

# Bærekraftige strategier for rehabilitering av vann- og avløpsnett

**Håkon Rygg**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Sveinung Sægvog, IBM

Medveileder: Stian Bruaset, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg- og miljøteknikk



# Bærekraftige strategier for rehabilitering av vann- og avløpsnett

Masteroppgave VA-teknikk 2017, Håkon Rygg

## Bakgrunn

Bærekraftig forvaltning av vann- og avløpsnett innebærer trygg og sikker forvaltning av ledningsnettverket. Systemet skal ha god funksjonalitet med lav risiko knyttet til skader og bortfall av vannforsyning eller avløpskapasitet. Systemet skal også forvaltes slik at kostnader holdes lave. Forvaltningen av vann- og avløpssystemene ivaretas på tre nivåer, hvor også bærekraften kan vurderes;

- Strategisk nivå, hovedplaner som gjengir overordnede målsettinger i et tidsperspektiv på typisk 10-20 år.
- Taktisk nivå, identifiserer ledninger som er kandidater for fornyelse og rangerer dem.
- Operativt nivå, teknologi for gjennomføring av prosjekter fastlegges og prosjektene implementeres.

Flere kommuner har i dag strategiske vurderinger med hensyn til anvendelse av full utskiftning versus gravefrie løsninger for reovering av eksisterende ledninger. Ofte er disse basert på kortsiktige (taktiske og operasjonelle) vurderinger, og bærekraften til prosjekter blir ofte basert på prosjektspesifikke sammenligninger. For å vurdere bærekraften til et prosjekt velger man normalt ut en liste med indikatorer som dekker de tre aspektene av bærekraft; miljø, økonomi, sosialt. Denne oppgaven skal se på bærekraften til ulike strategiske løsninger over deres livssyklus. For å kunne gjøre dette må man ta i bruk såkalte levetidskurver for rehabiliteringsstrategiene og vurdere effekten på indikatorene over hele strategiens levetid (som dekkes av levetidskurven). Ved å sammenligne bærekraften over livssyklusen til fornyelsesmetoder, istedenfor bare for enkelt prosjekter vil man få et bedre grunnlag for å ta avgjørelser.

Mange norske byer benytter seg i stor grad av no-dig løsninger for å fornye ledninger. Dette gjør de for å redusere kostnader, redusere størrrelsen på inngrepet, og for å redusere CO<sub>2</sub> avtrykket. I flere tilfeller i dag og i framtiden vil man redusere andelen av no-dig løsninger i byer for å fokusere på separering av felles systemer grunnet effekten av klimaendringer. Ved en separering vil man øke den hydrauliske kapasiteten til systemet. For å kunne separere må man grave opp og skifte ut ledningene. En slik endring i praksis hos kommunene vil helt klart påvirke framtidige rehabiliterings strategier, og forandre de i forhold til slik de er i dag.

## Spesifisert oppgave

1. Litteraturstudie rundt prinsipper for bærekraftbegrepet og beskriv state-of-the-art innen bærekraft i vannsektoren.
2. Analyser bærekraften til ulike rehabiliteringsstrategier over deres livssyklus. Definer først en prosess for å beregne livssyklus-omfanget til en kohort. Prosessen skal normalisere kohorter i forhold til hverandre mhp levetid. Anvendt den foreslåtte prosessen for å sammenligne følgende strategier mhp bærekraft:
  - a. No-dig, ikke-strukturell metode (mørtel/epoxy drikkevann).
  - b. No-dig, semi-strukturell metode (strømpe).
  - c. No-dig, full strukturell metode (PE ledning).
  - d. Full utskiftning.
  - e. Full utskiftning med koordinering av avløps- og drikkevannsprosjekter.
  - f. Full utskiftning med koordinering av avløps- og drikkevannsprosjekter, og rehabilitering av vegger.
3. Case studie for Trondheim kommune med No-dig versus utskiftning.
4. Basert på resultatene fra punkt 2, 3 og 4, diskuter i et langtidsperspektiv hvordan valg av ulike rehabiliterings strategier vil påvirke bærekraften til norsk VA-sektor, både med hensyn til økonomi, miljø og det sosiale aspektet.  
-Diskuter hvordan en bærekraftanalyse med full utskiftning blir påvirket med bruk av el-lastebil.

## Assistanse

Doktorgradskandidat Stian Bruaset, Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU vil være veileder for denne oppgaven, assistert av professor Sveinung Sægrov.

## Sammendrag

Planlegging av utskiftningsmetoder for vann og avløp bør utføres i et langt tidsperspektiv. Enkelte effekter kommer ikke fram i et kort tidsperspektiv, men inkluderes derimot i et langt et. Planlegging av denne utskiftningen kan gjøres ved å kombinere bærekraft og asset management. Asset management sørger for å minimere bruk av penger og ressurser, mens bærekraft ivaretar framtidige utfordringer. Å kombinere de kan ha flere fordeler som imøtekommer framtidens utfordringer. Derimot vil kombinasjonen kunne komme i konflikt med eksterne faktorer som økonomi, kvalitet på utførelse og effektivitet.

Tidligere bærekraftanalyser har benyttet levetid som en indikator ved rehabiliteringsplanlegging av vann og avløp. Problemet med dette er at rehabiliteringsmetoder har ulik levetid, noe som gjør at man sammenligner ulike metoder på ulikt grunnlag. En metode med kortere levetid vil måtte utføre flere rehabiliteringsprosesser for å oppnå samme levetid som en metode med lengre levetid. Dette medfører at ressursbruk og påvirkning fra metoder med kort levetid, i realiteten vil ha større innflytelse i et strategisk perspektiv. For å sammenligne ulike metoder på likt grunnlag er nåtidens levetider for ikke-strukturell metode, semi-strukturell metode, strukturell metode, full oppgraving, koordinering mellom VA og koordinering mellom VA og vei bestemt. Levetidene er videre brukt for å framstille bærekraftfaktorer. Metodene med kort levetid får høy bærekraftfaktor og visa versa.

Utvalgte bærekraftfaktorer er benyttet i bærekraftanalysen for å se utslaget i forhold til tidligere analyser. Bærekraftanalysen er gjort etter nåtidens standard hvor verdier og utregninger er basert på Trondheim kommune. I et bærekraftig perspektiv med bruk av bærekraftfaktorer, viser analysen at det vil være mindre differanse på metoder med kortere levetid i forhold til metoder med lengre levetid. Kostnadsberegningen til ulike strategier viser tilsvarende. Totalt sett er fortsatt no-dig metoder billigere og mer bærekraftig enn full graving.

## **Abstract**

Planning of rehabilitation methods for water and sewage systems should take place over a long time perspective. This is done so effects that will not appear in a short time perspective will be included. It is possible to combine sustainability and asset management to plan rehabilitation. Asset management is a planning process used to minimize money consumption and the use of assets. The combination of the two is used to meet future challenges. On the other hand a combination is partly in conflict, because sustainability includes external factors about economy, quality of performance and efficiency.

Several sustainability analyses use lifetime as an indicator, when they are planning rehabilitation of water and sewage systems. Different rehabilitation methods have different life cycle. Dissimilar methods should not be directly compared, because it will then be based differently. Rehabilitation methods with short life cycle need to be rehabilitated several times to achieve the same lifetime as other long lasting methods. This means that in reality short-lived methods will have a greater impact in a strategic time perspective. The lifetime of non-structural method, semi-structural method, structural method, replacement, replacement coordination and replacement coordination with roads is determined. Life cycles are further used to generate sustainability factors. The sustainability factors provide the opportunity to compare methods on an equal basis. Short-lived rehabilitation methods are associated with high sustainability factors and vice versa.

Selected sustainability factors will be used to compare result from previous sustainability analysis. The analysis is based on up-to-date values for Trondheim municipality. By using sustainability factors, it shows by using a strategic perspective that there will be less difference between methods with shorter life cycles compared to methods with longer life cycles. In addition there will be less difference in cost. Overall the no-dig method is cheaper and more sustainable than replacement.

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i forbindelse med uteksaminering i Vann- og miljøteknikk våren 2017 ved NTNU. Arbeidet tilsvarer 30 studiepoeng i vannforsynings- og avløpsteknikk, TVM 4905.

Overordnet omhandler masteroppgaven hvordan levetid for ulike rehabiliteringsstrategier påvirker bærekraft. Jeg har valgt oppgaven etter interesse om rehabilitering av ledningsnett. Dette har gitt meg mye kunnskap som jeg ønsker å ta med meg videre inn i arbeidslivet.

Jeg vil benytte anledningen til å takke Stian Bruaset for god og kontinuerlig veiledning. I tillegg vil jeg takke Sveinung Sægrov. Takk for informasjon og rettleiding om koordinering fra Pericault et al. (2017). Takk til skribenter i Sørumsdalen et al. (2010) som har gitt meg lov til å basere case-studien på verdier fra deres bærekraftsanalyse. Takk til Nilssen (2016) og til ansatte i andre norske kommuner som gav meg mye god info i prosjektoppgaven. Infoen har vært viktig for masteroppgaven. Til slutt vil jeg takke min enestående kjæreste, mine venner på kontoret, min søster, samt alle andre som har bidratt.



---

Håkon Rygg

9. Juni 2017





## Innholdsfortegnelse

<b>Bærekraftige strategier for rehabilitering av vann- og avløpsnett.....</b>	<b>i</b>
Bakgrunn .....	i
Spesifisert oppgave .....	ii
<b>Sammendrag .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>iv</b>
<b>Forord.....</b>	<b>v</b>
<b>Innholdsfortegnelse .....</b>	<b>vii</b>
<b>Tabelliste.....</b>	<b>viii</b>
<b>Figurliste .....</b>	<b>ix</b>
<b>Del 1, Innledning.....</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Mål med oppgaven.....	1
1.3 Oppgavestruktur.....	1
<b>Del 2, Litteraturstudie .....</b>	<b>3</b>
2.1 Asset management .....	3
2.11 Hvorfor bruke asset management?.....	3
2.12 Tre nivåer av AM.....	3
2.13 Strategisk planlegging .....	4
2.14 Plan-do-check-act .....	5
2.2 Bærekraft .....	7
2.21 Definisjon av bærekraft.....	7
2.22 Tre bærekraftige aspekter .....	7
2.23 Metoder for å måle bærekraft .....	10
2.3 Drøfting av bærekraft mot asset management.....	11
<b>Del 3, Metoder for rehabilitering av VA-nettet.....</b>	<b>13</b>
3.1 Bakgrunn for rehabilitering.....	13
3.11 Kohort.....	13
3.12 Levetidskurve.....	13
3.13 Livssyklus .....	15
3.14 Hvorfor se på livssyklus?.....	15
3.15 Herz-formel .....	17
3.16 Forklaring av levetidsfaser .....	18
3.2 Strategier .....	19
3.21 Strategi A, Ikke-strukturell metode .....	20
3.22 Strategi B, Semi-strukturell metode .....	23
3.23 Strategi C, Strukturell metode.....	26
3.24 Strategi D, Full utskiftning .....	28
3.25 Strategi E, Koordinering av drikkevann- og avløpsprosjekter.....	30
3.26 Strategi F, Koordinering av drikkevann- og avløpsprosjekter og veier .....	35
3.3 Resultater fra ulike metoder .....	41
3.4 Diskusjon av metoder og resultater .....	43

<b>Del 4, Casestudie</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1 Bakgrunn for bærekraftanalysen</b> .....	<b>47</b>
<b>4.2 Oppdaterte verdier</b> .....	<b>48</b>
<b>4.3 Inndeling av soner</b> .....	<b>51</b>
<b>4.4 Utrekning</b> .....	<b>54</b>
4.41 Overordnet utregning .....	54
4.42 Ressurser .....	55
4.43 Miljøindikatorer .....	57
4.44 Helsemessige indikatorer .....	57
4.45 Sosiale indikatorer .....	58
4.46 Kvalitetsindikatorer .....	58
<b>4.5 Bærekraftanalyse</b> .....	<b>60</b>
4.51 Fordeling .....	60
4.52 Normalisering.....	60
4.53 Vekting.....	61
<b>4.6 Økonomisk vurdering</b> .....	<b>62</b>
4.61 Kostnad i soner .....	62
4.62 Kostnad for bærekraftanalysen .....	64
<b>4.7 Resultater fra bærekraftanalysen</b> .....	<b>65</b>
<b>4.8 Diskusjon av bærekraftanalyse</b> .....	<b>75</b>
4.81 Bærekraftanalyse med el-lastebil.....	78
<b>4.9 Konklusjon</b> .....	<b>80</b>
4.91 Faglige og tekniske antagelser .....	81
4.92 Videre arbeid .....	81
<b>Referanser</b> .....	<b>82</b>

## Tabelliste

Tabell 1, Ikke-strukturell metode.....	21
Tabell 2, Parametere fra ikke-strukturell metode.....	22
Tabell 3, Krav til ringstivhet.....	23
Tabell 4, Semi-strukturell metode.....	25
Tabell 5, Parametere fra semi-strukturell metode.....	25
Tabell 6, Strukturell metode .....	27
Tabell 7, Parametere fra strukturell metode .....	27
Tabell 8, Full utskiftning .....	29
Tabell 9, Parametere fra full utskiftning.....	29
Tabell 10, Koordinering vann og avløp .....	32
Tabell 11, Parametere fra koordinering vann og avløp .....	34
Tabell 12, Levetid vei .....	36
Tabell 13, Parametre fra koordinering VA og vei .....	40
Tabell 14, Areal strategier.....	41
Tabell 15, Forskjell i areal.....	41
Tabell 16, Bærekraftfaktorer .....	42
Tabell 17, Inngangsverdier.....	50

Tabell 18, Gjennomsnittlige transportavstander.....	56
Tabell 19, Prosentvis bruk av metode (Rygg, 2016) .....	60
Tabell 20, Soner med tilhørende forholdstall.....	63
Tabell 21, Kostnad i ulike kommuner (Rygg, 2016).....	64
Tabell 22, Indikatorer for rød sone.....	65
Tabell 23, Normaliserte verdier i rød sone .....	67
Tabell 24, Straffepoeng i rød sone.....	68
Tabell 25, Indikatorer for gul sone.....	69
Tabell 26, Normaliserte verdier i gul sone .....	70
Tabell 27, Straffepoeng i gul sone.....	71
Tabell 28, Indikatorer for rosa sone.....	72
Tabell 29, Normaliserte verdier i rosa sone.....	73
Tabell 30, Straffepoeng i rosa sone .....	74
Tabell 31, Kostnad for utførelse .....	74

## Figurliste

Figur 1, Skjema for utførelse (Bruaset and Sægrov, 2017) .....	2
Figur 2, Oppbygging av AM.....	4
Figur 3, Plan-Do-Check-Act (Røstum, 2013).....	6
Figur 4, Tre aspekter ved bærekraft (Enander et al., 2014) .....	9
Figur 5, Illustrerte levetidskurver Bruaset (2017) .....	16
Figur 6, Reduksjon av ringstivhet (Simonsen, 2015).....	24
Figur 7, Hypoteser for koordinering .....	33
Figur 8, Trafikklaster ÅDT (Svenson, 2014).....	36
Figur 9, Levetidskurver for trafikklaster (Svenson, 2014) .....	37
Figur 10, Uavhengig hypotese for vei.....	38
Figur 11, Trappesfunksjon.....	39
Figur 12, Koordinering VA og vei.....	40
Figur 13, Levetid for ulike metoder .....	42
Figur 14, Trondheim inndelt i soner .....	52
Figur 15, Ledningsnett i soner .....	53
Figur 16, Forholdet mellom kostnad i ulike soner .....	63

# **Del 1, Innledning**

## **1.1 Bakgrunn**

Tidligere bærekraftanalyser har bruk levetid som en indikator. I et strategisk perspektiv vil rehabiliteringsmetoder i større grad være avhengig av tilhørende levetid. En bærekraftanalyse bør derfor utføres med levetid som styrende faktor. Masteroppgaven skal bruke relevante artikler fra Marlow et al. (2010b), Malm et al. (2013), Bruaset et al. (2017), Pericault et al. (2017), Renaud et al. (2014) og Røstum (2013). I tillegg vil flere andre relevante artikler bli brukt. Bærekraftanalysen skal baseres på analysen til Sørumsdalen et al. (2010), men verdiene blir derimot tilpasset til Trondheim kommune istedenfor til Oslo. Verdier i bærekraftanalysen justeres og oppdateres til dagens standard.

## **1.2 Mål med oppgaven**

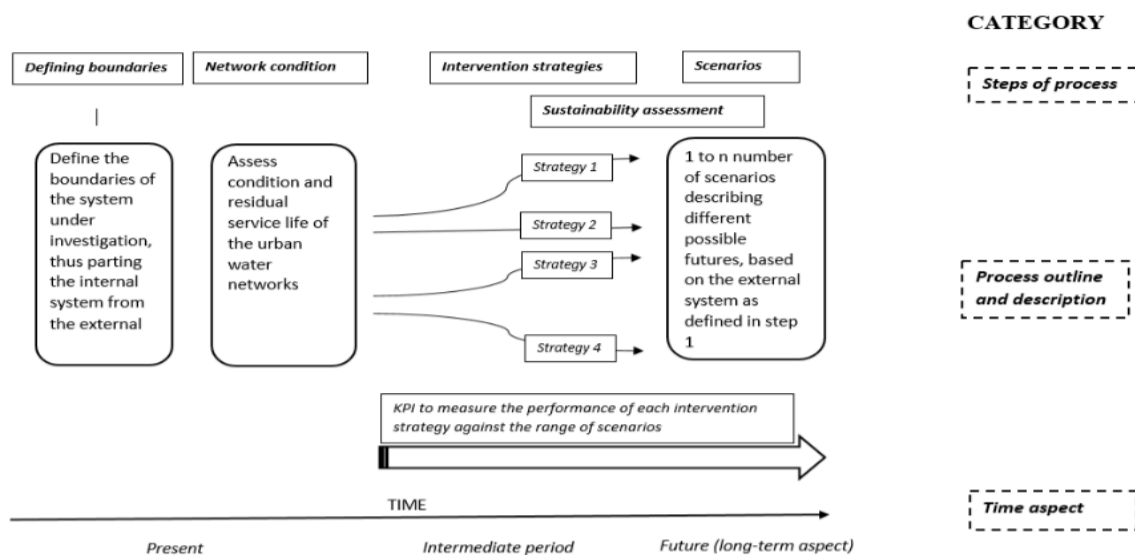
Målet med masteroppgaven er å sammenligne ulike rehabiliteringsstrategier på tilsvarende grunnlag. Strategiene skal sammenlignes ut i fra forskjell i levetid, da dette vil påvirke indikatorene. Målet er videre å finne levetider som representerer nåtidens levetider for ulike metoder, på bakgrunn av disse skal bærekraftfaktorer uttrykkes. Målet med bærekraftfaktorene er å definere faktorer som er enkle og praktiske å bruke i en bærekraftanalyse. Til slutt er målet å utføre en bærekraftanalyse i et strategisk tidsperspektiv for Trondheim kommune. Ulike strategier skal da bli sammenlignet på likt grunnlag med bruk av tilhørende bærekraftfaktorer, resultatet skal videre sammenlignes mot tidligere utførte analyser.

## **1.3 Oppgavestruktur**

Masteroppgaven skal tredeles, hvor det først utføres en litteraturstudie om kombinasjonen mellom bærekraft og asset management. Neste del vil definere levetider til ulike metoder etter dagens beste standard. Siste del skal anvende utvalgte bærekraftfaktorer i en bærekraftanalyse.

Denne masteroppgaven er basert på deler av framgangsmåten til Bruaset and Sægrov (2017) hvor Figur 1 er hentet fra. Første fase i Figur 1 definerer konteksten for et prosjekt.

Det er viktig å lage grenser for hva som er viktig og hva som er uvesentlig. Et eksempel er når en gitt del av VA-nettet skal rehabiliteres. Når det planlegges må man avgrense området som skal rehabiliteres, samtidig som vesentlige indre og ytre faktorer for rehabiliteringen blir tatt hensyn til. Overflødig info tas vekk for å få tydelig fokus på de bestemmende kriteriene. I neste steg blir valgt del av nettverket evaluert i forhold til utskiftning. Data fra tilsvarende ledninger brukes til å lage levetidskurver (Kap 3.12) slik at informasjonen videre kan brukes til å bestemme utskiftningstidspunkt. Grunnet usikkerhet med ulike faktorer i et strategisk perspektiv er det vanlig å lage scenarioer, da vil ulike scenarioer føre til ulike levetider. Tredje steg av figuren omhandler strategier, strategier er mulige valg av utførelse. Ulike strategier skal veies opp mot hverandre for å utforske hvilke strategier som er bærekraftige og robuste. Respektive valg vil vise fordeler og ulemper med hver strategi slik at optimal løsning kan oppnås. Overordnet kan man si at valg av strategi avslører kommunens fokus i et strategisk perspektiv med hensyn til metode, risiko og investeringer. Kostnad kommer først ved rehabilitering før man senere ser fordelene. Det er derfor viktig å ha et strategisk perspektiv (Bruaset and Sægrov, 2017).



**Figur 1, Skjema for utførelse (Bruaset and Sægrov, 2017)**

## **Del 2, Litteraturstudie**

### **2.1 Asset management**

#### **2.11 Hvorfor bruke asset management?**

Asset management (heretter AM) brukes for å strukturere en gjennomføringsprosess, prosessen fører til minimering av utgifter og gode løsninger. Alegre et al. (2013) definerer AM som: "The coordinated activities of an organization to realize value from asset".

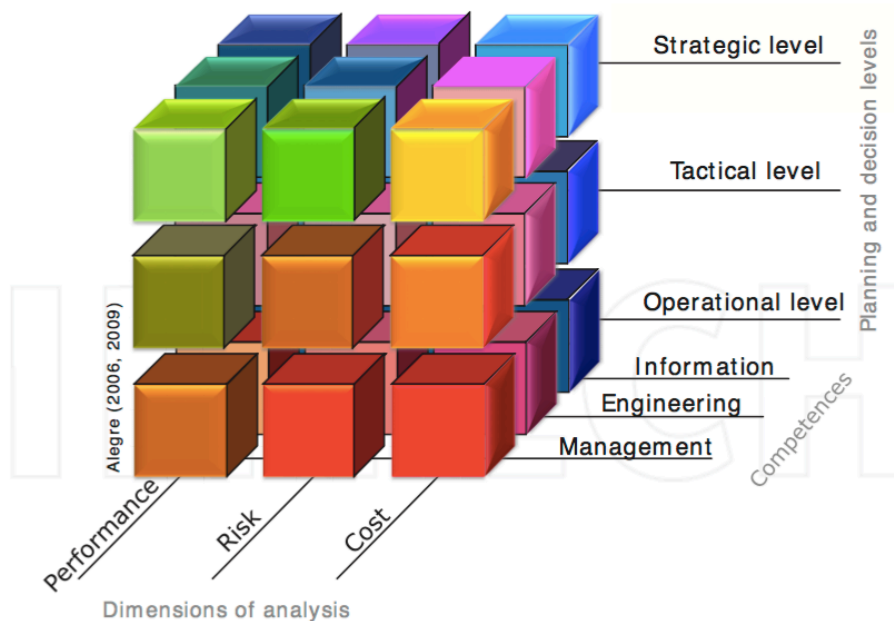
Dagens VA-system er bygget opp gjennom generasjoner og er tilpasset slik at befolkningen skal ha trygg og pålitelig vanntilførsel og avløpshåndtering. Systemet er så stort at man trenger en prosess som ivaretar nettets nytteverdi. Vann- og avløpsnettene skiller seg ut ved at nettet som helhet ikke har en gitt levetid, noe som fører til at man må se på mindre soner. AM er viktig av flere grunner. VA-nettet blir stadig forbedret og utvidet, samfunnet kommer med økende krav og ny teknologi kommer på markedet. For å oppnå en god håndtering av nettverket i et langt tidsperspektiv, samt for å sikre god ytelse, akseptabelt risikonivå og en effektiv beslutningstagning, er AM nødvendig. AM sikrer også økonomisk riktige beslutninger slik at budsjett overholder ønskede mål.

#### **2.12 Tre nivåer av AM**

Figur 2 viser sammensetningen til AM hvor planleggingshorisonten er delt opp i tre nivåer; strategisk, taktisk og operasjonelt nivå. Nivåene er i hovedsak delt opp etter tidshorisont, beslutningsform og type tiltak.

I det strategiske nivået blir hovedlinjene for framtiden bestemt. Retningslinjer blir bestemt på øverste hold og bestemmelsene bør være forankret i gitte visjoner og mål. Mål og visjoner blir laget av politikere, VA-sjef og plansjef. Basert på disse lages fornyelsesplaner og man velger hvilke overordnede strategier som skal benyttes. I det taktiske nivået lager man detaljerte beslutninger for et delsystem eller et område. Beslutningene skal være basert på føringer fra det strategiske nivået. Den som er ansvarlig for VA-nettet foretar taktiske vurderinger som igjen blir brukt til å identifisere områder som bør rehabiliteres.

Tidsperspektivet strekker seg som regel fra 3 til 5 år. I det operasjonelle nivået blir retningslinjer utformet og detaljerte beslutninger bestemt, dette gjør at man kan gjennomføre videre tiltak. Anleggsansvarlig eller driftsansvarlig har da ansvaret for å lage tekniske planer for gjeldende anleggsprosjekt. Tidshorisonten vil være fra 1 til 2 år. På dette nivået vil man høste gevinsten fra god planlegging og prosjektering.



**Figur 2, Oppbygging av AM**

### 2.13 Strategisk planlegging

Utgangspunktet for denne masteroppgaven vil være det strategiske nivået, noe som vil bli nærmere omtalt i det følgende. Som tidligere nevnt blir retningslinjer bestemt ut i fra mål og delmål. Det er imidlertid vanskelig å gjøre disse realistiske. For å oppnå realistiske målsetninger kreves det mye kunnskap om sammenheng og oppbygging av VA-nettet. Informasjon for å lage gode mål kan baseres på overvåkningsystemer eller tilbakemeldinger fra driftsoperatører (Alegre and Coelho, 2012).

Befolkningsvekst og klima kan gjøre det vanskelig å planlegge det strategiske nivået. I byer blir befolkningsvekst ytterligere styrket med en trend av urbanisering (SSB, 2016). Det er vanskelig å planlegge rehabilitering fordi det knyttes usikkerhet til framtidsprognoser, noe som også gjør det vanskelig å bestemme dimensjoneringsgrunnlag. Klimautfordringer er et dagsaktuelt tema som må settes fokus på. Forandring i nedbørsmengde kan gi utfordringer

til vannforskyvning og i form av nye dimensjonsgrunnlag. All den tid man planlegger i et strategisk perspektiv vil usikkerhet forekomme. AM vil forenkle denne planleggingsprosessen, slik at framtidige utfordringer lettere kan håndteres.

