

Modellering av langtidsbehov for fornyelse av drikkevannsledninger

Martin Okstad

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Sveinung Sæggrov, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Oppgavetekst

Bakgrunn

Gjennom internasjonalt forskningssamarbeid er det etablert metoder for systematisk planlegging av vedlikehold og fornyelse av vann- og avløpsledninger. Bærekraftig forvaltning av vann- og avløpsnett innebærer at de har god funksjonalitet, der risiko knyttet til skader og bortfall av vannforsyning eller avløpskapasitet er lav og kostnadene lavest mulig. Til dette har vi tekniske løsninger, informasjonssystemer, organisatoriske og medarbeideres kvalifikasjoner. Forvaltningen av vann- og avløpssystemene ivaretas på tre nivåer;

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

Modeller for langtidsplanlegging (LTP) som anvendes i det strategiske nivået kan gi informasjon om omfang og i noen grad også kriterier for ledninger med kort restlevetid. Dette er en meget viktig informasjon når lokale modeller for transportkapasitet og sårbarhet anvendes i det taktiske nivået. Metoder for kalibreringsprosesser har nylig blitt foreslått både ved NTNU og i andre internasjonale publikasjoner. Hensikten er å velge kriterier for ledninger som forventes å ha begrenset levetid. Denne oppgaven ser nærmere på slike metoder.

Spesifisert oppgave:

1. Utfør en data-analyse som viser aldersfordelingen av nedlagte og renoverte vannledninger i to norske byer og sammenlign med resultatene fra prosjektoppgaven. Studiet skal underbygge en påstand om at norske byer har noenlunde lik eller ulik praksis for utvelgelse av rehabiliteringsprosjekter.
2. Konstruer en metode for automatisk utvelgelse av kandidater for fornyelse, basert på anbefalt metode for utvelgelse i prosjektoppgave.
3. Utfør en LTP-analyse for en norsk by hvor levetidskurver kalibreres etter anbefalt metode, og sammenlign resultatene med LTP-prosjekt utført i kommunen uten kalibrering.

Sammendrag

Service-nivå er en faktor som utelates fra mange av de eksisterende metodene for langtidsplanlegging av ledningsfornyelse. Og når levetidskurver anvendes, er de som regel basert på antagelser og erfaringer. En ny metode utviklet ved NTNU kalibrerer derimot levetidskurver med historiske data fra allerede rehabiliterte ledninger som grunnlag. En antatt fremtidig rehabiliteringsrate benyttes i kalibreringsprosessen, og tidligere rehabiliteringsraters evne til å opprettholde et tilfredsstillende service-nivå skal avgjøre hvilken rehabiliteringsrate som velges.

Kalibreringen innebærer å estimere årlig fremtidig nedleggelse av operative ledninger, helt til alle ledningene i en gruppe er nedlagt, som så overføres til en kalibreringskurve. Dette er en tidkrevende prosess, og målet med denne masteroppgaven har vært å utvikle en *automatisert* kalibreringsfunksjon. I den forbindelse er det blitt utført en analyse av aldersfordelingen til nedlagte og renoverte drikkevannsledninger i tre norske byer, da alderen på ledningene som velges ut vil være avgjørende for kalibreringskurvens forløp.

Resultatene fra de tre byene er for ulike til at en landsdekkende praksis kan fastslås, og derfor bør en tilsvarende analyse ideelt sett gjennomføres av alle vannverk som ønsker å benytte kalibreringsfunksjonen. Én trend er imidlertid at alderen til de nedlagte og renoverte ledningene ofte fordeler seg likt i forhold til alderen til de *operative* ledningene, og dette har dannet grunnlaget for programmeringen av en normalfordelt utvelgelse av ledninger i funksjonen.

