykelkostnader till följd av förändrade osäkerhetsnivåer, relativt osäkerhetsfaktor 2

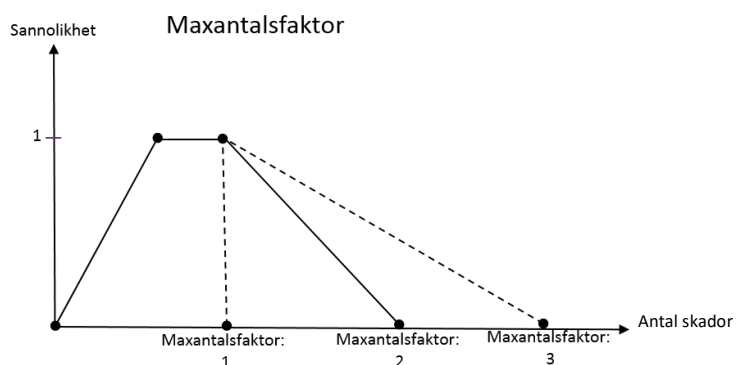
| Osäkerhetsfaktor | Förändrad livscykelkostnad IK | | Förändrad livscykelkostnad Konv | |
|------------------|-------------------------------|---------|---------------------------------|----------|
| | Procentuell | Kostnad | Procentuell | Kostnad |
| 1,33 | -0,5 % | 0,4 mkr | -2,4 % | -2,1 mkr |
| 4 | 0,8 % | 0,7 mkr | 6,5 % | 5,9 mkr |

Ur tabellen kan det konstateras att osäkerhetsnivåernas inverkan på resultatet är små för infrakulverten, så pass små att de ligger på gränsen till det medelfel som kan förväntas utifrån simuleringarna med s100, vilket konstateras under 8.1 Val av simuleringsstorlek. För konventionell förläggning är de något större, men som tidigare konstaterats är detta att förvänta då underhållen är dyrare för denna förläggningsteknik. Skillnaden mellan olika osäkerhetsnivåer har inverkan på de totala livscykelkostnaderna vilket visar på att valet måste göras med omsorg.

Att värdera datas osäkerhetsnivå är svårt då definitionerna av osäkerhetsnivåerna inte är explicita. I slutändan blir det därför upp till användaren av modellen att bedöma vilken osäkerhetsnivå som anses mest representativ. Modellen kan vara till hjälp genom att den kan utföra denna typ av analyser, vilket möjliggör för användaren att variera osäkerhetsnivåerna för att undersöka vilken effekt dessa antagande får på slutresultatet. Det kräver dock vissa manuella justeringar för att erhålla dessa resultat.

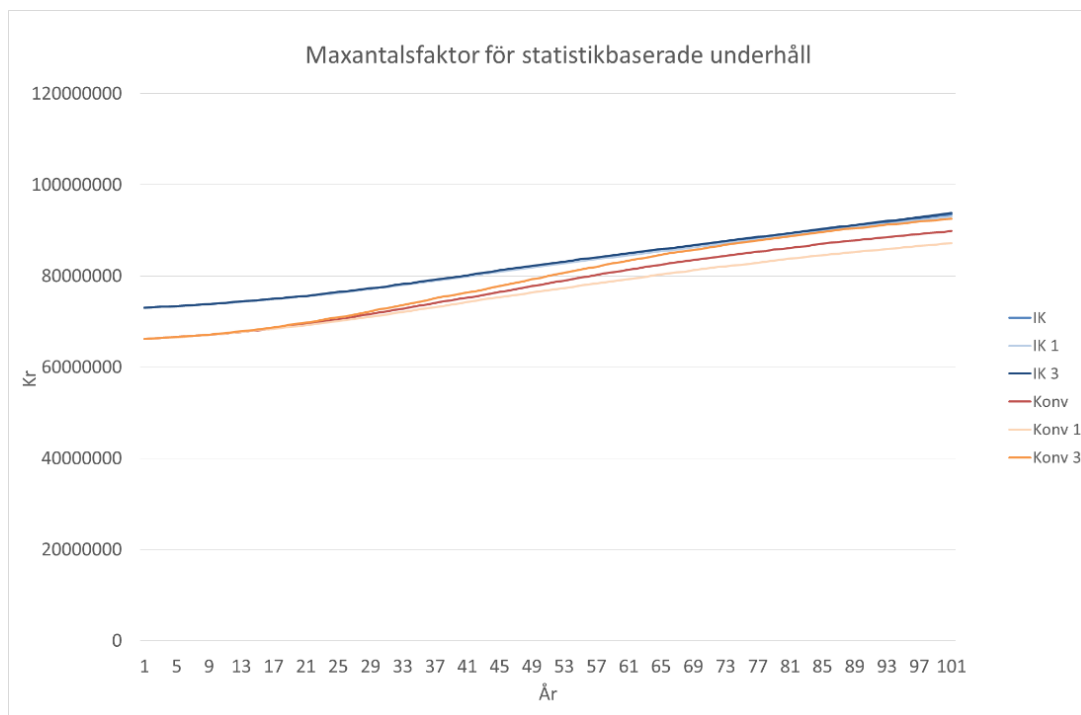
8.3 Val av maxantalsfaktor

Maxantalsfaktorn är den faktor som anger det definitiva maxvärdet i trapetsfördelningen. Faktorn multipliceras med det övre gränsvärdet för Zon 1 och på så sätt spänns den avslutande delen på trapetsfördelningen upp (se 3.5 Teori om datainsamling och datahantering). Den maxantalsfaktor som används vid modelleringen av antalet statistikbaserade underhåll antas vara 2 i fallstudien. Detta värde motiverades med att det erbjuder möjligheten att fånga upp extremfall som kan inträffa. Hur stora eller små dessa extremfall kan tänkas vara är svårt att argumentera för eller emot då det är många olika faktorer som orsakar brott på ledningar och kablar (se avsnitt 5.9 Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser). För att undersöka effekten av detta antagande varieras därför denna maxantalsfaktor mellan 1 och 3 och hur detta påverkar trapetsfördelningens max-värde för antal underhåll framgår i Figur 94.



Figur 94: Olika maxantalsfaktorers inverkan på möjlighetsfördelningens utformning för antalet underhåll

Ur Figur 94 framgår att en ökad maxantalsfaktor leder till ett högre medelvärde för antalet underhåll. Det leder också till högre extremvärden vilket kan få en inverkan på totalresultatet. Hur de olika maxantalsfaktorerna påverkar de totala livscykelkostnaderna för infrakulverten respektive konventionell förläggning testas för Scenario 2 och resultatet framgår i Figur 95.



Figur 95: Maxantalsfaktorns påverkan på medelkostnadskurvan. Maxantalsfaktor 1 och 3 jämförs med 2 i Scenario 2.

Maxantalfaktorn påverkar, precis som osäkerhetsnivåerna, konventionell förläggning mer än infrakulverten utifrån fallstudien. Detta kan förklaras av samma argument som vid analysen av osäkerhetsnivåernas inverkan på totalresultatet, nämligen att kostnaderna är högre för underhållsåtgärderna vid konventionell förläggning. Hur kostnaderna påverkas av maxantalfaktorn framgår tydligare i *Tabell 18*.

