

# Livscykelperspektiv på den prefabricerade infrakulverten

- En hållbar lösning för stadens ledningsbundna infrastruktur

---



**Filip Bergman**

# Innehållsförteckning

1. Inledning.....	1
1.1 Syfte och målbeskrivning.....	2
2. Bakgrund.....	3
3.1 Teknisk beskrivning av infrakulverten.....	3
3.2 Potentiella för- och nackdelar med infrakulverten.....	5
4. Metod.....	7
4.1 Scenarionivå.....	7
4.1.1 Känslighetsanalys.....	10
4.2 Parameternivå.....	11
4.3 Modellering och simulering.....	12
5. Resultat – Ekonomisk livscykelprestanda för infrakulvertkonceptet.....	13
5.1 Infrakulvertens livscykelkostnad för basscenariot.....	13
5.1.1 Infrakulvertens livscykelprestanda i ett nuvärdesperspektiv.....	14
5.1.2 Viktiga processer och ledningsnät för infrakulvertens livscykelprestanda.....	15
5.2 Projektspecifika villkor och dess inverkan på infrakulvertens konkurrenskraft.....	17
5.2.1 Nätlängdens påverkan på den ekonomiska jämförelsen.....	18
5.2.2 Schaktningskostnadens påverkan på den ekonomiska jämförelsen.....	18
5.3 Potential av olika åtgärder för förbättrad livscykelprestanda av infrakulverten.....	20
6. Resultat – Miljömässig livscykelprestanda för infrakulverten.....	23
6.1 Projektspecifika villkor och potential av olika förbättringsåtgärder.....	24
7. Infrakulvertens ekonomiska och miljömässiga konkurrenskraft.....	27
7.1 Infrakulvertens ekonomiska konkurrenskraft.....	27
7.2 Infrakulvertens miljömässiga konkurrenskraft.....	28
8. Fortsatt forskning för att utreda infrakulvertens fulla potential.....	29
Bilaga 1.....	31

## 1. Inledning

Ledningsbunden infrastruktur för distribution av bl.a. el, tele, vatten, avlopp och fjärrvärme är en förutsättning för en hållbar utveckling av det moderna stadslivet. Rådande praktik för att bygga och upprätthålla dessa systems funktioner medför dock stora kostnader och resursförluster, miljöpåverkan och intrång i stadsmiljön. En av de viktigaste orsakerna till denna problematik är att infrastrukturen förläggs direkt i marken under våra gator och torg. Förutom stort slitage på ledningarna innebär en sådan praktik att allt underhåll och förnyelse bygger på ett ständigt återkommande behov av dyra och miljöstörande schakt- och återställningsarbeten. Detta skapar i sin tur begränsningar på angränsande markanvändning och den stora prislappen på sådana arbeten är en viktig orsak till att ingen återvinning idag sker av de delar av systemen som tjänat ut sin funktion.

Att utveckla en mer hållbar och resurseffektiv förvaltning av den ledningsbundna infrastrukturen kräver sannolikt en kombination av åtgärder och förändringar. Förebyggande åtgärder i form av nya tekniker att förlägga dessa system som kan öka deras hållbarhet, underlätta för underhåll och förnyelse och minska begränsningar på markanvändning i städer är en central del av ett sådant arbete. Bättre samordning av olika nätägares behov och verksamheter, en ökad grad av förebyggande underhåll och förnyelse av systemen samt förändringar som möjliggör återanvändning och återvinning av de kablar och rör som tas ur bruk är andra potentiellt viktiga strategier.

I den här rapporten läggs fokus på förebyggande åtgärder i form av nya tekniker för att förlägga den ledningsbundna infrastrukturen. Mer specifikt studeras ekonomiska och miljömässiga konsekvenser av att använda en ny typ av prefabricerad infrakulvert. Konceptet utvecklades av Tekniska Verken och Uponor i samband etableringen av stadsdelen Vallastaden i Linköping inför bomässan 2017 och är intressant eftersom det potentiellt kan lösa många av de hållbarhetsutmaningar som förknippas med konventionell förläggning. Infrakulverten innefattar även flera patenterade lösningar och materialval som gör den betydligt enklare och mindre kostsam att förlägga än traditionella betongkulvertar.

Även om etableringen av stadsdelen Vallastaden visar på infrakulvertens potential handlar det fortfarande om en ny och relativt obeprövad teknik. Det finns följaktligen stora kunskapsluckor och osäkerheter kring konceptets livscykelprestanda och konkurrenskraft gentemot konventionella förläggningsmetoder. Att konceptet befinner sig i en tidig utvecklingsfas innebär dessutom att det sannolikt finns en betydande potential för effektiviseringar och lärandeffekter som på sikt kan förbättra infrakulvertens prestanda och konkurrenskraft.

Ledningsbunden infrastruktur har en lång livslängd och valet av teknik för dess förläggning får därmed också långsiktiga konsekvenser, både för nätägare och för det omgivande samhället. För att täcka in sådana viktiga aspekter i planering och beslutsfattande rörande teknikval och nyinvesteringar krävs ett livscykelperspektiv där olika alternativs prestanda analyseras över längre tidsperioder. Exempelvis innebär etableringen av den prefabricerade infrakulverten initialt ett betydande intrång i stadsmiljön och kopplat till det en relativt stor investering och miljöpåverkan. Motiven för att använda infrakulverten kretsar därmed kring frågeställning om, och i så fall under vilka förutsättningar, konceptets potentiella och ofta mer långsiktiga fördelar

betalar sig i ett längre perspektiv (t ex. ökad livslängd på systemen, minskat behov av underhåll och ökade möjligheter för återvinning).

## **1.1 Syfte och målbeskrivning**

Syftet med den här rapporten är att presentera de viktigaste resultaten från IERP(Industrial Ecology Research Program)-projektet *Livscykelperspektiv på den prefabricerade infrakulverten: en hållbar lösning för stadens ledningsbundna infrastruktur?* Projektets övergripande mål var att analysera infrakulvertens livscykelprestanda och i vilka sammanhang och under vilka villkor den kan utgöra ett lönsamt och miljömässigt motiverat alternativ till traditionella förläggningsmetoder.

Rapporten innefattar ett urval av ekonomiska och miljömässiga livscykelanalyser från projektet. Förutom att dimensionera infrakulvertens potential läggs stor vikt på lärande och att identifiera vilka faktorer och villkor som är mest kritiska för konceptets livscykelprestanda och konkurrenskraft gentemot traditionell förläggning. Vår avsikt med dessa analyser är att öka förståelsen för i vilka tillämpningar infrakulverten kan vara ett gångbart alternativ och hur konceptets ekonomiska och miljömässiga prestanda på sikt kan förbättras via olika typer av åtgärder och förändringar. Centrala frågeställningar som behandlas i rapporten är:

Vad är infrakulvertens ekonomiska och miljömässiga prestanda och vilka processer bygger upp konceptets kostnads- och miljöprofil utmed dess livscykel?

Vilka projektspecifika villkor är kritiska för infrakulvertens konkurrenskraft gentemot traditionell förläggning med avseende på ekonomisk och miljömässig livscykelprestanda?

Vilka principiella åtgärder och förändringar av infrakulverten har på sikt störst potential att öka konceptets prestanda och konkurrenskraft gentemot traditionell förläggning?

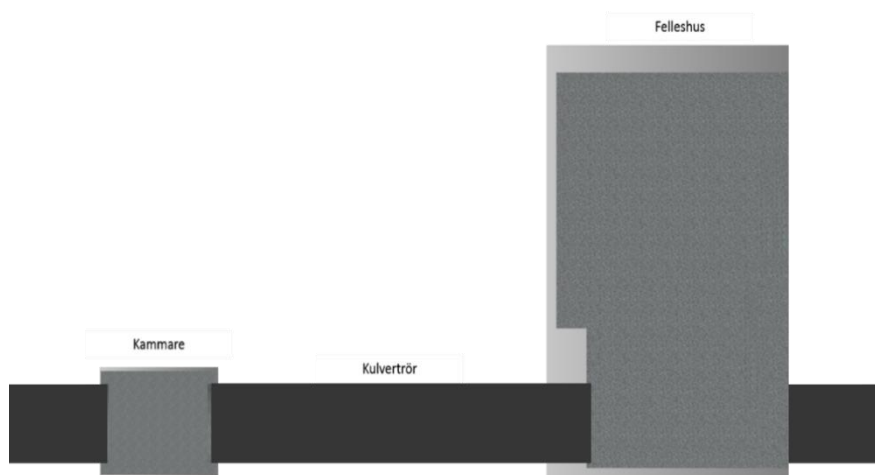
## 2. Bakgrund

Idag finns det ett område som förses med ledningsbunden infrastruktur genom infrakulverten och det området kallas Vallastaden och ligger i Linköping. Vallastaden är ett nybyggt område där bo- och samhällsexpo 2017 anordnades. Utvecklingsarbetet mot denna nya typ förlängningsteknik är starkt kopplat till områdets utformning. Beslutet om bomässan togs 2012 och för att bestämma hur området skulle utformas hölls en arkitekttävling. Bebyggelsen i området var tät och tillsammans med komplicerade markförhållanden blev det omöjligt att förlägga den ledningsbundna infrastrukturen med konventionell teknik till en rimlig kostnad.

För att förse området med infrastruktur krävdes nytänkande från Tekniska verken och för att hinna till inflyttningen som skulle ske 2016 var det relativt ont om tid för att utveckla ett nytt koncept. Kulverttekniken är inget nytt och har använts runt om i världen lång tid tillbaka. Den äldre typen av kulvertteknik används vanligtvis inte i ett område som Vallastaden och för att göra det kostnadseffektivt krävs en ny typ av kulverten. Tanken på att utveckla en kulvert med hög prefabriceringsgrad och relativt låga kostnader väcktes och tillsammans med VVS och infrastrukturleverantören, Uponor, utvecklades en ny metod för att förlägga infrastruktur som kan underhållas med schaktfria metoder. Den nya typen av kulvert fick namnet infrakulvert.

### 3.1 Teknisk beskrivning av infrakulverten

Idag ligger ca 1800 meter infrakulverten nedgrävd i Vallastaden och den är i fullt bruk. En utbyggnad av infrakulverten är planerad för 2018. I kulverten i Vallastaden finns ledningsnät för avlopp, vatten, el, optofiber, fjärrvärme och sopsug. Infrakulverten i Vallastaden består av tre huvudsakliga komponenter: kulvertör, kammare och fellehus. I *Figur 1* nedan ses hur de olika komponenterna bygger upp infrakulverten.



*Figur 1: Schematisk bild över hur kammare, fellehus och kulvertör bygger upp infrakulverten.*

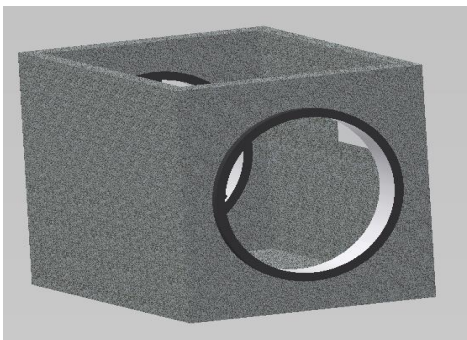
Kulvertörret tillverkas av Uponor och utgör den största sträckan av infrakulverten. Röret är gjort av polyeten (PE) och har en innerdiameter på 2,2 meter som levereras i längder upp till 28 meter. I *Figur 2* visas en bild på kulvertörrets innandöme och ett exempel på hur ledningarna är förlagda i kulverten. Det finns även tomma fästen som i framtiden kan komma till användning för nya system som kan förläggas i kulverten. Utöver ledningsslagen i kulverten finns även

utrustning för internkraft och larmutrustning som varnar vid översvämning, rök- och gasutveckling.



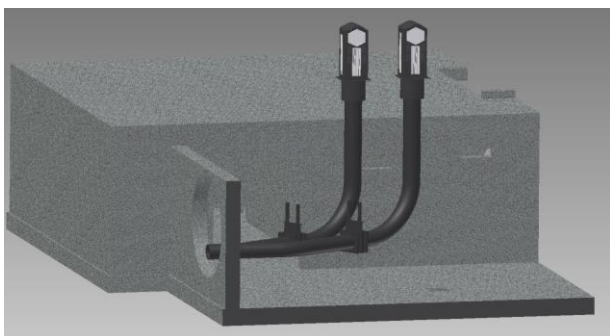
*Figur 2. Kulvertrörets innandömen där ledningsnäten är upphängda.*

För att sammanfoga de raka kulvertrören används kammare. Kammare är gjorda av betong och på locket av kammaren finns det möjlighet att komma ner i kulvertsystemet via ett brunnlock. Genom kammarväggen leds även servisanslutningarna till fastigheterna. I *Figur 3* ses en bild på en tom kammare.



*Figur 3: Exempel på en tom kammaren med två ingångar för kulvertrör.*

Felleshusens källare har samma funktion som kammare, det vill säga att sammanfoga kulvertrören och att leda ut servisledningar till fastigheter. De större felleshusen har även utrymme för teknisk utrustning samt nedkast för sopsugssystemet. Det finns även en trappa ner till kulverten som underlättar nedgång till kulverten.



Figur 4: Fellehusets källare. I denna bild ses rörsystemet och nedkassen för sopsugssystemet.

### 3.2 Potentiella för- och nackdelar med infrakulverten

Huvudanledningen till varför infrakulverten utvecklades har beskrivits i avsnittet ovan men det finns även andra potentiella fördelar med infrakulverten. Vid konventionell förläggning är ledningsnäten nedgrävda i marken och i infrakulverten går miljön för ledningsnäten att jämföra med inomhusmiljö med en temperatur mellan 10- 15 grader. Skillnaden i omgivande miljön för ledningsnäten kan potentiellt förbättra ledningsnätets hållbarhet och leda till lägre underhållsfrekvens och längre livslängd.

När ledningsnäten förläggs i en infrakulvert krävs inte schaktning då underhåll- och förnyelsearbete ska utföras. Schaktning är kostsamt och påverkar både den närliggande miljön, klimatet, de boende och verksamma i området. Att undvika att bryta upp ytan ovan gjord kan också medföra att finare ytskikt kan anläggas med mindre risk för uppbyggnad.