Planleggingshorisonten for det strategiske nivået kan ha varighet mellom 10 til 20 år og fra 20 til 100 år. Denne tidshorisonten representerer en usikkerhet som kan ses på som en kjegle, hvor det er liten usikkerhet i nær framtid, altså på tuppen av kjeglen, og større usikkerhet jo nærmere man kommer bunnen. Dette innebærer at usikkerheten vokser i takt med størrelsen på diameteren. AM handler om å håndtere usikkerhet og utfordringer på en god måte, slik at man tilfredsstiller framtidige utfordringer.

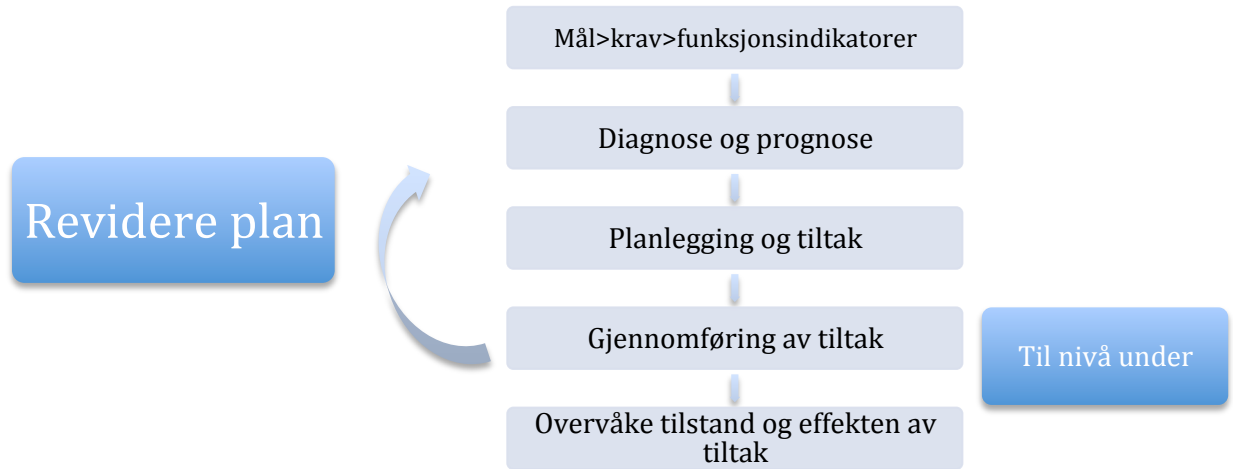
#### **2.14 Plan-do-check-act**

AM skal forvalte ledningene på en god måte. Dette innebærer å minimere kostnad, optimalisere levetid og om å oppnå kontinuerlig forbedring. For å nå målene baserer man prosessen på PDCA-metoden. Det vil si "plan-do-check-act" eller oversatt til norsk "å planlegge, gjøre, sikre og handle". VA-nettet er så stort at man bør ha en jevnlig utskiftning for å unngå store etterslep. Ved utskiftning bør man vurdere tilstanden til nettet, iverksette tiltak og vurdere effekten av tiltakene. I takt med tiden vil kravene til samfunnet endre seg og teknologiutviklingen fører til nye krav og metoder. Røstum (2013) har skrevet dette på en god måte ved å si at "Det som var godt nok før er ikke nødvendigvis godt nok i dag". Det er derfor viktig å bruke ny ervervet kunnskap senere i andre prosjekter.

Fornyelse av VA-nettet bør skje i en kontinuerlig prosess. Prosessen blir imidlertid aldri helt ferdig ettersom ledninger mister akseptabel standard over tid. Fornyelse bør derfor utføres i henhold til en strukturert loop, slik at man sikrer god gjennomføringsevne. Loopen går igjennom de de forskjellige nivåene med fokus på kontinuerlig forbedring. For å oppnå god gjennomføring av tiltak, må gangen i PDCA-sirkelen være tydelig. Mange kommuner og andre aktører har i dag implementert deler av Figur 3, noe som er viktig for å oppnå dette. Det mange derimot mangler er en gjennomgang av de ulike leddene (Alegre et al., 2013). Gjennomgangen er viktig for å oppnå ønsket forbedring, slik at gitte mål og gjennomføringsevnen blir tilstrekkelig ivaretatt. PDCA-metoden skal bidra til god



informasjonsflyt, og erfaring gjort i lavere nivåer skal vandre oppover slik at informasjonen kommer bedriften til gode.



**Figur 3, Plan-Do-Check-Act (Røstum, 2013)**

## **2.2 Bærekraft**

### **2.21 Definisjon av bærekraft**

Brundtland-kommisjonen var tidlig ute med å definere bærekraft. Bærekraft ble definert følgende: "Utvikling som imøtekommer dagens behov uten å ødelegge mulighetene for at kommende generasjoner skal få dekket sine" (Brundtland, 1987). Dette innebærer at næringsaktiviteter i liten grad bør ha negative konsekvenser for miljø og samfunn, samtidig som man må finne gode løsninger som ivaretar dette. I senere tid har bærekraft blitt definert en rekke ganger, men innholdet bygger ofte på det samme. Fokuset er rettet mot å finne nye og bedre løsninger, noe som krever kunnskap og forståelse. Bærekraftanalyser kan være en bidragsyter til å finne slike gode løsninger.

Bærekraft er svært relevant innenfor vann- og avløpssektoren for å opprettholde en god funksjonalitet samt for å sikre framtiden. I dag ser man at byer vokser, noe som fører til økt vann- og ressursforbruk. I tillegg ser man at ledningsnettet eldes, noe som krever nye rør- og distribusjonssystemer. Ved rehabilitering bør det settes fokus på god samhandling mellom sosiale, økonomiske og miljømessige forhold, slik Figur 4 illustrerer. I Norge er det stort fokus på bærekraft både i privat og offentlig sektor, med gradvis større fokus på miljø. I VA-bransjen skal alle VA-anlegg være bærekraftige, noe som er bestemt i VA-norm (2016). Hvilke bærekraftige aspekter som vektlegges i størst grad forandrer seg, men man har tidligere sett at økonomi er en tungtveiende faktor.

### **2.22 Tre bærekraftige aspekter**

Begrepet bærekraft består av tre viktige aspekter. For å finne de beste løsningene, også kalt "state of the art", må man kombinere de tre aspekter på en forenelig måte. Aspektene omhandler miljømessige, sosiale og økonomiske forhold. Figur 4 viser de tre sentrale aspektene i bærekraftbegrepet, hvor man oppnår bærekraft ved å ha én fot innenfor de tre aspektene samtidig. Sosial bærekraft sikrer trygghet for befolkningen som igjen vil føre til gode levevilkår. Miljømessig bærekraft innebærer hvor vidt man innretter seg etter naturens bæreevne. Tiltak skal tåle økosystemets kapasitet og inngrep skal derfor bli en del av økosystemet uten for store endringer. Det tredje aspektet er økonomi. Økonomi henger

sammen med valg av metode og løsning. Å velge en billig løsning kan gå på bekostning av de to andre aspektene. Bærekraft brukes for å sikre framtidens ressursgrunnlag og man bør ha et langt tidsperspektiv framfor kortsiktig gevinst. I det følgende er det laget en liste med eksempler fra de tre aspektene.

### **Sosial**

- Vann- og avløpssystemer som sikrer trygt drikkevann og tilfredsstillende avløpshåndtering.
- I hvilken grad befolkningen blir påvirket av rehabiliteringsprosjekter i form av trafikkulempet og boforhold.
- Støy

### **Miljø**

- Optimalisering i form av lavt ressursforbruk.
- Utslipp av CO<sub>2</sub> og andre miljøgifter.
- Elveløp som flyttes og i den sammenheng legges i rør, på denne måten mister man elvens naturlige liv og man kan senere få kapasitetsproblemer ved store regnskyll.

### **Økonomi**

- Valg av metode
- Billigere løsninger kan være mer skadelig for naturen eller føre til dårligere løsninger for omliggende beboere.
- Kostnadseffekt av levetid i et ledningsnettverk.
- Økonomisk effektiv planlegging og anleggsarbeid, samt prisgunstige materialer.



**Figur 4, Tre aspekter ved bærekraft (Enander et al., 2014)**

Bærekraftbegrepet er kjent for mange, men en felles forståelse på hva som inngår i begrepet for VA-bransjen, synes spredt (Enander et al., 2014, Marlow et al., 2010a). For å oppnå en felles forståelse for dette har Alegre et al. (2014) prøvd å definere begrepet for VA-sektoren. Gjennom EU-prosjektet TRUST har bærekraft i vannsektoren blitt definert som: "Sustainability in urban water cycle services is met when the quality of assets and governance of the services is sufficient to actively secure the water sector's needed contribution to urban social, environmental and economic development in a way that meets the need of present without compromising the ability of future generations to meet their own needs." Bærekraft i VA-bransjen er altså viktig slik at service og kvalitet på tjenestene blir opprettholdt. Samtidig bør prosjekter innenfor VA utføres på en måte som ivaretar de ulike bærekraftige aspektene. Definisjonen innebærer også at man må sørge for å reparere og utbedre VA-nettet slik at dagens og framtidens krav blir møtt. Definisjonen beskriver på mange måter en forvaltning av dagens VA-nett. Dette kan illustreres ved at kommuner driver vedlikeholdsarbeid og metoder og strategier er stadig utbedret og drøftet.

Hvilke oppgaver som skal løses og hvilke løsninger man kommer fram til er et vurderingstema, men i hvilken grad løsningene er bærekraftige er et annet. Dette illustreres ved en ingeniør som ofte faller ned på de samme gamle løsningene. Når man i dag har større fokus på bærekraft, vil ikke disse løsningene sammenfalle med dagens krav til bærekraft (Marlow et al., 2010a). Med større fokus på effektivisering, kompetanse, lekkasjetetting, ledningsfornyelse og innovasjon er det sannsynlig at man vil gå mot bærekraftige løsninger

fordi samfunnet krever forbedringer. Ingeniøren har da ikke noe annet valg enn å etterfølge samfunnets krav. Samfunnet må se på begrepet som helhet, uten å vektlegge økonomi i for stor grad. Det finnes ulike oppfatninger om hva som er viktigst med bærekraften, og svarene vil ofte tufte på subjektive vurderinger (Marlow et al., 2010a). I det følgende vil denne masteroppgaven sette fokus på type utskiftning og i hvilken grad levetiden til en metode påvirker bærekraft. Definisjonen til Enander et al. (2014) er kortfattet og presis og vil være utgangspunkt for videre arbeid; "Bærekraftig forvaltning av VA-tjenester omfatter alle faser i kjeden fra planer, prosjektering, utbygging og etterfølgende drift og vedlikehold" (Enander et al., 2014).

### **2.23 Metoder for å måle bærekraft**

Bærekraft kan beregnes gjennom flere forskjellige metoder. Metodene gir ulikt resultat med hensyn til hva man ønsker å måle. Beregningene kan brukes alene eller i kombinasjon med andre metoder, der noen eksempler er gitt punktvis under.

- Kostnad-nytte-analyse er en analyse som vurderer om prosjektet er samfunnsøkonomisk lønnsomt. Eksempelvis kan dette være forurensing som er en negative ekstern virkning. Det finnes og mange positive eksterne virkninger.
- Økologisk fotavtrykk viser hvor stort areal som er nødvendig for et menneskelig samfunn.
- Livssyklusanalyse tar for seg alle miljøpåvirkninger til et produkt. Det vil si den totale miljøpåvirkningen fra råvareutvinning til håndtering av avfall. Inklusivt er transport og energibruk.
- Livssykluskostnad er kostnaden for en syklus inklusiv oppføringskostnader og driftskostnader.
- Miljødeklarasjoner påser at produkter er utviklet i forhold til gitte krav og bransjestandard. Deklarasjonen er et verifisert dokument som beskriver miljøprofilen til et produkt.
- Bærekraftig livssyklusanalyse er en bred analyse med fokus på bærekraft. Metoden inkluderer aspekter av sosial, økonomisk og miljømessige verdier.

(Hauan, 2017, Sørumsdalen et al., 2010, Finkbeiner et al., 2010)

### **2.3 Drøfting av bærekraft mot asset management**

Det finnes flere utfordringer knyttet til bærekraft. Klimaendringer er i dag et faktum som vil spille en stor rolle for vannsektoren. Selv med nye klimamål satt av FN (FN-sambandet, 2017), er det liten tvil om at det vil skje forandringer. Å møte disse forandringene på en god måte er essensielt for å sikre et godt VA-nettverk. På politisk nivå er det definert at løsninger skal være bærekraftige, men det finnes likevel mange definisjoner på bærekraft som sådan (Marlow et al., 2010a, TRUST, 2012, Enander et al., 2014). TRUST-prosjektet har jobbet med å definere bærekraft, noe som er viktig for at begrepet kan bli implementert og forstått for alle. Med en felles definisjon er det samtidig viktig at prosjekterende tar ansvar med å sette seg inn i bærekraftbegrepet i VA-sammenheng. På denne måten blir nye og bedre løsninger overveid.

Bærekraft og AM kan i noen grad slås sammen for å oppnå et mer helhetlig prosjekt. Grunnen for å slå de sammen kan være for å inkludere eksterne faktorer som ikke vil inkluderes i AM. I bærekraft inngår de tre aspektene miljø, sosiale og økonomiske forhold. AM kan inkludere disse aspektene som overordnede mål, samt fokusere på å sikre god ytelse og riktig risikohåndtering av et prosjekt. I tillegg vil det skapes økonomiske rammer som sikrer at et prosjekt kan gjennomføres innenfor et gitt budsjett. Kombinasjonen kan føre til løsninger som møter dagens og framtidens utfordringer. Mye tyder på at en slik kombinasjon kan bli omfattende, men til gjengjeld kan man finne løsninger som i større grad er rustet for fremtiden.

Bærekraft og AM er i delvis konflikt per definisjon (Bruaset and Sægrov, 2017). AM tar som regel ikke hensyn til eksterne faktorer utenfor egen organisasjon, fordi AM ønsker å maksimere ytelsen av eget system. Motsetningsvis tar bærekraft hensyn til miljømessige og sosiale forhold. På denne måten kan økonomi, kvalitet på utførelse og effektivitet komme i konflikt. Der AM vil minimere kostnad og bruk av ressurser, kan bærekraft kan føre til valg av dyrere løsninger som sikrer en god kombinasjon av aspektene. Ønsker man bedre bærekraftige løsninger må man betale for det, men kostnaden kan bli hentet tilbake i form av mindre ekstern påvirkning og mulig lengre levetid. Norske kommuner har en visjon om å

bli mer bærekraftige (moderniseringsdepartementet, 2017), i enkelte tilfeller kan dette likevel føre til at man velger dyrere prosjekter som da må ta hensyn til eksterne faktorer.

Ytelse, risiko og kostnad er tre viktige elementer i AM på samme måte som faktorer for miljø, sosiale forhold og kostnad er viktige aspekter i bærekraft. Kostnad inngår i begge begreper, for begge ønsker økonomisk sikre løsninger. AM inkluderer risiko og ytelse av et anlegg, som er avgjørende for å sikre god VA-håndtering også i framtiden. Ved å kombinere AM og bærekraft finner man løsninger som er klare til å møte framtidens utfordringer. Bærekraft representerer ikke usikkerhet, til tross for at det skal planlegges for framtidige utfordringer. Usikkerheten knyttet til et prosjekt vil imidlertid øke over en tidsperiode. AM inkluderer på sin side usikkerhet, noe som øker kredibiliteten til en løsning. Bærekraft kan måles ved ulike bærekraftanalyser, og utfallet vil derfor baseres på forhåndsbestemte kriterier. Det vil si at en bærekraftanalyse vil være avhengig av omfanget til analysen. I et strategisk perspektiv kan da omfanget i noen tilfeller bli for lite. Motsetningsvis inkluderer AM ulike tidshorisonter, og løsninger i taktisk og operasjonelt nivå vil derfor i noen grad være bestemt ut i fra strategiske mål og delmål.

VA-norm (2016) stadfester at alle VA-anlegg skal være bærekraftige, grad av bærekraftighet er imidlertid ikke spesifisert. For et slikt resultat bør AM i større grad enn tidligere kobles til bærekraft. Om noen år tror jeg disse to uttrykkene sammenfaller slik at alt man ikke lenger ser ulikheter, men heller jobber sammen for å finne de beste løsningene for et enda bedre samfunn. Man kan implementere bærekraft i PDCA-loopen slik at det dannes bærekraftige mål og krav. Tiltakene bør da tilfredsstillende grad av bærekraft slik at man kan finne optimale løsninger. På denne måten vil man stadig oppnå forbedring og bærekraftighet vil feste seg i organisasjonen. Et eksempel på hvordan dette kan gjøres er å implementere sosiale og miljømessige indikatorer i planleggingsfasen. Ved å iverksette tiltak basert på dette og videre vurdere tiltakene, vil man komme med gode løsninger. Løsningene vil stadig forbedres, og de bærekraftige indikatorene vil med dette bli stammen i gjennomføringen. I tillegg vil løsningene vandre mellom ulike nivåer, noe som gjør at flere vil bli oppmerksomme på utførte løsninger. På denne måten oppnår man flere bærekraftige beslutninger.

## **Del 3, Metoder for rehabilitering av VA-nettet**

### **3.1 Bakgrunn for rehabilitering**

#### **3.1.1 Kohort**

Kohort er fellesbetegnelsen på en gruppe ledninger med like egenskaper. En kohort består av ledninger innenfor et tidsintervall med likt materiale, styrke og påvirkning av laster. Dette gjør at alle rør i en kohort vil oppføre seg omtrent likt. På den måten kan man finne røroppførselen til en gruppe og ikke til en ledning. Ved bruk av kohorter kan man gjennomføre færre levetidsprognoser, noe som er gunstig i et gigantisk ledningsnettverk. Kohorts er samlingen av en gruppe med homogene rør med samme levetidsprognoser (Bruaset, 2017).

#### **3.1.2 Levetidskurve**

Det finnes mange definisjoner for en levetidskurve. På engelsk blir den gjerne omtalt som "survival curve", hvor man på norsk benytter definisjoner som "overlevelseskurve", "levetidskurve", "utskiftningskurve" med mer. I det følgende i denne masteroppgaven vil jeg benytte definisjonen "levetidskurve".

En levetidskurve illustrerer oppførselen til en kohort gjennom levetiden. For å konstruere levetidskurven må data baseres på kohorter, noe som inkluderer bruddstatestikk og tidspunkt for utskiftning. Det er forventet at aldringsegenskapene til ledningene i en kohort er relativt like, slik at kohorten får felles levetidskurve. Kurven indikerer sannsynlighet for at en gitt ledning lever lengre enn tiden  $t$ . Kurven indikerer også en statistisk fordeling for grad av utskiftning (Renaud et al., 2014). Figur 5 illustrerer ulike levetidskurver. Med Herz sin Formel 1 kan man konstruere levetidskurver basert på reelle levetider. Dette er videre forklart i kapittel 3.15.

Renaud et al. (2014) skriver om terminologien med bruk av levetid kontra servicetid. Levetid antyder at et objekt har en definert periode i bruk. Begrepet servicetid redegjør derimot for hvor lenge en gjenstand er i drift. I følge Renaud et al. (2014) bestemmer noen rehabilitering ut i fra gjennomsnittlig levetid. I slike tilfeller er det tvilsomt at rør blir skiftet



ut på optimalt tidspunkt, ettersom man ved å skifte ut ledninger fra et snitt, antas det én bestemt levetid. Innenfor en kohort er det forskjellig grad av kvalitet, noen rør vil leve lengre enn andre. Servicetid passer bedre i VA-bransjen ettersom ledninger kan skiftes ut fra eksterne forhold. Eksempler på dette er ledninger som byttes ut ved koordinering av vann og avløp, vei, ved politiske beslutninger, grunnet hydraulisk kapasitet, sonevis rehabilitering, fysisk levetid, etter alder og ved utbygging. Rehabilitering kan altså bestemmes ut i fra en rekke ulike faktorer. Levetid er ofte styrende for levetidskurver, men levetidskurver blir påvirket av servicetiden til hver enkelt ledning. Servicetid er et riktigere begrep i VA-bransjen, ettersom servicetid forteller når en ledning er forventet utskiftet.

Levetidskurver lages for å gruppere ledninger slik at det kan lages felles analyser (Malm et al., 2013). I et ledningsnettverk ønsker man å vite når utskiftning av ledninger bør skje. Nettverket er svært stort og inkluderer ulike materialer, lagt på forskjellig tidspunkt med forskjellig kvalitet. Med å utarbeide levetidskurver basert på kohorter, avgrensers man nettverket slik at forventet nedbrytningsprosess i et område kan vurderes. På denne måten kan man finne rehabiliteringsbehov, samt sette av midler for å håndtere dette. Utgangspunktet er at ledningsnettverket er stort, men med å utarbeide levetidskurver kan man legge til rette for en kontinuerlig rehabilitering. På denne måten unngår man store etterslep og man får rehabilitert ledninger på optimalt tidspunkt.

Fordelen med kurven er at den inkluderer usikkerhet i form av to verdier, en verst og best tenkelig sannsynlig levetid. Videre kan levetidskurver brukes til å lage budsjettplaner og rehabiliteringsrater, noe som er gunstig for å innkalkulere usikkerhet i budsjettplaner (Bruaset and Sægrov, 2017). Levetidskurver brukes i planleggingen slik at ledninger blir skiftet ut på nødvendig tidspunkt. Ulempen ved gruppering av rør, er imidlertid at feil kan oppstå på enkelte ledninger før estimert servicetid, slik at ledningen krever utskiftning. Feil på ledningsnettverket vises ofte i form av hull i bakken eller med vann som siver ut. Ledninger med feil vil derfor ofte bli oppdaget og undersøkt, slik at man kan reparere eller skifte ut ledningene hvis dette er nødvendig.

### **3.13 Livssyklus**

I løpet av en livssyklus for en kohort skal alle ledninger være skiftet ut. Dette er en kontinuerlig prosess som i sin helhet aldri vil ta slutt, men nye metoder kan bidra til lengre levetid eller billigere prosesser. Livssyklus er definert i ISO14044-standarden som; "The entire life cycle of a product, to end of life and final disposal" (Finkbeiner et al., 2006). En livssyklus omhandler prosessen fra rør blir lagt, til de byttes ut med nye rør. Enkelte omtaler derfor livssyklus som perioden fra rørene fødes til de dør.

Alegre et al. (2016) skriver at begrepet livssyklus ikke kan anvendes på ledningsnett som helhet siden nettet har uendelig lang levetid. Dette fører til at man må dele opp nettet i soner for å lage en avgrensning. På denne måten vil enkelte deler av nettverket ha en livssyklus, mens levetiden til nettverket som helhet forblir uendelig ettersom det stadig blir reparert. For å finne grad av bærekraftighet til strategier, kan man definere livssykluser og evaluere dem opp mot hverandre (Bruaset, 2017). Flere analyser viser at no-dig kommer bra ut i en bærekraftanalyse (Sørumshagen et al., 2010, Røstum, 2013), men problemet i disse tilfellene er at no-dig har kortere servicetid enn graving. På den måten evalueres metodene på ulikt grunnlag.

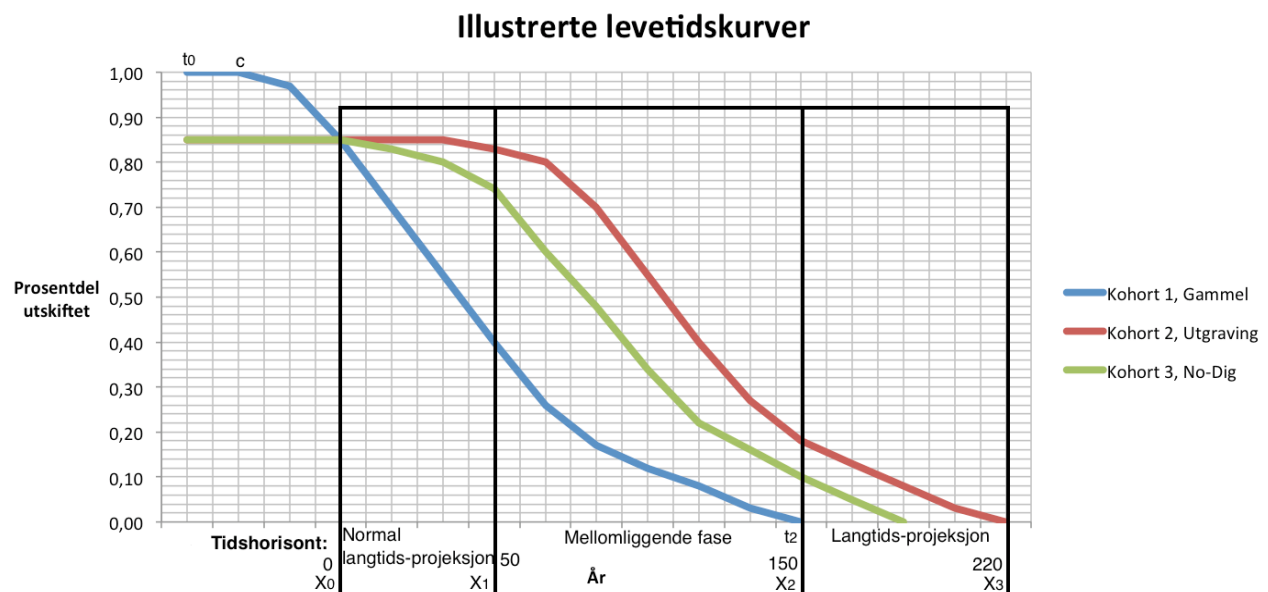
Metode blir valgt ut i fra flere bestemmende kriterier, hvor et av dem er livssyklus. Når rørene legges består de av ypperste kvalitet og har lang forventet levetid. Etter hvert som tiden går vil rørene slites og det vil oppstå feil. Når rørene har utviklet seg til en utilfredsstillende standard, må de skiftes. En livssyklus inneholder alle faser til en kohort og varer fra rørene blir lagt, til alle er skiftet ut.