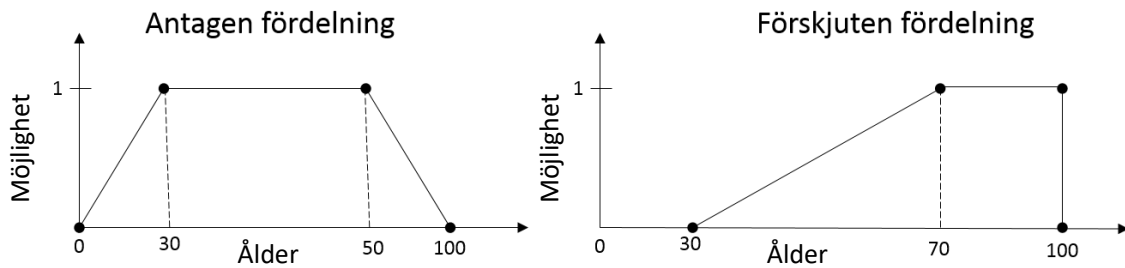
Tabell 18: Maxantalsfaktorns påverkan på livscykelkostnaden där maxantalsfaktor 1 och 3 jämförs med 2 för Scenario 2.

| Maxantalsfaktor | Förändring livscykelkostnad IK | | Förändring livscykelkostnad Konv | |
|-----------------|--------------------------------|----------|----------------------------------|----------|
| | Procentuell | Kostnad | Procentuell | Kostnad |
| 1 | -0,5 % | -0,5 mkr | -2,9 % | -2,6 mkr |
| 3 | 0,3 % | 0,3 mkr | 3 % | 2,7 mkr |

Som kan ses påverkas kostnaderna för konventionell förläggning mer än kostnaderna för infrakulverten. För infrakulverten ligger dessutom variationen inom det max-fel som erhålls vid s100 vilket gör det svårt att göra några andra analyser än att valet av maxantalsfaktor påverkar slutresultatet mindre än valet av osäkerhetsnivå.

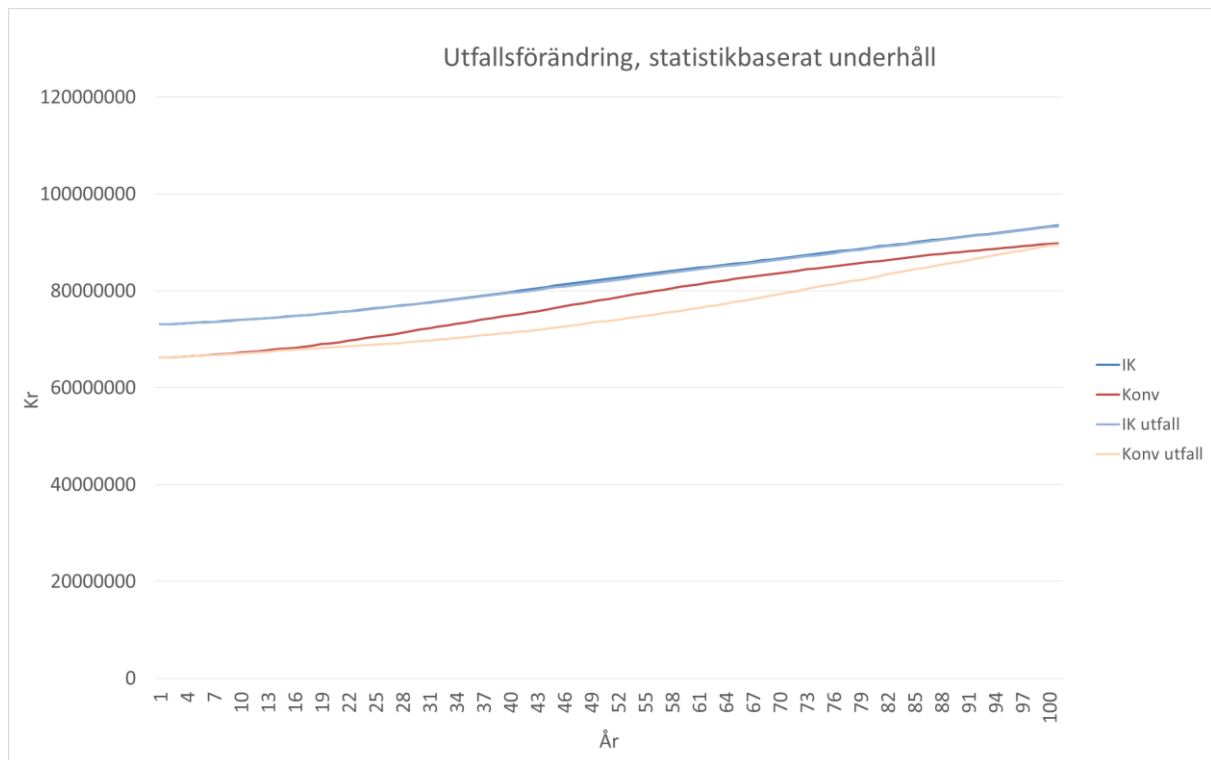
8.4 Val av åldersfördelning

Möjlighetsfördelningen för när de statistikbaserade underhållen sker beskrevs i detalj i kapitel 5.9 *Identifierade och modellerade underhållsfrekvenser*. Där konstateras att åldersfördelningen för fjärrvärme-, el- och optonet varit svårt att identifiera i fallstudien och således gjordes antagandet att dessa nät följer åldersfördelningen för VA-ledningar. Detta antagande bör inte påverka de totala livscykelkostnaden utan enbart skjuta kostnaderna i tiden eftersom samtliga kostnader beräknas i nuvärde. Valet testas genom att förändra möjlighetsfördelningen för statistikbaserade underhåll enligt *Figur 96*.



Figur 96: Ursprunglig antagen åldersfördelning samt en förskjuten åldersfördelning för statistikbaserat underhåll

Möjlighetsfördelningen förskjuts så att underhållen sker senare i livsryckeln än i fallstudien. I Figur 97 ses förändringarna i medelkostnadsdiagram för Scenario 2.