Ledningsnäten i infrakulverten ligger mer lättillgängligt än ledningsnät förlagda med konventionell teknik. Detta medför att kontroll av prestanda underlättas. Att ha en förståelse för ledningsnätets skick kan leda till att proaktiva underhåll kan utföras och på så vis kan en del av de akuta underhållen undvikas. Om nya ledningsnät i framtiden ska installeras görs det smidigare i infrakulverten då inga schaktarbeten med mera krävs. Den flexibiliteten kan vara en stor fördel i framtiden.

Vid konventionell förläggning följer ledningarna oftast gatunätet medan infrakulverten kan installeras mer oberoende av som finns ovan jord. Följden av detta blir att ett konventionellt nät kan bli 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.

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. När ledningsnät är placerade i infrakulverten är de mer lättillgängliga och vid underhåll och förnyelse tas uttjänta material till vara på ett lättare sätt. Om uttjänta ledningsmaterial hade legat kvar i infrakulverten hade även platsbrist uppstått.

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 plus eventuell yta att placera maskiner på för att

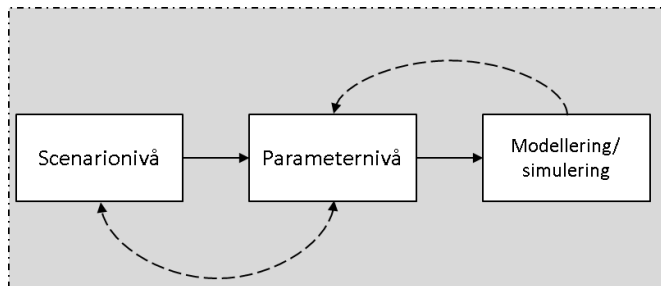
gräva fram ledningar men vid förläggning i kulvert försvinner detta behov. Detta leder till att det är möjligt att bygga tätare stadsdelar och att längden för ledningar och kablar kan reduceras då de konventionellt följer gatunätet men i kulverten kan passera under byggnader och genom innergårdar.

Det är inte bara möjliga fördelar med infrakulverten, 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 ske 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 kulvertsystemet skulle riskera att kollapsa och skapa ett slukhål.



## 4. Metod

För att jämföra infrakulvertens miljömässiga och ekonomiska prestanda under en livscykel mot konventionell förläggning användes LCC/LCA-metodik. Arbetet startade med att sätta upp villkor och antaganden kring scenariot som skall analyseras, *Figur 5*. Ett scenario sätter upp villkoren för analysen. Det klargör parametrar kring tid och rum och hur relationen mellan förläggningsteknikerna ser ut.



*Figur 5: Övergripande illustration över metoden.*

Därefter samlades data in för scenariot vilket benämns som parameternivå. Det krävdes ekonomisk- och miljömässig data samt data för underhåll och förnyelse. När detta var på plats användes simuleringsmodellen för att generera resultat för scenariot. Dessa tre huvudsakliga steg i genomförandet av rapporten har i huvudsak skett i kronologisk ordning men det har under hela arbetsprocessen funnits behov att gå tillbaka till föregående steg.

### 4.1 Scenarionivå

För att utföra LCC/LCA-studien av den ledningsbundna infrastrukturen valdes ett basscenario som utgångspunkt för jämförelsen. Basscenariot för infrakulverten är hämtat från den enda installationen av infrakulverten som utförts (Vallastaden). På grund av att det är en helt ny teknik och att markförhållandena i Vallastaden är komplicerade ses denna uppskattning som dyr. Referensfallets (konventionell förläggning) utgår från ett typiskt projekt där utformningen liknar ett stort antal andra projekt. Förhållandena som råder vid den konventionella förläggningen antas således som normala och detta medför att uppskattningen är mer av en medelkostnadskaraktär. Att jämföra en ny teknik (infrakulverten) med en vedertagen teknik (konventionell förläggning) där mängden data och villkor för förläggningen är olika ger en asymmetrisk jämförelse. Trots den asymmetriska jämförelsen kan basscenario användas till att analysera infrakulvertens ekonomiska och miljömässiga prestanda och vad som bygger upp den. Jämförelsen görs mot en bred grupp av projekt som kan benämnas som typfall vilket ger en grundläggande jämförelse.

För att analysera de två förläggningsteknikerna ytterligare gjordes känslighetsanalyser som varierar olika projektspecifika villkor och förbättringsåtgärder för infrakulverten i förhållande till basscenariot. Vilka känslighetsanalyser som utförts beskrivs mer utförligt i avsnitt *4.1.1 Känslighetsanalys*. För den ekonomiska analysen görs även en syntes där de olika känslighetsanalysernas kombineras för att få ytterligare förståelse kring infrakulvertens ekonomiska prestanda.

Några av de potentiella fördelarna med infrakulverten har legat till grund för hur basscenariot utformats. Dessa antaganden och basscenariot för båda förlängningsteknikerna beskrivs nedan.

Scenariot omfattar infrakulverten 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 kulvertröret. Vad som händer efter detta går således endast att spekulera i och varken Tekniska verken eller Upponor har i dagsläget någon plan för hur kulverten ska hanteras efter dess livslängd är uppnådd. Av denna anledning sätts tidsperioden till 100 år. I *Tabell 1* listas de grundläggande antagandena som byggt upp basscenariot.

Tabell 1: Grundläggande antaganden och faktorer för basscenariot.

	<i>Infrakulvert</i>	<i>Konventionell förläggning</i>
<b>Längd</b>	1 km	1.5 km
<b>Kammare</b>	42 st	-
<b>Kulvertrör</b>	46 st	-
<b>Felleshus</b>	4 st	-
<b>Ytbeläggning</b>	Asfalt	Asfalt
<b>Servisanslutningar</b>	138 st	138 st
<b>Variation vid installationen</b>	+/- 30 %	+/- 20 %
<b>Underhåll- och förnyelsebehov</b>	30%	100%
<b>Avloppssystem</b>	Trycksatt system med pumpar och backventiler	Självfall med en pump
<b>Avloppsbrunnar</b>	-	30 st

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 med 138 servisanslutningar.

För att förse 138 servisanslutningar i ett bostadsområde antas 1 km infrakulvert krävas. Det antagandet grundar sig på hur infrakulverten i Vallastaden är uppbyggd. Ledningsnätens längd placerade i infrakulverten är således 1 km för samtliga system förutom el och opto som läggs med dubbla kablar. För ett 1 km långt infrakulvertsystem med 138 st servisanslutningar krävs 46 st kulvertrör som är 17 meter långa. Dessa sammanfogas med 42 stycken kammare och 4 st felleshus.

Kostnaden och miljöpåverkan vid installationen av båda näten anses ha en variation. För den konventionella förläggningen antogs variationen vara +/- 20 % och för infrakulverten +/- 30 %. Att variationen är större för infrakulverten antas bero på att tekniken är ny, vilket medför större variation.

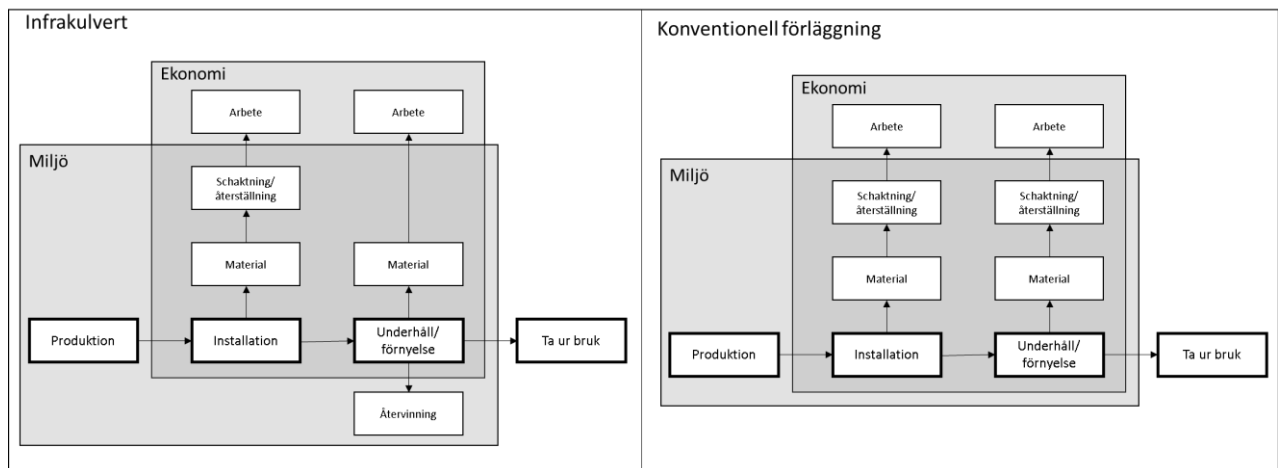
En potentiell fördel med infrakulverten, som beskrivits i kapitel 2, är att det kan krävas en kortare nätlängd än vid konventionell förläggning. För referensfallet i basscenariot har en 50 % längre nät antagits vilket vore fallet i ett område som Vallastaden. Hur längdförhållandet påverkar jämförelsen mellan förläggningsteknikerna analyseras i känslighetsanalysen.

Referensfallet (konventionell förläggning) är i basscenariot uppbyggt i form av ett typiskt projekt för ledningsbunden infrastruktur. De geologiska förutsättningarna antas vara goda vilket inte leder till ökad påverkan vid installation och underhåll. Om mer komplicerade markförhållanden råder och hur det skulle påverka jämförelsen med infrakulverten görs i känslighetsanalysen. Markytan ovan infrakulverten och konventionell förläggning antas vara enbart asfalt.

En potentiell fördel med infrakulverten är att ledningarna är placerade i en mer gynnsam miljö än då de är nedgrävda i marken (konventionell förläggning). Det finns viss data kring hur stort behovet av underhåll och förnyelse ett nät som lagt med konventionell förläggning kan vara. Eftersom infrakulvertkonceptet är nytt finns det mycket begränsat med data. För att hantera detta gjordes ett antagande kring förhållandet mellan konventionell förläggning och förläggningen i infrakulverten. Antagandet är att behovet av underhåll och förnyelse vid förläggning i infrakulverten är 30 % av behovet vid konventionell förläggning.

Ledningsnäten som förläggs i infrakulverten och i konventionell förläggning är av samma typ och dimensioner. Det finns dock en skillnad för avlopps nätet. Den befintliga installationen av infrakulverten är mer eller mindre horisontell och det innebär att avloppssystemet inte kunde läggas med självfall. Lösningen blev ett trycksatt system där behovet av pumpstationer och backventiler på servisledningarna uppkom. Vid konventionell förläggning läggs avloppsledningarna enklare med självfall och så antas vara fallet i referensfallet för basscenariot. Avloppssystemet i referensfallet är inte enbart självfall utan behov av en avloppspump krävs på grund av geologiska förutsättningar. Vid konventionell förläggning krävs även avloppsbrunnar vilket inte krävs vid förläggning i infrakulverten då kammare och fellehus bidrar med samma funktion.

Systemgränserna för miljö- och ekonomianalysen skiljer sig åt. Se *Figur 6* för avgränsningar och processer för infrakulverten och för konventionell förläggning.



Figur 6: Processer och systemgränser för infrakulvert och konventionell förläggning. Boxarna med större typsnitt och tydligare ram är de huvudsakliga processerna och de övriga är processer som uppkommer vid de huvudsakliga.

En tydlig skillnad mellan den ekonomiska och miljömässiga analysen är hur produktion av material och arbete hanteras. Produktionen tas inte med i beaktning vid den ekonomiska beräkningen utan där antas att kostnaden för produktionen syns vid inköp vid installationen. Vid miljöanalysen däremot tas produktion med i analysen. Det är vid produktionen de olika materialens miljöpåverkan uppkommer. I denna rapport har inte arbete beräknats vid miljöanalysen utan arbete ger endast upphov till kostnader.

En skillnad mellan infrakulverten och konventionell förläggning är att schaktning/återställning inte krävs vid underhåll och förnyelse i infrakulverten. Det krävs dock schaktning vid installationsfasen av infrakulverten då kulvertrör, kammare och fellehus installeras.

En potentiell fördel med kulverten är att återvinning av uttjänta ledningsmaterial underlättas till följd av att ledningsnäten ligger mer lättåtkomliga. Med denna grund antas återvinning ske i infrakulverten men inte vid konventionell förläggning. Att analysera den ekonomiska potentialen av återvinningen är komplicerat och ofta lågt värde jämfört med övriga kostnader för livscykel. Återvinningen beräknas således enbart vid miljöanalysen.

#### 4.1.1 Känslighetsanalys

Skillnaden i förutsättningar för de två förläggningsteknikerna medför en asymmetrisk jämförelse där den nya tekniken med förläggning i infrakulvert jämförs med en bred grupp av projekt då konventionell förläggning använts. För att analysera hur val av tillämpning (konventionell förläggning) och utveckling av infrakulverten påverkar den ekonomiska och miljömässiga jämförelsen gjordes flertalet känslighetsanalyser där basscenariot ändras. För den ekonomiska analysen utfördes även en syntes där kombinationer av villkorsförändringar för både konventionell förläggning och förläggning i infrakulverten gjordes.

Det första antagandet som analyserades var hur skillnader i ledningslängden av det konventionella nätet påverkar livscykelkostnaden. I basscenariot antas 50 % längre nät än nätet för infrakulverten. I denna analys testas lika långt nät och dubbelt så långt nät och presenteras med den ackumulerade medelkostnaden för livscykel.

Nästa faktor som analyseras är hur den ekonomiska jämförelsen påverkas av förändrad kostnad vid schaktning. De faktorer som påverkar kostnaden för schaktningen är inte enbart hur svåra

markförhållandena är utan även hur tät bebyggelsen är, utrymme för maskiner, möjlighet till lagring av schaktmassor, trafikintensitet eller andra typer av aktiviteter som ger försvårade omständigheter i markplan. I basscenariot motsvarade kostnaden för schaktning medelkostnaden för ett stort antal projekt men att hitta projekt där kostnaden dubbleras är inte ovanligt. Det finns även fall då kostnaden blir tre gånger så stor men det är ovanligt. Det mest ovanliga och extrema fallet av markförhållanden antas vara när dubbelsidig kvarvarande spont krävs. För dubbelsidig spont antas kostnaden för installation, underhåll och förnyelsen bli fyra till fem gånger så stor och den höga kostnaden leder ofta till att områden där spont krävs inte exploateras.