Trondheim Kommune har tidligere utarbeidet en rapport om det langsiktige behovet for rehabilitering av vannledninger ved hjelp av programvaren CARE-W LTP og den konvensjonelle metoden for å velge levetidskurver. I et case-studie er sammenlignbare resultater blitt produsert med levetidskurver fra kalibreringsfunksjonen. De kalibrerte levetidskurvene er basert på forutsetninger som er noe ulike kommunens, og resulterer i et fremtidig rehabiliteringsbehov som nesten er det dobbelte av hva kommunens rapport slår fast. En estimert fremtidig feilrate illustrerer at med rehabiliteringsraten fra de kalibrerte levetidskurvene, vil drikkevannsnettets potensielt kunne oppnå et godt service-nivå i løpet av en tiårsperiode. Innsatsen må da legges ned i enkelte ledningsgrupper med særlig behov for rehabilitering.

Abstract

Service level is a factor excluded from many of the existing methods for long-term planning of pipe renewal. And when survival curves are used, they are usually based on assumptions and experiences. A new method developed at NTNU, however, calibrates survival curves with historical data from already rehabilitated pipelines. An assumed future rehabilitation rate is used in the calibration process, and the ability of historical rehabilitation rates to maintain a satisfying service-level will determine which rehabilitation rate is chosen.

The calibration involves estimating annual future decommissioning of pipelines in operation, until all the pipelines in a group are decommissioned, which are then transferred to a calibration curve. This is a time-consuming process, and the intention of this master's thesis is to develop an *automated* calibration function. In that regard, an analysis of the age distribution of decommissioned and renovated drinking water pipelines in three Norwegian cities has been conducted, as the age of the pipelines selected will determine the extension of the calibration curve.

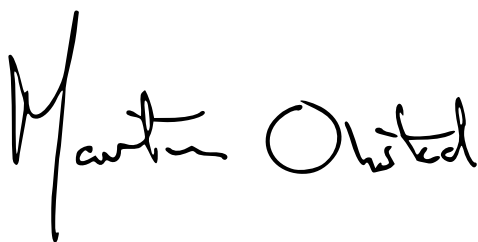
The results of the three cities are too different for a nationwide practice to be determined, and thus, a similar analysis should ideally be conducted by all water utilities wanting to use the calibration function. One trend, however, is that the age of the decommissioned and renewed pipelines often distributes in relation to the age of the *pipes in operation*, and this has formed the foundation of programming a normally distributed selection of pipelines in the function.

Trondheim municipality has previously developed a report on the long-term need for rehabilitation of water pipelines using the software CARE-W LTP and the conventional method for choosing survival curves. In a case study, comparable results have been produced with survival curves from the calibration function. The calibrated survival curves are based on assumptions that differ somewhat from those used in the municipality, resulting in a future rehabilitation need that is almost twice what the municipality's report states. An estimated future failure rate illustrates that with the rehabilitation rate from the calibrated survival curves, the drinking water network will potentially obtain a good service level during the next decade. The effort must then be put in some pipeline groups with special needs for rehabilitation.

Forord

Dette er en masteroppgave levert til Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet NTNU. Den er skrevet av forfatteren under veiledelse av doktorgradsstipendiat Stian Bruaset og professor Sveinung Sægrov våren 2017. Masteroppgaven er en del av masterstudiet Bygg- og miljøteknikk på NTNU med spesialisering innen vann- og avløpsteknikk. Oppgaven utgjør innleveringen i faget TVM4905 VA-Teknikk, som tilsvarer 30 studiepoeng.

Jeg ønsker å rette en stor takk til min veileder Stian Bruaset for grundig oppfølging og smittsomt engasjement for temaet gjennom hele perioden. Jeg vil også takke Trondheim Kommune, Bergen Kommune og Stavanger Kommune for å ha stilt betydelige mengder data til disposisjon.

A handwritten signature in black ink that reads "Martin Okstad". The signature is written in a cursive style with a large initial 'M'.