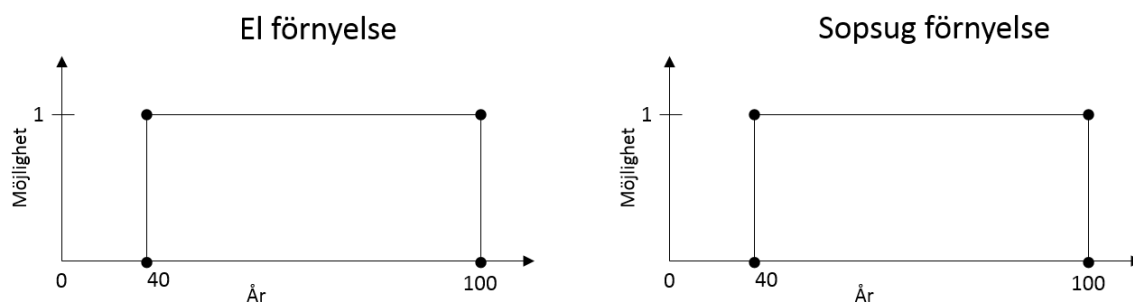
Figur 97: Skillnad i livsryckelkostnad med förskjuten möjlighetsfördelning där "utfall" innebär förändrad åldersfördelning

Som kan ses skiljer sig inte resultatet utan det som skiljer är kurvans karakteristik under livsryckeln. Tydligast ses skillnaden vid konventionell förläggning eftersom de statistikbaserade underhållen kostar mer att åtgärda och händer oftare. Detta innebär att om analyser kring break-even-tid ska utföras eller om diskontering används vid simuleringarna krävs ytterligare datainsamling kring när underhållen sker. Modellens förmåga att modellera olika typer av åldersfördelningar kan därmed användas till att jämföra olika antaganden.

8.5 Inverkan av att inkludera förnyelse av elnät och sopsugssystem

En av de potentiella fördelarna med förläggning i infrakulvert är att kostnaden för schaktning inte finns vid underhållsarbeten. Störst schaktning krävs vid förnyelse av delar eller hela ledningsnätet men på grund av databrist för i vilken omfattning förnyelse sker samt vad förnyelse kostar inkluderades detta inte i fallstudien. För att analysera förnyelsens möjliga påverkan jämfört med de övriga underhållen görs däremot en analys kring hur en förnyelse av el- och sopsugsnätet påverkar livsryckelkostnaden. Dessa två nät valdes på grund av att data har kunnat identifieras samt att det kan vara en viss skillnad på ett rör- och kabelbaserat system. Förnyelsen för dessa system hanteras på

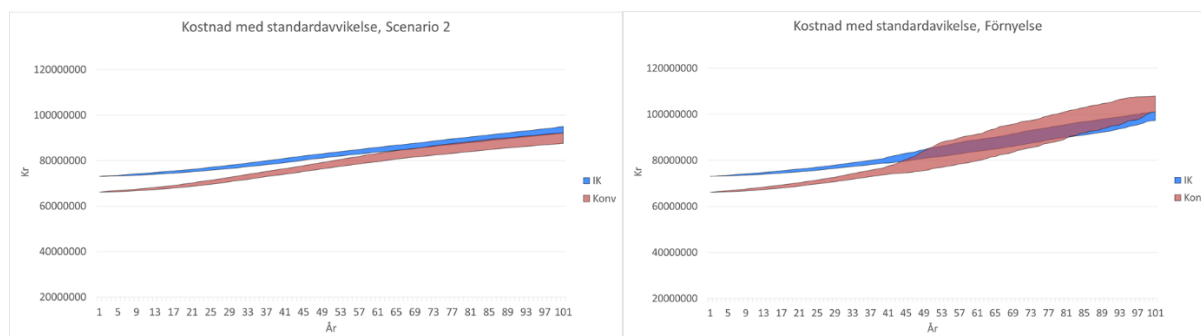
samma sätt som livslängdsbaserade underhåll i modellen. Livslängden för en el-kabel är ca 50 år och för sopsugsrör 60 år. Utifrån dessa värden antogs att en förnyelse bör ske inom 100 år. För att modellera detta sattes en kvadratisk fördelning som ger förnyelse mellan år 40 och 100 enligt *Figur 98*.



Figur 98: Trapetsfördelning för förnyelse av sopsugs- och elnätet

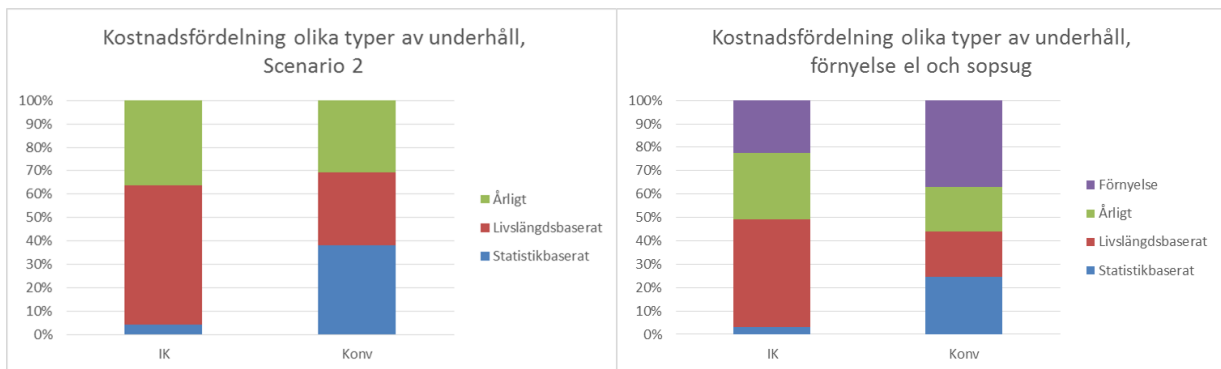
Kostnaden för förnyelsen av hela elnätet i fallstudien är 0,5 miljoner kr för kablar i infrakulverten, vilket motsvarar installationskostnaden, och 2,3 miljoner kr för kablar förlagt med konventionell teknik utifrån EBR-katalogens P1-nivå. Sopsugsrören kostar 5,5 miljoner kr att förnya i infrakulverten och 11,3 miljoner kr för rör förlagt med konventionell teknik. Båda kostnaderna är beräknade utifrån uppgifter från leverantören (Johansson J.E, 2016).

I *Figur 99* ses skillnaden i livscykelkostnad med standardavvikelse för Scenario 2 och då förnyelse av sopsugs- och elnät inkluderas. Som kan ses ökar kostnaden för båda förläggningsteknikerna men tydligast är skillnaden för konventionell förläggning. Detta beror på den betydligt högre kostnaden för förnyelse då schaktning krävs. Att förnyelsen sker någon gång mellan 40 och 100 år syns även det tydligast på kurvan för konventionell förläggning. Medelvärdet på livscykelkostnaden ökar med 6 % vid förläggning i infrakulveten och med 30 % vid konventionell förläggning.