Analysen fortsatte med att analysera åtgärder som kan minska infrakulvertens ekonomiska prestanda. Eftersom tekniken är ny kommer troligtvis kommande projekt då infrakulverten produceras och installeras ha tagit lärdom av tidigare installationer. För att få en uppfattning kring hur lärande vid ny teknik kan reducera kostnaden analyserades lärandekurvor för flera olika tekniker, tex solcellspaneler och bränsleceller. I dessa fall kunde det långsiktiga lärandet minska kostnaden mellan 0–30 %. De värden som analyserades var således 10 %, 20 % och 30 %.

Analysen av infrakulvertens ekonomiska potential fortsatte med att analysera hur ett minskat användande av kammare och fellehus påverkar livscykelkostnaden. Resultat för om inga kammare, inga fellehus och inga fellehus och 50 % färre kammare användes.

Utförandet av avloppssystemet i infrakulverten skiljer sig från nätet förlagt med konventionell förläggning. I infrakulverten är avloppsledningarna trycksatta medans det konventionella nätet är lagt med självfall. En analys för hur kostnaden för avloppsnätet i infrakulverten skulle påverkas om ledningarna även där lades med självfall.

För miljöanalysen testades längdfaktor för konventionella nätet och för miljöanalysen utfördes analyser kring användandet av kammare och fellehus samt hur den totala livscykelns miljöpåverkan förändras vid användning av miljövänligare betong.

#### **4.2 Parameternivå**

Nästa steg i metoden är parameternivån där data och information samlas in. De huvudsakliga processer som identifierats i denna studie är som tidigare presenterats produktion, installation och underhåll/förnyelse. För dessa processer har sedan data samlats in för respektive ledningsnät via mejl, intervjuer och litteratur, för att få information kring vilka delprocesser som faller inom huvudprocesserna. Information kring kostnader som uppstår vid processerna hämtades främst från databaser likt EBR och kompletterades med information från litteratur och intervjuer med personal på Tekniska verken. Hur mycket miljöpåverkan de olika processerna under livscykeln ger upphov till under livscykeln analyseras med klimatpåverkan och hämtas från databasen Ecoinvent med enheten kg CO<sub>2</sub> koldioxidekvivalenter. Underhållsfrekvenser och förnyelsebehov har samlats in på flera olika sätt.

Eftersom infrakulverten enbart har använts vid ett tillfälle är data från detta fall det enda underlag som varit tillgängligt. Underhållsdata i denna typ av kulvertmiljö finns såldes inte och grova uppskattningar har fått göras. För konventionell förläggning har medeldata från en mängd fall, både från Linköpings kommun och andra kommuner, använts och det statistiska underlaget för underhåll och förnyelse har sedan jämförts. Det långa tidsperspektivet (100 år) som analyseras kräver insamlad data från lång tid tillbaka och då var förläggningsteknikerna och

materialen i ledningsnäten annorlunda. Så en viss del spekulativa antaganden har även gjorts kring det konventionella nätet med hjälp av expertis på Tekniska verken. För en mer detaljerad beskrivning se, *Bilaga 1*.

### **4.3 Modellering och simulering**

I studien utförs både analyser kring miljöpåverkan (LCA) och ekonomi (LCC). 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. Vid en LCC måste tidsaspekten tas i beaktning på grund av pengars olika värden över tid. I denna studie har LCC beräknats med direkta kostnader. Detta för att förenkla resultatet och sätta fokus på principiella och övergripande skillnader mellan förläggningsteknikerna.

Något som genomsyrade hela inventeringsfasen för basscenariot 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 för både installations- och användningsfas. Osäkerheter har hanterats med möjlighetsfördelningar, för mer detaljerad information se, *Bilaga 1*.

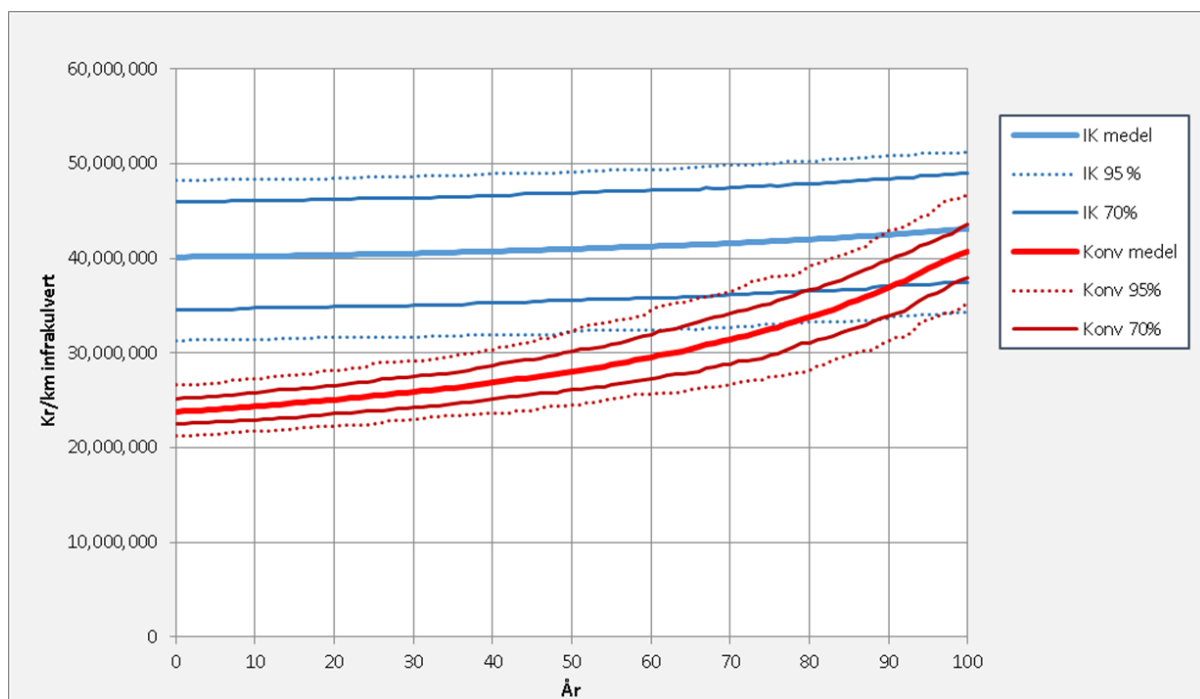
För att göra beräkningar där osäkerheterna är beskrivna med möjlighetsfördelningar användes Monte-Carlo-simuleringar. Det innebär att vid en körning av modellen slumpas värden fram utifrån möjlighetsfördelningen. Resultatet för beräkningen sparas därefter görs ett stort antal ytterligare beräkningar där de slumpade värdena får olika värden. När alla körningar är gjorda presenteras ett medelresultat och två stycken konfidensintervall. Ett konfidensintervall där 70 % av alla körningars resultat hamnar inom och ett där 95 % av alla körningars resultat innefattas.

## 5. Resultat – Ekonomisk livscykelprestanda för infrakulvertkonceptet

I det här kapitlet behandlas infrakulvertens ekonomiska prestanda och konkurrenskraft gentemot konventionell förläggning. Resultaten är uppdelade i tre delar. Först presenteras resultaten för basscenariot där de totala livscykelkostnaderna för de olika förläggningsteknikerna ställs mot varandra för att identifiera viktiga skillnader och processer som påverkar det ekonomiska utfallet. Därefter analyseras möjliga variationer i projektspecifika förutsättningar och hur dessa i sin tur påverkar infrakulvertens konkurrenskraft. I den sista delen utvärderas potentialen av olika principiella åtgärder och förändringar av infrakulvertens utformning, produktion och installation som på sikt kan leda till en förbättrad ekonomisk livscykelprestanda.

### 5.1 Infrakulvertens livscykelkostnad för basscenariot

Över en 100 års period ligger den ackumulerade medelkostnaden för infrakulvertkonceptet på knappt 45 miljoner kr per km kulvertsystem, *Figur 7*. Motsvarande livscykelkostnad för konventionell förläggning är i basscenariot lite drygt 40 miljoner kr. Störst skillnad mellan de olika teknikernas kostnadsprofiler uppkommer under de första årtiondena där själva installationen av infrakulverten mer eller mindre fördubblar kostnaderna jämfört med konventionell förläggning. Detta trots att konventionell förläggning i basscenariot innefattar 50 % längre ledningsnät.



*Figur 7: Ackumulerade livscykelkostnader för de olika förläggningsteknikerna i form av medelkostnader samt 70 och 95 % konfidensintervall. De olika konfidensintervallen innebär att 70 respektive 95 % av de simulerade resultaten (500 simuleringar) hamnar inom osäkerhetsintervallen.*

Utmed livscykeln minskar sedan dessa initiala skillnader i kostnader mellan teknikerna på grund av ett större behov av och högre kostnader för underhåll och förnyelse vid konventionell förläggning. Effekter av kulvertens potentiella fördelar i form av en ökad hållbarhet på

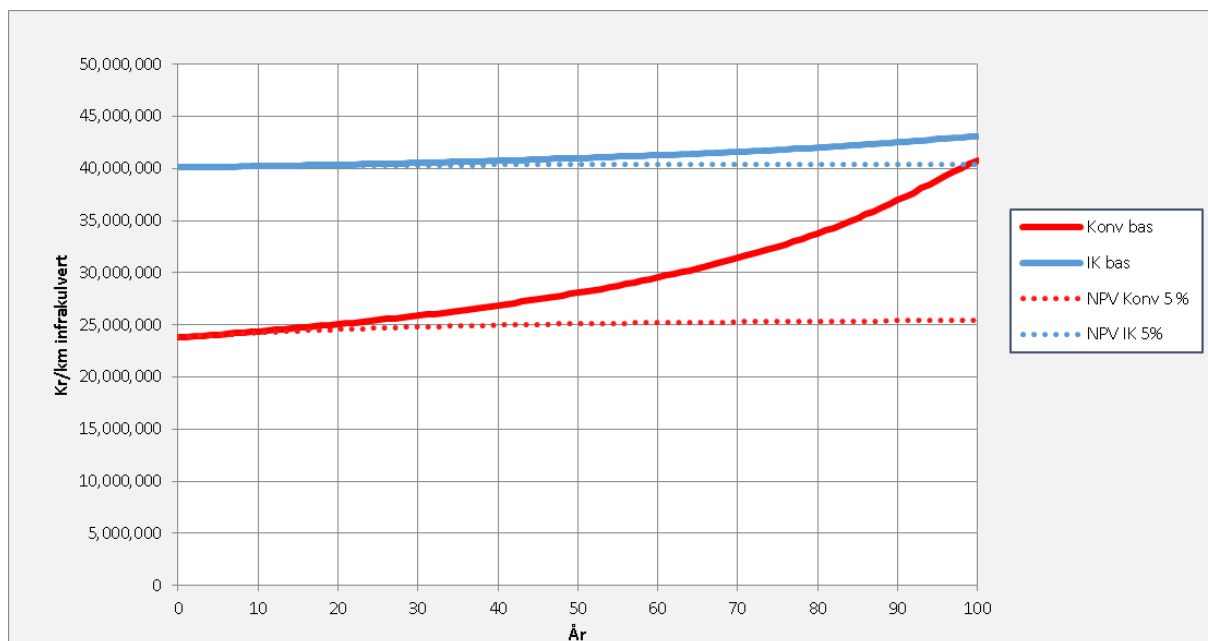
ledningsnätet och ett undviket behov av återkommande schakt- och återställningsarbeten blir som mest framträdande efter ca 50 år då kostnaderna för underhåll och förnyelse ökar exponentiellt för konventionell förläggning.

De ackumulerade livscykelkostnaderna för de olika förläggningsteknikerna är förknippade med stora osäkerheter, framförallt för infrakulverten som är en ny och obeprövad teknik. För basscenariot går det dock att konstatera att infrakulvertens potentiella fördelar gentemot konventionell förläggning inte är tillräckliga för att fullt ut motivera den initialt stora installationskostnaden. Men i ett längre tidsperspektiv blir nettoskillnaden mellan teknikerna relativt liten och även osäkerheter kopplat till kostnader för installation, underhåll och förnyelse vägs in i jämförelsen, sker ett överlapp av livscykelkostnaderna för infrakulverten och konventionell förläggning mot slutet av livscykeln.

#### *5.1.1 Infrakulvertens livscykelprestanda i ett nuvärdesperspektiv*

Ledningsbunden infrastruktur har lång livslängd och det kan vara komplicerat att göra denna typ av prospektiva analyser då kostnader som uppkommer utmed livscykeln kan värderas på olika sätt. Ett vanligt förekommande alternativ till att beräkna direkta kostnader för långsiktiga investeringar är nuvärdesmetoden. I princip bygger denna metod på att värdet av kostnader och intäkter minskar ju längre fram i tiden de uppkommer och för att väga in detta i beslut om investeringar används en diskonteringsränta. Denna ränta tar således hänsyn till inflation, investeringsrisker och vinstmarginaler och nedvärderar på så sätt betydelsen av framtida kostnader. Då en diskonteringsränta på 5 % tillämpas på livscykelkostnaderna för basscenariot blir skillnaden mellan förläggning i infrakulvert med konventionella metoder mycket större, *Figur 8*. I ett sådant investeringsperspektiv avgörs infrakulvertens ekonomiska konkurrenskraft helt och hållet av installationskostnaden. Huvudorsaken till detta utfall är att den konventionella förläggningsens relativt sett stora kostnader för framtida underhåll och förnyelse diskonteras bort.