### **3.14 Hvorfor se på livssyklus?**

Figur 5 illustrerer tre kohorter, en gammel, en kohort ved bruk av no-dig og en kohort ved full utskiftning. Figur 5 illustrerer livssyklusene i forhold til hverandre. Det er vanlig å evaluere metodene opp mot hverandre i et korttids-perspektiv. Det vil si at metoder blir evaluert ut fra ett enkelt prosjekt (Bruaset et al., 2017). Når dette gjøres ekskluderer man negative bærekraftige effekter som først vises etter lang tid. Eksempelvis kan dette være belegg utført som no-dig metode. Belegg er billig og bærekraftig for én livssyklus, men

belegg har kortere levetid enn graving. Konsekvensen av dette er at belegget må rehabiliteres flere ganger i løpet av levetiden til graving. I et strategisk perspektiv får dermed belegg en større negativ effekt. Når man ser på livssyklus blir pris og levetid evaluert, det er viktig å ikke glemme at påvirkningen også må være bærekraftig. Oppsummert er det ønskelig å se på et langt tidsperspektiv slik at man kan inkludere bærekraftige vurderinger, i tillegg får man en riktigere sammenligning av metoder.

Denne masteroppgaven skal evaluere ulike strategier ut fra total levetid, som er definert av metodenes levetidskurver. I løpet av mellomliggende fase blir alle gamle rør skiftet ut, i Figur 5 er dette etter 150 år. I neste fase fortsetter rehabiliteringen, men nå er det de nye ledningene som må skiftes ut. I Figur 5 vil dette skje i langtids-projeksjonen. Ulike strategier og deres livssyklus skal drøftes opp mot hverandre med hensyn til levetid og bærekraft. Tidligere analyser (Sørumshagen et al., 2010) har brukt levetid som en indikator, mens Bruaset (2017) forklarer at alle andre indikatorene også er påvirket av levetid. Levetid skal derfor i denne masteroppgaven bli brukt som en styrende faktor for de andre indikatorene. For å gjøre dette må indikatorene ganges opp med en bærekraftfaktor som vil bli definert fra rehabiliteringsmetodens levetidskurve.



**Figur 5, Illustrerte levetidskurver Bruaset (2017)**

### 3.15 Herz-formel

Herz Formel 1 brukes til å lage en levetidskurve (Herz, 2002). Videre brukes ulike levetidskurver til å sammenligne strategier for ulike metoder med hensyn til levetid. Ved starten av en levetidskurve vil ingen rør være skiftet ut, men etter hvert som tiden går vil en større og større del av kohorten være utskiftet. Dette er illustrert som den prosentvise delen av kohorten utskiftet.

$$S(t) = \begin{cases} 1 - F(t \leq c) = 1 & \\ 1 - F(t > c) = \frac{a + 1}{a + e^{b(t-c)}} & \\ 1 - F(t = \infty) = 0 & \end{cases} \quad (1)$$

I Herz sin formel er parameteren  $a$  en aldringsfaktor. Denne faktoren beskriver helningen på kurven som igjen beskriver hastighet på aldringsprosessen. Parameter  $b$  er en faktor som beskriver feilraten til de eldste ledningene. Parameter  $c$  beskriver hvor holdbar en kohort er. I begynnelsen av hver utskiftningsperiode har man en horisontal linje hvor man bare reparerer med punktreparasjon og da ikke rehabiliterer. Lengden på den horisontale linjen vil være lik  $c$ . Rehabiliteringen starter dermed når ledningen er så gammel at den har passert tiden  $c$  (Herz, 2002, Malm et al., 2012).

I denne masteroppgaven skal strategiene vurderes opp mot hverandre, dette gjøres ved å se på ulikhet i areal under hver levetidskurve. Størrelse på areal er et uttrykk for hvor lenge en strategi vil være i drift. Strategier med sen  $c$ -faktor og slak helning vil få lang levetid og dermed også stort areal. Arealet uttrykker ulikheter i levetid og brukes videre for å lage bærekraftfaktorer, Formel 3. Levetidskurven for en strategi er laget med Formel 1, ved å ta integralet av denne finner man arealet under kurven kalt livsløpsfaktor (LLF), Formel 2 (Bruaset et al., 2017). Blå kurve i Figur 5 tilsvarende kohort 1 viser benevnelsene brukt til å regne arealet under kurven. Utskiftningen starter ved  $t_0$ . Fram til punkt  $c$  rehabiliteres ikke kurven, arealet fram til  $c$  er derfor lik  $c$ . Integralet mellom  $c$  og  $t_2$  tilsvarer arealet under kurven.  $t_2$  er levetid lik året hvor  $y$ -aksen passerer verdi 0,05.

$$LLF = c + \int_c^{t_2} \frac{a+1}{a+e^{b(t-c)}} = c + \int_c^{t_2} \frac{(a+1)(bt - \ln(a+e^{b(t-c)}))}{ab} \quad (2)$$

Bærekraftfaktor i Formel 3 kalt BK viser ulikhet i levetid i forhold til en referanse-levetid (Bruaset et al., 2017). Formel 3 illustrerer hvordan man regner ut bærekraftfaktoren. Formelen illustrerer ulikhet i levetid for en strategi kontra en referansestrategi. Full utskiftning er referansestrategien og får faktor 1 grunnet at metoden har lengst levetid. Levetid er sett på som styrende faktor i bærekraftanalysen i del 4. Med denne betingelsen må bærekraftfaktoren for en metode ganges med indikatorene for metoden. Dette gjøres for å få et rettferdig sammenligningsgrunnlag. Man kan da si at man sammenligner metodene over samme levetid. Indikatorer for metoder med kort levetid vil få høy bærekraftfaktor, dette gjør at indikatorene for metoden får større verdi. Når man videre normaliserer verdiene er levetid tatt hensyn til. Levetid kan da få større betydning enn det tidligere analyser viser. Bærekraftfaktorene baseres på levetider for ledninger etter dagens beste standard, og det er derfor ønskelig at faktorene brukes videre i andre analyser. Når metoder blir forbedret slik at levetidene økes, bør bærekraftfaktorene oppdateres.

$$BK = 1 + \frac{LLF(Referansemetode) - LLF(Rehabiliteringsmetode)}{LLF(Rehabiliteringsmetode)} \quad (3)$$

### 3.16 Forklaring av levetidsfaser

For å gjennomføre case-studien må det gjøres en vurdering av forventet levetid for ulike metoder. Data om levetider er funnet gjennom litteratursøk, datasett og med prediksjon. Levetiden deles inn i tre stadier etter hvor mange rør som fremdeles er i drift. I det første stadiet er 100% av rørene er i drift og ingen rør har blitt rehabilitert. Det må nevnes at det vil bli utført punktrepasjon på dette stadiet grunnet oppstartsfeil. Fase to er definert som alderen til kohorten når 50% av rørene er i drift. Denne fasen er også kalt gjennomsnittsfasen. Siste fase består av de siste 10% av rørene som fortsatt er i drift, rørene er av god kvalitet og man kan forvente lang levetid. I denne fasen har 90% av rørene i kohorten blitt rehabilitert, og grafen slakker ofte ut på grunn av redusert feilrate. De siste

10% av rørene blir sett på som svært sterke og kan få lang levetid. Eksempelvis kan dette være rør som er godt over 100 år (Skaar, 2013).

LTP er et dataprogram for å estimere nåværende og framtidig tilstand av ledningsnett. Basert på verdier for 100, 50 og 10%-inputen regner programmet ut verdier for parameterne a, b og c (Saegrov, 2005). Parameterne brukes i Formel 2 fra Herz for å finne areal under levetidskurve. Ofte finner man et intervall for de ulike levetidsfasene. Intervallet blir så lagt inn i LTP. Fordelen med å bruke et intervall er at to levetidskurver blir laget i LTP. Videre beregner LTP en mest sannsynlig kurve mellom intervallet med tilhørende parametere. Dette gir gode representative verdier med tilhørende levetidskurve.

### **3.2 Strategier**

Mål og funksjonskrav blir tidlig fastsatt for utskiftningsprosjekter av ledninger. Sammen med avgjørende kunnskap om ledningens tilstand blir egnet metode for ledningsfornyelse valgt (AB, 1989). Typiske bestemmelseskriterier er levetid, grad av bærekraft, kapasitet og styrke med mer. Strategiene beskriver forventet levetid etter dagens standard. Dette betyr at verdiene sannsynligvis vil bli høyere med årenes løp på grunn av teknologiutvikling og økt fokus på kvalitet ved ledningsfornyelse. Levetider er beregnet ut i fra eksisterende rør, noe som gjør at utregningene i flere tilfeller er rundet oppover for å dekke teknologisk utvikling. Levetidene vil til slutt bli sammenlignet med levetider i Tyskland (Kropp, 2017), slik at funnene om levetider i denne masteroppgaven kan måles opp mot tilsvarende ledninger.

Ut i fra levetidene blir a, b og c -verdiene beregnet med dataprogrammet LTP. Programmet gir verdier mellom verst og best tenkelig scenario, hvor areal under graf er beregnet ut i fra gjennomsnittet av de to. Ut i fra a, b og c -verdiene finner man en levetidskurve som går i fra verdi 1 mot 0 på y-aksen. Formel 1 viser at Herz-formelen går mot uendelig, det er derfor antatt at integralet går mot verdi 0,05 på y aksen. Alderen til ledningen ved dette punktet er hentet fra analyser av Herz-formelen utført i excel.

### 3.21 Strategi A, Ikke-strukturell metode

Ikke-strukturell metode er definisjonen på rør som blir belagt med et nytt belegg. Belegget i seg selv har ingen strukturell styrke og man forutsetter derfor at det er reststyrke i eksisterende rør. Påføring av tykke lag av epoxy og polyuretan kan skape noen strukturelle egenskaper (Nystog Aas et al., 2016). Hensikten med å påføre nytt belegg er å stoppe korrosjon og redusere ruheten til rør. De siste årene har det vært en stor teknologisk utvikling som har forbedret de ikke-strukturelle metodene. Til å begynne med bestod metoden av en sement-mørtel blanding. Blandingen ble sprayet på rørveggene for å danne et heldekkende lag. Herdingen til denne metoden tok lang tid, noe som førte til sig i belegget, som igjen resulterte til at man fikk et ujevnt lag med størst tykkelse i bunn av røret. Epoxy og polyuretan-belegg har kortere herdetid, epoxy herder på rundt 16 timer, mens polyuretan herder etter 30 minutter. Det er vanskelig å oppnå et jevnt lag ved påføring av disse beleggene, dette kan føre til defekter som tillater korrosjon. Beleggene er også dyrere enn sement-mørtel belegg (Saegrov, 2008, Saegrov et al., 2008, ISTT, 2017, Miljøblad, 2006).

Herz (1998) har utført en casestudie i Tsjekkia, Teplice. Casestudien har tatt utgangspunkt i ulike rehabiliteringsstrategier og sammenlignet disse med hverandre. En av strategiene er relining, det vil si ikke-strukturelle metoder. Relining består av sement-mørtel, epoxy og polyuretan-belegg. Artikkelen framstiller ikke levetidene i tabellform, verdiene er derfor lest av en graf. Dette bidrar til noe usikkerhet i forhold til nøyaktig avlesning. Lengst levetid med belegg oppnås i dag ved å bruke epoxy og polyuretan-belegg (Saegrov, 2008, Saegrov et al., 2008). Sement-mørtel er i større grad nedbrytbart i en vannledning. Utgangspunktet er at epoxybelegg brytes ned av UV-lys, bakterier og lys. Ettersom det i en vannledning er mørkt og fuktig med lite aggressivt vann, kan epoxybelegg få lang levetid.

Saegrov (2008) undersøkte rør med epoxy og polyuretan-belegg etter 10 år. Disse viste svært få tegn til nedbryting, og man forventer derfor en levetid på minst 50 år for epoxy og polyuretan-belegg. Noe tykkere belegg vil beskytte røret lengre, sannsynligvis mer enn 20 år (Saegrov, 2008). Med dette utgangspunktet er det sannsynlig at de mest standhaftige

rørene vil vare lenge. Med ingen tegn til slitasje etter 20 år, og få tegn etter 50 år antas det at de beste rørene med belegg vil vare i minst 70 år. Belegg slites lite og i noen tilfeller kan man sammenligne levetiden med enkelte plastrør (Saegrov, 2008).

Rør i Øst-Europa blir ofte omtalt som dårlige, noe som fører til lavere levetid (Baur and Herz, 2002). Til tross for dette, krever en ikke-strukturell metode styrke fra eksisterende rør. Røret må med andre ord være i relativt god stand for at metoden skal komme til anvendelse (Nystog Aas et al., 2016). Mørtel-sementbelegg inngår i Herz (1998) og Baur and Herz (2002) sin casestudie, i tillegg er undersøkelsen fra 1998 og 2002, ikke-strukturell metode vil derfor ha noe lengre levetid etter dagens standard. Med utgangspunkt i teknologisk utvikling og bedre produkter brukes levetider basert på nyeste forskning (Saegrov, 2008, Saegrov et al., 2008). Alle levetidene er framstilt i Tabell 1, Tabell 2 viser parameterne funnet ut i fra levetiden til ikke-strukturell metode.

**Tabell 1, Ikke-strukturell metode**

Relining, avleste verdier (Herz, 1998) [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
13	20	34	48	50	78
Verdier (Baur and Herz, 2002) [år]					
20	30	30	40	50	60
Verdi basert på (Saegrov, 2008, Saegrov et al., 2008) [år]					
20	30	45	55	70	85
Ikke-strukturell metode [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
20	30	45	55	70	85



**Tabell 2, Parametere fra ikke-strukturell metode**

	Parameter	Snittverdi
Verdier funnet ved hjelp av LTP	a	4,233
	b	0,073
	c	25

Areal under kurven for ikke-strukturell metode er utregnet i Formel 4. Utregningen skjer etter Formel 2 med innsatte a, b, c og  $t_2$ -verdier.

$$\text{Areal A} = 25 + \int_{25}^{88} \frac{(4,233 + 1)(0,073t - \ln(4,233 + e^{0,073(t-25)}))}{4,233 * 0,073} dt = 52,32 \quad (4)$$

### 3.22 Strategi B, Semi-strukturell metode

Strømpeforing er en strategi som er betegnet som semi-strukturell. Det vil si at strømmen er delvis avhengig av støtte fra eksisterende rør for å kunne brukes, strømmen vil også ha noe strukturell styrke (Nystog Aas et al., 2016). Metoden blir utført ved å føre en filt eller fiberduk inn i røret som skal fornyes, samtidig som man tilfører et bindemiddel for å gi røret styrke. Typiske bindemidler er polyester, vinylester-epoxy eller silikatharpiks (ISTT, 2017, Nystog Aas et al., 2016). Strømper kan utformes slik at man oppnår full strukturell kapasitet og metoden får da styrke som tilsvarer nye plastrør (Saegrov, 2008). Ut i fra dette kan man forvente forskjellige levetider for semi-strukturell metode avhengig av styrkeegenskaper. Målinger gjort av Saegrov (2008) gir ikke grunnlag til å kvantifisere levetiden for strømper, men Saegrov et al. (2008) kommer fram til at levetiden er avhengig av tykkelse på foring. For å bestemme levetider i denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i krav til ringstivhet fra en revidert VA-norm fra Trondheim kommune utarbeidet 10. November 2015. Disse står i henhold til krav fra AB (1989), Miljøblad (2017) og Berteig (2016). Kravene er presentert i Tabell 3.

Type 1 -Relativt nytt rør uten skader, noe innlekking åpne skjøter etc.

Type 2 -Eldre rør med store og små sprekker, synlige deformasjoner, røtter, stor korrosjon etc.

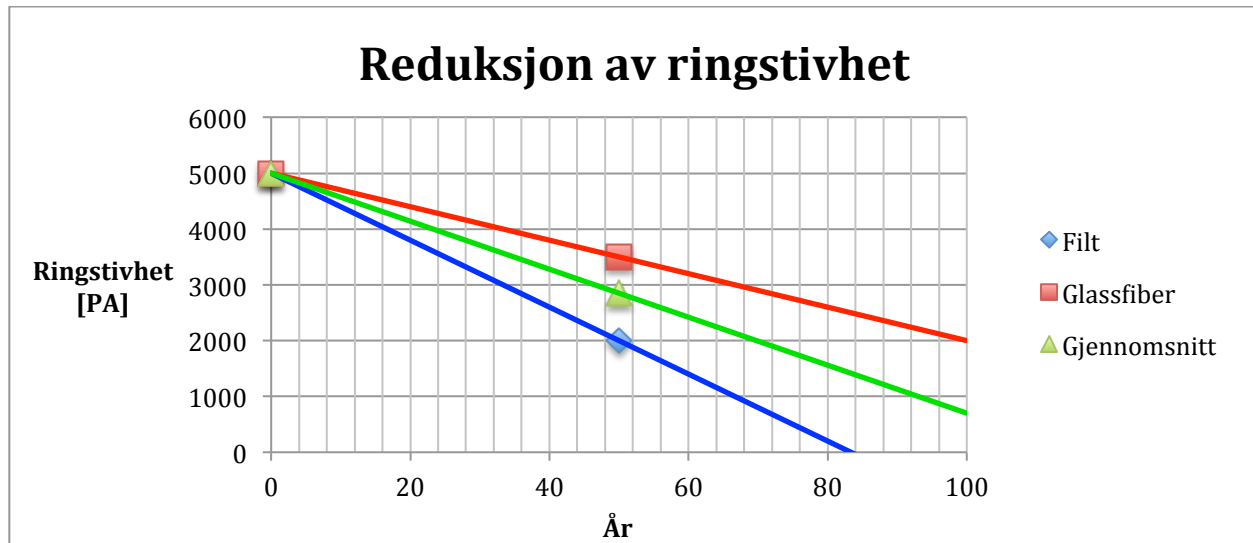
Type 3 -Stor deformasjon av røret (større enn 15%)

**Tabell 3, Krav til ringstivhet**

Type	Korttids ringstivhet (N/m <sup>2</sup> )	Langtids ringstivhet (N/m <sup>2</sup> )
1	2500	1000
2	5000	2000
3	5000	3500

For å finne levetiden til de 10% eldste rørene antas det en ringstivhet mellom type 1 og 2 for langtids ringstivhet, noe som tilsvarer en ringstivhet lik 1500 Pa. Type 3 beskriver stor deformasjon av et rør, ved dette tilfellet er det antatt at man ikke kan bruke semi-strukturell metode. I slike tilfeller bør det graves eller trekkes en ny ledning. Nystog Aas et al. (2016) forteller at strømpeforing kan brukes selv om det er sideforskjøvnne skjøter, deformasjoner og hull. Blir disse feilene for store vil det allikevel være enklere å bruke en annen metode. Ved å ekstrapolere Figur 6 og ta et gjennomsnitt mellom filt og glassfiber

kommer jeg fram til en levetid på rundt 85 år for de 10% eldste rørene. Verst og best tenkelig levetid settes derfor fra 75-95år.



Figur 6, Reduksjon av ringstivhet (Simonsen, 2015)

For å finne levetiden til semi-strukturell metode når 50% av rørene er byttet ut gjøres det en antagelse. Det antas at man kan se bort i fra de 10% eldste rørene. De 10% eldste rørene kan leve svært lenge i forhold til gjennomsnittet og de vil derfor ikke være av representativt grunnlag for de andre rørene. Hvis man inkluderer disse i gjennomsnittet vil gjennomsnittlig levetid bli for høy. Maks ringstivhet er 5000 Pa ut i fra Figur 6, ved å plusse på ringstivheten til de 10% eldste rørene tilsvarende 1500 Pa og dele på to finner man et gjennomsnitt på 3250 Pa. 3250 Pa tilsvarer en levetid på ca. 45 år ut i fra gjennomsnittet mellom filt og glassfiberstrømpe i Figur 6. Gjennomsnittlig levetid antas dermed å være 45 for de 50% eldste rørene. Verst og best tenkelig levetid blir på grunnlag av dette satt fra 35-55 år. Dette stemmer godt med Berteig (2016) som anslår at levetiden til strømpeforinger vil være ca. 50 år. Saegrov et al. (2008) anslår at strømper kan vare i mange tiår, hvor jeg tolker dette til å være mer enn 50 år. En slik tolkning passer bedre med levetiden for de 10% eldste rørene.

Saegrov et al. (2008) og Simonsen (2015) har foretatt inspeksjon av strømperenoverte rør. Saegrov et al. (2008) inspiserer to 20 år gamle rør, som var i god stand og som satt godt sammen med nærliggende rør. Det var imidlertid observert en beskjeden delaminering på

rørene. Simonsen (2015) inspiserte på sin side to rør med filt og to rør med glassfiber, disse har fått skadepoeng ut i fra utseende på røret. Rørene var rundt ti år gamle og hadde få skadepoeng, noe som tilsvarer en meget god og god standard. Med andre ord har strømpereoverte rør så god standard mellom 10-20 år at rehabilitering ikke er nødvendig. Etter 20 år begynner man imidlertid å se tendenser til feil, uten at dette har nevneverdig betydning. På bakgrunn av inspeksjonene settes levetid for når rehabilitering for semi-strukturell metode vil begynne. Intervallet tilsvarende 100% settes derfor fra 20-30 år.

Miljøblad (2017) har som funksjonskrav at strømpereoverte rør skal ha levetid på minst 100 år, men det er ingen standardiserte krav som ivaretar dette. Det er altså opp til ledningseier å bestemme krav til ferdigstilt produkt. Levetid er avhengig av strekkfasthet og tykkelse på foring, levetider på over 100 år har derfor sannsynligvis bedre strekkfasthet og tykkere foring enn det som framkommer i dette kapittelet. Tabell 4 viser levetider for semi-strukturell metode, Tabell 5 viser tilhørende a, b og c-verdier funnet i LTP.

**Tabell 4, Semi-strukturell metode**

Semi-strukturell metode [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
20	30	35	55	75	95

**Tabell 5, Parametere fra semi-strukturell metode**

	Parameter	Snittverdi
Verdier funnet ved hjelp av LTP	a	0,742
	b	0,051
	c	25

Areal under kurven for semi-strukturell metode er utregnet i Formel 5. Utregningen skjer etter Formel 2 med innsatt a, b, c og  $t_2$ -verdi.

$$\text{Areal B} = 25 + \int_{25}^{94} \frac{(0,742 + 1)(0,051t - \ln(0,742 + e^{0,051(t-25)}))}{0,742 * 0,051} dt = 49,55 \quad (5)$$

### 3.23 Strategi C, Strukturell metode

Definisjonen på en strukturell metode er når røret alene kan motstå omliggende krefter gjennom hele levetiden (Nystog Aas et al., 2016). Fornyelsesmetoden utføres ved å presse eller dra et nytt rør gjennom et eksisterende rør eller løsmasser. Rør kan også bores igjennom fjellmasser eller løsmasser. Metoden krever at man graver ved innløp og utløp av ledning, noe som gir lite graving i forhold til full utskiftning. Dette gjør også at volum masse blir mindre. Selve metoden er rask, men man inspiseres ofte eldre ledning før selve utførelsen. PE-rør kjennetegnes med stor fleksibilitet, strekkfasthet og korrosjonsbestandighet. Grunnet disse egenskapene brukes PE-rør ofte som materiale ved utskiftning med strukturell no-dig metode (ISTT, 2017).

SINTEF (2017a) har lagret data fra en rekke utskiftningsprosjekter. Dataene er tatt vare på for å planlegge framtidig utskiftning i Norge. SINTEF (2017a) består av omtrent 90 datagrunnlag med levetider på forskjellige rørtyper. Dette er rørtyper med forskjellig alder, materiale og størrelse. I dokumentet finnes det 11 PE-typer. Levetidene for strukturell metode er basert på et gjennomsnitt av SINTEF (2017a) sine PE-typer hvor utvalgte PE-rør har dagens standard. Det er ganske like forhold i Sverige og Norge, derfor inngår levetider fra Sverige i gjennomsnittet.

Levetidene i dokumentet gjelder for full oppgraving. Full oppgraving vil ha noe lengre levetid grunnet bedre kvalitet på omliggende masser. Strukturell no-dig metode kan utsettes for steiner fra omliggende masser som ligger og presser på røret, steinene kan gi skader på røret ved installering eller som en last over tid. En slik last kan etter hvert føre til et tidligere brudd som reduserer total levetid. Når omliggende masser ikke er i henhold til standard kan det oppdannes svanker eller bevegelse i bakken. Dette kommer fra telehiv eller fra utvidelse eller tørking av masser (Reikvam, 2013). Reikvam (2013) viser til økt bruddrate i denne sammenheng. Svanker og telehiv gir laster på ledningene, disse lastene reduserer total levetid. Malm et al. (2013) antar lik levetid på strukturell metode og full oppgraving. Miljøblad (2010) skriver at et PE-rør ikke skal påføres ytre krefter som kan føre til skader og riper, for å unngå dette brukes det en beskyttelseskappe. Problemet er at

man kan ha laster som varer over tid og som man ikke klarer å unngå. Lastene kan redusere levetiden noe.

Levetider er avhengig av omliggende masser. Med perfekte forhold kan man ideelt sett oppleve levetider opp mot full oppgraving, men i de fleste tilfeller vil rørene leve noe kortere. Dette er fordi man ikke har kontroll på omliggende masser i samme grad som ved full utskiftning hvor alle masser blir skiftet ut. Levetidene i Tabell 6 er derfor basert på en 90%-verdi av PE-rør for full oppgraving, hvor verdiene er videre rundet opp til nærmeste tier grunnet teknologisk utvikling som medfører bedre rør. Tabell 7 viser tilhørende a, b og c-verdier funnet ved hjelp av programmet LTP.

**Tabell 6, Strukturell metode**

PE, No-Dig [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
35	54	94	120	150	190
PE, No-Dig 90% verdi rundet opp [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
40	50	90	110	140	180

**Tabell 7, Parametere fra strukturell metode**

	Parameter	Snittverdi
Verdier funnet ved hjelp av LTP	a	4,392
	b	0,034
	c	45

Areal under kurven for strukturell metode er utregnet med Formel 6. Utregningen skjer etter Formel 2 med innsatt a, b, c og  $t_2$ -verdi.

$$\text{Areal C} = 45 + \int_{45}^{181} \frac{(4,392 + 1)(0,034t - \ln(4,392 + e^{0,034(t-45)}))}{4,392 * 0,034} = 104,32 \quad (6)$$

### 3.24 Strategi D, Full utskiftning

Full utskiftning innebærer at man graver opp en hel rørstrekning. Alle masser blir byttet ut slik at man får tilfredsstillende masser både under og over røret. Massene er av slik kvalitet at vann får trenge gjennom, noe som hindrer teledannelse og bevegelse i massene. Massene blir også komprimert både under og over røret for å hindre bevegelse. Utskiftningen skjer under kontrollerte forhold som fører til få feil på ledningene. Full utskiftning har som funksjonskrav at kraftpåvirkningen på røret skal være lik i alle retninger (Miljøblad, 2016). På denne måten oppnås et mekanisk stabilt grøftesystem.