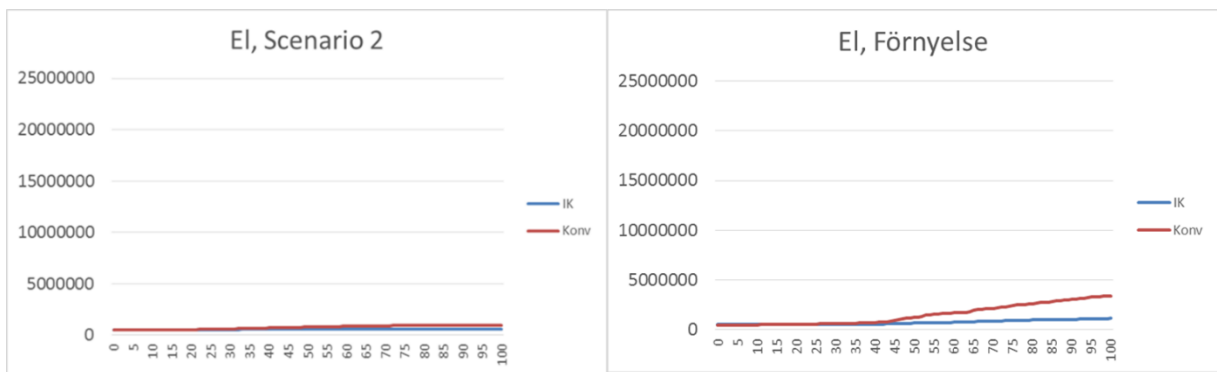
Figur 99: Livscykelkostnad med standardavvikelse då förnyelse av sopsugs- och elnätet förnyas en gång under 100 år.

Som kan ses påverkar förnyelsen av enbart två system den totala kostnaden för underhållet mycket. För att analysera hur kostsamma förnyelsen av sopsugs- och elnätet visas i *Figur 100* kostnadsfördelningen för de olika underhållstyperna. För nätet lagt med konventionell förläggning motsvarar förnyelsen cirka 52 % av de totala underhållskostnaderna. Om data kring de övriga nätens förnyelse funnits tillgänglig hade förnyelsen dominerat ännu mer.



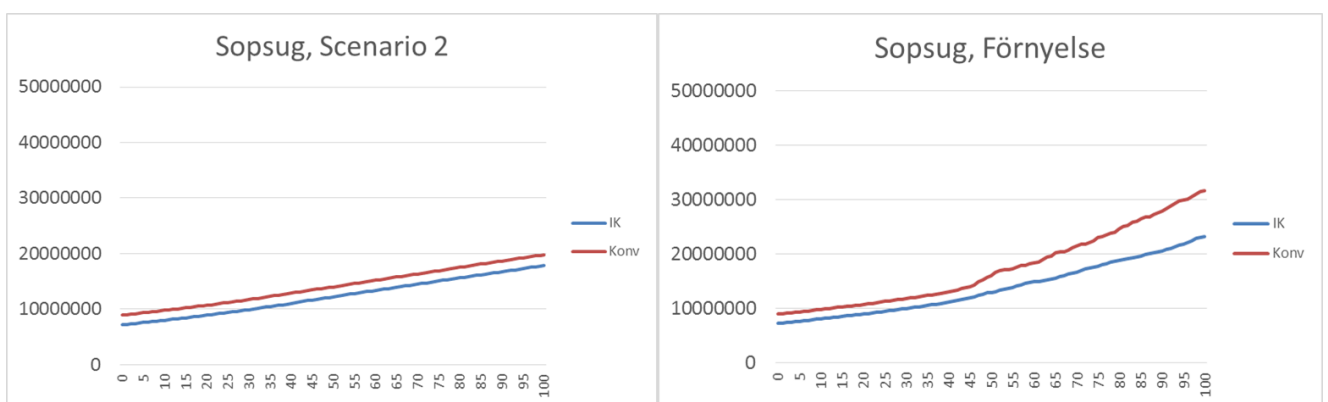
Figur 100: Procentuell fördelning av underhållskostnaderna för olika typer av underhåll. Det vänstra diagrammet visar på kostnadsfördelning i Scenario 2 och den högra vid förnyelse av sopsugs-och elnätet

Vid förläggning i infrakulverten ökar totalkostnaden för elnätet med 88 % då förnyelse inkluderas. Ännu större skillnad är det för elnätet förlagt på konventionellt sätt. Där är kostnadsökningen 256 % och skillnaderna synliggörs i Figur 101 där livscykelkostnaden för elnätet vid Scenario 2 och då förnyelse sker framgår. Elnätets förnyelse ökar även den totala livscykelkostnaden med 1 % för förläggning i infrakulvert och 3 % vid konventionell förläggning.



Figur 101: Elnätets livscykelkostnad. Den vänstra bilden visar på elnätets kostnader vid Scenario 2 och den högra bilden visar kostnaden då förnyelse sker

Sopsugsnätets livscykelkostnad påverkas procentuellt mindre vid förnyelse jämfört med elnätet, 30 % vid förläggning i infrakulvert och 62 % vid konventionell förläggning. Däremot påverkar en förnyelse av sopsugsnätet den totala livscykelkostnaden med 6 % för förläggning i infrakulvert och 27 % vid konventionell förläggning, en hel del för att endast vara ett system.



Figur 102: Sopsugsnätets livscykelkostnad. Den vänstra bilden visar på sopsugsnätets kostnader vid Scenario 2 och den högra bilden visar kostnaden då förnyelse sker.

Ovanstående analyser grundas på antagandet att förnyelsen av el- och sopsugsnät innebär att hela nätet byts ut och bör analyseras. I *Tabell 19* ses den procentuella skillnaden i livscykelkostnad för förläggningsteknikerna vid olika andelar förnyelse. På grund av att det är dyrare att utföra förnyelse vid konventionell förläggning påverkas även livscykelkostnaden mer för denna förläggningsteknik.

Tabell 19: Procentuell skillnad i livscykelkostnad jämfört med Scenario 2 för olika förnyelseandelar.

| Andel förnyelse | 25% | 50% | 75% | 100% |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|------|
| Förändrad livscykelkostnad för IK | 2% | 3% | 5% | 6% |
| Förändrad livscykelkostnad för konv | 4% | 9% | 12% | 16% |

Detta visar återigen vilken typ av analyser modellen kan utföra. För fallet med förnyelse kan det konstateras att modellen kan användas till att jämföra kostnaderna för olika förnyelsetakter. Det främsta användningsområdet för detta är vid planering av framtida förnyelser och underhållsarbeten.

8.6 Teoretisk validering av modellen

Vid modellutveckling är validering viktigt för att göra en rimlighetsbedömning av resultaten. Den första punkten som Páez-Pérez och Sánchez-Silva (2016) lyfter fram är validering av bakomliggande teori mot de verkliga system som undersöks. I detta fall bygger modellen på information från fallstudien vilken utformades för att för att representera verkligheten inom rimliga gränser. Bland annat ingår den stokastiska karakteristiken för ledningsbunden infrastruktur i modellen vilket stämmer överens med den teori som studerats. De känslighetsanalyser som dessutom kan utföras av modellen erbjuder också möjligheten att testa och ändra variabler om det skulle komma fram uppgifter om att informationen som ligger till grund för modellen är missvisande. Nästa valideringspunkt innebär att validera modellen mot teorin. Då modellutvecklingen följde en relativt smal litteratursökning kunde litteraturen följas, något som kunde blivit svårare om mer litteratur tagits hänsyn till. Hur modellen förhåller sig till teorin framgår tydligast i kapitel 4.1 *Metod för modellutveckling*. Dock innebär den begränsade litteraturen samtidigt att modellen kan sakna möjligheter som annan teori kunde lyft fram.