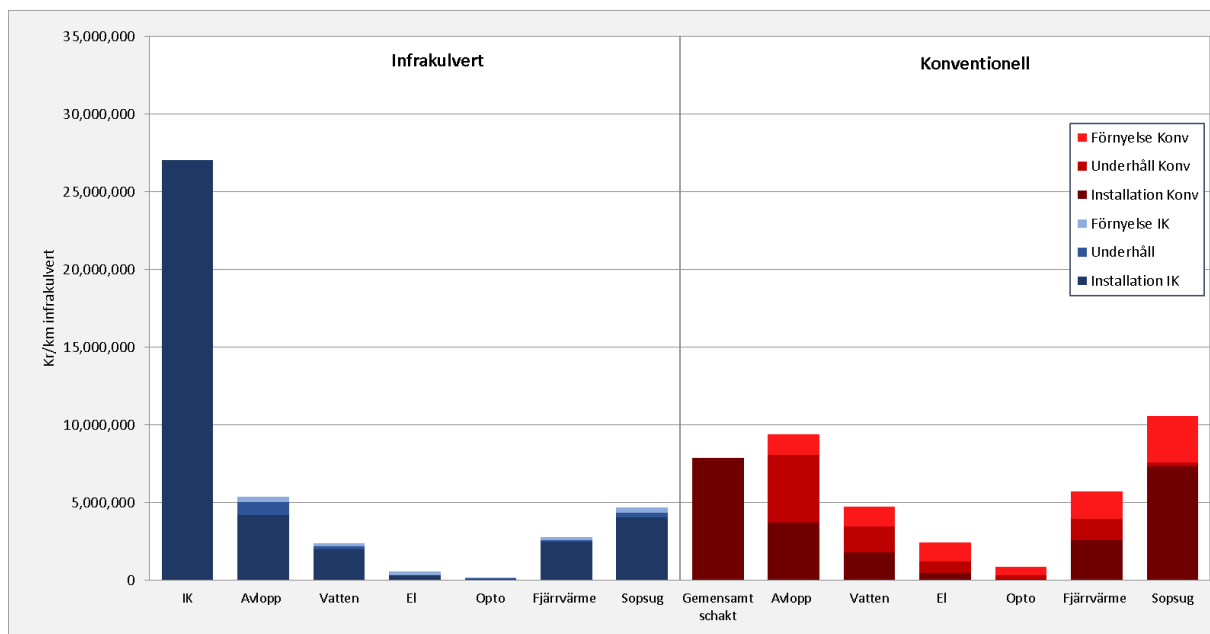




Figur 8: Direkta ackumulerade medelkostnader utmed förläggningsteknikernas livscykel (heldragna linjer) jämfört med nuvärdeskostnader med en diskonteringsränta på 5 % (prickade kurvor). Notera att en sådan diskonteringsränta kan anses som låg och inom privata företag används ofta en ränta på närmare 15 %, vilket innebär att framtida kostnader blir ännu lägre.

### 5.1.2 Viktiga processer och ledningsnät för infrakulvertens livscykelprestanda

För att få förståelse för vad som ligger bakom de livscykelkostnader som beskrivs ovan har vi delat upp dessa i olika kategorier. För infrakulverten är den klart största kostnadsposten själva installationen av kulvertrör och tillhörande kammare och fellesthus, *Figur 9*. Tillsammans utgör produktionen av dessa tre huvudkomponenter 60 % av den totala installationskostnaden för infrakulverten medan resterande del beror på schaktning, maskin- och arbetstid. Jämfört med de schaktarbeten som krävs vid konventionell förläggning är installationen av infrakulverten nästan fyra gånger så dyr.



Figur 9: Medelkostnader för olika kategorier för förläggning i infrakulvert (blå) och med konventionell teknik (röd). Kostnaderna för livscykeln är uppdelade i sju kategorier där installationskostnaden för infrakulverten och det gemensamma schaktet vid konventionell förläggning beskrivs separat medan övriga kategorier utgör totala livscykelkostnader för de olika ledningsnäten.

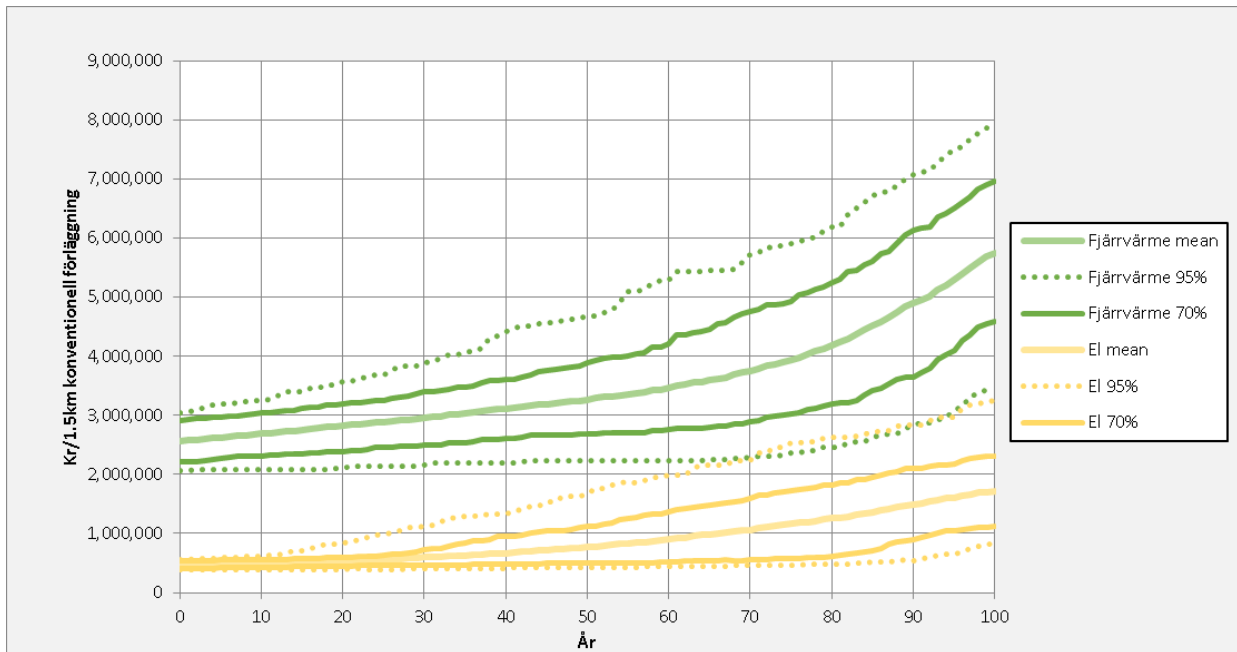
När det gäller installationen av de olika ledningsnäten är skillnaderna mellan förläggningsteknikerna betydligt mindre. De flesta av ledningsnäten har snarlika installationskostnader oavsett förläggningsteknik, trots att det konventionella nätet i basscenariot är 50 % längre. De största skillnaderna uppkommer vid installation av avlopps- och sopsugssystemen.

Infrakulverten måste ofta förläggas näst intill vilket innebär att avloppssystemet inte kan läggas med självfall. Systemet behöver därför trycksättas och behov av pumpar och backventiler på servisledningarna leder till högre installationskostnader än vid konventionell förläggning.

Förhållandet mellan kostnaden för sopsugssystemet i infrakulverten och vid konventionell förläggning är omvänt. Vid förläggning av sopsugssystem krävs sopnedkast ovan jord. Vid förläggning i infrakulverten används fellehusen till detta medan det vid konventionell förläggning krävs egna betongkammare. Det är framförallt kostnaden för dessa kammare som utgör skillnaden mellan förläggningsteknikerna.

Under användningsfasen för de olika ledningsnäten finns däremot stora skillnader i kostnader mellan förläggningsteknikerna. Skillnaderna beror framförallt på två faktorer: (1) behovet av underhåll och förnyelse, (2) kostnaderna för underhåll och förnyelse. Behovet av underhåll och förnyelse för ledningsnät placerade i infrakulverten är i basscenariot 30 % av behovet vid konventionell förläggning. Detta minskade behov av underhåll och förnyelse beror framförallt på att ledningsnäten i infrakulverten ligger i en mer skyddad och uppvärmd miljö. När ledningsnäten förlagda med konventionell förläggning ska underhållas och bytas ut krävs schaktning för åtkomst till ledningarna. Schaktningen medför stora kostnader och utgör i snitt 40 % av de totala kostnaderna för underhåll och förnyelse. Vid underhåll och förnyelse på ledningar förlagda i infrakulverten krävs inte schaktning.

Det förekommer även skillnader i kostnader för underhåll och förnyelse mellan olika ledningstyper. Kabelbaserade nät (el, opto) har i regel en lägre livscykelkostnad än rörbaserade system (avlopp, vatten, fjärrvärme och sopsug). För att ge ett exempel på hur kostnadsprofilerna ser ut för dessa två ledningstyper visas el- och fjärrvärmenätets livscykelkostnad vid konventionell förläggning i *Figur 10*.



Figur 10: Skillnad mellan vatten- och elnätets livscykelkostnad vid förläggning med konventionell förläggning i form av medelkostnader samt 70 och 95 % konfidensintervall.

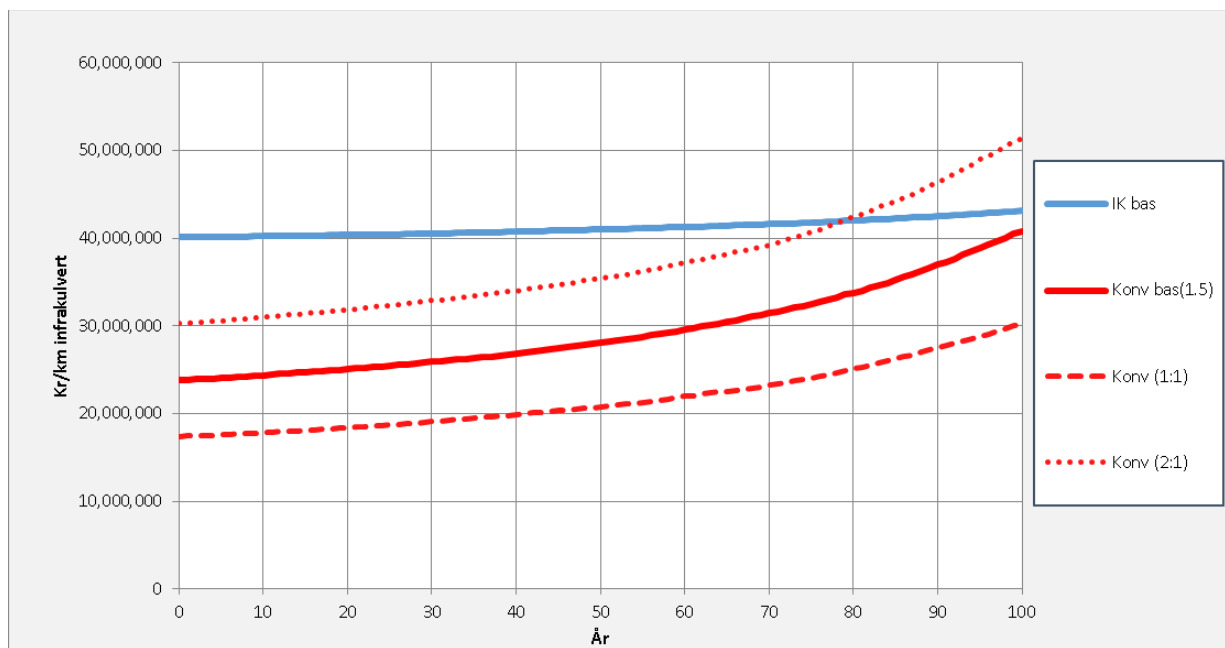
Högre materialkostnader och mer komplicerade förläggningsprocesser är bidragande orsaker till att installationskostnaderna för rörbaserade nät är betydligt större än för kabelbaserade system. De rörbaserade näten ligger på ett större djup i marken och vid underhåll och förnyelse krävs därför mer omfattande schaktarbeten vilket medför högre kostnader.

## 5.2 Projektspecifika villkor och dess inverkan på infrakulvertens konkurrenskraft

I basscenariot jämförs infrakulvertens nuvarande livscykelprestanda med motsvarande medelkostnad för konventionell förläggning. Det finns dock många projektspecifika villkor och förutsättningar som i det enskilda fallet kan påverka dessa kostnader, framförallt när det gäller förläggning med traditionella schaktmetoder. I detta avsnitt analyseras ett urval av sådana förutsättningar med avseende på hur de påverkar livscykelkostnaderna för konventionell förläggning, det vill säga det referensfall som infrakulvertens prestanda ställs emot. Ändrade projektvillkor såsom markförhållanden, bebyggelsetäthet, trafikintensitet etc. kan även påverka infrakulvertens livscykelkostnader men har störst inverkan på konventionell förläggning. Den installationskostnad som används för infrakulverten i basscenariot kan dessutom redan anses som hög i och med att den baseras på tillämpningen i Vallastaden där bland annat mycket svåra markförhållanden förekom.

### 5.2.1 Nätlängdens påverkan på den ekonomiska jämförelsen

En potentiell fördel med infrakulverten är att mindre hänsyn behöver tas till områdets bebyggelse och vägar vid förläggning av ledningsnäten, vilket i sin tur ofta innebär att längden på näten kan minskas. I Vallastaden skulle ledningsnäten ha varit i storleksordningen 50 % längre om konventionell förläggning använts istället för infrakulverten, en förutsättning som också ingår i basscenariot. Hur stor denna längdskillnad mellan de olika förläggningsteknikerna blir i det enskilda fallet kan dock variera avsevärt, bland annat beroende på hur området i fråga är utformat. Denna potential att förkorta ledningsnäten har en relativt stor påverkan på infrakulvertens konkurrenskraft, *Figur 11*.



Figur 11: Ackumulerade medelkostnader utmed livscykeln för konventionell förläggning vid olika längdförhållanden (1:1, 1,5:1 och 2:1) för ledningsnäten jämfört med förläggning i infrakulverten. Som jämförelse visas infrakulvertens ackumulerade livscykelkostnader för basscenariot.

Då längdförhållandet är 1:1, det vill säga lika långa ledningsnät, ökar skillnaden i installationskostnader mellan konventionell förläggning och infrakulverten med 43 % jämfört med basscenariot (1,5:1). Under sådana förutsättningar blir kulverten mer än dubbelt så dyr att installera. I och med att nätlängderna även påverkar behovet av underhåll och förnyelse innebär ett kortare nät vid konventionell förläggning även att skillnaderna mellan teknikernas totala livscykelkostnader blir betydligt större än i basscenariot.

Om längdförhållandet istället är 2:1, det vill säga ett behov av dubbelt så långa nät vid konventionell förläggning, så minskas skillnaden i installationskostnader mellan teknikerna med närmare 40 %. Sett över 100 år blir den totala livscykelkostnaden för infrakulverten då lägre än vid konventionell förläggning men break-even uppnås först vid 80 år.