Teoretisk sett vil full utskiftning gi lengst levetid. Dette kommer av at det graves, noe som fører til få feil og gode grøfteforhold. Hele strekningen graves opp og massene byttes ut slik at det legges nye optimale masser rundt røret. Utførelsen hindrer at rør blir lagt med svanker og man fjerner eventuelle steiner som kan føre til punktlast. Metoden blir sett på som en kostbar, plasskrevende og tidkrevende prosess. Graving gir større CO<sup>2</sup>-utslipp enn andre metoder som følge av mye graving og transport av masser. Man oppnår lengst levetid med denne metoden og full oppgraving blir derfor brukt som referansemetode for de andre metodene. Det vil si at de andre levetidene blir målt opp mot full oppgraving som får referanseverdi 1. Dette kommer fram i resultater i kapittel 3.3.

Som regel bruker man PE eller duktile støpejernsrør ved denne metoden. Duktile støpejern har noe lengre levetid enn PE-rør, men støpejern brukes noe mindre ved rehabilitering (Saegrov, 2017). For full utskiftning er det antatt at det brukes en kombinasjon av de to rørene med en 50:50 fordeling. Fordelingen får et snitt som er rundet opp til nærmeste tier. SINTEF (2017a) har hentet levetider fra Norge og Sverige for ulike rørtyper. Verdiene brukt videre er et gjennomsnitt av levetidene for dagens PE og duktile støpejernsrør. Tabell 8 viser levetider for full oppgraving, hvor Tabell 9 viser tilhørende a, b og c-verdier.

**Tabell 8, Full utskiftning**

PE, SINTEF-verdier [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
35	54	94	120	150	190
Duktilt støpejern, SINTEF-verdier [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
55	72	108	138	157	192
Ny verdi PE og duktilt støpejern [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
50	70	110	130	160	200

**Tabell 9, Parametere fra full utskiftning**

	Parameter	Snittverdi
Verdier funnet ved hjelp av LTP	a	7,248
	b	0,036
	c	60

Areal under kurven for full utskiftning er utregnet med Formel 7. Formelen er basert på Formel 2 med innsatt a, b, c og  $t_2$ -verdi.

$$\text{Areal D} = 60 + \int_{60}^{200} \frac{(7,248 + 1)(0,036t - \ln(7,248 + e^{0,036(t-60)}))}{7,248 * 0,036} = 125,25 \quad (7)$$



### 3.25 Strategi E, Koordinering av drikkevann- og avløpsprosjekter

Ved rehabilitering skifter man noen ganger ut både vann- og avløpsledningene. Dette gjøres av praktiske grunner, eksempelvis for å slippe å grave samme sted innenfor en kortere periode og for å minimere kostnader. Når en grøft graves har man tilgang på maskiner og annet nødvendig utstyr. Det er kostnadseffektivt å bruke utstyret til å skifte både vann- og avløpsledningene. På denne måten slipper man å skifte ut den ene ledningen, for så å senere komme tilbake for å skifte ut den andre. Dette gjør at man også får lavere utslipp. Håndtering av store maskiner i en liten grøft fører noen ganger til skade på andre ledninger. Ved andre metoder hender det at man skader ledninger, denne risikoen blir mindre ved koordinering. Dette kommer av at en ny ledning har høyere kvalitet og vil tåle mer og av at både vann- og avløpsledningen blir skiftet ut under kontrollerte forhold. Med andre ord bidrar koordinering til enklere rehabilitering, til tross for at det vil ta lengre tid.

Resultatet av koordinering er at ledningsnettets må betraktes etter en avhengig eller uavhengig hypotese (Pericault et al., 2017). En avhengig hypotese sier at tilstanden til vann- og avløpsledninger liggende i samme grøft vil ha tilnærmet lik tilstand. Med en uavhengig hypotese vil tilstanden utvikle seg forskjellig uavhengig av hverandre. Tilstanden til rør kan variere ut i fra konstruksjonsår og standard på ledningsmateriale. Rør lagt samme år med samme materiale vil antageligvis bestå av samme kvalitet. Tilstanden til slike rør vil derfor utvikle seg likt og man kan si at de er avhengige av hverandre. Et eksempel på dette er rør som ble lagt etter krigen, det var fokus på å bygge fort og mye og kvaliteten ble deretter. Eksterne forhold som uforutsette laster kan gjøre rør uavhengige. I slike tilfeller vil like rør oppføre seg forskjellig, og man får en uavhengig hypotese. En uavhengig hypotese kan også være to rør av forskjellig materiale, hvor det ikke foreligger noen korrelasjon mellom levetidsfunksjonen til de to rørene.

Et ledningsnettverk er stort og vil bestå av rør med både uavhengige og avhengige hypoteser (Pericault et al., 2017). Dette gjør at begge hypotesene bør brukes.  $S_s(t)$  beskriver sannsynligheten for at en tilfeldig avløpsledning er funksjonell etter  $t$  år, tilsvarende beskrive  $S_w(t)$  en vannledning. Når vann- og avløpsledninger er uavhengig av hverandre,

kreves det at begge er fungerende etter tiden  $t$ . Sannsynligheten for at begge er i drift kan derfor ses på som et produkt av hverandre. Formel 8 uttrykker ligningen for en uavhengig hypotese.

$$F_{sw}(t) = S_s(t) * S_w(t) \quad (8)$$

Når vann- og avløpsledninger er avhengige av hverandre er de sterkt korrelert. Skal vannledningen skiftes, må avløpsledningen også skiftes og visa versa. Levetiden blir dermed alltid den minste verdien ut i fra levetidene til vann- og avløpsledninger. Formel 9 uttrykker en avhengig hypotese.

$$F'_{sw}(t) = \min [S_s(t):S_w(t)] \quad (9)$$

Pericault et al. (2017) sin case-studie er i fra Sverige og den omhandler koordinering mellom vann- og avløpsprosjekter. Utregningene er basert på denne artikkelen, men levetidene er skiftet ut med levetider funnet i denne masteroppgaven og selve utregningen er tatt et steg lengre. Det er sannsynlig at begge hypoteser vil forekomme i et ledningsnett, og jeg har derfor regnet ut levetidskurver for to hypotesene. I tillegg har jeg kombinert dem.

Vannrørene består av PE og duktilt støpejern slik som ved full utskiftning. Det er antatt at avløpsrørene er består av PE og betong. Levetidene for avløp er basert på en sammenstilling av avløpslevetider for norske kommuner (SINTEF, 2017b). SINTEF (2017b) og har på samme måte som med vannledninger opparbeidet et datagrunnlag for avløpsledninger. Levetidene for avløpsledninger med betong og PE er på samme måte som med vannledninger basert på de nyeste levetidene og rundet opp til nærmeste tier. Tabell 10 viser levetidene.

**Tabell 10, Koordinering vann og avløp**

PE og duktilt støpejern, vannledning [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
50	70	110	130	160	200
Gjennomsnitt betong og PE, avløpsledning [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
50	70	110	140	150	200
	a	b	c		
Vannledning	7,248	0,036	60		
Avløpsledning	16,729	0,045	60		

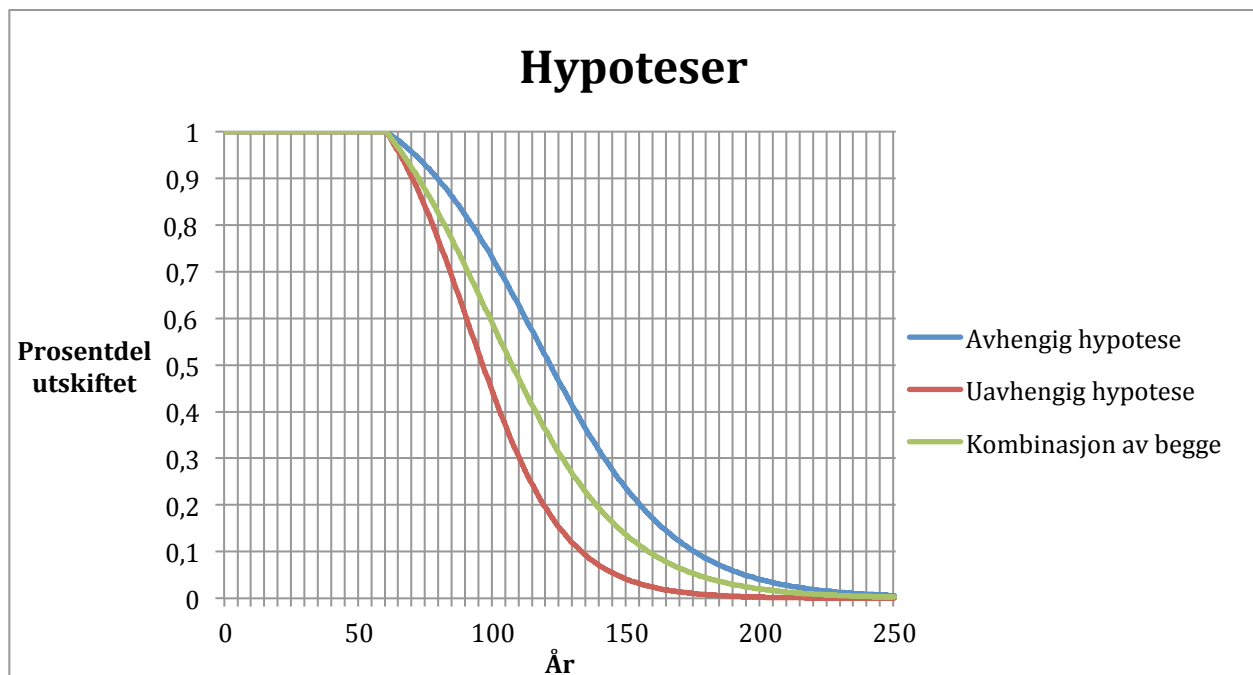
VA-nettet blir skiftet ut i en kontinuerlig prosess med forskjellige metoder, dette medfører at begge tilstander av uavhengige og avhengige hypoteser vil forekomme. Utskiftning skjer på forskjellige måter hvor metode blir bestemt ut i fra individuelle forhold. I hvor stor grad utskiftningen skjer i henhold til en avhengig eller uavhengig hypotese er ikke dokumentert (Nilssen, 2017). Det antas derfor at det er en lik fordeling mellom de to hypotesene, altså en 50:50 fordeling. Levetidskurven for koordinering mellom vann og avløp er på bakgrunn av dette utregnet etter Formel 10.

$$S_{\text{Koordinering,sw}}(t) = \frac{F_{\text{sw}}(t) + F'_{\text{sw}}(t)}{2} \quad (10)$$

En uavhengig hypotese regnes ut med Formel 8. Basert på a, b og c -verdiene i Tabell 10 lages en levetidskurve for vann og en for avløp. Disse to levetidskurvene ganges så sammen og man får en ny funksjon hvor verdi a, b og c er ukjent. Verdi c bestemmes ut i fra når første utskiftning starter som i dette tilfellet er 60 år. For å finne a og b-verdiene brukes minste kvadraters metode sammen med problemløseren i Excel. Problemløseren finner determinant koeffisient ( $r^2$ ) nærmes 1 slik at kurven sammenfaller med punkter utregnet. Dette fører til en estimering av a og b -verdien.

Den avhengige hypotesen regnes ut ved hjelp av levetidskurven for vann og levetidskurven for avløp. I dette tilfellet finner man en ny levetidskurve ved å bruke den til enhver tid minste verdi fra de to levetidskurvene, Formel 9. For å finne ny a, b og c –verdi må minste kvadraters metode brukes på samme måte som ved den uavhengige hypotesen. For å finne a og b –verdien brukes altså problemløseren i Excel for å finne determinant koeffisient nærmest 1.

Til slutt kombinerer man den avhengige og uavhengige hypotesen med en 50:50 fordeling. Dette gjøres med Formel 10, hvor utregnet levetidskurve for den avhengige og uavhengige hypotesen legges sammen og deles på to. Ut i fra kombinasjonen må man igjen bruke minste kvadraters metode med problemløseren slik at man kan finne gjeldende a, b og c –verdier for strategien. Hypotesene gir ulike levetidskurver vist i Figur 7. Kombinasjonen av begge hypotesene er videre brukt i oppgaven. Tabell 11 viser gjeldende a, b og c-verdier for koordinering mellom VA.



Figur 7, Hypoteser for koordinering

**Tabell 11, Parametere fra koordinering vann og avløp**

	Parameter	Snittverdi
Verdier funnet ved hjelp av minste kvadraters metode og problemløser.	a	4,656
	b	0,040
	c	60

Areal under kurven for koordinering mellom vann- og avløpsprosjekter er utregnet i Formel 11. Formelen er basert på Formel 2 med innsatte a, b, c og  $t_2$  -verdier.

$$\text{Areal E} = 60 + \int_{60}^{177} \frac{(4,656 + 1)(0,040t - \ln(4,656 + e^{0,040(t-60)}))}{4,656 * 0,040} dt = 111,34 \quad (11)$$

### 3.26 Strategi F, Koordinering av drikkevann- og avløpsprosjekter og veier

Koordinering mellom VA og vei sees i flere tilfeller på som gunstig for å dele på utgifter mellom etater og for å utnytte utstyr og tilgjengelighet av maskiner og fagfolk. Det som gjør koordineringen vanskelig er at livssyklusen til vei skiller seg fra syklusen til VA. Dette innebærer at vei som har kortere levetid vil gjennomgå flere rehabiliteringsprosesser før ledningene i VA-nettet er av en slik tilstand at også de kan byttes ut. Livssyklusen til vei gjenspeiler hvor ofte man må bytte/legge ny asfalt. Koordinering av VA og vei gir valg mellom å bytte ut ledningene før eller etter nødvendig tidspunkt for rehabilitering. For å unngå hyppig reparasjon med tilhørende redusert service av ledningene ønsker man å bytte ledningene før de har nådd sin fysiske levetid hvor de preges av gjentatte ledningsbrudd. Man bør altså optimalisere utskiftningen til vei og VA slik at livssyklusene samsvarer i størst mulig grad, men samtidig slik at VA-ledningene skiftes ut før de har nådd enden på sin fysiske levetid.

Svenson (2014) har gjort en studie om levetider for veier i Sverige. Levetid for vei er i den sammenheng definert etter hvor lang tid det går før asfalten må skiftes ut/legges på nytt. Veiene ligger nord i Sverige, og vil være representativ for norske forhold. Klima og dimensjon på vei er forholdsvis likt i Sverige og Norge. Type asfalt vil også være lik. Levetidskurver for vei er avhengig av års-døgntrafikk, forkortet ÅDT. Betegnelsen innebærer summen av antall kjøretøy som passerer et punkt i begge retninger i løpet av et år, dividert på antall dager. ÅDT bestemmer slitaskjen på vei og vil derfor være utgangspunktet for hyppighet av utskiftning. Den er som regel konstant, så lenge det ikke bygges nye boligfelt, kjøpesentre eller lignende. For gitte intervaller av ÅDT er det definert ulike levetidskurver, som illustrert i Figur 8 og Figur 9.

Statens vegvesen har publisert vegkart med ÅDT, hvor disse er brukt for å finne en gjennomsnittlig ÅDT for Trondheim kommune. Man oppnår et godt gjennomsnitt ved å benytte verdier for mange veier av ulike størrelser. Det er derfor tatt ut 150 veier i Trondheim med ulike ÅDT-er. Gjennomsnittet av veiene er 2977 biler per dag. Dette tilsvarer klasse 5 i Figur 8. Andre byer vil ha andre ÅDT-er, og vil dermed også ha andre

levetidskurver for vei. ÅDT må derfor bestemmes fra by til by slik at man finner tilhørende levetidskurve.

**TABLE 2. Definition of traffic classes.**

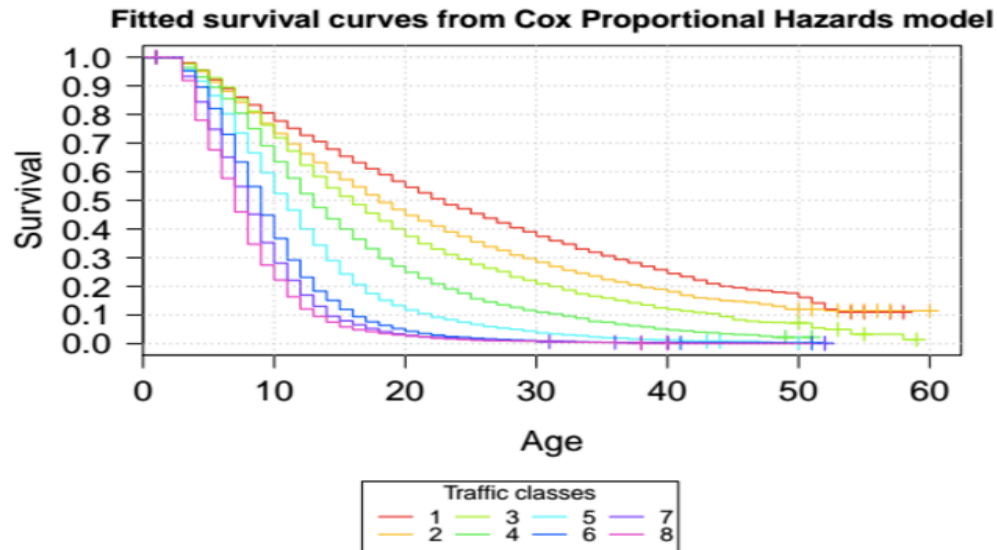
Class	Vehicles/day
1	<250
2	250-499
3	500-999
4	1000-1999
5	2000-3999
6	4000-7999
7	8000-11999
8	>12000

**Figur 8, Trafikklasser ÅDT (Svenson, 2014)**

Figur 9 viser levetidskurver for vei med ulike klasser av ÅDT. Gjennomsnittlig ÅDT for Trondheim kommune tilsvarer klasse 5, som er illustrert i turkis farge i Figur 9. Levetid av vei skal sammenlignes med koordinering av vann og avløp. For å kunne sammenligne vei og VA må levetid for turkis linje leses av Figur 9. Levetid leses av når veien er 100% intakt, når 50% av veien er skiftet ut og når 90% av veien er skiftet ut. Avlesningen er vist i Tabell 12. Minste og lengste levetid for vei er antatt ved å trekke fra og legge til ett år fra verdiene avlest fra kurven i Figur 9.

**Tabell 12, Levetid vei**

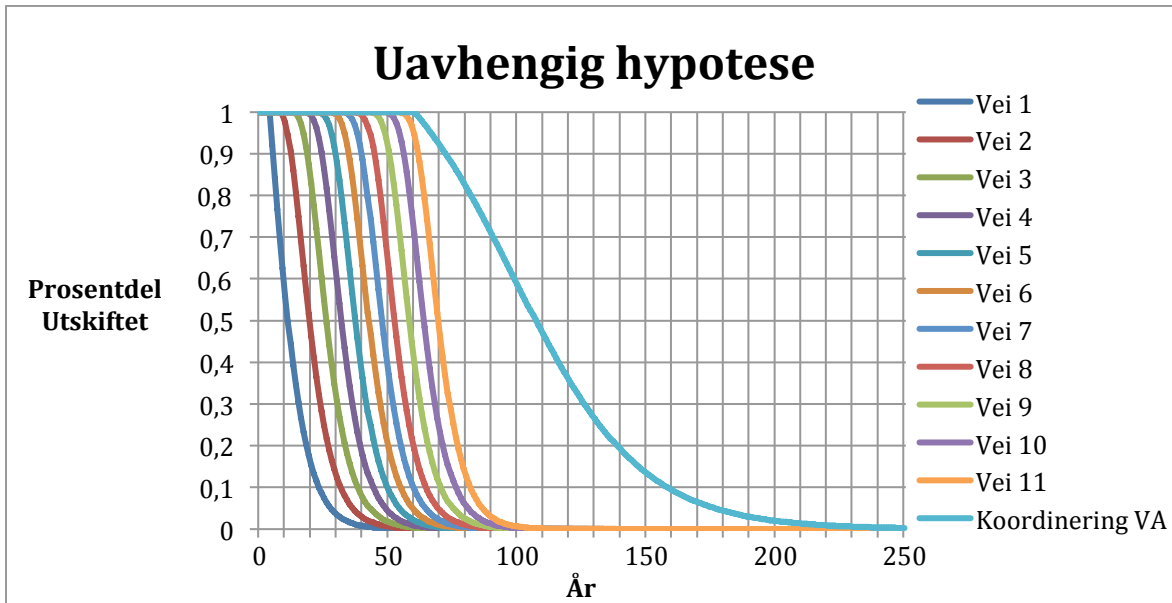
Avlesning levetidskurve vei [år]					
100%		50%		10%	
Kort	Lang	Kort	Lang	Kort	Lang
3	5	10	12	22	24



**Figur 9, Levetidskurver for trafikklasser (Svenson, 2014)**

Koordinering av vei kan ses på med to hypoteser, en uavhengig og en avhengig hypotese. Den uavhengige hypotesen sier at levetiden til vei er helt uavhengig av foregående levetid. Selve fordelingen vil med dette være lik for ulike rehabiliteringer. I den uavhengige hypotesen er levetid etter andre rehabilitering summen av uavhengige variabler med samme fordeling. Det vil si at fordelingen til andre rehabilitering er lik konvolusjonen til sin egen levetid. Integralet til en konvolusjon av to funksjoner er lik produktet til integralet av de to funksjonene. Levetid på et tidspunkt  $t$  er lik  $1 - (\text{integralet av levetidsfunksjonen på tidspunkt } t)$ . Det betyr at man ved andre rehabilitering vil få funksjonen  $1 - (\text{integralet av levetidsfunksjonen på tidspunkt } t)^2$ . Videre vil man ved flere rehabiliteringer utvide funksjonen til  $1 - (\text{integralet av levetidsfunksjonen på tidspunkt } t)^n$  (Pericault, 2017). På bakgrunn av dette har jeg funnet levetidskurvene for en uavhengig hypotese. Dette er vist i Figur 10.





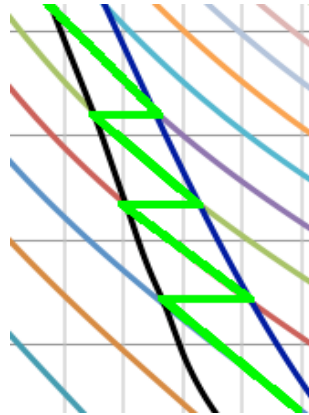
**Figur 10, Uavhengig hypotese for vei**

Koordinering av vei kan også forklares med en avhengig hypotese. En avhengig hypotese innebærer at levetiden for vei er avhengig av forrige levetid. ÅDT er styrende for vegslitasje og fører til noenlunde lik slitasje hvert år. Slitasjen på veien vil derfor være avhengig av slitasjen fra tidligere år. Det vil si at rehabilitering av vei bør modelleres etter en avhengig hypotese (Bruaset, 2017). Dette fører til at veier i Trondheim med et 100% intervall på 4 år vil bli skiftet ut hvert 4. år. Et intervall på 50% innebærer i dette tilfellet at veiene i skiftes ut vert 11. År, mens veiene i et intervall på 10% blir skiftet ut hvert 23. år. Dette er illustrert i Figur 12.

Når man koordinerer med vei ligger ledningene så dypt under bakken at veien ikke vil påvirke levetiden til ledningene. Tilstanden på veien har altså ingen sammenheng med tilstanden på rørene. Dette gjør at Formel 8 og 9 ikke kan brukes ved koordinering med vei. Sammenhengen er med andre ord enveis og VA-ledninger vil derfor blir skiftet ut basert på veisyklusen.

Figur 11 viser hvordan utskiftningen for VA kan tilpasses veikurvene. VA-kurven har en mørk blå farge. For å finne optimal koordinering mellom vei og VA følger man den veikurven som til enhver tid ligger nærmest VA-kurven. Veikurven vil treffe VA-kurven og straks kryssningen skjer, går man vannrett tilbake til den første veikurven man treffer på. På

denne måten vil man alltid følge den veikurven som ligger tettest opp mot VA-kurven. Denne kurven som er merket lysegrønn i Figur 11, vil gjennom flere steg danne en trappekurve. Ved å beregne gjennomsnittet til trappefunksjonen vil man få en kurve som representerer optimal koordinering mellom vei og VA. I Figur 11 vil optimal veikurve ligge mellom svart og mørkeblå linje, noe som tilsvarer mørk grønn linje i Figur 12.

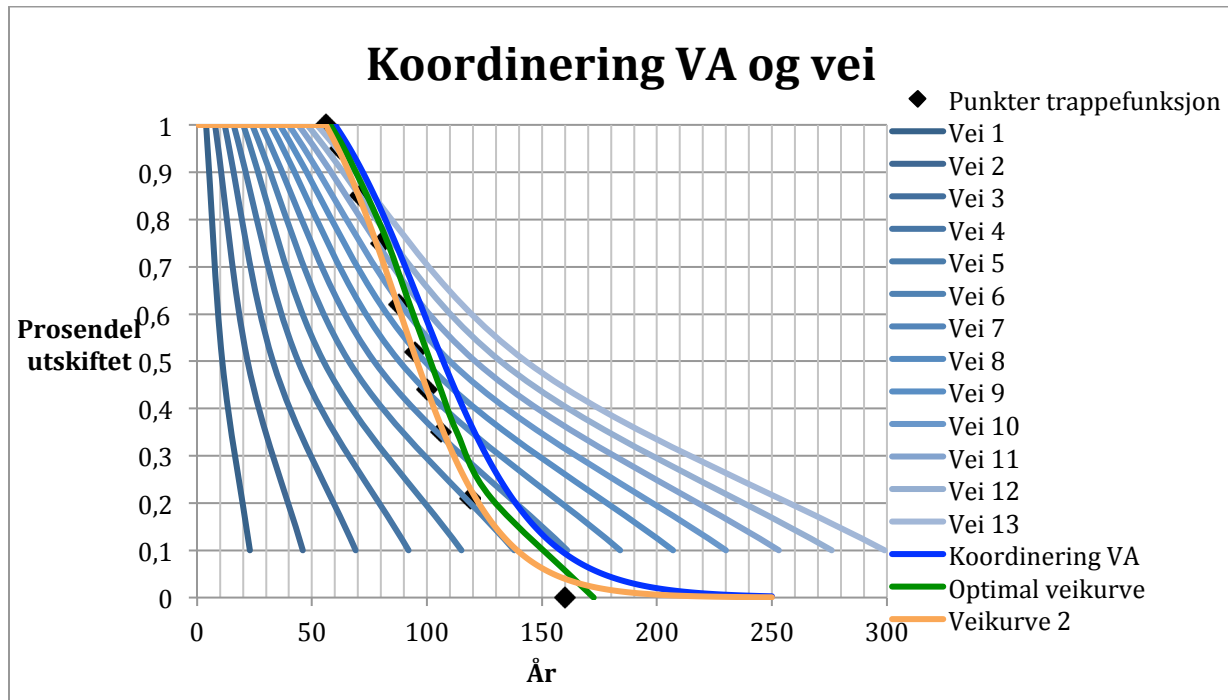


**Figur 11, Trappefunksjon**

I realiteten er det usannsynlig at man vil klare å følge en optimal veikurve. Rehabilitering skal koordineres på en god måte, og teorien passer ikke alltid med løsningene i praksis. Ved koordinering må en felles plan opprettes, tidspunkt for rehabilitering må passe for begge etater, søknader for graving må godkjennes og biler må opplyses om alternativ veistrekning. For å unngå for sen rehabilitering, utføres ofte rehabiliteringen for tidlig. En slik tidlig rehabilitering gjøres for å unngå at ledninger blir av slik kvalitet at det framkommer mange feil, samt for å sikre hydraulisk kapasitet.