Då simuleringsprogrammet utvecklats av en utomstående expert är validering enligt Páez-Pérez och Sánchez-Silva (2016) tredje punkt, simuleringsprogram kontra modellen, svårt att göra i detalj. Det kan konstateras att simuleringarna utförs som tänkt och uppfyller de krav som ställs vilket tyder på ett väl uppbyggt program som dessutom fungerar för de olika scenarier som testas. Att validera koncepten i modellen mot mätbara indikatorer i de verkliga systemen är även det svårt då det är dessa indikatorer som även är bakomliggande data. Då modellen därigenom bör överensstämja med dessa indikatorer kan det å andra sidan hävdas att modellen uppfyller detta. Den avslutande valideringspunkten är att validera resultaten i modellen mot observationer i de verkliga systemen. Kostnadsmissigt stämmer de olika underhållskostnaderna överens med vad ledningsägarna uppgivit och även installationskostnaden motsvarar vad involverade parter har uppgett. Antalet underhåll är svårt att validera då det är en prospektiv analys. Det som kan sägas kring detta är att antalet underhåll förhåller sig till historiska underhållsfrekvenser och därmed får anses representativa. Modellen erbjuder även här möjlighet att variera variablerna vilket gör att detta kan anpassas efter den information som erhålls vid en vidare informationsökning.

Utifrån valideringsaspekterna ovan och de avgränsningar som gäller för fallstudien kan det konstateras att modellen uppfyller de krav som ställs. Avgränsningarna för fallstudien begränsar modellens användningsområde och om exempelvis miljöpåverkan inkluderas i en vidareutveckling av modellen bör en ny validering genomföras.

8.7 Diskussion kring utvecklad modell utifrån teori och önskemål

Den framtagna modellen för att simulera livscykelkostnad för infrastruktur förlagd i infrakulvert jämfört med konventionell förläggning analyseras med utgångspunkt i de krav och önskemål som identifierats i teori och metod. Dessa krav och önskemål sammanfattas i *Figur 13* som ligger under rubriken *4.1.3 Arbetsprocess för modellens utformning*.

Ett önskemål som uppdragsgivarna framförde var att modellen ska ge användaren möjlighet att analysera resultatet i detalj. I kapitel 7 *Resultat* där resultat för fallstudien studien redovisas ges exempel på hur modellen kan visa resultat för LCC-studien och utföra känslighetsanalyser. Eftersom modellen är utformad för att även kunna hantera miljöpåverkan bör liknande resultat ges även vid en LCA. Detta kan dessvärre inte bekräftas eftersom LCA-analyser ännu inte genomförts med modellen.

Enligt Boussabaine och Kirkham (2008) bör en modell för LCC-analyser kunna hantera diskontering. Modellen kan hantera diskontering men eftersom LCC-studien endast är en inledande del av ett större forskningsprojekt valdes nuvärde då det underlättade datainsamling och beräkningar. Vid en mer omfattande datainsamling kan en ränta tas fram och modellen är förberedd för att utföra beräkningarna.

LCC-studier för en ny teknik, till exempel för infrakulverten i Vallastaden, är en prospektiv analys. Vid prospektiva analyser är osäkerheterna ofta stora och modellen bör därför kunna hantera detta (Boussabaine och Kirkham, 2008). I LCC-studien som utförts i fallstudien var de största osäkerheterna kopplade till underhållsprocesserna. Med hjälp av Bo Perssons program i Visual basic kan modellen hantera osäkerheter genom att beskriva dessa som möjlighets- och sannolikhetsfördelningar. I modellen har en trapetsfördelning antagits för att hantera osäkerheterna i fallstudien. Att osäkerheterna har denna karakteristik är inte givet och modellen kan därför hantera även andra typer av sannolikhetsfördelningar. Dock har datainsamlingen för LCC-studien till viss del haft utgångspunkt i trapetsfördelningen och såldes är en analys av hur andra typer av fördelningar hade påverkat resultat svår att utföra utan ytterligare datainsamling. De stora osäkerheterna och att inputen för underhållet är sannolikhetsfördelat medför även att resultatet från flera simuleringar måste samlas in för att ge ett relevant resultat. Modellen kan hantera även detta tack vara Bo Persson som bidrog med kollektorer som sparar resultatet för varje körning av modellen och dessutom tar fram medelvärden samt standardavvikelsen för de körningar som gjorts.

En svaghet är att modellen i nuläget inte kan hantera ”för stora” ledningsnät. Då ledningsnäten blir stora kommer det även ske fler underhåll och som beskrivs i *6.3 Underhåll* kan modellen maximalt hantera 30 underhåll av varje statistikbaserad underhållstyp. Detta innebär att det finns en övre gräns för hur stora nät som kan analyseras. En möjlig lösning på detta är att vidareutveckla modellen så att den delar upp nätet i mindre, hanterbara delar var för sig för att sedan summera livscykelkostnaderna och miljöpåverkan.

Även att modellen hanterar förnyelse som underhåll baserat på livslängd är en svaghet då det ger en skev bild på vad förnyelse innebär. När ett nät förnyas bör inte underhållsfrekvensen för det förnyade nätet vara samma som ett icke-förnyat nät. En möjlig utveckling av detta är att övriga underhåll på något sätt nollställs och efterliknar underhållen vid år 0. Modellens nuvarande utformning klarar inte av att hantera sådana korrelationer vilket bör vidareutvecklas för att ge hanteringen av förnyelse ett mer rättvisande resultat.

Både teorin (från IEC (2004)) och önskemålen från uppdragsgivarna lyfter fram vikten av att modellen bör vara flexibel. Som beskrivits i *6.1 Ingångsparameterar* kan användaren ange storlek på nät, nätets delar och vad som ska analyseras. Dessutom möjliggör de ”manuella skruvarna” för variation av kostnader och underhållsfrekvenser på ett enkelt sätt utan att behöva ändra bakomliggande data, vilket används till de känslighetsanalyser som utförs i *7.2 Känslighetsanalys av bakomliggande antaganden*. Detta tyder på flexibilitet i modellen. När statistikbaserade underhåll sker i tiden går inte att ändra utan

att förändra bakomliggande data. Detta påverkar, som analyserats i 8.4 *Val av åldersfördelning*, inte den totala livscykelkostnaden då kostnaderna enbart förskjuts i tiden.

Enligt Frangopol et al. (2004) bör de ansvariga för ledningsbunden infrastruktur ha ett större fokus på livscykelkostnader för att planera investeringar i infrastrukturen. För att utföra sådana analyser finns behov av beräkningsverktyg. Beräkningsverktyget som utvecklats i projektet är utformat för att jämföra förläggning med infrakulvert med konventionell förläggning men skulle även kunna användas enskilt för varje förlängningsteknik för att öka kunskapen kring hur nätens ekonomi ser ut över livscykeln. Modellen är som i avsnitt 6.1 *Ingångsparametrar* beskrivits, uppbyggd så att nätets karakteristik definieras av infrakulvertens utformning. Eftersom flest ledningsnät läggs med konventionell förläggning i Linköping så är rimligtvis behovet för ett sådant verktyg störst för den förläggningstekniken.