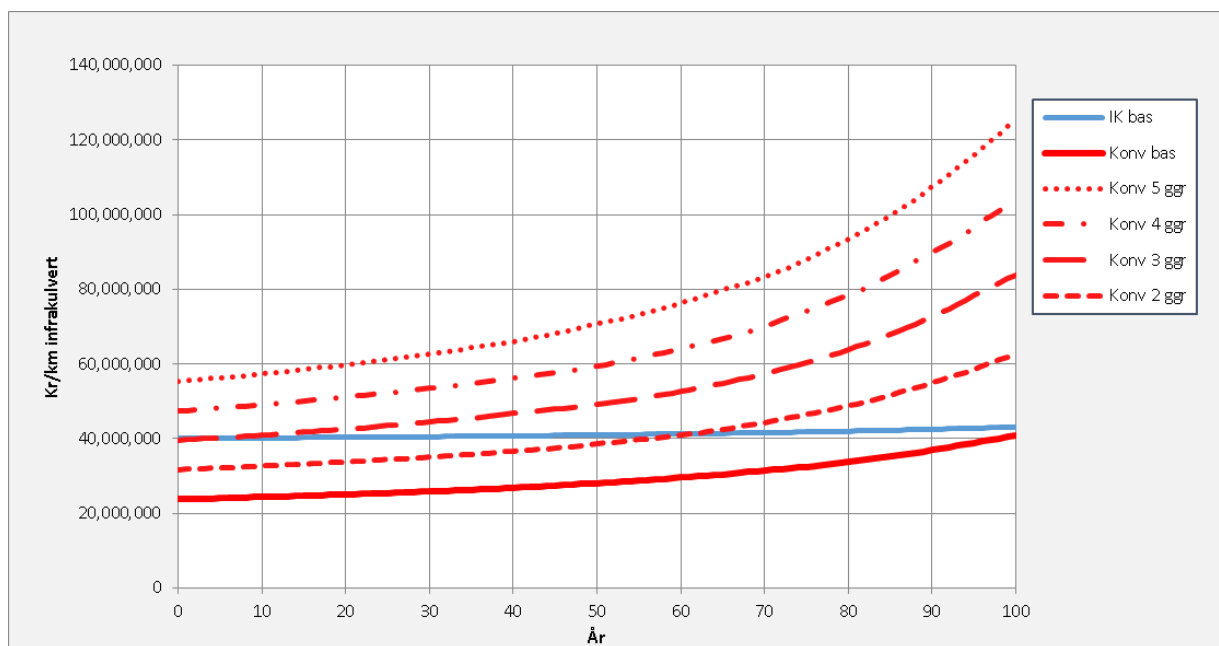
### 5.2.2 Schaktningskostnadens påverkan på den ekonomiska jämförelsen

Basscenariot för den konventionella förläggningen utgår från typkostnader från en mängd genomförda projekt. Det finns dock många villkor och förutsättningar som kan öka denna

”medelkostnad” i det specifika fallet och de faktorer som påverkar kostnaden för schaktarbeten vid installation, förnyelse och underhåll är det som har störst påverkan på livscykelkostnaden. Här handlar det inte bara om markförhållanden utan kostnaden för schaktning påverkas även av bebyggelsestäthet och utrymme för arbetsmaskiner, möjlighet till lagring av schaktmassor, trafikintensitet eller andra typer av aktiviteter som skapar försvårande omständigheter i markplan.

En dubblerad kostnad för schaktarbeten i samband med installation, förnyelse och underhåll kan anses relativt vanligt förekommande i projekt där konventionell förläggning används. Att kostnaden för schaktning är tre gånger så hög är relativt ovanligt men förekommer då och då vid mer komplicerade projekt och försvårande omständigheter. I extrema och sällsynta fall kan schaktkostnaden till och med vara så pass hög som 4-5 gånger den medelkostnad som används i basscenariot. Detta motsvarar områden som normalt sätt inte exploateras och där extraordinära åtgärder krävs såsom exempelvis dubbelsidig kvarvarande spont.

Vid en fördubblad kostnad för schaktarbeten i samband med konventionell teknik minskar skillnaden i installationskostnad gentemot infrakulverten med 50 %, *Figur 12*. Redan under sådana projektspecifika förutsättningar blir infrakulvertens totala livscykelkostnad betydligt lägre än för konventionell förläggning med den relativt stora investeringskostnaden för kulverten betalar sig inte förrän efter ca 60 år.



Figur 12: Ackumulerad livscykelkostnad för konventionell förläggning vid olika kostnadsfaktorer (2, 3, 4 och 5) för schaktarbeten jämfört med basscenariot för infrakulverten. Kostnadsfaktorn påverkar kostnaden för schaktningen vid installationen och den totala kostnaden för underhåll- och förnyelseprocesser.

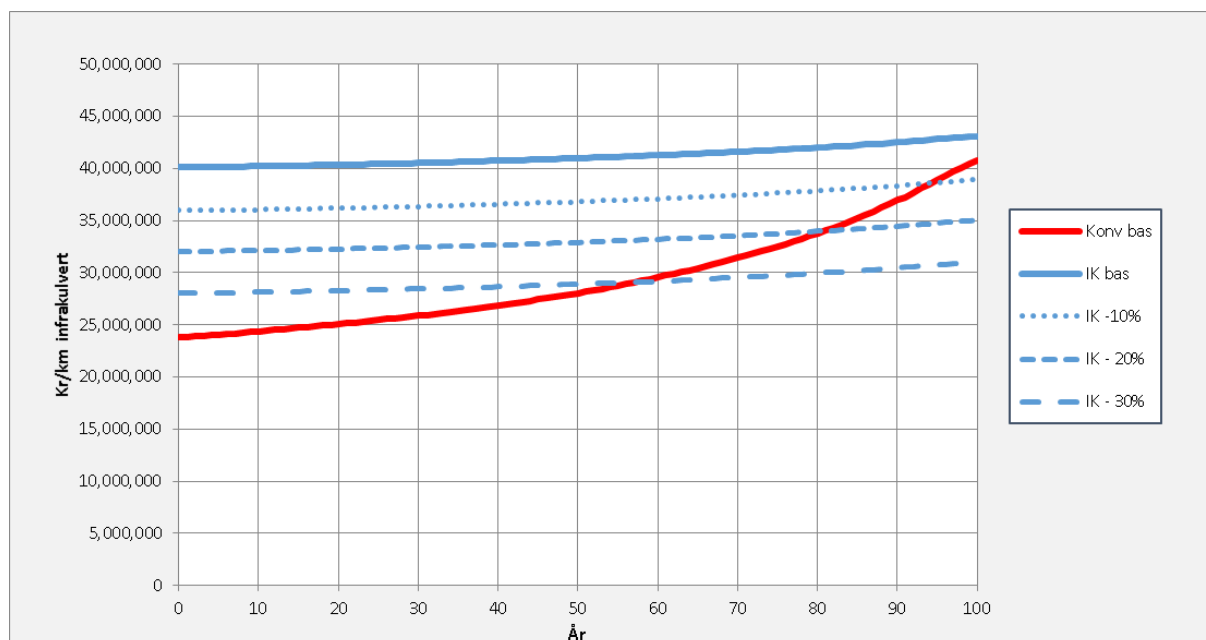
För att installationskostnaderna för de olika teknikerna ska bli i samma storleksordning krävs projektspecifika villkor som gör konventionell förläggning ca tre gånger så dyr jämfört med den medelkostnad som används i basscenariot. I sådana fall finns tydliga ekonomiska incitament att välja kulverttekniken, inte minst beroende på att de totala livscykelkostnaderna

då kan halveras. För extremfall där exempelvis dubbelsidig spontning krävs vid konventionell förläggning är infrakulverten även ett betydligt bättre alternativ vad gäller installationskostnader. Att även kunna exploatera sådana områden med mycket svåra markförhållanden till en mer rimlig kostnad är sannolikt en viktig konkurrensfördel med infrakulvertkonceptet.

### 5.3 Potential av olika åtgärder för förbättrad livscykelprestanda av infrakulverten

Infrakulverten är en ny och relativt obeprövad teknik som hittills bara har tillämpats vid ett enda tillfälle i Vallastaden, Linköping. På sikt finns det därför sannolikt en potential att minska både produktions- och installationskostnader genom lärandeeffekter och gradvisa effektiviseringar. En ökad grad av prefabricering och effektivisering av befintliga produktionsmetoder är ofta centrala delar av en sådan utveckling. I och med att infrakulverten används i fler och fler projekt utvecklas även kunskap, erfarenheter och arbetsrutiner för hur själva installationen av kulverten ska göras på ett så effektivt sätt som möjligt. Det är inte ovanligt att sådana lärandekurvor för produktion och installation av ny teknik på sikt leder till kostnadsreduceringar i intervallet 10-30 %.

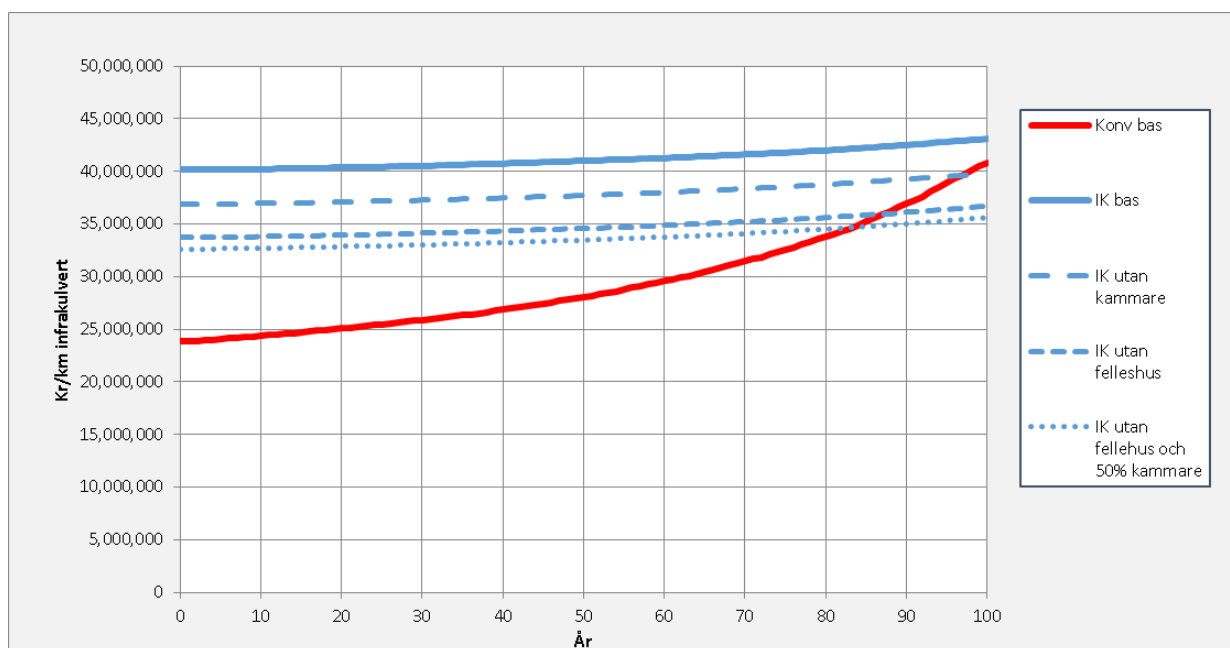
Vid 10 % kostnadsreducering av installationskostnaden till följd av effektiviseringar och långsiktiga lärandeeffekter minskar merkostnaden för att investera i kulverten istället för konventionell förläggning med nästa 30 %, *Figur 13*. Även om de totala livscykelkostnaderna för teknikerna då blir likvärdiga är break-even-tiden för kulvertens större investeringskostnad fortfarande mycket lång, ca 95 år.



Figur 13: Olika potentialer för att på sikt minska infrakulvertens installationskostnad (10, 20 och 30 % kostnadsreduceringar) till följd av lärandeeffekter, prefabricering och gradvisa effektiviseringar av produktion och installation. Som jämförelse visas även livscykelkostnaderna för infrakulverten och konventionell förläggning i basscenariot.

Vid en kostnadsreducering på 30 % av installationskostnaden innebär infrakulverten endast en ökad investeringskostnad på ca 20 % jämfört med motsvarande medelkostnad för konventionell förläggning. En break-eventid för en sådan merkostnad fås först runt 60 år men den totala livscykelkostnaden för infrakulverten blir å andra sidan 30 % lägre än för konventionell förläggning. Kostnadsreducering till följd av långsiktiga lärandeffekter och effektivisering kan därmed påverka infrakulvertens konkurrenskraft mycket men vid jämförelse med basscenariot för konventionell förläggning är fortfarande investeringskostnaden högre.

Det är inte bara lärandeffekter och gradvisa effektiviseringar av produktionsmetoder som potentiellt kan öka infrakulvertens konkurrenskraft utan även förändringar av kulvertens konstruktion kan bidra till minskade installationskostnader. Som beskrivits i tidigare kapitel utgör produktionen av fellethus och kammare en stor andel av denna installationskostnad. I Vallastaden finns det enbart källarplan på felleshusen och dessa byggdes för infrakulverten. I andra områden med källarplan i fler fastigheter kan möjligtvis dessa användas som substitut för kammare och fellethus. På så sätt minskar kostnaden för produktion av de kammare och fellethus som enbart är kopplade till infrakulvertsystemet. I *Figur 14* visas hur kostnaden förändras då inga fellethus, kammare eller 50 % färre kammare och inga fellethus behövs för infrakulverten.