Figur 12 viser veikurver for Trondheim med en avhengig hypotese. Av overnevnte grunner vil man ikke klare å koordinere på et optimalt tidspunkt. Det må derfor lages en ny veikurve. Koordinering trenger mer tid, og det antas dermed en dobling av avstanden mellom VA-kurven og optimal kurve. Punktene fra denne kurven tilsvarer trappefunksjonen som er plottet i Figur 12. Med avlesning er verdier for intervall; 100%, 50% og 10% tastet inn i LTP, finner man a, b og c-verdier. Disse verdiene brukes til å lage veikurve 2. Veikurve 2 er altså antatt kurve for koordinering mellom VA og vei. Dette er tilfellet siden VA ønsker å koordinere sammen med fornyelse av veier, og utskiftningen av

VA vil med andre ord henge seg på utskiftningen av vei. Verdier fra LTP gjør at kurven blir mer utjevnet i forhold til optimal veikurve. Verdier fra LTP er vist i Tabell 13.



Figur 12, Koordinering VA og vei

Tabell 13, Parametre fra koordinering VA og vei

	Parameter	Snittverdi
Verdier funnet ved hjelp av LTP	a	4,439
	b	0,047
	c	56

Areal under kurven for koordinering mellom VA og vei er utregnet i Formel 12. Formelen er basert på Formel 2 med innsatte a, b, c og  $t_2$ -verdier.

$$\text{Areal F} = 56 + \int_{56}^{154} \frac{(4,439 + 1)(0,047t - \ln(4,439 + e^{0,047(t-56)}))}{4,439 * 0,047} dt = 99,02 \quad (12)$$

### 3.3 Resultater fra ulike metoder

Arealene under de ulike strategiene er funnet ved Herz Formel 2 vist i Tabell 14. Full utskiftning har lengst levetid og størst areal og er dermed sett på som referanseareal. For å finne forskjell i areal er arealene fra hver strategi delt på referansearealet. Resultatet fra dette er satt inn i Tabell 15.

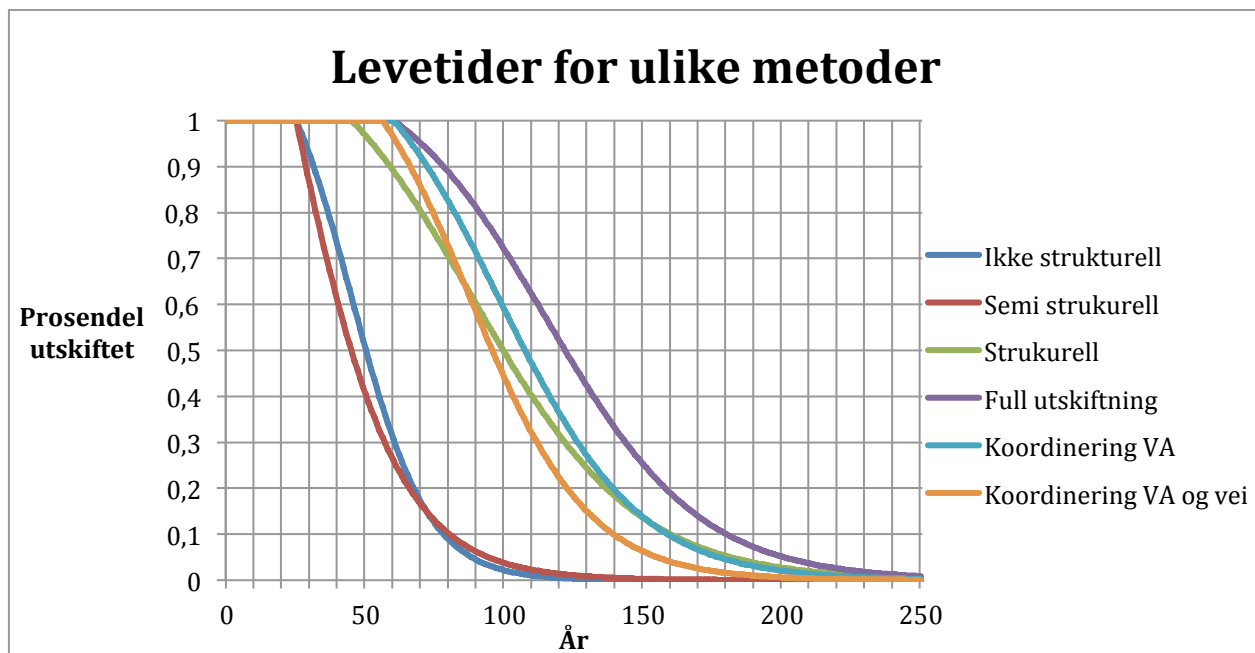
**Tabell 14, Areal strategier**

Areal	
Full utskiftning	125,25
Ikke-strukturell metode	52,32
Semi-strukturell metode	49,55
Strukturell metode	104,32
Koordinering med vann og avløp	111,33
Koordinering med vei	99,02

**Tabell 15, Forskjell i areal**

Forskjell i areal	
Full utskiftning	1,00
Ikke-strukturell metode	0,42
Semi-strukturell metode	0,40
Strukturell metode	0,83
Koordinering med vann og avløp	0,89
Koordinering med vei	0,79

Figur 13 viser de ulike strategiene i forhold til hverandre. Kurvene er lagd i Excel basert på tall i kapittel 3.2 og Formel 1. Tabell 14 og Tabell 15 viser at semi-strukturell metode har minst areal, etterfulgt av ikke-strukturell, koordinering VA og vei, strukturell og koordinering VA.



**Figur 13, Levetid for for ulike metoder**

Bærekraftfaktorer er regnet ut med Formel 3. Tabell 16 viser utregnede bærekraftfaktorer.

**Tabell 16, Bærekraftfaktorer**

Bærekraftfaktor, BK	
Full utskiftning	1,00
Ikke-strukturell metode	2,39
Semi-strukturell metode	2,53
Strukturell metode	1,20
Koordinering med vann og avløp	1,13
Koordinering med vei	1,27

### 3.4 Diskusjon av metoder og resultater

Figur 13 viser forskjell i levetid for de ulike strategiene. Ikke-strukturell og semi-strukturell metode har relativt likt areal. Beregningene viser at ikke-strukturell metode har litt større areal enn semi-strukturell metode. Ikke-strukturell metode er definert som et tynt belegg uten strukturelle egenskaper. Semi-strukturell metode er definert etter ringstivhet på strømper. Begge metodene kan også utføres med som full strukturell kapasitet med tykt belegg eller tykk strømpe. Antatt semi-strukturell metode har noe styrke i seg selv, det kunne derfor tenkes at det skulle blitt større forskjell mellom de to metodene (Miljøblad, 2009). Nystog Aas et al. (2016) skriver at semi-strukturell metode kan utføres med forskjellig grad av styrke i foringen. Større styrke ville dermed gitt lengre levetid. Dette er også tilfellet for ikke-strukturell metode. Et tykkere belegg kan føre til strukturelle egenskaper og man ville dermed også få lengre levetid (Nystog Aas et al., 2016). Samtidig krever ikke-strukturell metode relativt gode rør for at metoden skal bli brukt, noe som gjør at man i utgangspunktet bare forbedrer eksisterende rør for lengre levetid. Man kan derfor forvente tilnærmet lik levetid for de to metodene i mange tilfeller.

I dialog med Kropp (2017) blir jeg opplyst om levetider for Tyskland ved bruk av tilsvarende metoder. Gamle rør med god strukturell styrke får ved bruk av belegg nokså lik levetid som semi-strukturell metode i Tyskland. Dette ser man også i denne masteroppgaven hvor semi-strukturell metode har tatt utgangspunkt i strekkspenningskrav. Med utgangspunkt i større strekkspenning vil man øke levetidene for semi-strukturell metode. Levetidene for belegg er avhengig av styrke på eksisterende rør, men et tykt belegg kan også gi strukturelle egenskaper. I Tyskland forventer man at semi-strukturelle rør i gjennomsnitt varer 25 til 50 år (Kropp, 2017). Levetidene kan som i Norge variere noe, men med så like tall er det god grunn til å tro at levetidene funnet i denne oppgaven er høyst reelle. I framtiden er det sannsynlig at det blir strengere krav til ringstivhet, og levetid vil dermed økes.

For strukturell metode ble det tatt en 10% reduksjon av verdi for full utskiftning. Dette gjør at strukturell metode får omlag 20% mindre areal enn full utskiftning. Utblokking er regnet

som en svært god metode med lange levetider (Nystog Aas et al., 2016), og har derfor en bærekraftfaktor på 1,2. Forskjellen er likevel ikke veldig stor i forhold til full utskiftning. Det er vanskelig å si hvor gode de omliggende massene er ved strukturelle metoder, og enkelte antar at det ikke er forskjell i levetid mellom denne metoden og full utskiftning (Malm et al., 2012). Det antas allikevel at det blir noe forskjell grunnet omliggende masser og risiko for skade ved utføring. Grad av forskjell mellom de to metodene må antas da man ikke har noen konkrete tall å belage seg på. Å kvalitetssikre masser med bruk av no-dig metoder har vist seg vanskelig, men av erfaring er masser av ulik kvalitetsmessig grad (Ødegaard, 2012). Tidligere var det vanlig å fylle igjen rundt rørene med stedlige, tilgjengelige masser, mens det i dag stilles større krav til kvaliteten på gjenfyllingsmassene. Om noen tiår vil man imidlertid rehabilitere rør som ligger i masser med bedre kvalitet. Det må da foretas en ny vurdering av om man kan oppnå lik levetid mellom strukturell metode og full utskiftning.

Kropp (2017) forteller at full strukturell metode har relativt lik levetid som ved oppgraving, men de antar at full strukturell metode lever i snitt 10 til 30 år kortere. I denne masteroppgaven er det antatt at strukturell metode får 10% kortere levetid enn full utskiftning. Dette gir en forskjell på 10 til 20 år for ledninger. Selv om det brukes forskjellige antagelser i Tyskland og i denne masteroppgaven, er størrelsesordenen relativ lik. Dette er da med på å bekrefte riktige levetider for strukturell metode. Full utskiftning setter krav til masser (Miljøblad, 2016). Man klarer ikke å sette samme krav til masser ved utførelse av no-dig metoder, og levetidene vil derfor i større grad bli påvirket av omliggende masser. Rør er også mer utsatt for skade og mulige anleggsfeil ved no-dig metoder. Grunnen er at man opererer i masser eller på innsiden av eksisterende rør, som gir mindre kontroll på gjennomføring.

Helningen på strategiene i Figur 13 vil påvirke hvor hurtig man må skifte ut ledningene. De to strategiene med lavest levetid har brattest helning, mens de andre strategiene blir byttet ut over en lengre periode. Konsekvensen av dette kan være at man må rehabilitere flere ledninger over en kortere periode. For å slippe en utskiftningsboom vil det være lurt å kombinere ulike strategier. På denne måten får man et nettverk med forskjellige levetider

slik at man kan holde rehabiliteringsraten nokså konstant. Koordinering av vann og avløp, og koordinering med vei fører til at man ofte bytter ut ledninger før maksimal fysisk levetid. I slike tilfeller det er da andre kriterier som økonomi og ressursbruk som bestemmer utskiftningen.

Koordinering av VA og vei gjør at man utnytter tilgjengelighet av personell og utstyr. Det graves én gang som fører til lavere utslipp og mindre sosial påvirkning. Dette ses på som gunstig i et bærekraftig perspektiv. I tillegg vil man dele på kostnader som totalt sett gjør rehabilitering billigere. Bærekraftfaktoren for koordinering av VA er nokså lav, og levetidene er derfor nokså lik som ved full utskiftning. Bærekraftfaktoren for koordinering av vei er noe høyere, hvor en slik koordinering vil ha større påvirkning i en bærekraftanalyse.

Tabell 16 viser de ulike bærekraftfaktorene. Strategier med lang levetid har lav bærekraftfaktor. Metoder som ikke-strukturell og semi-strukturell metode har kort levetid i forhold til de andre metodene og derfor har de høy bærekraftfaktor. I en bærekraftanalyse vil disse to metodene påvirke analysen med å mer enn doble verdier for indikatorer for no-dig. I nye analyser med bruk av bærekraftfaktorer kan pris få en større betydning siden slike metoder vil komme dårligere ut enn de tradisjonelt har gjort. Dette innebærer at levetid er av stor betydning. Levetid vil dermed også ha mer å si enn det som er beregnet i analysene til Sørumsdalen et al. (2010) og Skaar (2013) hvor levetid er brukt som en indikator. Ved bruk av bærekraftfaktorer kan det virke som om graving som har lang levetid, vil komme bedre ut enn i tidligere utførte analyser. Sørumsdalen et al. (2010) sin analyse kalkulerer graving i forhold til no-dig med over dobbelt så mange straffepoeng. Det antas at forskjellen mellom de to metodene vil bli mindre ved bruk av bærekraftfaktorer, ettersom no-dig- indikatorer multipliseres med tilhørende bærekraftfaktor.

Ikke-strukturelle metoder og semi-strukturelle metoder har en forholdsvis enkel og kjapp rehabilitering. Når man når enden på deres fysiske levetid, må de rehabiliteres på nytt. I slike tilfeller vil man rehabilitere med en ny metode som fører til lang levetid. På denne måten ser man over én livssyklus Det vil si at man sannsynligvis ikke vil benytte seg av



ikke-strukturelle metoder og semi-strukturelle metoder to ganger på rad. Påfølgende rehabilitering vil derfor være en metode med lang levetid og gode strukturelle egenskaper. Levetiden til en kombinasjon av to metoder vil oftest være ulik levetiden til en annen metode. Det som er viktig i slike tilfeller er at man sammenligner med tilsvarende levetid, noe som må korrigeres. Sammenligner man for eksempel full utskiftning med ikke-strukturell metode+full utskiftning kan man bruke Tabell 15. Indikatoren for full utskiftning vil ganges med en, ettersom man utnytter hele levetiden. Indikator for ikke-strukturell metode må legges sammen med indikator for full utskiftning\*(1-forskjell i areal). Indikator for full utskiftning tilsvarer da full utskiftning\*(1-0,42). Ved å gjøre dette oppnår man en sammenligning over flere livssykluser med tilsvarende areal og samme levetid.

En analyse av én livssyklus vil sannsynligvis føre til større bruk av ressurser og høyere utslipp enn de reelle utslippene utført med en bærekraftanalyse. Dette kommer av at man i virkeligheten vil bruke forskjellige metoder etter endt fysisk levetid fra en metode. Kort levetid innebærer dermed mindre påvirkning enn det bærekraftfaktorene tilsier. Fordelen med bærekraftfaktorene er at det fører til en praktisk og enkel tilnærming. I tillegg tar man hensyn til nåtidens levetider. Ved å inkludere flere livssykluser vil det råde stor usikkerhet. Teknologi utvikler seg, og metoder i dag er nok ikke tilsvarende de som eksisterer om 100 til 150 år. Det kan derfor være uheldig å definere rehabiliteringen i et langt tidsperspektiv. Bærekraftfaktorene vil imidlertid innebære en mer presis tilnærming, ettersom man ser påvirkningen fra en livssyklus mot en annen.

I framtiden ser jeg for meg at bærekraftfaktorene får større betydning. Ved å bruke disse faktorene kan man sammenligne ulike metoder på bakgrunn av levetid, noe som gjør at man får et mer reelt grunnlag for å bestemme riktig metode. Indikatorene kan ved hjelp av bærekraftfaktorene sammenlignes direkte. En direkte sammenligning gjør det lettere å utføre en rettferdig analyse av bærekraftig utvikling hvor langtidsperspektivet av bærekraftig påvirkning er inkludert.

## Del 4, Casestudie

### 4.1 Bakgrunn for bærekraftanalysen

Norge har forpliktet seg til å kutte i klimautslipp og på den måten bli mer bærekraftig (FN-sambandet, 2017). For å møte kravene må alle bransjer må bli mer bærekraftige, inkludert VA-bransjen. I dag er det et stort rehabiliteringsbehov for VA-ledninger, og i den sammenheng er det viktig å finne bærekraftige løsninger. For å finne riktige metoder bør det utføres bærekraftanalyser.

Case-studien i denne masteroppgaven tar utgangspunkt i Sørumshagen et al. (2010) sin studie om bærekraftig rehabilitering av vann- og avløpsnett. Sørumshagen et al. (2010) har beregnet bærekraft for to metoder, no-dig og full oppgraving. I studien tilsvarende no-dig den strukturelle metoden utblokking. Bærekraftanalysen er gjort med hensyn på 17 forskjellige indikatorer, fordelt mellom ulike grupper. Rehabiliteringen er basert på et ledningstrekk på 300 meter i Oslo sentrum. Resultatet fra analysen til Sørumshagen et al. (2010) viser at no-dig metoden er betydelig mer fordelaktig, med langt færre straffepoeng og billigere utførelse.

I case-studien ser jeg på hele ledningsnett til Trondheim kommune, i motsetning til Sørumshagen et al. (2010) som har fokus på ett enkelt fornyelsesprosjekt. Ved å se på hele nettverket kan ulike strategier sammenlignes, og framtidige metoder vurderes. Forfatterne av Sørumshagen et al. (2010) har gitt meg lov til å ta utgangspunkt i deres bærekraftanalyse og til å bruke data som er representativ for masteroppgaven. Masteroppgaven utfører en bærekraftanalyse av Trondheim kommune og verdier fra Sørumshagen et al. (2010) vil oppdateres til dagens beste standard. I tillegg gjøres det egne vurderinger hvor dette er hensiktsmessig. Til slutt skal resultatene fra denne masteroppgaven drøftes i lys av andre bærekraftanalyser, som ikke har levetid som styrende faktor (Skaar, 2013, Sørumshagen et al., 2010)

## 4.2 Oppdaterte verdier

Grunnet manglende tall på hvor mye diesel en gravemaskin bruker i dag, er forbedring i drivstofforbruk konvertert i forhold til forbedringen i bilindustrien. I 1996 brukte biler i snitt 0,58l/mil (Thune-Larsen et al., 1997). Thune-Larsen et al. (1997) anslo at det ville være 20% forbedring fram mot 2017. Dette stemmer godt med tall fra Skillebæk (2016) som viser at biler i dag bruker rundt 0,48l/mil, noe som tilsvarer en forbedring på 17%. I denne masteroppgaven antas det at det vil være samme forbedring i dieselforbruk for graving. Det vil si at diesel til graving blir oppdatert fra 0,087l/m<sup>3</sup> til 0,072l/m<sup>3</sup>. Det har skjedd mye i bilindustrien de siste 20 årene, og det har vært tilsvarende utvikling for tyngre kjøretøy. Dette gjør at gravemaskiner vil bruke mindre diesel i dag enn for 20 år siden. Mange av forbedringene i bilindustrien har fokus på miljø med lavere forbruk og lavere utslipp, slik at det er god grunn til å tro at utviklingen vil fortsette, og tallet bør derfor jevnlig oppdateres.

Thune-Larsen et al. (2014) viser til at ulykker ved godstransport koster 1,09kr/km i 2014, noe som er lavere enn verdien fra Sørumsåsen et al. (2010). Sørumsåsen et al. (2010) benytter en verdi fra 2001 som tilsvarer 1,13 kr/km. Et lavere tall betyr færre ulykker i jobbsammenheng. Bedrifter jobber mot færre ulykker og det er dermed positivt å se en forbedring. En krone i 2014 er ikke verdt det samme i 2017, og derfor er konsumindeksen i SSB brukt for å finne dagens pris. Oppdatert kostnad for ulykker er 1,09kr/km, i 2017-verdi tilsvarer dette 1,15kr/km (SSB, 2017b).

Enhetsverdi for diesel til transport er sjekket opp mot Simonsen (2012) og stemmer godt overens med denne. Det må nevnes at forbruk varierer i stor grad ut fra hastighet og tyngde på kjøretøy, og verdien er basert på et gjennomsnittsforkonsum i ulike hastigheter. Sannsynligvis vil diesel til transport reduseres i tiden framover i takt med den teknologiske utviklingen. Diesel til transport bør derfor jevnlig oppdateres på lik linje som med forbruket til graving.

Utslipp av miljøgifter er sjekket opp mot rapporten til Kolshus (2015), rapporten har gått gjennom flere av verdiene til Sørumshagen et al. (2010). Verdiene for miljøindikatorer i de to rapportene er tilsvarende i 2009 og 2015 og vil derfor forbli som de er. Med fokus på reduisering av utslipp er det grunn til å tro at også utslipp vil reduseres i årene som kommer. Inngangsverdiene er vist i Tabell 17, tabellen viser både gamle og nye inngangsverdier.

**Tabell 17, Inngangsverdier**

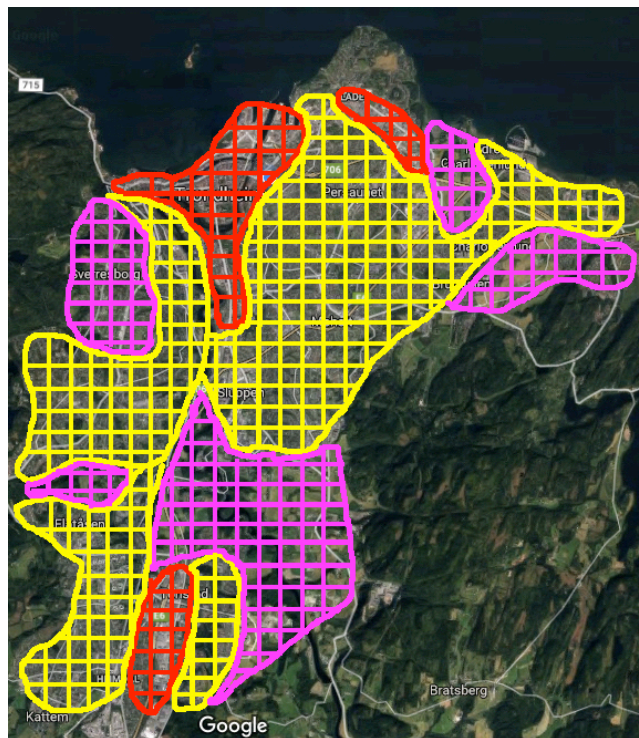
Innsatsfaktor	Enhetsverdi Sørumshagen et al. (2010)	Kildegrunnlag Sørumshagen et al. (2010)	Oppdatert enhetsverdi	Oppdatert kildegrunnlag
Elektrisk kraft ( kWh/m ledning)	0,4	Ola Sandum (2009) pers. kom.	0,4	Sørumshagen et al. (2010)
Diesel til graving (l/m <sup>3</sup> masse)	0,087	Tillmann et al. (1996)	0,072	Utregnet
Diesel til transport fullt lass (l/km)	0,5	Ola Sandum (2009) pers. kom.	0,5	Simonsen (2012)
Diesel til transport tom bil (l/km)	0,25	Ola Sandum (2009) pers. kom.	0,25	Simonsen (2012)
Utslipp av CO <sub>2</sub> fra diesel (kg/kg)	3,17	(Brunvoll et al., 2009)	3,17	Kolshus (2015)
Utslipp fra CO fra diesel (kg/kg)	0,0044	(Brunvoll et al., 2009)	0,0044	Kolshus (2015)
Utslipp av NO <sub>x</sub> fra diesel (kg/kg)	0,02	(Brunvoll et al., 2009)	0,02	Kolshus (2015)
Utslipp fra SO <sub>2</sub> fra diesel (kg/kg)	0,00002	(Brunvoll et al., 2009)	0,00002	Kolshus (2015)
Utslipp fra svevestøv (kg/kg diesel)	0,00055	Brunvoll et al. (2009)	0,00055	Kolshus (2015)
Støy fra transport (kr/kjørte km i by)	4,65	ECON (2001)	4,65	Sørumshagen et al. (2010)
Støy fra anleggsvirksomhet (skala)	1-100		1	
Ulykker (kr/kjørte km)	1,13	ECON (2001)	1,15	Thune-Larsen et al. (2014)
Ulemper for næringsvirksomhet (dager)	1		1	
Ulemper for trafikk (dager)	1		1	
Ulemper for beboere (dager)	1		1	
Levetid (år)	1		-	
Fornyelse av andre ledninger (skala)	0 eller 1		-	
Skaderisiko på ledninger (skala)	1-10		1	

### 4.3 Inndeling av soner

Trondheim kommune er i masteroppgaven delt inn i tre soner ut i fra type område som blir påvirket ved rehabilitering. Inndelingen er basert på antagelser om boligtetthet og industri, noe som er en tilnærming til virkeligheten. I Trondheim foregår det rehabilitering av ledninger i bysentrum, i boligstrøk og boligstrøk med landlige omgivelser i utkanten av byen. Trondheim kan ut i fra dette deles inn i tre soner merket med rødt, gult og rosa på Figur 14. Områdene er delt inn i soner ut i fra et satellittbilde fra google maps (Google, 2017). Områder i Trondheim med stor befolkningstetthet og industri er merket med rødt, det vil si midtbyen, rundt Elgseter, handlegaten ved Lade og sentrum av Tiller. Felles for områdene er at det er høyere bygninger, mye folk i området, samt mange kontor- og næringsbygg. Områder rundt er merket gult og kjennetegnes ved å ha mange eneboliger og mindre leilighetskomplekser. Rosa sone kjennetegnes med jordbrukslandskap eller boliger i landlige omgivelser. Eksempelvis er dette boliger som er i nærheten av parkareal, jorder eller boliger ved golfbaner slik som ved Sverresborg.