Martin Okstad

9. juni 2017

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	iii
Abstract	iv
Forord	v
Figurer	viii
Tabeller	x
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problembeskrivelse	2
1.3 Mål med oppgaven.....	2
1.4 Disposisjon	3
2 Analyse av nedlagte og renoverte drikkevannsledninger	4
2.1 Metode	4
2.2 Resultater	6
2.2.1 Trondheim	6
2.2.2 Bergen.....	13
2.2.3 Stavanger.....	19
2.3 Drøfting av analyseresultater	25
3 Automatisert kalibrering.....	27
3.1 Kalibreringsmetoden.....	28
3.2 Excel-funksjon.....	29
3.2.1 Utarbeidelse	29
3.2.2 Beskrivelse av funksjonen.....	33
3.3 Drøfting av kalibreringsfunksjonen	38
4 CASE: LTP-analyse, Trondheim Kommune	40
4.1 Metode	40
4.1.1 Kohort-inndeling.....	40
4.1.2 Service-nivå	41
4.1.3 Valg av rehabiliteringsrater.....	44
4.1.4 Kalibrering av levetidskurver og input i CARE-W LTP.....	47
4.2 Resultater og sammenligning med LTP-rapport uten kalibrering	49
5 Diskusjon.....	56
6 Konklusjon.....	59
7 Referanser	61
Vedlegg A:	64
Fullstendig kode til kalibreringsfunksjonen	64
Vedlegg B:	70
Figurer fra kalibreringsfunksjonen.....	70

Figurer

Figur 1 Nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune	6
Figur 2 Eksempel på ledningskurve fra analysen av Trondheim Kommune.....	7
Figur 3 Årlig gjennomsnittsalder til nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune fra 2001 til 2015 plottet mot en fiktiv ledningskurve	9
Figur 4 Gjennomsnittlig alder med standardavvik for nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune	10
Figur 5 Korresponderende prosentverdier til nedlagte og renoverte vannledningers gjennomsnittlige alder og standardavvik i Trondheim Kommune.....	10
Figur 6 Aldersfordeling på nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune.....	11
Figur 7 Aldersfordeling og normalfordelingskurve, Trondheim Kommune	12
Figur 8 Nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune.....	13
Figur 9 Eksempel på ledningskurve fra analysen av Bergen Kommune	14
Figur 10 Årlig gjennomsnittsalder til nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune fra 2000 til 2015 plottet mot en fiktiv ledningskurve	16
Figur 11 Gjennomsnittlig alder med standardavvik for nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune.....	17
Figur 12 Korresponderende prosentverdier til nedlagte og renoverte vannledningers gjennomsnittlige alder og standardavvik i Bergen Kommune	17
Figur 13 Aldersfordeling på nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune	18
Figur 14 Aldersfordeling og normalfordelingskurve, Bergen Kommune	18
Figur 15 Nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune.....	19
Figur 16 Eksempel på ledningskurve fra analysen av Stavanger Kommune	20
Figur 17 Årlig gjennomsnittsalder til nedlagte og renoverte vannledninger i Stavanger Kommune fra 1994 til 2014 plottet mot en fiktiv ledningskurve	22
Figur 18 Gjennomsnittlig alder med standardavvik for nedlagte og renoverte vannledninger i Stavanger Kommune.....	23
Figur 19 Korresponderende prosentverdier til nedlagte og renoverte vannledningers gjennomsnittlige alder og standardavvik i Stavanger Kommune	23