Modellens struktur kan behöva modifieras något för att använda det som ett verktyg för livscykelanalyser för enbart konventionell förläggning. Modellens nuvarande utformning innehåller de nödvändiga delarna för att undersöka vilka underhåll som är mest kostsamma, när de förväntas ske och vilka investering som därmed kan förväntas. Vid modifiering kan det även gå att få in leveranssäkerhet som en aspekt som går att beräkna i modellen. Detta kräver mer information kring de verkliga nätens status men modellen kan använda denna information till att beräkna möjliga underhållsbehov som krävs för att uppnå en viss leveranssäkerhet.

9 Slutsatser

Vad behöver ett kombinerat LCA- och LCC-verktyg ta hänsyn till vid modellering av ledningsbunden infrastruktur?

Ett verktyg som utvecklas för att genomföra LCA- och LCC-beräkningar behöver kunna hantera flertalet livscykelkelfaser för att möjliggöra fler användningsområden och analyser av valda produkter. Detta är självklart kopplat till de systemgränser som gäller för de studier som tillämpar verktyget men genom att möjliggöra val att inkludera eller exkludera flera livscykelkelfaser får verktyget ett bredare användningsområde. För modeller som ska tillämpas på ledningsbunden infrastruktur är detta dock ett svårt val att göra då infrastrukturens långa livslängd innebär stora osäkerheter.

Att kunna hantera osäkerheter är också viktigt för LCA- och LCC-modeller. Tidigare studier lyfter fram valet att antingen inkludera eller exkludera osäkerheter (Feiz, 2016; Finnveden et. al, 2009) men för ledningsbunden infrastruktur bör osäkerheterna inkluderas. Orsaken till denna rekommendation är infrastrukturens stokastiska karaktär där omgivningens inverkan på underhållsfrekvenser och livslängder inte är lätt att förutsäga. Naturliga händelser och olyckor påverkar vilket underhållsbehov som uppkommer och genom att inkludera dessa osäkerheter kan en uppfattning skapas av vilka risker som förekommer. För att underlätta hanteringen av beräkningarna rekommenderas även Monte Carlo-simulering som är utformat för att hantera precis detta (Boussabaine och Kirkham, 2008).

Dessa osäkerheter kan också innebära att inventeringsanalysen måste utformas för att kunna skaffa en uppfattning av hur stora osäkerheter som förekommer. Därigenom kan inte specifika svar förväntas erhållas utan bredare diskussioner kring infrastrukturens beteende anses mer givande och är framförallt användbart vid känslighetsanalyser. Utifrån erfarenheterna från denna fallstudie är inventeringsanalysen också en tidskrävande process som kräver tålamod, planering och gärna en plan B. Uppfattning från inventeringsanalysen är att det finns mindre dataunderlag kring skadestatistik än förväntat på flera ledningsnät vilket också det ställer krav på att modellen utformas för att hantera data med olika detaljnivå.

Ovanstående aspekter är även viktiga att tänka på vid resultatpresentationen. Ett verktyg som ska svara på spekulativa frågor bör kunna redovisa resultat på en form där de bakomliggande osäkerheterna framgår. Återigen rekommenderas därför Monte Carlo-simulering som beräkningsmetod då det möjliggör denna presentation. Olika detaljnivåer av resultatet kan också bidra med fördjupade kunskaper och förståelse för enskilda processer bidrar till de sammanlagda resultaten.

Slutligen bör ett LCA- och LCC-verktyg erbjuda möjligheten att genomföra känslighetsanalyser. Då detta är en viktig del av LCA-metodiken för att kontrollera vilken inverkan olika antaganden och avgränsningar har på resultatet behövs de för att sätta resultatet i perspektiv. För infrastruktur är känslighetsanalyser av bakomliggande antaganden viktigt för att granska deras inverkan. I praktiken kan detta användas av ledningsägarna till att föra in egna värden i modellen och på så sätt ge en ökad förståelse och kunskap kring sin verksamhet.

Hur kan livscykelkostnaderna för förläggning i infrakulvert jämfört med konventionell förläggning beräknas och redovisas i en modell, utifrån en fallstudie?

Modellen beräknar livscykelkostnaderna utifrån Monte Carlo-metoden. Fallstudien innefattar osäker data och modellen kan presentera resultatet med standardavvikelse för att belysa hur stora osäkerheterna är. Dessutom kan beräkningar utföras både på övergripande systemnivå och för varje ledningsnät. Vidare kan varje underhållsåtgärd analyseras i detalj för att bidra med ökad förståelse och kunskap kring vilka åtgärder som ger upphov till störst kostnader och när i tiden de sker. För att granska resultatet kan modellen även utföra känslighetsanalyser genom att variera variabler.

Hur påverkas livscykelkostnaderna av olika förutsättningar som geologi, underhållsfrekvenser etc.?

Utifrån fallstudiens resultat framstår infrakulverten som ett mer kostsamt alternativ än konventionell förläggning, både vid ”normala” förutsättningar och förutsättningar som kräver dubbelspont. Detta återspeglar endast de kostnader som identifierats i fallstudien och det finns flera potentiella fördelar som inte kvantifierats, exempelvis återvinning eller förnyelse. Om dessa inkluderas i framtida studier kommer resultatet troligtvis se annorlunda ut då det i samband med fallstudien identifierats flertalet fördelar vars värde kan uppväga skillnaderna i nuvarande resultat. Ett sådant exempel är byggbar yta som kan tillgodoses vid förläggning i infrakulvert.

De analyser som utförts kring möjliga förbättringar av kulverttekniken visar på vikten av att veta förutsättningarna för att kunna göra rättvisande jämförelser. De visar också på att kulvertens ekonomiska prestanda jämfört med konventionell förläggning är starkt förknippat med förutsättningarna som råder på platsen. Exempelvis är skillnaden i grundinvestering betydligt mindre då spont förutsätts behövas. Även vilken ledningslängd som ska jämföras har betydelse vid jämförelse av livscykelkostnaderna.

Den underhållstyp som medför högst kostnader är förnyelse. Då data kring detta inte kunde identifieras för samtliga ledningsnät utelämnades detta från fallstudien men vid de tester som utfördes framgår att infrakulverten är klart fördelaktig kostnadsmissigt. Denna aspekt är, beroende på vilken tidsperiod som granskas, därför viktig att utreda mer för att skapa rättvisande jämförelser.

9.1 Framtida studier

Om modellen ska kunna ge ett mer tillförlitligt resultat, användas till beslutsfattande eller strategisk planering av infrastruktur är det framförallt bakomliggande data som måste förfinas. Det finns stora luckor kring vissa ledningsnät i fallstudien och således skiljer sig datakvaliteten mellan de olika nätet kraftigt. Det krävs djupare studier av nätens karakteristik för att ge modellen ett mer tillförlitligt resultat. Detta kan bland annat genomföras genom att ledningsägarna på de olika ledningsnäten inför enhetliga rutiner för att samla in statistik och information kring varför skador uppkommer.