Et rutenett er konstruert i sonene i Figur 14, noe som gjøres for å finne den prosentvise fordelingen av de ulike sonene. Utreget fordeling av soner er vist under, hvor rutenettet i sonene er tegnet inn for hånd ved hjelp av linjal. Antall rutene er videre telt opp, noe som vil føre til mindre variasjon i resultatet enn ved annen inndeling av soner, gjennom unøyaktig rutenett eller ved unøyaktig telling av ruter. For et mer nøyaktig resultat anbefaler jeg større nøyaktighet i inndelingen av soner og utregning ved hjelp av dataverktøy.

- Rød= 11,4%
- Gul= 58,8%
- Rosa= 29,8%



**Figur 14, Trondheim inndelt i soner**

Figur 15 illustrerer ledningsnettets i de ulike sonene. I den røde og gule sonen er det høy befolkningstetthet, noe som fører til høy tetthet av rør. Lengden på ledningsnettets innenfor de tilhørende sonene er derfor lengre per rute enn i rosa sone. I rosa sone bor det færre mennesker og finnes færre boliger, noe som betyr at man får en lavere tetthet av rør. Unntaket er Sverresborg, som ligger i rosa sone, hvor det er noe høyere tetthet. Årsaken til dette er at området består av en blanding av parkarealer, golfbane, kontorbygg og bolighus.

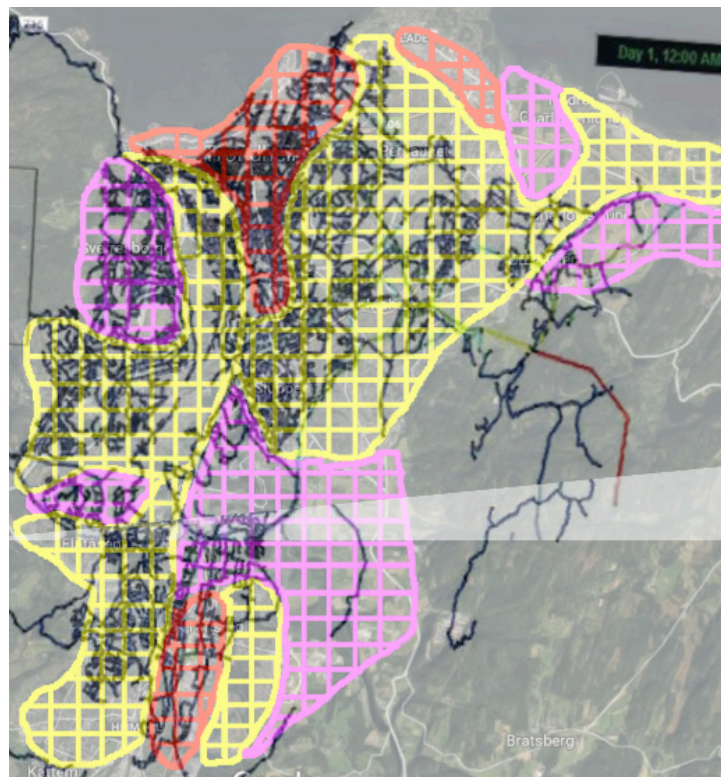
Figur 15 er utgangspunktet for antatt tetthet av rør i hver sone. Hva gjelder tettheten av rør, antas det at lengde rør innenfor rosa sone halveres. Lengden tatt bort fra rosa sone legges på rød og gul sone. Rød har klart høyest tetthet av rør og vil derfor motta 10 % av lengde rør fra rosa sone. Gul har mellomstor tetthet og vil derfor motta de resterende 5% fra rosa sone. Resultatet av ny fordeling av lengde rør i hver sone blir som vist under. Dersom man skaffer seg tilgang på data om lengden på ledningene i hver sone, kan tetthet og lengden på ledningene beregnes nøyaktig.

- Rød= 21,4%
- Gul= 63,7%
- Rosa= 14,9%

Ledningsnett i Trondheim er 792,3 km langt (Selseth and Røstum, 2014). For å finne den totale lengden på ledningsnett i hver sone, multipliserer man den prosentvis fordeling av rør med den totale lengden rør i hver sone. Ny fordeling av lengder på rør blir med dette som vist under

- Rød=169,6 km
- Gul= 504,7 km
- Rosa= 118,1 km

Figur 15 viser ledningsnett i Trondheim, samt inndelingen av sonene. Bildene er tilpasset hverandre i best mulig grad. I øvre høyre hjørne mangler det ledninger, noe som ikke er forenelig med virkeligheten. Manglende ledninger kan komme av unøyaktig tilpasning av kart, samt at ledningskartet er eldre enn ny utbygging. Feilkildene kan imidlertid rettes opp ved å benytte et kart med lik skalering, slik at man også forbedrer inndelingen av sonene.



**Figur 15, Ledningsnett i soner**



## 4.4 Utrekning

Utrekningen for indikatorer skjer på bakgrunn av Tabell 17. Lindholm (2002) forklarer at det er viktig å velge indikatorer med omhu. Indikatorene valgt bør være representative for hva man ønsker å finne ut. I tillegg er det viktig å unngå indikatorer som i sin helhet har liten betydning for en bærekraftanalyse. I nye prosjekter må metoder velges og man må vurdere forskjellige alternativer. Gode bærekraftige løsninger bør baseres på indikatorer med langtids- ytelse og effekt. Indikatorene bør møte mål og delmål bestemt av tilhørende kommune. Videre bør man velge indikatorer som er relevant for gjeldende prosjekt og finne målenheter på disse (Baur and Kropp, 2002, Alegre et al., 2014). Typiske mål gitt av Lindholm (2002) er vist punktvis under. Målene samsvarer i stor grad med indikatorer bruk i artikkelen til Sørumsdalen et al. (2010).

- Lavest mulig kostnad
- Best mulig funksjonalitet I forhold til brukernes behov og ønsker
- Lavest mulig utslipp av forurensende stoffer
- Lite støy i anleggsperioden
- Ingen ulykker eller sykdommer relatert til infrastrukturen
- Minst mulig forbruk av energi
- Minst mulig utslipp av forurensninger og miljøgifter til jord, vann og luft

### 4.41 Overordnet utregning

I de forskjellige sonene er det utført utregninger basert på Tabell 17, beregningene er utført i Excel. Sørumsdalen et al. (2010) har brukt utblokkning som no-dig metode, som er definert som en strukturell metode. Case-studien omhandler ulike soner i Trondheim og det er derfor antatt at no-dig består av 50% semi-strukturell metode og 50% strukturell metode. Fordelingen stemmer overens med hvor mye og hvilke no-dig metoder som brukes i norske kommuner i dag (Rygg, 2016). I mange tilfeller bruker man også ikke-strukturell metode, men denne er unntatt fra beregningen.

Utrekningene er basert på levetid som styrende faktor. Det vil si at bærekraftfaktoren for semi-strukturell metode og bærekraftfaktoren for strukturell metode må ganges inn med

indikatorene for no-dig. Total mengde no-dig er summen av gjeldende indikatorer for de to metodene. Bærekraftfaktoren for full utskiftning er 1, noe som medfører at indikatorene for graving forblir som utregnet. Bærekraftfaktoren for semi-strukturell metode er 2,53, mens strukturell metode har faktoren 1,2.

No-dig har en antatt fordeling mellom 50% strømpekjøring og 50% utblokking. De to metodene har forskjellig anleggstid og utslipp. Utslipp er korrelert til drivstofforbruk. Røstum (2013) har i sin rapport mottatt et anslag fra ulike entreprenører som omhandler anleggstid og CO<sup>2</sup>-utslipp. Anleggstiden for utblokking er anslått til 6 uker, mens for strømpekjøring er den anslått til 9 uker. Anleggstiden er på bakgrunn av dette beregnet til 1,5 ganger lenger tid for strømpe enn for utblokking. Ut i fra dette vil de sosiale indikatorene for semi-strukturell metode ganges med 1,5 i bærekraftanalysen. Anslag blir ikke alltid som forutsett, CO<sup>2</sup>-utslippet i rapporten til Røstum (2013) for strømpe 1, ble i virkeligheten nesten dobbelt så stort. For å øke kredibiliteten baseres utslipp av CO<sup>2</sup> seg på flere anslag for strømpekjøring fra Røstum (2013). Gjennomsnittet av CO<sup>2</sup>-utslippet for relevante anslag samsvarer med opplyste reelle utslipp lik 21.1 kg CO<sup>2</sup>/meter. CO<sup>2</sup>-utslippet for utblokking er basert på et snitt av to verdier fra Røstum (2013) og på utslipp fra Sørumsdalen et al. (2010). Utregnet utslipp tilsvarer et CO<sup>2</sup>-utslipp lik 5,62 kg/meter. Semi-strukturell metode slipper derfor ut i snitt 3,75 ganger mer CO<sup>2</sup> enn utblokking. Grunnet at utslipp er korrelerte med drivstoff, vil fossilt brensel, utslipp og støv ganges med 3,75 for semi-strukturell metode i bærekraftanalysen.

#### **4.42 Ressurser**

Rehabilitering av rør innebærer oppgraving, forbruk av elektrisitet og legging av ny asfalt. Case-studien er basert på data fra artikkelen til Sørumsdalen et al. (2010) til en 300 meter lang ledning. I bærekraftanalysen er det antatt bruk av tilsvarende mengde stein, elektrisitetsforbruk og asfalt per meter ledning. Det vil si at opprinnelig verdi fra Sørumsdalen et al. (2010) er delt på 300 meter og ganget opp med meter ledning innenfor hver sone.

Uthenting av rene masser, forurensede masser, nye masser og asfalt er nødvendig i alle rehabiliteringsprosjekter. Avstanden for å hente massene har innvirkning på dieselforbruk, og tilhørende utslipp av miljøgifter. For hver av de tre sonene er det funnet kjørelengder. Kjørelengdene er basert på et gjennomsnitt av 20 til 30 adresser innenfor hver sone til kjøre/hentepunkt. Korteste reisevei i tid er hentet fra google maps (Google, 2017), noe som medfører at avstanden i enkelte tilfeller er lengre enn korteste vei. Videre er det beregnet et gjennomsnitt av alle avstander innenfor en sone.

Rene masser er levert på Bjørkemyra hos Lia pukkverk, mens forurensede masser er levert i Tillerringen 166 hos Rimol. Henting av nye masser skjer også ved Lia pukkverk (Dragsten, 2017). Henting av asfalt varierer med hvilken entreprenør Trondheim kommune bruker, og i hovedsak er to entreprenører hyppigst brukt; NCC og Veidekke. For å finne avstand til henting av asfalt er det beregnet et gjennomsnitt mellom deres to uthentingssteder. NCC henter asfalt på Gjølme, mens Veidekke henter asfalt i Steinkjer (NCC, 2017, Veidekke, 2017). Utreget avstand til masser er vist i Tabell 18.

**Tabell 18, Gjennomsnittlige transportavstander**

	Avstand levering rene masser	Avstand levering forurensede masser	Avstand henting nye masser	Avstand henting asfalt
Rød sone	10,4 km	9,7 km	10,4 km	84,5 km
Gul sone	9,9 km	9,2 km	9,9 km	82,5 km
Rosa sone	8,8 km	10 km	8,8 km	83,4 km

Fossilt brensel er utregnet etter hvor mange turer som trengs for en tippebil med lastekapasitet på 22m<sup>3</sup> (TAB, 2017) ut i fra mengde stein og asfalt i hver sone. I tillegg er diesel for graving lagt til, diesel per kubikk er ganget med mengde stein i kubikk. Det er antatt at tippebilene kjører en vei med full bil og en vei med tom bil. I realiteten vil man ofte prøve å planlegge slik at man kjører med full bil begge veier. På denne måten sparer man drivstoff og unngår unødvendige turer. I masteroppgaven er det er ikke undersøkt hvor ofte dette skjer. En mer grundig analyse bør undersøke dette slik at forbruk og utslipp blir basert på erfaringsdata.

#### **4.43 Miljøindikatorer**

Utslipp for miljøindikatorer er funnet ved å gange forbruk av diesel i hver sone med inngangsverdiene for utslipp i Tabell 17. Diesel har tetthet på 0,84 kg/l (SSB, 2017a), noe som brukes for å finne antall kg diesel.

#### **4.44 Helsemessige indikatorer**

Sonene i Figur 14 får antatt ulik sosial påvirkning i bærekraftanalysen og vil derfor berøre publikum i forskjellig grad. I sentrumsområder, tilsvarende rødt område, vil flest mennesker bli berørt ved rehabilitering. Rehabilitering fører til støy som blir forsterket av bygninger rundt. Høye bygninger reflekterer støy slik at påvirkningen blir stor. Mange mennesker ferdes i området og vil derfor bli påvirket, noe som er vanskelig å unngå i sentrum der det er begrenset med plass. I gult område vil som oftest færre bli påvirket ved rehabilitering. Rehabilitering i dette området fører til at enkelte veier eller strekninger kan bli stengt. Boligområder har ofte mange stikkveier, noe som gjør at befolkningen kan finne andre veier å ferdes. De som ferdes i dette området er oftest de som bor der, og antall berørte vil derfor begrenses. I mindre bebodde området vil landskapet i større grad være åpent og befolkningstettheten vil være lav, noe som fører til at få mennesker blir påvirket ved rehabilitering av ledninger.

Støy i rød sone vil være tilsvarende i rapporten til Sørumsdalen et al. (2010) med skalatall 15 for no-dig og 100 for graving. Skalatallet tar utgangspunkt i bysentrum. I boligområde (gul sone) er det antatt noe lavere støy, og skalatallet er derfor antatt til 13 for no-dig og 95 for graving. I landlige omgivelser (rosa sone) er det enda mindre støy og skalatallet er derfor endret til 11 for no-dig og 90 for graving. Skalatallene er videre justert i forhold til lengde på ledningsnett i hver sone, al den tid dette indikerer hvor mye arbeid som vil utføres.

Støv i sonene er funnet ved å multiplisere inngangsverdi fra Tabell 17 med antall kg diesel. Pris for ulykker er fra 2014. Verdien justeres i forhold til konsumindeksen i Norge, konsumindeksen i SSB (SSB, 2017b) gir ny verdi lik 1,15 kr/kjørte km.

#### **4.45 Sosiale indikatorer**

Ulemper i antall dager for næringsvirksomhet, trafikk og boforhold vil være avhengig av i hvilken sone bærekraftanalysen utføres. Ulemper i antall dager vil vare lengre i sentrum grunnet vanskeligere arbeidsforhold. Ut i fra dette er det antatt tilsvarende påvirkning av ulemper i rød sone som i artikkelen til Sørumshagen et al. (2010), som i sin analyse utfører et sentrumsprosjekt. Dette tilsvarer 4 dager for no-dig og 12 dager for graving. For gul sone antas det noe mindre påvirkning, dette kommer av at det er lettere å utføre arbeid på ledningsnett i boligområder. Man slipper å ta hensyn til trikk og annen kollektivtrafikk, og det vil være mindre infrastruktur i bakken. Dermed antas det at ulempene varer 3 dager for no-dig og 11 dager for graving. I rosa sone er påvirkningen minst, men utførelse av no-dig krever et visst antall dager. Graving er lettere jo lenger ut i fra sentrum man kommer, eksempelvis vil man i rosa sone grave over jorder og parkarealer uten asfalt. Gravingen vil derfor i gjennomsnitt ta kortere tid. Ut i fra dette antas det at ulempene varer i 3 dager for no-dig og 10 dager for graving. I bærekraftanalysen vil antall dager med ulemper justeres etter lengden på ledningsnett. Dette gjøres med å dele på lengde ledning rehabilitert i analysen til Sørumshagen et al. (2010) og gange opp med antall meter ledning i hver sone. I analysen til Sørumshagen et al. (2010) rehabiliterer de en 300 meter lang ledning.

#### **4.46 Kvalitetsindikatorer**

Artikkelen til Sørumshagen et al. (2010) anser levetid som en indikator. Levetid vil i de fleste tilfeller være med å bestemme hvorfor man velger en metode, mens med levetid som en indikator sammenligner man ulike metoder basert på ulikt grunnlag. Grunnen er at levetid vil påvirke omfanget til alle indikatorene. Dette kommer av at man ikke tar hensyn til at man må gjennomføre en metode flere ganger for å oppnå samme levetid som en annen metode. Eksempelvis har ikke-strukturell metode kort levetid i forhold til graving. For å oppnå samme levetid som graving må metoden utføres flere ganger. Dette vil videre føre til større utslipp og man vil i større grad bli påvirket av sosiale indikatorer. På denne måten bør metoder med lavere levetid komme dårlige ut i en langtids- bærekraftanalyse. All den tid Sørumshagen et al. (2010) bruker levetid som en indikator, vil jeg bruke levetid som en styrende faktor i bærekraftanalysen. Dette gjøres med å multiplisere indikatorer for hver metode med tilhørende bærekraftfaktor, slik at levetid sees på som styrende.

Skaderisikoen på ledninger vil være lik den som er brukt i Sørumsøya et al. (2010). Levetid blir tatt hensyn til ved å multiplisere bærekraftfaktoren med skaderisikoen.

Fornyelse av øvrige ledninger, som er en indikator med verdi 1 eller 0 i Sørumsøya et al. (2010), er ikke med i denne case-studien. Dette punktet tilsvarer koordineringsarbeid, og bør på lik linje med de andre metodene bli vurdert etter levetid som styrende faktor. Forskjellen på koordinering og de andre metodene er at man vil få lengre anleggstid ved koordinering. Ved koordinering skifter man ut både vann- og avløpsrørene, noe som fører til en større grøft. Større grøft tilsvarer mere masser. Fordelen er at man kan dele alle indikatorene på to for graving, ettersom man fordeler påvirkningen fra vann- og avløpsledningen. Ved koordinering må man bruke tilhørende bærekraftfaktorer, noe som ikke vil bli gjort i denne masteroppgaven. Bærekraftfaktorene er derimot tilgjengelig for framtidige analyser.

## 4.5 Bærekraftanalyse

### 4.51 Fordeling

Kommuner i Norge bruker no-dig og graving i ulik grad. Noen kommuner bruker no-dig svært aktivt, slik som Bærum kommune, mens andre bruker no-dig lite slik som Kristiansand. Trondheim kommune ligger på rundt snittet for bruk av no-dig. Forskjellene i utførelse vil i en bærekraftanalyse påvirke i form av straffepoeng og kostnad. Med dette utgangspunktet skal det gjøres tre ulike bærekraftanalyser som tar hensyn til hvor mye no-dig og graving som er brukt i hver sone. Prosentvis bruk av metode er funnet gjennom spørreundersøkelser (Rygg, 2016). Bærekraftanalysen er utført med en fordeling på 5% no-dig og 95% graving, 30% no-dig og 70% graving og 50% no-dig og 50% graving. Dette vil i resultat-delen tilsvare strategi 1, 2 og 3. Tabell 19 viser prosentvis bruk av metode i fem store kommuner i Norge, og strategiene er basert på et representative utdrag av disse.

**Tabell 19, Prosentvis bruk av metode (Rygg, 2016)**

Prosentvis bruk av metode					
	Oslo	Trondheim	Drammen	Kristiansand	Bærum
No-dig vann	40%	28%	21%	5%	50%
Graving vann	60%	72%	79%	95%	50%
No-dig avløp		49%	15%	25%	68%
Graving avløp		51%	85%	75%	32%

### 4.52 Normalisering

Indikatorene for de ulike strategiene er normalisert. Anvendt normalisering gjør indikatorer benevnelsesløse og man minimerer mengde informasjon med å gi indikatorene en verdi ut i fra ytelse. Strategiene blir på denne måten enkle å sammenligne. Å normalisere innebærer at største verdi for en strategi får absoluttverdi lik 100. Minste verdi fra no-dig eller graving får verdi lik den prosentvise andelen av de to. Et eksempel på dette er hvis man bruker 200 liter diesel ved bruk av no-dig, og 800 liter diesel ved graving. Normalisert verdi blir da 100 for graving, mens no-dig får normalisert verdi lik 25.

#### 4.53 Vekting

Sørumshagen et al. (2010) har foretatt en panelvekting av de ulike indikatorene. Vekting utføres for å prioritere problemer etter alvorlighetsgrad, vannverkets ønsker, krav og etter strategiske planer. På denne måten kan overordnede politiske mål vektlegges. Panelet i Sørumshagen et al. (2010) består av fire personer, noe som gjør at vektingen er delvis subjektiv. For å unngå subjektivitet kan man øke antall deltagere i et panel slik at subjektive ytterpunkter vil forsvinne i et gjennomsnitt. Et panel bør også ha folk med ulik faglig bakgrunn for å belyse ulike aspekter, erfaringer og kunnskap. Det er viktig å vekte resultatet for å få fokus på viktige elementer. Sum av vektetallene skal være lik 100, og hver indikator ganges med en delsum av 100. Panelvektingen fører til at hver metode får straffepoeng. Metoden med færrest straffepoeng er mest bærekraftig.

I denne masteroppgaven følges samme vekteprosess som i Sørumshagen et al. (2010). Indikatorer for levetid og indikator for fornyelse av øvrige ledninger er derimot ikke med i vekteprosessen. Levetid er ikke sett på som en indikator, men en styrende faktor som påvirker alle indikatorene. Fornyelse av øvrige ledninger vil si koordinering. Koordinering har slik som de andre metodene egne bærekraftfaktorer. Skal en analyse utføres med koordinering bør derfor bærekraftfaktoren for denne metoden ganges inn. Indikator for levetid og indikator for fornyelse av øvrige ledninger bør derfor ikke være med i en bærekraftanalyse.

Total sum av vekt i prosent må være lik 100. Ved å kutte levetid og fornyelse av øvrige ledninger, foreligger det et overskudd på ni prosentpoeng som må plasseres. CO<sub>2</sub>-utslipp er i sterkt fokus i dagens samfunn, og regjeringen har lovet å kutte utslippene, slik at utslippet vektes med ytterligere tre prosentpoeng. Mange opplever støy som slitsomt og irriterende, og derfor vektes støy med ett prosentpoeng ekstra. Næringsvirksomhet er avhengig av lett tilkomst, og omgivelser kan påvirke om kunder går inn i en butikk eller ikke. Næringsvirksomhet vektes derfor med tre ekstra prosentpoeng. Trafikkulemper påvirker ofte mange, og stenging av veier kan føre til store omveier. Med dette utgangspunktet vektes trafikkulemper med to flere prosentpoeng.



## 4.6 Økonomisk vurdering

### 4.61 Kostnad i soner

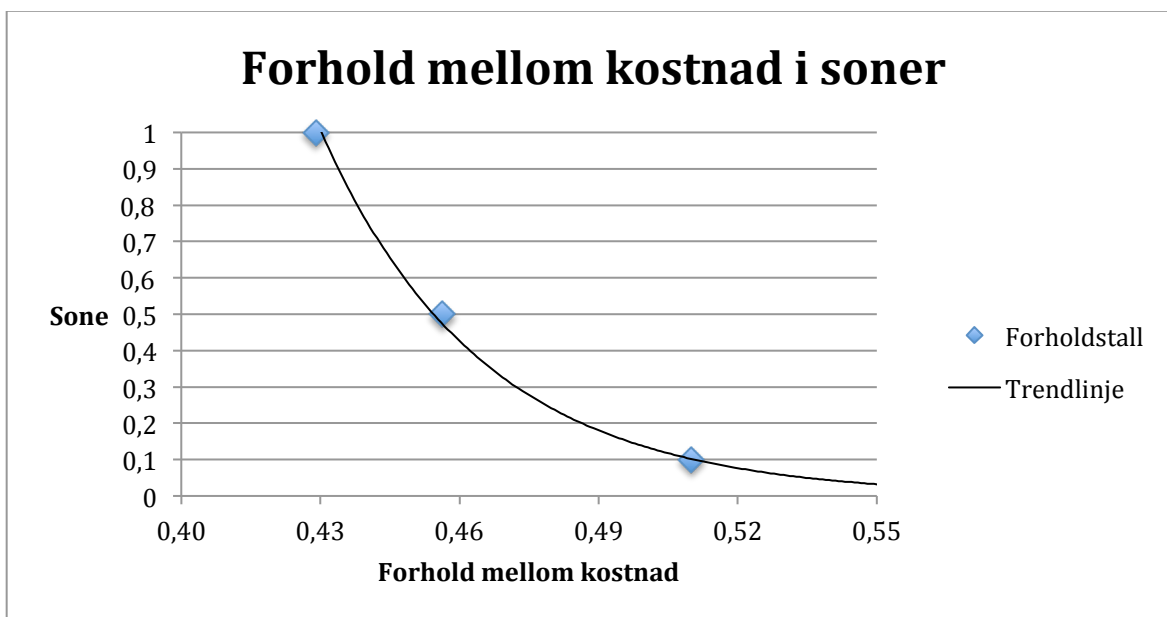
Enhetskostnader for rehabilitering er funnet gjennom intervjurunder i prosjektoppgaven (Rygg, 2016). Fordi det er ulik befolkningstetthet, vanskelighetsgrad og trafikk i de tre sonene, vil det være ulik pris for rehabilitering av ledninger. Kostnad i kroner/meter er vist i Tabell 21, men kostnader for rehabilitering utenfor sentrum og i landlige omgivelser mangler for Trondheim. For å finne rehabiliteringskostnad for graving utenfor Trondheim sentrum, finner jeg forholdet mellom graving i sentrum og utenfor. Forholdet gjelder for de byene med prisinformasjonen oppgitt. Pris i sentrum er ca. 1,23 ganger høyere enn utenfor. Med dette forholdet blir prisen for graving utenfor sentrum lik 12200 kr/meter.