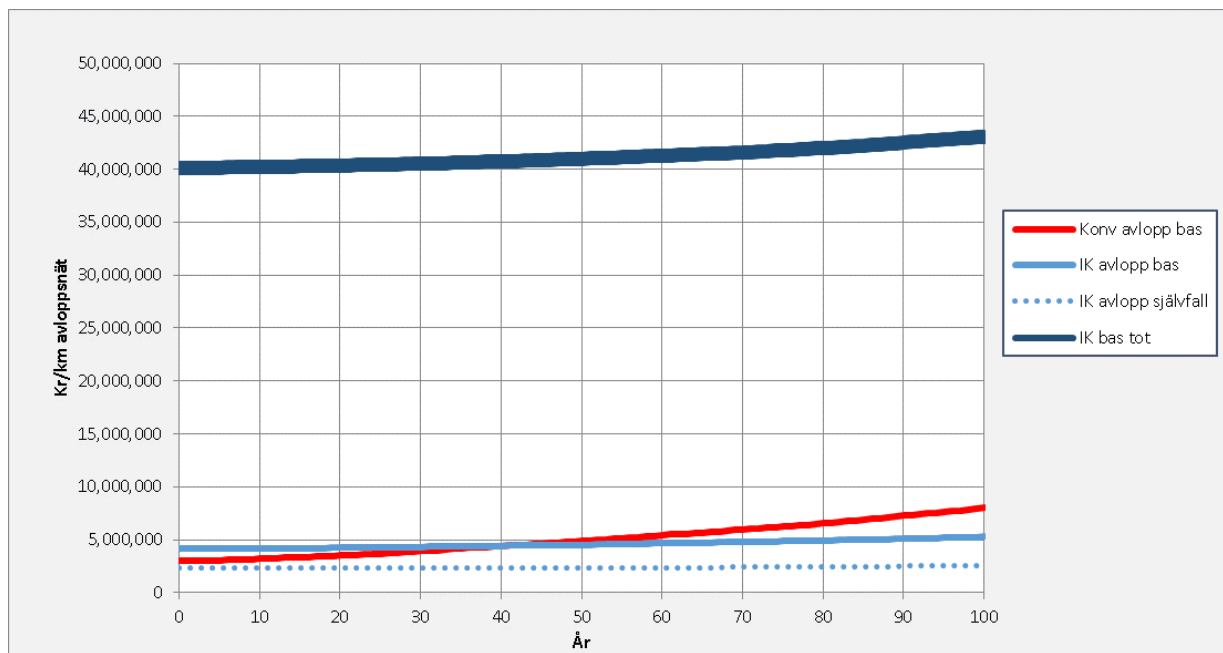


*Figur 14: Ackumulerad livscykelkostnad (medel) för infrakulverten då inga fellethus, kammare eller inga fellethus och 50 % färre kammare krävs. Som jämförelse visas även livscykelkostnaderna för infrakulverten och konventionell förläggning i basscenariot.*

Om förläggning utan kammare kan utföras så minskar investeringskillnaden mellan teknikerna med 20 % och brek-even för infrakulverten högre investeringskostnad blir vid år 95. Att undvika behovet av fellethus har en större potential och kan potentiellt minska skillnaden i investeringskostnad gentemot konventionell förläggning med närmare 40 %. Om inga fellethus och 50 % färre kammare används vid förläggningen av kulverten blir investeringskillnaden endast något lägre (46 %) och break-even uppstår runt år 85. Att försöka undvika kammare och

felleshus i så stor uträkning som möjligt påverkar infrakulvertens konkurrenskraft även om det fortfarande är dyrare att förlägga med infrakulverten än vid basscenariot för konventionell teknik.

Att utveckla konceptet ytterligare kan även innebära andra tekniska lösningar för ledningsnäten men sådana förändringar har i regel en betydligt mindre effekt på infrakulvertens installations- och livscykelkostnader. Att utveckla lösningar för att kunna lägga avloppssystemet med självfall även i kulverten, och därmed minska behovet av pumpar och backventiler, minskar exempelvis bara infrakulvertens installations- och livscykelkostnaden med några få procent, *Figur 15*.



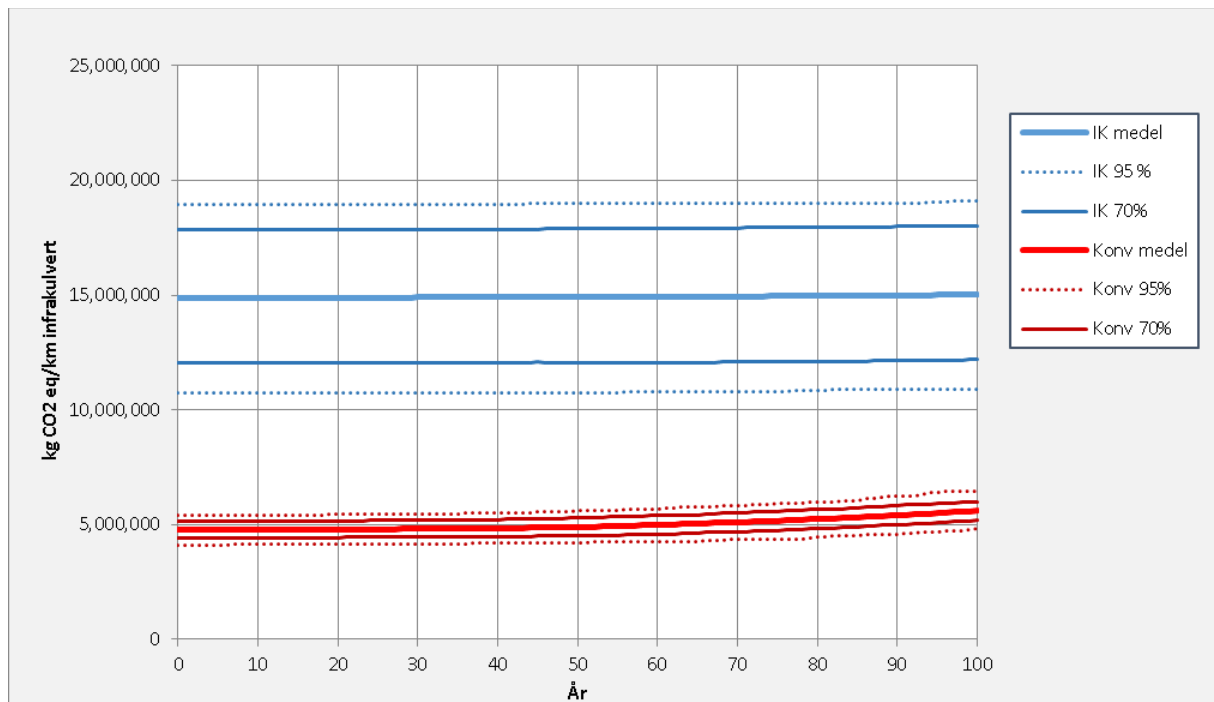
*Figur 15: Den ackumulerade medelkostnaden för avloppssystemet vid två olika typer av förläggning: självfall (prickad blå) och trycksatt (heldragen blå).*



## 6. Resultat – Miljömässig livscykelprestanda för infrakulverten

I det här kapitlet analyseras infrakulvertens miljömässiga prestanda jämfört med konventionell förläggning. Först presenteras resultaten för basscenariot där den totala klimatpåverkan för de båda förläggningsteknikernas livscykel ställs mot varandra för att identifiera skillnader och de processer som ger upphov till störst påverkan. I likhet med de ekonomiska analyserna analyseras därefter projektspecifika villkor och hur de påverkar infrakulvertens klimatprestanda. Till sist utvärderas potentialen av förbättringsåtgärder och förändringar kopplat till infrakulvertens installation och produktion.

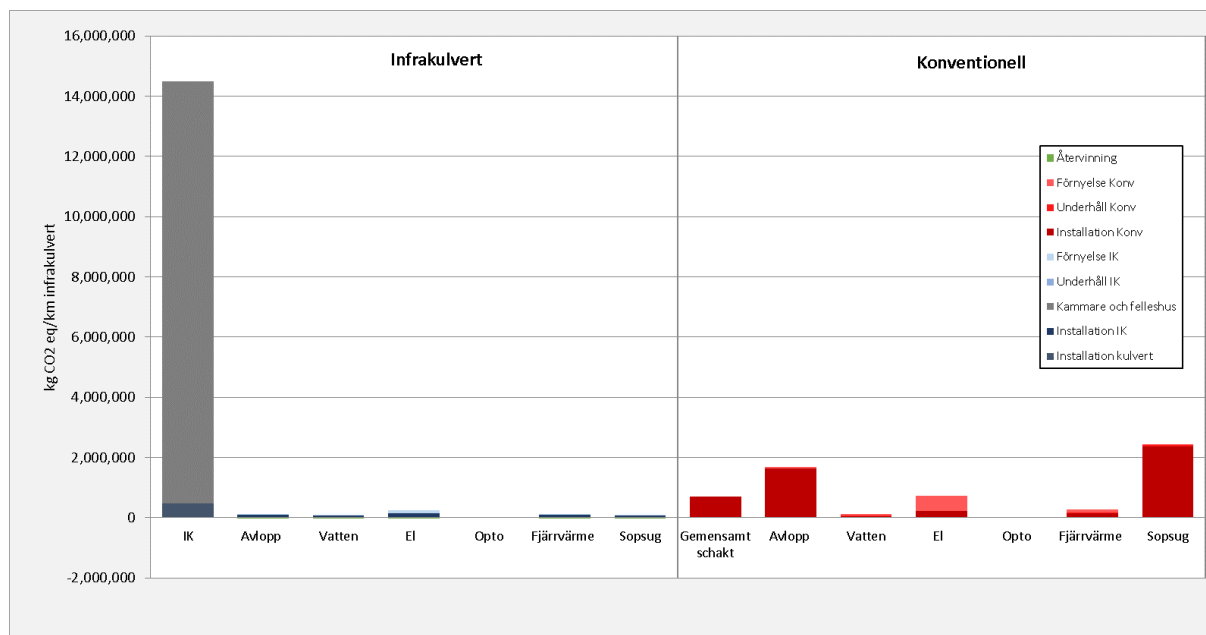
Infrakulvertens totala klimatpåverkan för livscykeln är ungefär tre gånger så hög som miljöpåverkan vid konventionell förläggning, *Figur 16*. Den största skillnaden mellan teknikerna uppkommer redan vid installationen där infrakulverten har en avsevärt större påverkan. Under användningsfasen ger den konventionella förläggningen upphov till större klimatpåverkan, i huvudsak till följd av ett ständigt återkommande behov av schaktarbeten för förnyelse och underhåll av ledningsnäten.



*Figur 16: Ackumulerade klimatpåverkan under livscykeln för de olika förläggningsteknikerna i form av medelpåverkan samt 70 och 95 % konfidensintervall.*

För att få en djupare förståelse om vad som bygger upp miljöpåverkan för de båda teknikerna delas klimatpåverkan upp i olika livscykelkategorier, *Figur 17*. Det är mycket tydligt att den största miljöpåverkan vid förläggningen av infrakulverten uppkommer till följd av

produktionen av den betong som både kammare och fellehusen består av. Det är hela 97 % av miljöpåverkan vid installationen av infrakulverten som orsakas av denna betongproduktion.



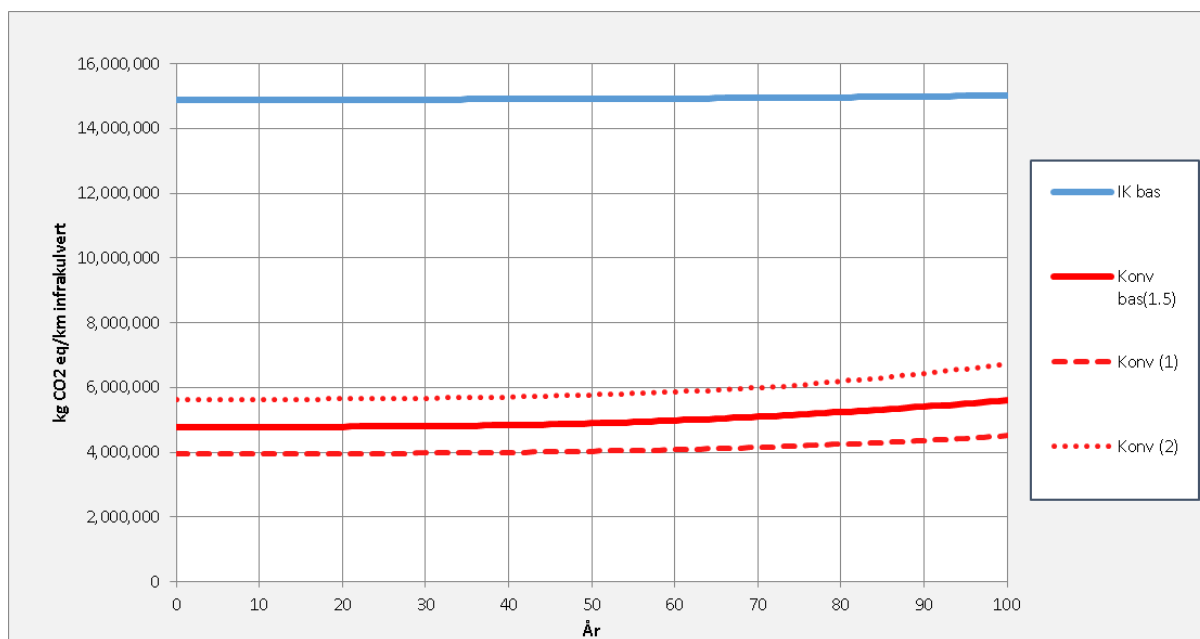
Figur 17: Klimatpåverkan (medel) för olika livscykelkategorier vid förläggning i infrakulvert (blå) och med konventionell teknik (röd). Klimatpåverkan för livscykeln är uppdelad i sju olika kategorier där påverkan för installation av infrakulverten och det gemensamma schaktet vid konventionell förläggning visas separat medan övriga kategorier berör de olika ledningsnäten.

För konventionell förläggning orsakar installationen av avlopps- och sopsugssystemen störst miljöpåverkan. Även här är det produktion av betong som slår igenom i och med behov kopplat till avloppsbrunnar och sopnedkast. För infrakulverten används fellehusen och kammare för dessa funktioner.

I och med betongproduktionens stora bidrag till klimatpåverkan vid installationen får övriga livscykelkategorier såsom underhåll, förnyelse och återvinning en relativt liten betydelse för infrakulvertens prestanda och konkurrenskraft. Vid underhåll och förnyelse kopplat till konventionell förläggning ger schaktning och återställning upphov till i snitt 57 % av den totala klimatpåverkan. Eftersom schaktning inte krävs vid underhåll och förnyelse i infrakulverten hade detta kunnat vara en betydande faktor i jämförelsen. Men givet betongens stora klimatpåverkan vid installation av infrakulverten blir betydelsen av att undvika dessa processer näst intill försumbar. Detsamma gäller positiva klimateffekter av att infrakulverten möjliggör återvinning av de uttjänta delarna av ledningsnäten. Även om sådana effekter kan ha en relativt stor betydelse för klimatpåverkan av enskilda nät (t ex. elnätet) så är de i jämförelsen mellan infrakulverten och konventionell förläggning försumbara.