Flera av de potentiella fördelarna med infrakulverttekniken har därmed inte kunnat utredas inom denna fallstudie som begränsats till att beräkna en konventionell LCC. Modellen som utvecklats i projektet kan användas både vid LCA- och LCC-analyser vilket innebär att den kan ses som ett verktyg för miljö-LCC-studier (enligt Lichtenvor et. als 2008 definitioner). För att användas som detta krävs vidare informationssökning och datainsamling vilket kan bidra till ytterligare information kring ledningsbunden infrastrukturens miljöpåverkan under livscykeln, vilket även kan användas för att jämföra olika förläggningstekniker. Andra intressanta potentiella fördelar med kulvert-tekniken som inte kunnat utredas är de som är kopplade till samhällsekonomiska och mjuka värden. Kulverten har flera troliga fördelar inom dessa som inte kunnat utredas inom detta projekt. Om det är möjligt att värdesätta dessa fördelar och modellen utvecklas för att inkludera de kan modellen betraktas som ett verktyg för sociala-LCC analyser.

Som nämnts i *7.4 Diskussion kring infrakulverten i fallstudien* och *8.5 Inverkan av att inkludera förnyelse av elnät och sopsugssystem* finns det även ytterligare aspekter på ledningsbunden infrastruktur som kan vara av intresse ur modelleringsperspektiv. Hur förnyelsen ska hanteras och även hur till exempel samhällsekonomi kring ledningsbunden infrastruktur ska analyseras kan studeras vidare. Hur återvinningen av ledningsnäten skiljer sig mellan kulvertförläggning och förläggning med konventionell teknik är även det i behov av fortsatt arbete.

Traditionellt sätt har Tekniska verkens olika nätspecifika avdelningar jobbat isolerat med fokus enbart på sitt eget ledningsnät. För att i framtiden kunna nyttja att en vidareutvecklad modell krävs en övergripande roll på företaget som har ett helhetsperspektiv på all ledningsbunden infrastruktur som Tekniska verken ansvarar för. Den rollen upplevs saknas i den nuvarande organisationen. Ett mer utbrett samarbete över avdelningsgränserna skulle även kunna bidra med en mer systematisk syn på underhållsstatistik så att skillnaden i datakvalité blir mindre mellan de olika ledningsnäten.

Referenser

- Alesand, A. 2013. *Kostnader vid reparation av vattenläckor i Linköpings kommun*. Examensarbete Tekniska högskolan vid Linköpings universitet.
- Andersen, S., M., 2007. *An introductory note on the environmental economics of the circular economy*. Springer, Sustainability Science 2 (2007): 133-140
- Andersson, S., 2013. *Urban mining potential in local power grids: Hibernating copper and aluminum in Linköping*. Examensarbete Tekniska högskolan vid Linköpings universitet.
- Bengtsson, J., Ivansson, P. och Werner, C., 2006. *Kraftkabelförläggning i mark – en studie av produktionsmetoder*. Examensarbete Institutionen för teknik och design, Växjö universitet.
- Boussabaine, A. och Kirkham, R. 2008. *Whole. Life-cycling costing: Risk and risk responses*. Chichester, Storbritannien.
- Bäcklund, Å., 2016. Muntligt 2016-10-18. Projektcontroller vattenavdelningen Tekniska verken. Arbetar med att ta fram entreprenadkostnader.
- Cranser, H., 2013. *Trycksatta huvudvattenledningar, Guide för material och schaktfria metodval vid åtgärder av vattenledningar*. Examensarbete Kungliga tekniska högskolan.
- Danielsson J., 2016. Muntligt 2016-11-08. Projektör Tekniska verken Linköping nät.
- Energimarknadsinspektionen, 2014. *Din totala kostnad för el*. Faktablad hämtad 2016-12-06: http://ei.se/Documents/Publikationer/fakta_och_informationsmaterial/Din_totala_kostnad_for_el.pdf
- EU kommissionen, 2010. *General guide for Life Cycle Assessment – detailed guidance*. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.
- Feiz, R., 2016. *System analysis for eco-industrial development – applied on cement and biogas production systems*. Doktorsavhandling, Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling, Linköpings universitet.
- Ferm, A., 2016. Muntligt 2016-10-11. Energiingenjör energiavdelningen Tekniska verken. Arbetar med projektering av sopsug.
- Finnveden G., Hauschild M.Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S., Koehler A., Pennington D., och Suh S., 2009. *Recent developments in Life Cycle Assessment*. Journal of environmental management 91:1-21
- Fjärrensyn, 2013. *Historien om fjärrvärmen*. Syntesblad från Fjärrensynprojektet ”Fjärrvärmens affärsmodeller”. Hämtad 2016-12-09: <http://www.fjarrvarmensaffarsmodeller.se/pdf/historien.pdf>
- Fjärrensyn, 2016. *Livslängd för fjärrvärmerör*. Pågående forskningsprojekt. Hämtad 2016-12-05: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Fjarrensyn/Forskning--Resultat/Pagaende-projekt/Teknik/Livslangd-for-fjarrvarmeror/>
- Frangopol D., Kallen M.J., van Noortwijk J.M., 2004. *Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions*. Progress in structural engineering and materials: Vol. 6 Issue 4 (197-212)
- Grebner, M., 2016. Muntligt 2016-10-07. Projektör för el och opto i infrakulverten i Vallastaden.
- Hammarström, L.E., 2016. Muntligt 2016-10-11. Projektledare energiavdelningen Tekniska verken. Ansvarig för underhåll av fjärrvärmenätet.
- Hammarström, L.E., 2017. Email-korrespondens. Projektledare energiavdelningen Tekniska verken. Ansvarig för underhåll av fjärrvärmenätet.