Pris for rehabilitering er ulik i de forskjellige sonene. I tillegg vil forholdet mellom kostnad for no-dig og graving være forskjellig ut i fra hvilken sone man ser på. Forholdet mellom kostnaden for no-dig i sentrum og graving i sentrum er 0,43, mens utenfor byen er forholdet 0,46. Forholdet beskriver prisforskjell på no-dig i forhold til graving. Prisene i ulike byer varierer noe, grunnet forskjellig vanskelighetsgrad og fordi ulike byer bruker ulike no-dig metoder. Oslo har for eksempel mye bebyggelse, trikk, t-bane og infrastruktur i bakken, noe som bidrar til høye kostnader. I tillegg er det vanlig med full strukturell metode i Oslo, hvor metoden er dyrere enn belegg og strømpe som er mye brukt i Kristiansand. Forskjell i pris er vist i Tabell 21.

Figur 16 viser forholdet i pris mellom no-dig og graving for de forskjellige sonene. Rød sone er plassert på verdi 1, gul sone er plassert på verdi 0,5 og rosa sone er plassert på verdi 0,1. Forholdet mellom pris i rosa sone er ukjent, og det lages derfor en eksponentiell trendlinje mellom de ulike sonene. Mellom sentrum (rød sone) og boligområder (gul sone) er trenden ganske lineær, prisen er altså relativt lik, med noe billigere utførelse i gul sone. Gul sone er billigere grunnet enklere utførelse.

Pris for no-dig vil reduseres noe fra rød til gul sone, og fra gul til rosa sone vil prisen reduseres minimalt. Rehabilitering med no-dig krever utstyr og personell, noe som gjør at

rehabiliteringspris går mot konstant. Pris for graving i landlige omgivelser reduseres mye i forhold til rød og gul sone. Graving i landlige omgivelser er antageligvis enklere og billigere enn i by og boligstrøk. I mange tilfeller vil man grave over jorder og parkområder, som er enkelt og hurtig. Man slipper i tillegg å erstatte asfalt, brostein etc som i flere tilfeller er en betydelig kostnad. En lineær trendlinje mellom de tre sonene antas derfor å være feil. Avlesning av Figur 16 for rosa sone med verdi lik 0,1 vil med en antatt eksponentiell trendlinje gi et forholdstall lik 0,51.



**Figur 16, Forholdet mellom kostnad i ulike soner**

Tabell 20 viser forholdet i pris mellom no-dig og graving. Pris for graving utenfor sentrum er kalkulert til 12200 kr/meter. Med et forhold på 0,46 mellom no-dig og graving blir pris for no-dig utenfor sentrum lik 5610 kr/meter.

**Tabell 20, Soner med tilhørende forholdstall**

	Sone	No-dig/Graving
Sentrum, Rød	1	0,43
Utenfor sentrum, Gul	0,5	0,46
Landlige omgivelser, Rosa	0,1	0,51

**Tabell 21, Kostnad i ulike kommuner (Rygg, 2016)**

Kostnad (NOK/m)						
Metode	Oslo	Trondheim	Drammen	Kristiansand	Bærum	Snitt
No-dig i sentrum	20000	6000	12000	2900	6500	9480
Graving i sentrum	40000	15000	30000	13000	12500	22100
No-dig utenfor sentrum	18000	(5610)	10000	2800		10267
Graving utenfor sentrum	35000	(12200)	20000	12500		22500

Kostnad for graving i rosa sone er antatt til å koste 90% av kostnaden for graving i gul sone. Kostnaden for graving i rosa sone er ut i fra dette 10980 kr/meter, dermed koster No-dig i rosa sone 5600 kr/meter. Dette stemmer overens med at prisen for no-dig etter hvert vil bli konstant.

#### 4.62 Kostnad for bærekraftanalysen

Tilsvarende som i artikkelen til Sørumsdalen et al. (2010) er det valgt å ikke ta med kostnader som en egen indikator. Offentlige myndigheter og byggherrer har som oftest økonomiske rammer å forholde seg til og straffepoeng til hver strategi bør settes opp mot kostnad (Lindholm, 2002). Slike rammer kan føre til at bærekraft settes opp mot kostnad, og man får et valg mellom den billigste metoden, eller en metode som er mer bærekraftig. Samtidig kan en metode både være den billigste og den mest bærekraftige

Kostnadene til strategiene er utregnet med å multiplisere kostnad i hver sone med antall meter ledning for hver sone. Kostnad for no-dig metoder vil på samme måte som i bærekraftanalysen være avhengig av bærekraftfaktoren. Det er antatt at no-dig består av 50% semi-strukturell metode og 50% strukturell metode. Gjennomsnittlig bærekraftfaktor for disse to metodene er lik 1,87. Kostnadene for no-dig er multiplisert med denne faktoren slik at man igjen får sammenlignet metodene på likt grunnlag.

#### **4.7 Resultater fra bærekraftanalysen**

Tabell 22, 25 og 28 viser utregningen av indikatorene for hver sone. Lengden på ledningsnett i hver sone har mye å si på størrelsesordenen til indikatorene. Videre ser man at graving i de fleste tilfeller har større forbruk enn no-dig, med unntak av elektrisitetsforbruk og skaderisiko. I artikkelen til Sørumsdalen et al. (2010) er det stor forskjell på størrelsesordenen mellom no-dig og full oppgraving. Med levetid som styrende faktor ser man at denne forskjellen er mindre i alle soner.

Tabell 23, 26 og 29 viser summen av indikatorer innenfor hver strategi. Videre er strategiene normalisert i forhold til hverandre. Mellom de tre sonene er det liten forskjell ved ressurser og miljøindikatorer. Noe forskjell framkommer i de helsemessige indikatorene. Støy har størst påvirkning i rød sone, litt mindre i gul sone og minst påvirkning i rosa sone. Størst forskjell mellom soner framkommer under de sosiale indikatorene. I rød sone er det minst forskjell mellom normaliserte verdier. Mange vil derfor bli påvirket gjennom rehabilitering i denne sonen. I gul sone er færrest påvirket av rehabilitering. Total sett ser man at økning i bruk av no-dig fører til mer bærekraftig påvirkning. Skaderisikoen er lik i alle soner.

Tabell 24, 27 og 30 viser straffepoeng i de tre sonene. Rød sone har totalt flest straffepoeng for de ulike strategiene. Gul sone har færrest straffepoeng og rosa sone ligger dermed i midten på antall straffepoeng. Total ser man at det er liten forskjell i straffepoeng mellom sonene. Resultatet viser at størst bruk av no-dig fører til færrest straffepoeng.

Tabell 31 viser kostnad for utførelse, samt forskjell i pris mellom strategi 1 og 2 i forhold til strategi 3. Strategi 1 er dyrest etterfulgt av strategi 2 og 3. Kostnadene blir derfor lavere når større andel er utført med no-dig

Tabell 22, Indikatorer for rød sone

Indikatorer for bærekraftig rød sone											
Resurser	Enhet	50 % No-dig semi-strukturell	50% No-dig strukturell	Total No-dig	Full oppgraving	No-dig 5%	Full oppgraving 95%	No-dig 30%	Full oppgraving 70%	No-dig 50%	Full oppgraving 50%
Fossilt brennstoff	liter	329449	41669	371118	622041	18556	590939	111335	435429	185559	311021
Stein	m <sup>3</sup>	96947	45983	142930	629208	7146	597748	42879	440446	71465	314604
Elektrisitetsforbruk til legging av rør	kWh	85794	40693	126486	5652	6324	5369	37946	3956	63243	2826
Asfalt	m <sup>3</sup>	4934	2340	7274	50018	364	47517	2182	35013	3637	25009
Miljøindikatorer											
Utslipp CO <sub>2</sub>	kg	877252,91	110956,89	988209,80	1656370,22	49410,49	1573551,71	296462,94	1159459,15	494104,90	828185,11
Utslipp CO	kg	1217,63	154,01	1371,63	2299,06	68,58	2184,11	411,49	1609,34	685,82	1149,53
Utslipp NO <sub>x</sub>	kg	5534,72	700,04	6234,77	10450,29	311,74	9927,78	1870,43	7315,20	3117,38	5225,15
Utslipp SO <sub>2</sub>	kg	5,55	0,70	6,25	10,45	0,31	9,93	1,88	7,32	3,13	5,23
Helsemessige indikatorer											
Støv	skala	10724,18	5086,57	15810,74	56517,40	790,54	53691,53	4743,22	39562,18	7905,37	28258,70
Støv	kg	152,23	19,25	171,48	287,38	8,57	273,01	51,44	201,17	85,74	143,69
Ulykker	kr	248010	117633	365643	1768663	18282	1680229	109693	1238064	182821	884331
Sosiale indikatorer											
Næringsvirksomhet	dager	4290	1357	5647	6782	282	6443	1694	4747	2823	3391
Trafikkulemper	dager	4290	1357	5647	6782	282	6443	1694	4747	2823	3391
Boforhold	dager	4290	1357	5647	6782	282	6443	1694	4747	2823	3391
Kvalitetsindikatorer											
Levetid	år			Bærekraft-faktor	Bærekraft-faktor						
Skaderisiko på ledning	skalering	10,1	4,8	14,9	2,0	0,7	1,9	4,5	1,4	7,5	1,0
Fornyelse av øvrige ledninger	skalering			Metode E og F	Metode E og F						

**Tabell 23, Normaliserte verdier i rød sone**

Normaliserte verdier i rød sone							
Ressurser	Enhet	Sum strategi 1	Sum strategi 2	Sum strategi 3	Normalisert strategi 1	Normalisert strategi 2	Normalisert strategi 3
Fossilt brennstoff	liter	609495	546764	496580	100,0	89,7	81,5
Stein	m <sup>3</sup>	604894	483325	386069	100,0	79,9	63,8
Elektrisitetsforbruk til legging av rør	kWh	11694	41902	66069	17,7	63,4	100,0
Asfalt	m <sup>3</sup>	47881	37195	28646	100,0	77,7	59,8
Miljøindikatorer							
Utslipp CO <sub>2</sub>	kg	1622962,20	1455922,09	1322290,01	100,0	89,7	81,5
Utslipp CO	kg	2252,69	2020,83	1835,35	100,0	89,7	81,5
Utslipp NO <sub>x</sub>	kg	10239,51	9185,63	8342,53	100,0	89,7	81,5
Utslipp SO <sub>2</sub>	kg	10,24	9,19	8,35	100,0	89,8	81,6
Helsemessige indikatorer							
Støy	skala	54482,07	44305,40	36164,07	100,0	81,3	66,4
Støv	kg	281,59	252,61	229,43	100,0	89,7	81,5
Ulykker	kr	1698512	1347757	1067153	100,0	79,3	62,8
Sosiale indikatorer							
Næringsvirksomhet	dager	6725	6442	6214	100,0	95,8	92,4
Trafikkulempere	dager	6725	6442	6214	100,0	95,8	92,4
Boforhold	dager	6725	6442	6214	100,0	95,8	92,4
Kvalitetsindikatorer							
Levetid	år	-	-	-	-	-	-
Skaderisiko på ledning	skaleri ng	2,6	5,9	8,5	31,3	69,5	100,0
Fornyelse av øvrige ledninger	skaleri ng	-	-	-	-	-	-

**Tabell 24, Straffepoeng i rød sone**

Straffepoeng i rød sone				
Ressurser	Vekt i %	Strategi 1	Strategi 2	Strategi 3
Fossilt brennstoff	12	1200,0	1076,5	977,7
Stein	6	600,0	479,4	382,9
Elektrisitetsforbruk til legging av rør	6	106,2	380,5	600,0
Asfalt	8	800,0	621,5	478,6
<b>Sum</b>	<b>32</b>			
<b>Miljøindikatorer</b>				
Utslipp CO <sub>2</sub>	11	1100,0	986,8	896,2
Utslipp CO	5	500,0	448,5	407,4
Utslipp NO <sub>x</sub>	6	600,0	538,2	488,8
Utslipp SO <sub>2</sub>	4	400,0	359,0	326,2
<b>Sum</b>	<b>26</b>			
<b>Helsemessige indikatorer</b>				
Støy	7	700,0	569,2	464,6
Støv	5	500,0	448,6	407,4
Ulykker	11	1100,0	872,8	691,1
<b>Sum</b>	<b>23</b>			
<b>Sosiale indikatorer</b>				
Næringsvirksomhet	6	600,0	574,7	554,4
Trafikkulempet	5	500,0	478,9	462,0
Boforhold	3	300,0	287,3	277,2
<b>Sum</b>	<b>14</b>			
<b>Kvalitetsindikatorer</b>				
Levetid		-	-	-
Skaderisiko på ledning	5	156,4	347,3	500,0
Fornyelse av øvrige ledninger		-	-	-
<b>Sum</b>	<b>5</b>			
<b>Total sum</b>	<b>100</b>	9162,6	8469,3	7914,7

Tabell 25, Indikatorer for gul sone

Indikatorer for bærekraft gul sone											
Ressurser	Enhet	50 %No-dig semi-strukturell	50% No-dig strukturell	Total No-dig	Full oppgraving	No-dig 5%	Full oppgraving 95%	No-dig 30%	Full oppgraving 70%	No-dig 50%	Full oppgraving 50%
Fossilt brennstoff	liter	939998	118893	1058891	1777588	52945	1688709	317667	1244312	529445	888794
Stein	m <sup>3</sup>	288574	136873	425448	1872924	21272	1779278	127634	1311047	212724	936462
Elektrisitetforbruk til legging av rør	kWh	255376	121127	376502	16833	18825	15991	112951	11783	188251	8417
Asfalt	m <sup>3</sup>	14684	6965	21649	148885	1082	141441	6495	104220	10824	74443
Miljøindikatorer											
Utslipp CO <sub>2</sub>	kg	2503029,82	316588,75	2819618,57	4733360,78	140980,93	4496692,74	845885,57	3313352,55	1409809,29	2366680,39
Utslipp CO	kg	3474,23	439,43	3913,66	6569,96	195,68	6241,46	1174,10	4598,97	1956,83	3284,98
Utslipp NO <sub>x</sub>	kg	15791,99	1997,41	17789,40	29863,47	889,47	28370,30	5336,82	20904,43	8894,70	14931,74
Utslipp SO <sub>2</sub>	kg	15,80	2,00	17,79	29,86	0,89	28,37	5,34	20,90	8,90	14,93
Helsemessige indikatorer											
Støy	skala	27665,70	13122,07	40787,78	159820,12	2039,39	151829,11	12236,33	111874,08	20393,89	79910,06
Støv	kg	434,29	54,93	489,22	821,25	24,46	780,19	146,77	574,88	244,61	410,63
Ulykker	kr	704993	334384	1039378	5037728	51969	4785842	311813	3526410	519689	2518864
Sosiale indikatorer											
Næringsvirksomhet	dager	9577	3028	12605	18505	630	17580	3781	12954	6302	9253
Trafikkulemper	dager	9577	3028	12605	18505	630	17580	3781	12954	6302	9253
Boforhold	dager	9577	3028	12605	18505	630	17580	3781	12954	6302	9253
Kvalitetsindikatorer											
Levetid	år			Bærekraft-faktor	Bærekraft-faktor						
Skaderisiko på ledning	skalering	10,1	4,8	14,9	2,0	0,7	1,9	4,5	1,4	7,5	1,0
Fornøyelse av øvrige ledninger	skalering			Metode E og F	Metode E og F						



**Tabell 26, Normaliserte verdier i gul sone**

Normaliserte verdier i gul sone							
Ressurser	Enhet	Sum strategi 1	Sum strategi 2	Sum strategi 3	Normalisert strategi 1	Normalisert strategi 2	Normalisert strategi 3
Fossilt brennstoff	liter	1741653	1561979	1418239	100,0	89,7	81,4
Stein	m <sup>3</sup>	1800550	1438681	1149186	100,0	79,9	63,8
Elektrisitetsforbruk til legging av rør	kWh	34816	124734	196668	17,7	63,4	100,0
Asfalt	m <sup>3</sup>	142523	110714	85267	100,0	77,7	59,8
<b>Miljøindikatorer</b>							
Utslipp CO <sub>2</sub>	kg	4637673,67	4159238,12	3776489,68	100,0	89,7	81,4
Utslipp CO	kg	6437,14	5773,07	5241,81	100,0	89,7	81,4
Utslipp NO <sub>x</sub>	kg	29259,77	26241,25	23826,43	100,0	89,7	81,4
Utslipp SO <sub>2</sub>	kg	29,26	26,24	23,83	100,0	89,7	81,4
<b>Helsemessige indikatorer</b>							
Støy	skala	153868,50	124110,41	100303,95	100,0	80,7	65,2
Støv	kg	804,65	721,64	655,24	100,0	89,7	81,4
Ulykker	kr	4837810	3838223	3038553	100,0	79,3	62,8
<b>Sosiale indikatorer</b>							
Næringsvirksomhet	dager	18210	16735	15555	100,0	91,9	85,4
Trafikkulempet	dager	18210	16735	15555	100,0	91,9	85,4
Boforhold	dager	18210	16735	15555	100,0	91,9	85,4
<b>Kvalitetsindikatorer</b>							
Levetid	år	-	-	-	-	-	-
Skaderisiko på ledning	skalering	2,6	5,9	8,5	31,3	69,5	100,0
Fornyelse av øvrige ledninger	skalering	-	-	-	-	-	-

**Tabell 27, Straffepoeng i gul sone**

Straffepoeng i gul sone				
Ressurser	Vekt i %	Strategi 1	Strategi 2	Strategi 3
Fossilt brennstoff	12	1200,0	1076,2	977,2
Stein	6	600,0	479,4	382,9
Elektrisitetsforbruk til legging av rør	6	106,2	380,5	600,0
Asfalt	8	800,0	621,5	478,6
<b>Sum</b>	<b>32</b>			
<b>Miljøindikatorer</b>				
Utslipp CO <sub>2</sub>	11	1100,0	986,5	895,7
Utslipp CO	5	500,0	448,4	407,2
Utslipp NO <sub>x</sub>	6	600,0	538,1	488,6
Utslipp SO <sub>2</sub>	4	400,0	358,8	325,8
<b>Sum</b>	<b>26</b>			
<b>Helsemessige indikatorer</b>				
Støy	7	700,0	564,6	456,3
Støv	5	500,0	448,4	407,2
Ulykker	11	1100,0	872,7	690,9
<b>Sum</b>	<b>23</b>			
<b>Sosiale indikatorer</b>				
Næringsvirksomhet	6	600,0	551,4	512,5
Trafikkulempet	5	500,0	459,5	427,1
Boforhold	3	300,0	275,7	256,3
<b>Sum</b>	<b>14</b>			
<b>Kvalitetsindikatorer</b>				
Levetid		-	-	-
Skaderisiko på ledning	5	156,4	347,3	500,0
Fornyelse av øvrige ledninger		-	-	-
<b>Sum</b>	<b>5</b>			
<b>Total sum</b>	<b>100</b>	9162,6	8409,0	7806,2

Tabell 28, Indikatorer for rosa sone

Indikatorer for bærekraft rosa sone											
Ressurser	Enhet	50 %No-die semi- strukturell	50% No-die strukturell	Total No-die	Full oppgraving	No-die 5%	Full oppgraving 95%	No-die 30%	Full oppgraving 70%	No-die 50%	Full oppgraving 50%
Fossilt brennstoff	liter	216040	27325	243365	409544	12168	389067	73010	286681	121683	204772
Stein	m <sup>3</sup>	67500	32016	99516	438094	4976	416189	29855	306666	49758	219047
Elektrisitetsforbruk til legging av rør	kWh	59735	28333	88067	3935	4403	3738	26420	2755	44034	1968
Asfalt	m <sup>3</sup>	3434	1629	5063	34826	253	33085	1519	24378	2532	17413
Miljøindikatorer											
Utslipp CO <sub>2</sub>	kg	575274,14	72761,95	648036,08	1090533,89	32401,80	1036007,20	194410,82	763373,72	324018,04	545266,95
Utslipp CO	kg	798,47	100,99	899,46	1513,67	44,97	1437,99	269,84	1059,57	449,73	756,84
Utslipp NO <sub>x</sub>	kg	3629,49	459,07	4088,56	6880,34	204,43	6536,32	1226,57	4816,24	2044,28	3440,17
Utslipp SO <sub>2</sub>	kg	3,65	0,46	4,11	6,88	0,21	6,54	1,23	4,82	2,06	3,44
Helsemessige indikatorer											
Støv	skala	5475,68	2597,16	8072,84	35415,81	403,64	33645,02	2421,85	24791,07	40364,2	17707,91
Støv	kg	99,81	12,62	112,43	189,21	5,62	179,75	33,73	132,45	56,22	94,61
Ulykker	kr	161769	76729	238498	1159204	11925	1101244	71549	811443	119249	579602
Sosiale indikatorer											
Næringsvirksomhet	dager	2241	709	2950	3935	147	3738	885	2755	1475	1968
Trakkulempen	dager	2241	709	2950	3935	147	3738	885	2755	1475	1968
Beforhold	dager	2241	709	2950	3935	147	3738	885	2755	1475	1968
Kvalitetsindikatorer											
Levetid	år			Bærekraft- faktor	Bærekraft- faktor						
Skaderisiko på ledning	skalering	10,1	4,8	14,9	2,0	0,7	1,9	4,5	1,4	7,5	1,0
Forryelse av øvrige ledninger	skalering			Metode E og F	Metode E og F						

**Tabell 29, Normaliserte verdier i rosa sone**

Normaliserte verdier i rosa sone							
Ressurser	Enhet	Sum strategi 1	Sum strategi 2	Sum strategi 3	Normaliserte strategi 1	Normaliserte strategi 2	Normaliserte strategi 3
Fossilt brennstoff	liter	401235	359690	326455	100,0	89,6	81,4
Stein	m <sup>3</sup>	421165	336521	268805	100,0	79,9	63,8
Elektrisitetsforbruk til legging av rør	kWh	8142	29175	46001	17,7	63,4	100,0
Asfalt	m <sup>3</sup>	33338	25897	19945	100,0	77,7	59,8
Miljøindikatorer							
Utslipp CO <sub>2</sub>	kg	1068409,00	957785,55	869285,99	100,0	89,6	81,4
Utslipp CO	kg	1482,93	1329,41	1206,57	100,0	89,6	81,4
Utslipp NO <sub>x</sub>	kg	6740,75	6042,80	5484,45	100,0	89,6	81,4
Utslipp SO <sub>2</sub>	kg	6,74	6,05	5,50	100,0	89,7	81,5
Helsemessige indikatorer							
Støy	skala	34048,66	27212,92	21744,32	100,0	79,9	63,9
Støv	kg	185,37	166,18	150,82	100,0	89,6	81,4
Ulykker	kr	1113169	882992	698851	100,0	79,3	62,8
Sosiale indikatorer							
Næringsvirksomhet	dager	3886	3639	3442	100,0	93,7	88,6
Trafikkulempet	dager	3886	3639	3442	100,0	93,7	88,6
Boforhold	dager	3886	3639	3442	100,0	93,7	88,6
Kvalitetsindikatorer							
Levetid	år	-	-	-	-	-	-
Skaderisiko på ledning	skaleri ng	2,6	5,9	8,5	31,3	69,5	100,0
Fornyelse av øvrige ledninger	skaleri ng	-	-	-	-	-	-

**Tabell 30, Straffepoeng i rosa sone**

Straffepoeng i rosa sone				
Ressurser	Vekt i %	Strategi 1	Strategi 2	Strategi 3
Fossilt brennstoff	12	1200,0	1075,7	976,3
Stein	6	600,0	479,4	382,9
Elektrisitetsforbruk til legging av rør	6	106,2	380,5	600,0
Asfalt	8	800,0	621,4	478,6
<b>Sum</b>	<b>32</b>			
<b>Miljøindikatorer</b>				
Utslipp CO <sub>2</sub>	11	1100,0	986,1	895,0
Utslipp CO	5	500,0	448,2	406,8
Utslipp NO <sub>x</sub>	6	600,0	537,9	488,2
Utslipp SO <sub>2</sub>	4	400,0	359,0	326,2
<b>Sum</b>	<b>26</b>			
<b>Helsemessige indikatorer</b>				
Støy	7	700,0	559,5	447,0
Støv	5	500,0	448,2	406,8
Ulykker	11	1100,0	872,5	690,6
<b>Sum</b>	<b>23</b>			
<b>Sosiale indikatorer</b>				
Næringsvirksomhet	6	600,0	562,0	531,5
Trafikkulempet	5	500,0	468,3	442,9
Boforhold	3	300,0	281,0	265,8
<b>Sum</b>	<b>14</b>			
<b>Kvalitetsindikatorer</b>				
Levetid		-	-	-
Skaderisiko på ledning	5	156,4	347,3	500,0
Fornyelse av øvrige ledninger		-	-	-
<b>Sum</b>	<b>5</b>			
<b>Total sum</b>	<b>100</b>	9162,6	8427,1	7838,7

**Tabell 31, Kostnad for utførelse**

	Rød sone	Gul sone	Rosa sone	Sum strategier	Prisforskjell mot strategi 3
Strategi 1	kr 2 511 691 200	kr 6 113 497 973	kr 1 293 570 717	kr 9 918 759 890	1,08 %
Strategi 2	kr 2 350 147 200	kr 5 894 287 837	kr 1 277 734 305	kr 9 522 169 341	1,03 %
Strategi 3	kr 2 220 912 000	kr 5 718 919 728	kr 1 265 065 174	kr 9 204 896 902	1,00 %

#### 4.8 Diskusjon av bærekraftanalyse

Bærekraft er i fokus i dagens samfunn. Man skal leve slik at man ikke ødelegger for framtidig generasjoner og man bør derfor finne gode løsninger. For å velge riktige løsninger er det viktig å lage analyser, slik at man kan drøfte metoder opp mot hverandre. Indikatorer må velges for å gjennomføre en bærekraftanalyse. Hvilke indikatorer som velges er viktig for hva som skal settes fokus på. Indikatorene og vektingen i denne masteroppgaven er i stor grad basert på Sørumsdalen et al. (2010). Lindholm (2002) skriver om viktigheten til å unngå indikatorer som i realiteten ikke er viktig for en bærekraftanalyse. Dette er indikatorer som gir små utslipp og dermed er betydningsløs i den store sammenheng. Grunnen til at man bør unngå slike indikatorer er at det kan føre til at man velger en metode som er mindre bærekraftig. Valg av indikatorer bør derfor gjøres etter kriterier som sikrer god relevans. Sørumsdalen et al. (2010) har basert indikatorene på gode kriterier slik at indikatorene sikrer dette.