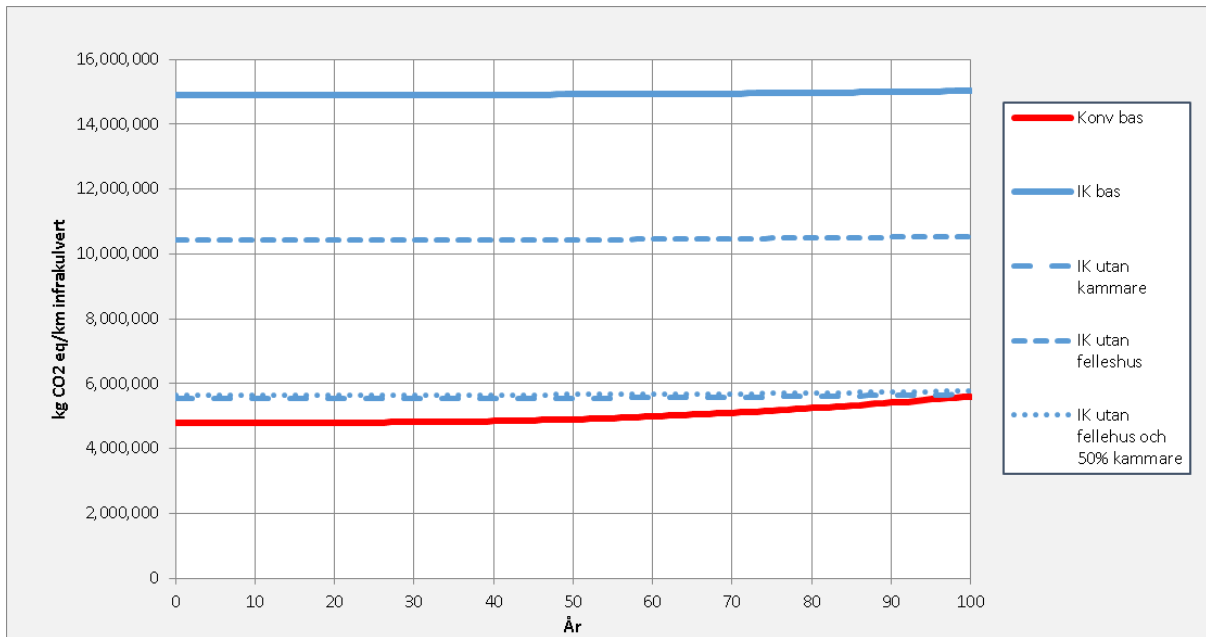
### 6.1 Projektspecifika villkor och potential av olika förbättringsåtgärder

Vid den ekonomiska analysen hade antagandet kring det konventionella ledningsnätets längdförhållande jämfört med infrakulverten stor betydelse för jämförelsen. Vid samma analys för klimatpåverkan spelar detta längdförhållande en betydligt mindre roll, *Figur 18*. Även om längden på ledningsnäten har stor betydelse för klimatpåverkan från konventionell förläggning är fortfarande infrakulvertens påverkan flera gånger större.



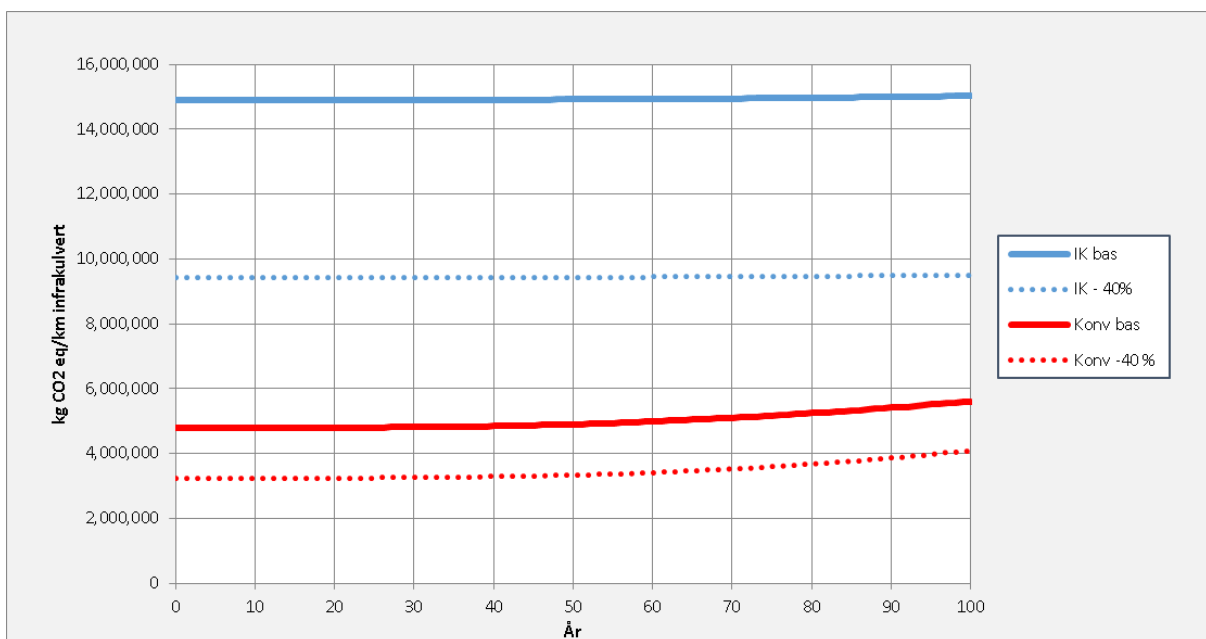
Figur 18: Klimatpåverkan utmed livscykeln för konventionell förläggning vid olika längdförhållanden (1:1, 1,5:1 och 2:1) för ledningsnäten jämfört med förläggning i infrakulverten. Som jämförelse visas infrakulvertens klimatpåverkan ackumulerade för basscenariot.

Som beskrivits tidigare kan behovet av fellethus och kammare potentiellt undvikas vid framtida förläggningar av infrakulverten. För att analysera hur sådana konstruktionsförändringar påverkar infrakulvertens klimatpåverkan analyseras tre olika fall: förläggning utan kammare, utan fellethus och 50 % färre kammare och utan fellethus. Om samtliga kammare kan undvikas vid förläggningen av infrakulverten minskas den initiala skillnaden mellan infrakulvertens och det konventionella nätets klimatpåverkan med hela 93 %, *Figur 19*. Den totala klimatpåverkan för de båda förläggningsteknikernas livscykel blir då snarlik. Att helt undvika behovet av kammare kan vara svårt men i princip samma effekt kan erhållas genom att undvika behovet av fellethus och 50 % av kammarna.



Figur 19: Klimatpåverkan (medel) utmed infrakulvertens livscykel då inga fellehus, kammare eller inga fellehus och 50 % färre kammare krävs. Som jämförelse visas även klimatpåverkan för infrakulverten och konventionell förläggning i basscenariot.

Att undvika kammare och fellehus är ett sätt att undvika den stora miljöpåverkan från betongproduktionen. Att välja en betong som är bättre för miljön är ett annat. Det finns betong på marknaden som tillverkas med större andel återvunnet material som kan ge upphov till så pass mycket som 40 % lägre klimatpåverkan, *Figur 20*. Att vid upphandling ställa krav på miljöanpassad betong kan därmed ha lika stor betydelse som att undvika behovet av fellehus.



Figur 20: Klimatpåverkan (medel) utmed infrakulvertens livscykel för basscenariot och då en betong med 40 % mindre klimatpåverkan används. Som jämförelse visas även climateffekterna av att använda miljöanpassad betong för avloppsbrunnar och sopnedkast vid konventionell förläggning.

## **7. Infrakulvertens ekonomiska och miljömässiga konkurrenskraft**

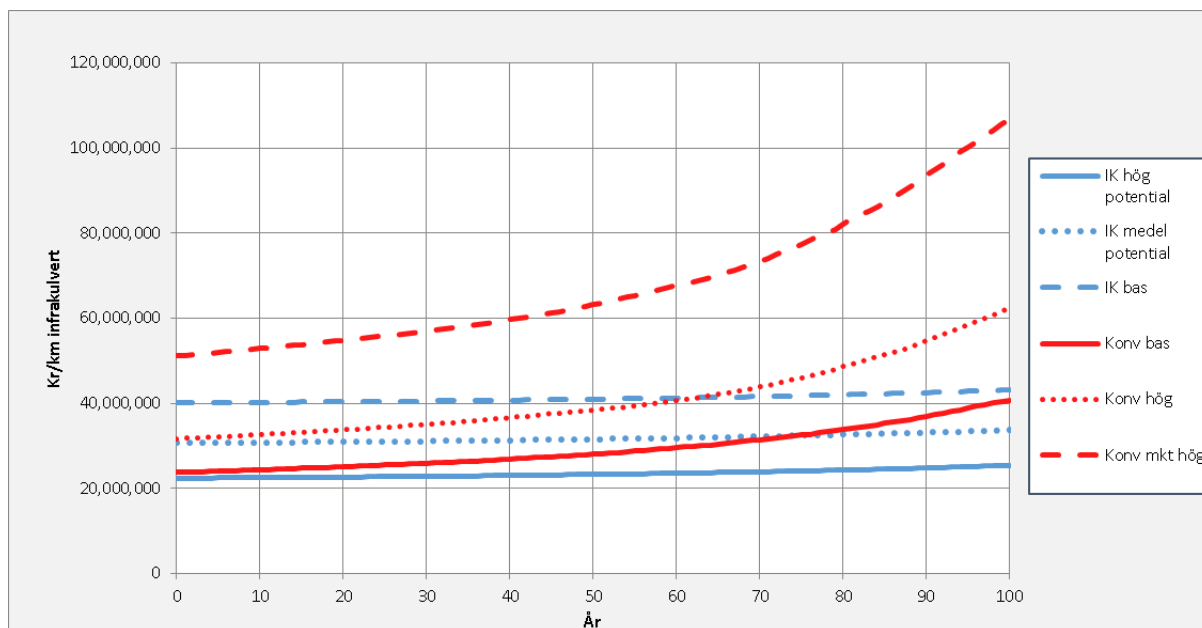
I detta kapitel sammanfattas några av huvudpoängerna från kapitel 5. *Resultat – Ekonomisk livscykelprestanda för infrakulvertkonceptet* och 6. *Resultat – Miljömässig livscykelprestanda för infrakulverten*.

### **7.1 Infrakulvertens ekonomiska konkurrenskraft**

Våra ekonomiska analyser visar att under normala projektförhållanden är infrakulverten i nuläget ett dyrt alternativ till traditionell förläggning. Det är framförallt den höga investeringskostnaden som gör infrakulverten svår att motivera från ett ledningsägarperspektiv.

En stor del av arbetet med att utveckla kulvertens konkurrenskraft ligger i att identifiera projekt där alternativkostnaden för konventionell förläggning är högre än normalt, *Figur 21*. Redan vid en fördubblad kostnad för installation, underhåll och förnyelse på grund av försvårade omständigheter för schaktning blir den totala livscykelkostnaden för infrakulverten betydligt lägre än för konventionell teknik. Även om sådana projektspecifika villkor kan anses som relativt vanligt förekommande i stadsmiljö innebär infrakulverten fortfarande en betydande merinvestering som inte betalar sig förrän efter ca 60 år. På sikt finns det dock en stor potential att minska dessa merkostnader via förändringar och effektiviseringar av infrakulvertens konstruktion, produktion och installation. Bara genom att undvika fellehusen och reducera installationskostnaderna med 10 % via prefabricering och gradvisa lärandeffekter blir en investering i infrakulverten jämförbar med många, lite dyrare konventionella projekt. För att detta även ska vara fallet i jämförelse med konventionell förläggning under normala projektförhållanden krävs dock mer omfattande konstruktionsförändringar (t ex. inga fellehus och 50 % färre kammare) och effektiviseringar (30 % reduktion av installationskostnad) av konceptet. Infrakulverten kan dock redan i sin nuvarande utformning ibland vara ett ekonomiskt konkurrenskraftigt alternativ till konventionell förläggning, men då handlar det om projekt med extraordinära omständigheter och mycket komplicerade villkor för schaktarbeten.

För att utveckla infrakulvertens konkurrenskraft bygger arbetet på två huvudspår. Det ena är att identifiera projekt där alternativkostnaden för annat teknikval än infrakulverten är högre än det normala. Det andra är att vidareutveckla infrakulvertens konstruktion, produktion och installation för att reducera kostnaden.



Figur 21: Medelkostnader för livscykeln för bägge förläggningsteknikerna med olika kombinationer av projektspecifika villkor och utvecklingspotential. För infrakulverten visas basscenariot och två kombinationer av förändrad konstruktion och långsiktiga lärandeeffekter för att påvisa infrakulvertens potential (IK bas, IK medel potential och IK hög potential). För "IK medel potential" antas att förläggningen sker utan fellehus och lärandeeffekter leder till 10 % lägre installationskostnad. Vid "Hög potential" installeras infrakulverten utan fellehus och 50 % färre kammare och med en lärandeeffekt som minskar installationskostnaden med 30 %. För den konventionella förläggningen visas basscenariot och två kombinationer där försvårande förutsättningar för schaktning och nätlängden förändras för att visa på vilka tillämpningar av infrakulverten som kan vara ekonomiskt motiverade (Konv bas, Konv hög och Konv mkt hög). Vid "Konv hög" är kostnaden för schaktningen dubbelt så hög jämfört med basscenariot och vid "Konv mkt hög" är kostnaden för schaktningen tre gånger så hög jämfört med basscenariot och nätlängden är dubbelt så lång jämfört med det konventionella nätet.