- Hedbrant, J. och Sörme, L., 2001. *Data vaguess and uncertainties in urban heavy-metal data collection*. Water, Air and Soil pollution 1(3-4):43-53.
- IEC, 2004. *International standard. Dependability management, Part 3-3: Application guide – Life cycle costing*. International electrotechnical commission.
- Jigered, L., 2016. Muntligt 2016-10-11. Ingenjör energiavdelningen Tekniska verken. Arbetar med projektering av konventionell förläggning av fjärrvärme.
- Johansson, J.E., 2016. Email-korrespondens. Tekniska verkens kontakt på MariMatic, utvecklare av sopsugssystemet.
- Johansson, L. och Björk, L., 2012. *Geoteknisk PM, Ledningskulvert inom Bo16-området, Vallastaden, Linköping*. Tekniska verken driftum, infrateknik/geoteknik.
- Johansson, M., 2016. Muntligt 2016-10-18. Enhetschef ledningsnät vatten Tekniska verken.
- Jönsson, C.F., 2016. Muntligt 2016-12-09. Driftansvarig pumpstationer Tekniska verken.
- Kallskog, R., 2016. Muntligt 2016-10-19. Projektsamordnare vattenavdelningen Tekniska verken. Arbetar med projektering av serviser.
- Krook, J., Svensson, N., och Wallsten, B., 2015. *Urban infrastructure mines: on the economic and environmental motives of cable recovery from subsurface power grids*. Journal of cleaner production 104 (2015): 353-363
- Lagerwall, B., 2008. *Realräntan i Sverige*. Ekonomiska kommentarer nr. 5 2008. Utgiven av Sveriges riksbank.
- Lakoff, G., 2010. Why it matters how we frame the environment. Environ. Commun.4, 70–81.
- Lichtenvort, K., Rebitzer, G., Huppel, G., Ciroth, A., Seuring, S., Schmidt, W.P., Günther, E., Hoppe, H., Swarr, T. och Hunkeler, D., 2008. *Environmental life cycle costing*. Pensacola, Fla: SETAC; Boca Raton; CRC Press.
- Liljedahl, M., 2017. Muntligt 2017-02-03 Exploateringsingenjör Linköping kommun
- Lindner, M., 2016. Mailkorrespondens. Gruppchef konstruktion energiavdelningen Tekniska verken.
- Linköpings kommun, 2016. *Villkor för arbete inom offentlig plats i Linköpings kommun – vid ledningsgrävningar i kommunens mark, - vid andra arbete som medför ingrepp/skador på kommunens mark*. Första kopia, Miljö och samhällsbyggnadsförvaltningen, Linköpings kommun.
- Lummi, T., 2016. Mailkorrespondens. Kontaktperson för skadestatistik hos svensk fjärrvärme.
- Magnusson, P., 2016. Mailkorrespondens. Produktchef på Wapro, tillverkare av backventiler.
- Malm A., Horstmark A., Jansson E., Larsson G., Meyer A. & Uusijärvi J. 2011a. *Rörmaterial i svenska VA-ledningar – egenskaper och livslängder*. Rapport nr 2011-14 från Svenskt Vatten Utveckling.
- Malm A., Horstmark A., Jansson E., Larsson G., Meyer A. & Uusijärvi J. 2011b. *Handbok i förnyelseplanering av VA-ledningar*. Rapport nr 2011-12 från Svenskt Vatten Utveckling.
- MariMatic, 2015. *MetroTaifun – Ny dimension för avfallshantering*. Informationsbroschyr publ. 2015-11-10.
- Mebratu, D., 1998. *Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review*. Environ. Impact Assess. Rev.18, 493–520
- NKT cables, 2016. *Kraftkabel 1kV*. Hämtad 2016-11-28:
<http://www.nktcables.com/~media/Files/NktCables/Products/SE/eca/1v%20cables/1%20kV/AXQJ1kV328701FGC101680ENF.pdf>

- OFS, 2011. *Cable lifetime*. Optical fiber cable and connectivity solutions. Hämtad 2016-11-23: http://www.cellco.com.pl/files/ofs_life_time.pdf
- Páez-Pérez D., Sánchez-Silva M., 2016. *A dynamic principal-agent framework for modeling the performance of infrastructure*. European journal of operational research 254(576-594)
- Roxbergh, K., 2014. *Riskmodell för kabelsträckningar I mellanspänningsnätet i Sverige*. Examensarbete Teknisk- och naturvetenskaplig fakultet, Uppsala universitet.
- Rydin, G., 2016. Muntligt 2016-12-14. Pensionerad projektledare för infrakulverten i Vallastaden på Tekniska verken.
- Sauvé, S., Bernard, S., och Sloan P., 2016. *Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research*. Environmental Development 17 (2016): 48-56.
- Statistiska centralbyrån, 2016. *Konsumentprisindex mäter prisnivån i Sverige*. Hämtad 2017-01-12: <http://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/samhällets-ekonomi/prisernas-utveckling/>
- Sund, G., 2002. *Utvändig korrosion på fjärrvärmerör*. Svenska fjärrvärmeföreningen, forskning och utveckling. Rapport nr: 2002:80.
- Svensk elstandard, 2003. *Kraft-, styr- och installationskablar – Typbeteckningar*. Svensk elstandard SS 424 17 01, utg. 5:2003.
- Svensk energi, 2016. *Leveranssäkerhet/DARWin, årsrapport 2015*. Hämtad 2016-11-23: <http://www.svenskenergi.se/Elfakta/Statistik/LeveranssakerhetDARWin/>
- Svensk fjärrvärme, 2003. *Skadestatistik 1995-2003*. Opublicerad databas, 2003.
- Svensk fjärrvärme, 2016. *Så funkar fjärrvärme*. Hämtad 2016-10-12: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Fjarrvarme/Sa-funkar-fjarrvarme/>
- Svensk handel, 2016. *Ny lag om hållbarhetsredovisning*. Hämtad 2016-12-12: <http://www.svenskhandel.se/verksam-i-handeln/radgivning/hallbarhet/ny-lag-om-hallbarhetsredovisning/>
- Svenska kraftnät, 2016. *Teknik*. Hämtad 2016-11-22: <http://www.svk.se/natutveckling/utbyggnadsprocessen/teknik/#Darfor.Inte.grava.Ned>
- Svensson, A., 2016. Muntligt 2016-12-28. Plan- och projektledare avd. Vatten på Tekniska verken.
- Tekniska verken, 2015a. *Om oss: Kortfakta*. Hämtad 2016-11-23: <https://www.tekniskaverken.se/om-oss/ekonomi-och-organisation/kortfakta/>
- Tekniska verken, 2015b. *Primär- eller sekundärsystem*. Hämtad 2016-12-13: <https://www.tekniskaverken.se/tjanster/fjarrvarme/din-fjarrvarmecentral/primar--eller-sekundarsystem/>
- Vallastaden, 2016. *Expo: Sveriges mest innovativa samhällsbyggnadsprojekt*. Hämtad 2016-11-23: <http://www.vallastaden2017.se/expo/>
- Wallsten, B., 2015. *The urk world. Hibernating infrastructures & the quest for urban mining*. Doktorsavhandling, Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling, Linköpings universitet.
- van de Donk W.B.H.J, Hancher L., van Lieshout P.A.H, Meurs P.L., Nooteboom B., de Vries G.H., Winsemius P., 2008. *Infrastructures – Time to invest*. Scientific council for government policy, Amsterdam University Press.
- van Dijk, T., 2008. *New perspectives on investment in infrastructures*. Scientific council for government policy, Amsterdam University Press.

van Vickle, P., 2014. *Optical fiber cable design and reliability*. Hämtad 2016-11-13:
http://www.ieee802.org/3/bm/public/may14/vanvickle_01_0514_optx.pdf

Vestman, C., 2016. Email-korrespondens. Projektledare Uponor.

Wiklund, M., 2016. Muntligt 2016-10-31. Projektledare i Vallastaden för energiavdelningen på Tekniska verken.

Wilson, C., 2014. *Interview techniques for UX practitioners: A user-centered design method*. Morgan Kaufmann publishers.