Skaar (2013) har brukt andre indikatorer, og han har utført en vektprosess basert på subjektiv mening. Skaar (2013) har valgt indikatorer og vekting med stort fokus på levetid, slik at graving kommer svært godt ut i bærekraftanalysen hans. Bærekraftanalysen i denne masteroppgaven bruker levetid som en styrende faktor og bærekraftfaktorene muliggjør en mer direkte og rettferdig sammenligning av ulike metoder. Det er derfor ikke nødvendig å sette levetid som en indikator. I motsetning til Skaar (2013) kommer strategien med no-dig best ut.

Panelvektingen er gjort av fire personer og vil derfor være delvis subjektiv. Vektingen er basert på et gjennomsnitt av deres meninger. For å redusere subjektiviteten kan et panel bestå av personer med ulike interesser. På den måten unngår man å bare legge vekt på en VA-ingeniørs mening. Dette er gjort i Sørumsdalen et al. (2010) med fire forskjellige personer med ulik teknisk bakgrunn. Vektingen får da større relevans med å representere en større del av samfunnet. Indikator for levetid og for fornyelse av øvrige ledninger er tatt vekk i case-studien. Jeg måtte derfor gjøre noen vurderinger som har ført til en noe annen vekting. Dette har igjen gjort at det er færre kvalitetsindikatorer og man har mistet noe av

balansen i antall indikatorer. For å opprette en viss balanse mellom problemområder kan det være lønnsomt med et jevnere antall indikatorer i problemområdene. I en ny analyse kan man gå igjennom indikatorene og eventuelt finne nye kvalitetsindikatorer. Vekting representerer viktigheten av indikatorer, og jeg har i masteroppgaven forandret vektingen slik at man i større grad skal ha fokus på politiske overordnede mål (FN-sambandet, 2017). Ideelt sett burde den nye vektingen vært drøftet i et panel for å hindre subjektivitet.

De tre sonene kommer relativt likt ut i bærekraftanalysen. Avstanden for massetransport er nokså lik, og man får derfor og noenlunde likt forbruk og utslipp. De tre sonene skiller seg derimot litt for så vidt det gjelder sosiale indikatorer. Rød har ikke overaskende størst påvirkning, mens gul har derimot minst påvirkning. No-dig krever et bestemt antall dager for utførelse, noe som gjør at det blir liten forskjell mellom gul og rosa sone. Gul er den sonen med lengst lengde ledning, og av den grunn økes forskjellen mellom de ulike strategiene.

Bærekraftanalysen tar for seg hele ledningsnettverket til Trondheim. En analyse av hele ledningsnettverket gjør at man kan planlegge i et strategisk perspektiv. Med enklere analyser av enkelte prosjekt kan man miste den overordnede målsetningen, og valg som er gode i dag er ikke nødvendigvis gode om 30 år. En måte å løse dette problemet på er å først gjøre en bærekraftanalyse av et helt nettverk, før man senere gjør mindre analyser basert på resultatene fra den overordnede analysen. Resultatet fra bærekraftanalysen viser at større bruk av no-dig metoder gir færre straffepoeng og lavere anleggskostnad. Resultatet tilsier derfor at man bør velge no-dig metoder der dette er mulig. Hvis analysen hadde blitt gjort med hensyn på koordinering ville man halvert indikatorer og kostnad for full oppgraving. Dette ville sannsynligvis gjort at graving kommer bedre ut. Ulempene dette medfører er at man vil ha lengre anleggstid, mer graving og dermed også mer kjøring. Analysen med koordinering kan føre til at graving er bedre enn no-dig i et bærekraftig perspektiv. Basert på dette utgangspunktet, vil det ikke være gitt at no-dig alltid vil komme best ut i en bærekraftanalyse.

Rehabilitering bør planlegges for en by med å se på ulike strategier i en bærekraftanalyse. I et bærekraftig perspektiv ser man at strategien med mest graving gir flest straffepoeng, se strategi 1. Selv om enkelte no-dig metoder har høy bærekraftfaktor, ser man at større bruk av no-dig metoder totalt sett gir færre straffepoeng, se strategi 3. Sørumsdalen et al. (2010) gir i sin bærekraftanalyse langt færre straffepoeng til no-dig enn til graving, der differansen er over dobbelt så stor i antall straffepoeng. Denne differansen er ikke lenger så stor ved bruk av bærekraftfaktorene for no-dig. Indikatorene for no-dig økes betraktelig grunnet de høye bærekraftfaktorene. Tidligere analyser kan på bakgrunn av dette, ha gitt no-dig en ufortjent god vurdering. Det er samtidig viktig å huske at Sørumsdalen et al. (2010) utførte sin analyse på ett prosjekt, mens jeg utførte analysen på et helt nettverk. Dette kan skape individuelle forskjeller i form av ulike antagelser.

Tre ulike strategier bestående av no-dig og graving er satt sammen. Basert på dette utgangspunktet er det antatt at no-dig består av 50% semi-strukturell metode og 50% strukturell metode. I virkeligheten vil man også bruke ikke-strukturelle metoder som for eksempel belegg. Belegg har høy bærekraftfaktor som gir større påvirkning. I hvilken grad man bruker de forskjellige no-dig metodene vil variere fra by til by, men det kunne allikevel vært interessant å utføre en bærekraftanalyse som også inkluderer belegg. Bærekraftanalysen kunne da vært brukt for å se om no-dig ville kommet dårligere/bedre ut, på tilsvarende måte som i denne masteroppgaven. Undersøkelser i prosjektoppgaven Rygg (2016) viser at ulike kommuner bruker forskjellige no-dig metoder i ulik grad. En slik fordeling vil da representere mer reelle forhold.

Kostnad kan brukes som en indikator, men dette anbefales ikke fordi byggherre og offentlige myndigheter har økonomiske rammer som må overholdes (Lindholm, 2002). Økonomi er sett på som en viktig styringsfaktor i alle prosjekter. I en bærekraftanalyse vil det derfor være nødvendig å inkorporere denne slik som Skaar (2013) gjør i sin analyse. Kostnader er i case-studien beregnet for seg selv, og ut i fra beregningene ser man at strategi 3 er billigst. Det er viktig å ta hensyn til økonomi i en bærekraftanalyse slik at man totalt får en fot innenfor alle de tre aspektene. Når man i et prosjekt er sterkt avhengig av budsjettammer, ser jeg det som enklere å ha beregnet kostnader for seg selv. I en analyse



vil kostnadene normaliseres, noe som fører til at man likevel må foreta en ny økonomisk vurdering for å finne total kostnad. På denne måten blir økonomi bestemmende i for stor grad.

No-dig er billigere enn graving, men med gjeldende bærekraftfaktor ganget inn blir forskjellen mindre. Forskjellen mellom strategi 1 og 2 i forhold til strategi 3, er kun 8% og 3%. Resultatene til Sørumshagen et al. (2010) viser stor prisforskjell på graving og no-dig. En mindre differanse kommer av at no-dig metoder har kortere levetid slik at det må gjøres flere utskiftninger for å representere samme levetid. Bærekraftfaktorene må i den sammenheng også ganges inn i kostnadsberegningene slik at prisforskjellen blir mindre. Strategi 3 er billigst og mest bærekraftig. Resultatene fra bærekraftanalysen viser at jo større bruk av no-dig, jo billigere og mer bærekraftig vil løsningen være. Dette er uavhengig av hvilken sone rehabilitering foregår.

#### **4.81 Bærekraftanalyse med el-lastebil**

El-kjøretøy har en sterkt vekst i dagens samfunn, og det er dermed god grunn til å tro el-lastebiler vil bli en del av tungtransporten (Henriksen, 2017). Hvis man ser bort i fra at Norge er med i et internasjonalt elektrisitetsmarked der noe av elektrisiteten er produsert fra kull, olje og gass, kommer mye av den elektriske energien fra vannkraft (Knudsen, 2007). I et slikt tilfelle vil bærekraftanalysen i case-studien bli helt annerledes. Basert på el-lastebiler vil indikatoren for fossilt brensel bli null, noe som gjør at miljøindikatorne også vil bli null. Elektriske kjøretøy bråker mye mindre enn dagens tungtransport, slik at skalatallet for støy vil også reduseres. Elektrisitetsforbruket vil økes, mens de resterende indikatorene trolig vil forbli som utregnet. Forbruk og utslipp fra gravemaskinene vil komme i tillegg, hvor dette vil gi noe forbruk av diesel og dermed også føre til noe utslipp.

Med nye indikatorer som i mindre grad er avhengig av utslipp er det grunn til å tro at metoder med lengre levetid vil komme bedre ut i en bærekraftanalyse. Graving har lengst levetid, men scorer i dag dårligst i en bærekraftanalyse i form av straffepoeng og pris. Uten å gjennomføre en analyse med el-lastebil er det vanskelig å si nøyaktig reduksjon i straffepoeng, men gode grunner taler for at graving vil få færre straffepoeng. Rehabilitering

av ledninger utføres noen ganger med koordineringsarbeid. Koordinering fører til at man deler indikatorer og kostnader på to for graving. Hvis prosjektet i tillegg utføres med el-lastebil ser jeg for meg at full oppgraving vil score bra i en bærekraftanalyse. Koordineringsarbeid har lave bærekraftfaktorer, og når man i tillegg deler indikatorene i to, vil indikatorene bli lave i forhold til no-dig som har høye bærekraftfaktorer. På tilsvarende måte vil kostnaden reduseres. Dette illustreres med at ny teknologi krever nye forutsetninger, samtidig som metoder som ikke er bærekraftige i dag, kan bli bærekraftige i framtiden.

Bærekraftfaktorene innebærer at metoder kan sammenlignes på tilsvarende grunnlag. Når en betydelig del av indikatorene for graving blir satt lik null, vil bærekraftfaktorene ha mer å si i analysen. Indikatorene for graving og no-dig vil bli likere, slik at en bærekraftfaktor på mer enn to vil gi stort utslag. Med andre ord vil levetid i større grad påvirke hvor bærekraftig et prosjekt er. Teknologiu utvikling innebærer at vi går mot en mer bærekraftig hverdag, mens pris og anleggstid vil og ha påvirkning på hvilke løsninger som blir valgt. For at bærekraftige løsninger skal bli tatt i bruk må de være konkurransedyktige satt opp mot eldre løsninger. Når den tiden kommer, bør det også gjennomføres nye bærekraftanalyser.

## 4.9 Konklusjon

I et strategisk perspektiv er det gunstig å kombinere AM og bærekraft. AM definerer en prosess noe som gir god gjennomføring av et prosjekt, mens bærekraft setter fokus på bærekraftige løsninger. Selv om de to begrepene kommer i konflikt, vil man med en kombinasjon av disse, sette fokus på viktige elementer som samlet sett kan gi best mulig resultat.

Levetid er i mange tilfeller med å bestemme valg av metode. Levetider for metodene er funnet med utgangspunkt i forskjellige forutsetninger, og vil som helhet representere nåtidens forhold. Analyser kan i dag bruke bærekraftfaktorene, men levetidene bør oppdateres ved framtidig bruk. Arealet under ulike metoder brukes til å lage ulike bærekraftfaktorer, hvor metodene med kortest levetid har medfølgende høy bærekraftfaktor. Bærekraftfaktorene er av slik form at de er enkle og praktiske å bruke, noe som er gunstig i bærekraftanalyser. I denne masteroppgavens bærekraftanalyse kommer no-dig dårligere ut enn i andre utførte analyser. Til tross for dette vil metoden likevel være mest bærekraftig. Dette innebærer at metoden med hyppigst bruk av no-dig får færrest straffepoeng. Det foreligger liten forskjell på straffepoeng i ulike soner, men man ser at sosiale indikatorer vil ha noe påvirkning på resultatet. Andre forutsetninger kan føre til andre resultater, eksempelvis med anvendelse av koordinering, kan graving komme gunstig ut. Dette kommer av at koordinering forutsetter at man halverer kostnader og indikatorer for graving.

Kostnadsforskjellen til de forskjellige strategiene i det store og det hele liten, men strategien med mest bruk av no-dig har minst kostnad. Med anvendelse av bærekraftfaktorene blir differansen i kostnad mindre enn i andre analyser. Strategi 3 koster minst å gjennomføre, mens Strategi 1 er dyrest å gjennomføre. El-lastebiler blir trolig tatt i bruk, noe som igjen kan føre til at graving kommer heldigere ut. Med bruk av el-lastebil vil også koordineringsarbeid score enda bedre. På bakgrunn av dette bør man unngå antagelsen om at no-dig alltid vil være den beste løsningen. I framtiden vil trolig ny

teknologi oppstå og el-lastebiler kan bli en del av transportnæringen. I så fall vil dette ha stor innvirkning på bærekraftanalysen, og det må utføres helt nye analyser og vurderinger.

#### **4.91 Faglige og tekniske antagelser**

Levetiden for ulike metoder vil forandre seg, og man kan samle informasjon om levetider i et datasett samt oppdatere disse. Dette vil føre til nøyaktige bærekraftfaktorer. Bærekraftfaktorene fører sannsynligvis til noe høye verdier, ettersom man ikke vil rehabilitere med tilsvarende metode to ganger på rad. Fordelen med faktorene er at de er praktiske og enkle å bruke. Sonene i Trondheim kan regnes ut med dataverktøy, noe som vil være svært nøyaktig. Inngangsverdier må jevnlig oppdateres og tilpasses til dagens teknologi, og på denne måten får man en analyse ut i fra nåtidens forhold. Verdiene kan på sin side ta større utgangspunkt i forholdene i Trondheim enn i Oslo.

Det er antatt at en lastebil kjører en vei med tom bil og en vei med full bil. Ofte vil man prøve å optimalisere antall kjøreturer, noe som krever nærmere undersøkelse. Vektingen i bærekraftanalysen er forandret og to av indikatorene er tatt bort. Ideelt sett bør en bærekraftanalyse være basert på et jevnt antall indikatorer innenfor forskjellige problemområder. I tillegg bør man unngå for mange subjektive vurderinger slik at bærekraftanalysen i sin helhet blir objektiv. Det er antatt at no-dig metoden består av strømpe og utblokking, men i virkeligheten vil no-dig også bestå av ikke-strukturelle metoder. Kostnadsberegningene kan derimot utføres på bakgrunn av reelle kostnader, hvor mangel på informasjon har ført til estimerte verdier.

#### **4.92 Videre arbeid**

Bærekraftfaktorene bør jevnlig oppdateres, ettersom levetider forandrer seg og man oppnår flere presise målinger med ny teknologi. Videre kan faktorene brukes til å til å utføre flere bærekraftanalyser hvor man ser på andre metoder. Særlig ville det vært ønskelig å gjøre én bærekraftanalyse med koordinering og én med bruk av el-lastebil. Ikke-strukturell metode blir ofte brukt ved rehabilitering, og den kan også inkorporeres i nye analyser. Der bærekraftanalysen er utført i Trondheim kommune, må rehabiliteringen av VA-nettet planlegges i alle kommuner. Det vil derfor være interessant å utføre analyser i ytterligere kommuner, for å vurdere bruken av tilsvarende strategier opp mot hverandre.

## Referanser

- AB, R. V. 1989. *Renovering af afløbsledninger - retningslinjer for valg, dimensjonering og utførelse*, <https://byg-erfa.dk/renovering-afl-bsledninger-retningslinier-valg-dimensjonering-og-udf-relse>, Rørcenteret teknologisk institut.
- ALEGRE, H., CABRERA ROCHERA, E., HEIN, A. & BRATTEBØ, H. 2014. Framework for Sustainability Assessment of UWCS and development of a self-assessment tool.
- ALEGRE, H. & COELHO, S. T. 2012. *Infrastructure asset management of urban water systems*, INTECH Open Access Publisher.
- ALEGRE, H., COELHO, S. T., COVAS, D. I. C., DO CÉU ALMEIDA, M. & CARDOSO, A. 2013. A utility-tailored methodology for integrated asset management of urban water infrastructure. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13, 1444-1451.
- ALEGRE, H., COELHO, S. T., VITORINO, D. & COVAS, D. 2016. Infrastructure asset management—the TRUST approach and professional tools. *Water Science and Technology: Water Supply*, ws2016033.
- BAUR, R. & HERZ, R. 2002. Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types. *Water science and technology*, 46, 389-396.
- BAUR, R. & KROPP, I. 2002. Selecting and scheduling infrastructure rehabilitation projects. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2, 43-50.
- BERTEIG, F. 2016. Erfaring med bruk av NoDig i Bærum kommune. *SSTT*.
- BRUASET, S. 17.02.17 2017. *RE: Levetidskurver*.
- BRUASET, S., RYGG, H. & SÆGROV, S. 2017. Exploring the long-term impact of urban water systems rehabilitation strategies and prepering the way for urban water systems of the future -do we plan for tomorrow or for the next century. Unpublished.
- BRUASET, S. & SÆGROV, S. 2017. A risk based framework for long-term sustainable management of urban water networks. Unpublished.
- BRUNDTLAND, G. H. 1987. *Vår felles framtid/Verdenskommisjonen for miljø og utvikling. Tiden norsk forlag*.
- BRUNVOLL, F., ENGELIEN, E., HOEM, B., HOLMENGEM, N., KARLSEN, H. T., MONSRUD, J., STEINNES, M., SØNSTEBØ, A. & WETHAL, W. 2009. Samferdsel og miljø 2009: utvalgte indikatorer for samferdselssektoren.
- DRAGSTEN, K. M. 2017. *RE: Transport av masser*.
- ENANDER, L., FJELDHUS, K. S. & GYLLENHAMMAR, A. 2014. *Bærekraftig forvaltning av VA-tjenestene*, Hamar, Norsk Vann BA.
- FINKBEINER, M., INABA, A., TAN, R., CHRISTIANSEN, K. & KLÜPPEL, H.-J. 2006. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The international journal of life cycle assessment*, 11, 80-85.
- FINKBEINER, M., SCHAU, E. M., LEHMANN, A. & TRAVERSO, M. 2010. Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 2, 3309-3322.
- FN-SAMBANDET. 2017. *Dette er Parisavtalen* [Online]. <http://www.fn.no/Tema/Klima/Klimaforhandlinger/Dette-er-Paris-avtalen>: FN-sambandet. [Accessed 2017].
- GOOGLE. 2017. *Trondheim kommune*. <https://www.google.no/maps/@63.4153862,10.4278974,8207m/data=!3m1!1e3>: Google maps.
- HAUAN, H. 2017. EPD. *Rørdagene*. Bamble.

- HENRIKSEN, B. 2017. Elektrisk fremtid for tunge kjøretøyer på norske veier.
- HERZ, R. Developing rehab strategies for drinking water networks. Proc., 9th International Conference on Durability of Building Materials and Components-DBMC, Dresden, Germany, 2002. 11.
- HERZ, R. K. 1998. Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 47, 275-283.
- ISTT. 2017. *Underground construction techniques* [Online]. <http://www.istt.com/guidelines>. [Accessed 30.03. 2017].
- KNUDSEN, T. 2007. Godstransport og transportmidlenes miljømessige egenskaper. *SINTEF Rapport*.
- KOLSHUS, K. 2015. Samferdsel og miljø 2015. Utvalgte indikatorer for samferdselssektoren. <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/samferdsel-og-miljo-2015?fane=om-content>: SSB.
- KROPP, I. 12. 04.17 2017. *RE: Lifetimes in Germany*.
- LINDHOLM, O. 2002. Analyse av kriterier og vektemetoder for bærekraftighet av avløpssystemer.
- MALM, A., LJUNGGREN, O., BERGSTEDT, O., PETERSSON, T. J. R. & MORRISON, G. M. 2012. Replacement predictions for drinking water networks through historical data. *Water Research*, 46, 2149-2158.
- MALM, A., SVENSSON, G., BÄCKMAN, H. & MORRISON, G. M. 2013. Prediction of water and wastewater networks rehabilitation based current age and material distribution. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13, 227-237.
- MARLOW, D., BEALE, D. & BURN, S. 2010a. Linking asset management with sustainability: views from the Australian sector. *American Water Works Association. Journal*, 102, 56.
- MARLOW, D., BEALE, D. & BURN, S. 2010b. A pathway to a more sustainable water sector: sustainability-based asset management. *Water Science and Technology*, 61, 1245-1255.
- MILJØBLAD 2006. Epoxy- og polyuretanbasert renovering av vannledninger. Nr. 68. <http://www.va-blad.no/utgitte-blader/>: VA/miljø-blad.
- MILJØBLAD 2009. Strømperenovering av avløpssystem. 91. [file:///Users/Haakon/Downloads/Blad%2091%20Nov-2009%20\(2\).pdf](file:///Users/Haakon/Downloads/Blad%2091%20Nov-2009%20(2).pdf): VA/Miljø-blad.
- MILJØBLAD 2010. Krav til PE-rør ved NoDig-utførelse. Nr. 97. <http://www.va-blad.no/utgitte-blader/>: VA/Miljø-blad.
- MILJØBLAD 2016. Grøfteutførelse fleksible rør. Nr. 5. <http://www.va-blad.no>: VA/Miljø-blad.
- MILJØBLAD 2017. Strømperenovering av avløpssystem. Nr. 91. <http://www.va-blad.no/utgitte-blader/>: VA/Miljø-blad.
- MODERNISERINGSDEPARTEMENTET, K.-O. 2017. *Ny stortingsmelding om bærekraftige byer og sterke distrikter* [Online]. <http://www.byerogdistrikter.no/>. [Accessed 22.02.17].
- NCC. 2017. *Gjølme pukkverk, Orkanger* [Online]. <https://www.ncc.no/vare-tjenester/for-privatpersoner/salg-av-pukk-og-grus/finn-ditt-narmeste-pukkverk/gjolme-pukkverk/>: NCC. [Accessed 27.04.17 2017].
- NILSSEN, O. 2016. Trondheim kommune. In: STIAN BRUASET, H. R. (ed.).
- NILSSEN, O. 05.04.17 2017. *RE: Koordinering vann og avløp*.

- NYSTOG AAS, H., KILLINGMO, E. & BUSK, V. 2016. Smart ledningsfornyelse -bruk av NoDig-metoder. Norsk Vann.
- PERICAULT, Y. 15. mars 2017 2017. *RE: Choosing results for LESAM paper*. Type to BRUASET, S.
- PERICAULT, Y., BRUASET, S., HEDSTRÖM, A., VIKLANDER, M., SAEGROV, S. & UGARELLI, R. 2017. Coordinated long term planning of sewer and water mains rehabilitation. Unpublished.
- REIKVAM, S. 2013. *Frostskader på drikkevannsledninger*. Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- RENAUD, E., BREMOND, B. & LE GAT, Y. 2014. Water pipes: why 'lifetime' is not an adequate concept on which to base pipe renewal strategies. *Water Practice and Technology*, 9, 307-315.
- RYGG, H. 2016. *Strategier for rehabilitering av vann- og avløpsnett*. NTNU.
- RØSTUM, J. 2013. *Veiledning i tilstandskartlegging og fornyelse av VA-transportssystemer*, Hamar, Norsk Vann BA.
- SAEGROV, S. 2005. *CARE-W: Computer aided rehabilitation for water networks*, IWA Publishing.
- SAEGROV, S. 2008. Testing av sementmørtel- og epoksybelegg for vannledninger. Fortrolig: SINTEF.
- SAEGROV, S. 29.03.17 2017. *RE: Rehabiliteringsmetoder*.
- SAEGROV, S., BJØRGUM, A., RODUM, E. & HAUGEN, M. 2008. Degradation of lining systems for drinking water networks. Confidential: SINTEF.
- SELSETH, I. & RØSTUM, J. 2014. Langtidsrehabiliteringsbehov for vannledninger i Trondheim kommune. SINTEF Byggforsk.
- SIMONSEN, A. B. 2015. *Levetid for renoveringsmetoder på avløpsledninger*. Master, NTNU.
- SIMONSEN, M. 2012. En analyse av drivstofforbruket i tyngre lastebiler.
- SINTEF 2017a. Levetidskurver for kohorter. In: SINTEF (ed.).
- SINTEF 2017b. Sammenstilling av alle levetidsfunksjoner avløp. In: KOMMUNER, N. (ed.).
- SKILLEBÆK, F. M. 2016. *De 50 gjerrigste bilene på markedet* [Online]. <http://www.dinside.no/motor/de-50-gjerrigste-bilene-pa-markedet/60966641>. [Accessed 02.03 2017].
- SKAAR, B. S. 2013. Fornyingsstrategi for vann-og avløpsnett og bærekraftanalyse for rehabilitering av vannledninger.
- SSB. 2016. *Befolkning og areal i tettsteder* [Online]. <https://www.ssb.no/befolkning/statistikker/befsett/aar/2016-12-06>. [Accessed 07.02.17 2017].
- SSB. 2017a. *Gjennomsnittlig energiinnhold* [Online]. <http://www.ssb.no/a/magasinet/miljo/tabell.html>: SSB. [Accessed 05.04.17 2017].
- SSB. 2017b. *Konsumprisindeksen* [Online]. <https://www.ssb.no/kpi>: Statistisk sentralbyrå. [Accessed 19.04.17 2017].
- SVENSON, K. 2014. Estimated lifetimes of road pavements in Sweden using time-to-event analysis. *Journal of Transportation Engineering*, 140, 04014056.
- SØRUMSHAGEN, H. Ø., BJERKHOLT, J. T. & LINDHOLM, O. G. 2010. Bærekraft rehabilitering av vann- og avløpsnett.
- TAB. 2017. *Tippbiler* [Online]. <http://www.tab.no/Tippbiler.9UFRnIXv.ips>: Transportsentralen i Asker og Bærum. [Accessed 02.05.17 2017].

- THUNE-LARSEN, H., MADSLIEN, A. & LINDJORD, J. E. 1997. Energieffektivitet og utslipp I transport. *Transportøkonomisk institutt*.
- THUNE-LARSEN, H., VEISTEN, K., RØDSETH, K. L. & KLÆBOE, R. 2014. *Marginale eksterne kostnader ved vegtrafikk*, TØI Report.
- TRUST. 2012. *Transition to the urban water services of tomorrow* [Online]. <http://www.trust-i.net/downloads/index.php?idesc=32>. [Accessed 08.12 2016].
- VA-NORM. 2016. *Bærekraftige VA-anlegg* [Online]. <http://va-norm.no/dokument/2-funksjonskrav/2-0-baerekraftige-va-anlegg/?source=&override=0>. [Accessed 2017].
- VEIDEKKE. 2017. *Lokale kontorer og anlegg* [Online]. <http://veidekke.no/kontakt/midt-norge/article55680.ece>: Veidekke. [Accessed 27.04.17 2017].
- ØDEGAARD, H. 2012. *Vann-og avløpsteknikk*, Norsk Vann.