## 7.2 Infrakulvertens miljömässiga konkurrenskraft

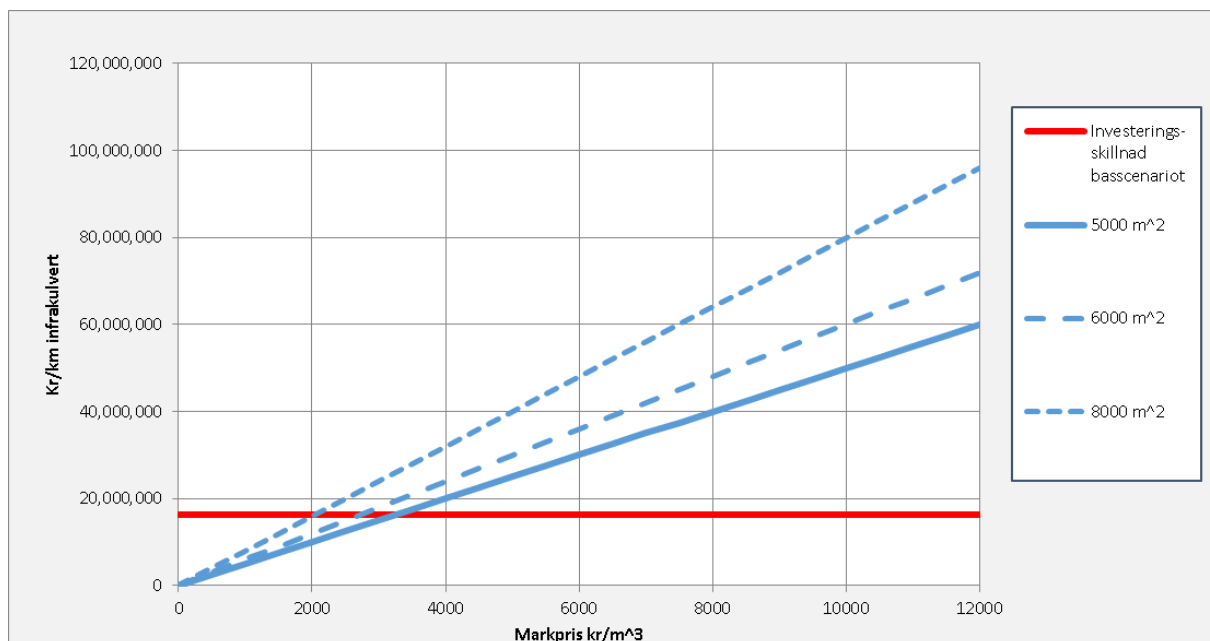
Infrakulverten har i nuläget en betydligt större klimatpåverkan än konventionell förläggning. Det är produktionen av den stora mängd betong som behövs till fellehus och kammare som mer eller mindre uteslutande orsakar denna påverkan. Förändringar för den konventionella förläggningen påverkar inte jämförelsen nämnvärt utan det är åtgärder kopplade till infrakulvertens konstruktion och produktion som har störst förbättringspotential. Att utveckla lösningar för att minska behovet av betongbaserade fellehus och kammare utgör en central del i ett sådant utvecklingsarbete. Även upphandling av miljöanpassad betong har en stor potential att minska infrakulvertens totala klimatpåverkan.

## 8. Fortsatt forskning för att utreda infrakulvertens fulla potential

Utgångspunkten för denna analys var ur ledningsägarens perspektiv. Infrakulvertens fördelar går dock inte enbart att mäta utifrån direkta kvantifierbara ekonomiska och miljömässiga konsekvenser. Att förlägga ledningsbunden infrastruktur i infrakulverten medför värden för en bredare grupp aktörer och för samhället i stort. Vid förläggning i infrakulverten undviks till exempel schaktning vid underhåll- och förnyelsearbeten och värdet av denna enskilda fördel påverkar många olika aktörer så som näringsliv, invånare, gatuhållning och trafik som påverkas vid schaktarbete. För att utreda infrakulvertens fulla potential bör det bredare perspektivet analyseras och komplettera de kvantifierbara analyserna som utförts i denna rapport. Genom att göra det kan möjligheter och hinder kring implementering av infrakulverten kartläggas och ge underlag för fortsatt utveckling av konceptet.

Ett exempel på ett värde som inte innefattas ur ledningsägarens perspektiv är värdet av byggbar yta. Vid konventionell förläggning förläggs ledningsnäten i ett schakt med en bredd på cirka åtta meter. Ytan ovanför ledningsnätet blir obrukbar för bebyggelse eftersom schaktning krävs om behovet av underhåll eller förnyelse uppkommer. Vid förläggning i infrakulverten koncentreras ledningsnäten i kulvertsystemet och hur mycket yta ovan jord som inte går att bebygga kan variera men det krävs med all sannolikhet inte åtta meter i bredd. För att beräkna värdet av den byggbara ytan som frigörs vid förläggning i infrakulverten antas samma nätlängder som i basscenariot (1,5 km för konventionell förläggning och 1 km för infrakulverten) och att den konventionella förläggningen tar åtta m<sup>2</sup>/m ledningsnät i anspråk och infrakulverten tar antingen 4, 6 eller 7 m<sup>2</sup>/m ledningsnät i anspråk. Skillnaden i hur mycket mark de olika teknikerna tar i anspråk ger den byggbara ytan som frigörs vid förläggning. De tre antaganden kring hur mycket mark infrakulverten tar i anspråk ger tre olika mängder av frigjord byggbar yta: 5000 m<sup>2</sup>, 6000 m<sup>2</sup> eller 8000 m<sup>2</sup>.

Värdet av den byggbara ytan kan värderas på olika sätt och denna analys utgår från markens pris vid försäljning. Markpriset beror på många faktorer och för att ge en uppskattning kring värdet vid olika markpriser sätts markvärdet som en linjär funktion av markpriset. Vid basscenariot är jämförelsen mellan förläggning i infrakulverten med konventionell teknik asymmetrisk där en ny teknik med svår förläggning jämförs med en gammal teknik förlagt vid typiska förhållanden. Detta leder till en stor skillnad i investeringskostnad men vid jämförelse med värdet av den byggbara ytan som frigörs vid förläggning i infrakulverten kan en högre investering motiveras då markpriset är högre än 3500 kr/ m<sup>2</sup>, *Figur 22*.



Figur 22: Värdering av byggbar yta för tre olika antaganden kring hur mycket byggbar yta som kan frigöras vid användning av infrakulverten vid olika markpriser(x-axeln). Detta jämförs med skillnaden i investeringskostnaden vid förläggning med infrakulvert och med konventionell förläggning i basscenariot.

Om endast värdet av byggbar yta tas in i den ekonomiska jämförelsen kan infrakulvertens ekonomiska konkurrenskraft öka markant. Eftersom värdet av den byggbara ytan tillfaller markägaren och inte ledningsägaren kan det vara svårt att motivera en högre investeringskostnad för ledningsägaren. Det kan krävas nya former av finansieringslösningar för investering i en infrakulvert jämfört med konventionell förläggning.

Bara genom att visa det ekonomiska värdet i exemplet ovan går det att motivera att bredare analyser kring infrakulvertens potential bör utföras.



## Bilaga 1

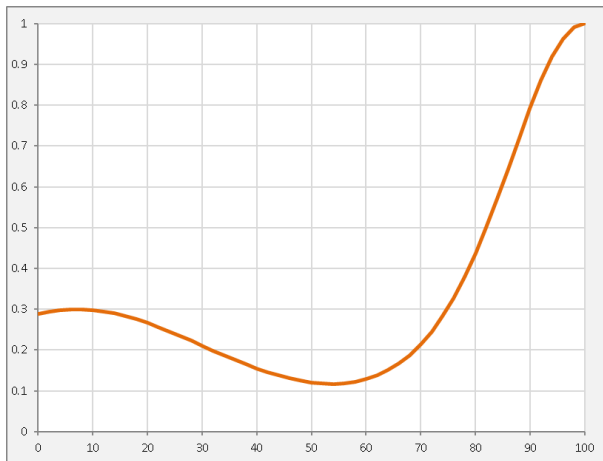
Vatten och avlopp är de ledningsnät där det bedömts att mest information kunnat samlas in för konventionell förläggning och för infrakulverten. Detta gäller främst konventionell förläggning då infrakulverten innebär ny teknik och nya material vilket gör att de bedöms som mer osäkra inom denna förläggningsteknik. För fjärrvärme förekom det sparsamt med information kring underhåll men källan bedöms som trovärdig då det är den ansvariga för fjärrvärmenätet på Tekniska verken som bistått med information.

Sopsugssystemet är en ny teknik och därmed finns det lite information gällande underhåll och förnyelsefrekvenser och kostnader som därför baseras på av tillverkaren uppgiven livslängd och förväntad kostnad. Kostnaderna för installationen är också hämtade från tillverkaren vilket anses trovärdigt. 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 gällde 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.

När underhåll på ledningsnäten analyserades kunde tre olika typer urskiljas: årligt, statistikbaserat och livslängdsbaserat. För att beskriva och modellera vad som bygger upp dessa olika typer av underhåll och förnyelse krävs beskrivning av de tre faktorer som modellerar underhåll och förnyelse. De tre faktorerna är: *Frekvens, utfall och omfattning*. *Frekvens* är hur ofta en viss typ av underhåll sker under livslängden. *Utfall* är när i tiden ett underhåll sker och *omfattning* är hur stor kostnad eller miljöpåverkan som uppkommer när underhåll eller förnyelse sker.

Årligt underhåll är underhåll som sker varje år under livscykeln. Denna underhållstyp kräver bara *omfattning* för att modelleras.

Statistikbaserat underhåll är mindre underhåll som sker på ledningsnäten för att upprätthålla ledningarnas funktion. Denna underhållstyp bygger på statistik på hur stor *frekvens* som kan förväntas för den analyserade tidsperioden och ledningslängd. Frekvensen ger enbart antalet underhåll och såldes krävs även data för när i tiden denna typ av underhåll kan förväntas, *utfall*. Det är svårt att uppskatta när i tiden denna typ av underhåll kommer ske. För många typer av tekniker och även ledningsbunden infrastruktur går ”badkars-kurvan” att applicera, *Figur 23*.



Figur 23: : Badkarskurva som används för utfallet av statistikbaserade underhåll. På x-axeln är år och på y-axeln är det sannolikhet.

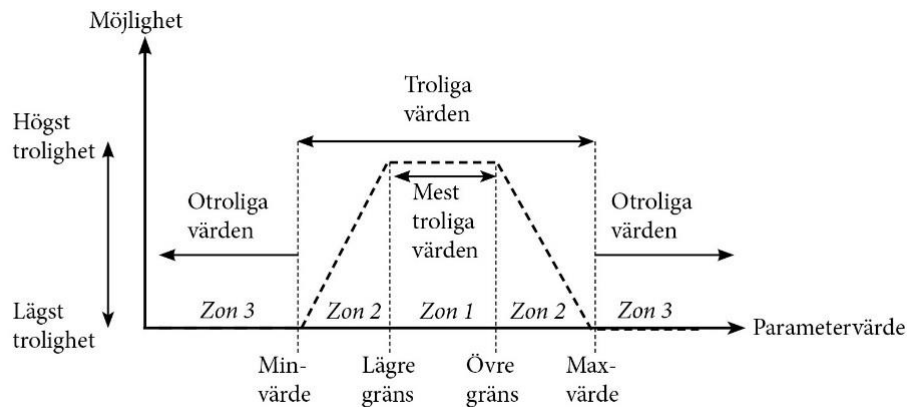
Badkars-kurvan bygger på teori kring hur prestandan på en teknik ser ut över tid. Till en början är behovet av underhåll större på grund av fel i produktion eller installation mm. Utmed livscykeln går sedan behovet ner då ledningarna används och fel från produktion och installation har åtgärdats. När sedan ledningarnas ålder ökar ökas behovet av underhåll på grund av tex slitage. Hur denna typ av kurva ser ut för de analyserade ledningsnäten är mycket svårt att uppskatta och omfattningen för statistikbaserade underhåll påverkar inte den totala livscykelpåverkan utan enbart när i tiden kostnaden faller ut. Den sista faktorn som bygger upp de statistikbaserade underhållen är *omfattning*. Vilken kostnad och miljöpåverkan som uppstår vid denna typ av underhåll skiljer sig mellan ledningsnäten och hur de är förlagda. Den stora skillnaden mellan förläggning i infrakulverten och med konventionell förläggning är att inga schakt krävs vid underhåll i infrakulverten.

Livslängdbaserade underhåll är underhåll på komponenter som har en angiven livslängd. Detta medför att enbart *utfall* och *omfattning* krävs för denna underhållstyp. *Utfallet* är helt enkelt den livslängd som komponenten antas hålla. När den uppnått sin livslängd så byts den ut och således krävs ingen *frekvens*. *Omfattningen* hanteras på samma sätt som för de statistikbaserade underhållen.

Förnyelse av ledningsnäten är större projekt där hela eller delar av nätet byts ut. För att modellera underhållet krävs data för *utfall* och *frekvens*. *Utfallet* är när i tiden förnyelsen sker och i studien antas den enbart bero på ledningsnätets ålder och den ökar linjärt med den. *Omfattningen* för förnyelsen är hur stor del av nätet som byts ut då en förnyelse sker. Detta ger både kostnaden och miljöpåverkan för underhållet.

Eftersom det är en framtidsorienterad studie som ska genomföras är det en prospektiv studie där en prognos för *frekvenser*, *utfall* och *omfattning* behöver tas fram är förknippat med flertalet osäkerheter. Val görs att antingen inkludera osäkerheterna eller utföra ytterligare informationssökning för att reducera dem. I denna studie väljs att inkludera osäkerheterna då ytterligare informationssökning inte ryms inom tidsramen och att studien ska besvara en spekulativ fråga kring vilka kostnader och vilken miljöpåverkan 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 för att få fram ”möjlighetsfördelningar”. En sådan

möjlighetsfördelning kan se ut som *Figur 24*. 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.



*Figur 24: 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.*

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. Denna typ av fördelningen används för *frekvens* vid statistikbaserade underhåll, *utfall* för utbyte vid livslängdbaserade underhåll och andel utbyte av nät vid *omfattning* då förnyelse analyseras.

De möjlighetsfördelningar som beskrivs i avsnittet ovan var ett sätt att inkludera osäkerheterna. 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.

En modell används för att utföra Monte-Carlo simuleringarna där data för *frekvens*, *utfall* och *omfattning* beräknas. I modellen anges den önskade databasen för vilken typ av analys som skall utföras och även mängden iterationer som skall utföras. För att generera resultatet till denna rapport görs 500 stycken iterationer och för varje iteration sparas ner och sammanställs. De sparade resultaten hanteras sedan i modellen och ger ett resultat för den ackumulerade medelkostnaden eller medelmiljöpåverkan för varje år. Utöver ett medelvärde ges även två stycken osäkerhetsintervall där resultatet från antingen 68 % eller 95 % av de 500 iterationerna ligger innanför.