Figur 20 Aldersfordeling på nedlagte og renoverte vannledninger i Stavanger	
Kommune.....	24
Figur 21 Aldersfordeling og normalfordelingskurve, Stavanger Kommune	24
Figur 22 Standardavvik representert som prosent.....	30
Figur 23 Sannsynlighet fordelt som bokser	31
Figur 24 Skjerm bilde av startsidens til kalibreringsfunksjonen	34
Figur 25 Skjerm bilde av resultatsiden til kalibreringsfunksjonen	36
Figur 26 Skjerm bilde av siden for tilpassing av Herz-funksjonen	37
Figur 27 Feilrate for kohortene beregnet som gjennomsnitt av de siste tre årene.....	44
Figur 28 Rehabiliteringsrate for kohortene beregnet som gjennomsnitt av de siste tre	
årene	45
Figur 29 Utvikling av feilraten til de tre mest kritiske ledningsgruppene	45
Figur 30 Kalibrerte levetidskurver fra CARE-W LTP.....	50
Figur 31 Levetidskurver fra rapporten til kommunen (Selseth og Røstum, 2014).....	50
Figur 32 Fremtidig rehabiliteringsbehov basert på de kalibrerte levetidskurvene	51
Figur 33 Fremtidig rehabiliteringsbehov fra rapporten til kommunen (Selseth og	
Røstum, 2014)	51
Figur 34 Fremtidige rehabiliteringsrater basert på de kalibrerte levetidskurvene	52
Figur 35 Fremtidige rehabiliteringsrater fra rapporten til kommunen (Selseth og	
Røstum, 2014)	52
Figur 36 Rehabiliteringsrate for hele nettet basert på de kalibrerte levetidskurvene...54	
Figur 37 Rehabiliteringsrate fra rapporten til kommunen (Selseth og Røstum, 2014) .54	
Figur 38 Fremtidig feilrate basert på de kalibrerte levetidskurvene, dagens feilrater og	
deres forventede økning	55

Tabeller

Tabell 1 Samletabell for nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune 2001-2015	8
Tabell 2 Samletabell for nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune 2000-2015	15
Tabell 3 Samletabell for nedlagte og renoverte vannledninger i Stavanger Kommune 1994-2014	21
Tabell 4 Inndeling av duktile støpejernsledninger (SJK)	40
Tabell 5 Kohortinndeling etter ledningsmateriale	41
Tabell 6 Anbefalte rehabiliteringsrater	47
Tabell 7 Verdier fra de kalibrerte levetidskurvene	48

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

På det strategiske nivået i forvaltning av vann- og avløpssystemer er modeller for langtidsplanlegging et viktig verktøy. Mange av metodene som i dag benyttes til langtidsplanlegging av ledningsfornyelse baserer seg på erfaringsbaserte ekspertråd om levetiden til ulike ledningstyper og antagelser om at ledninger bør byttes ut idet de når en gjennomsnittlig levetid (Renaud *et al.*, 2014). Et alternativ som trolig representerer virkeligheten bedre er den såkalte kohort-overlevelsmodellen. Modellen er mye brukt i demografi for å forutse endringer i populasjon, men i ledningssammenheng er statistiske døds- og fødselstall erstattet med gamle og nye ledninger som henholdsvis tas ut av og settes i drift. Ledningene grupperes i kohorter, der hver kohort består av en bestemt type ledninger som er installert eller rehabilitert i samme periode. En sannsynlighetsbetinget aldersfordeling i form av en levetidskurve (Renaud *et al.*, 2014) antyder hvor store andeler av en opprinnelig kohort som passerer ulike aldre før de tas ut av service. CARE-W LTP og KANEW (Herz, 2003) er blant programmene som benytter kohortmodellen, men svakheten er at også kohortenes levetidskurver som regel er basert på eksperters erfaringer, og sjelden har observasjon og empiriske data som et systematisk grunnlag. Det kan dermed diskuteres hvor godt de konstruerte levetidskurvene stemmer overens med tidligere rehabiliteringspraksis. I tillegg er det lite fokus på hvorvidt disse levetidskurvene, og dermed det beregnede fremtidige rehabiliteringsbehovet, greier å opprettholde et akseptabelt service-nivå på ledningsnettet.

1.2 Problembeskrivelse

En ny metode er blitt utviklet ved NTNU av Bruaset *et al.* (2017) for å kalibrere kohortenes levetidskurver. Denne ble grundig gjennomgått og sammenlignet med en lignende metode (Large *et al.*, 2015) som en del av et litteraturstudie i en forutgående prosjektoppgave (Okstad, 2016). Masteroppgaven bygger nå videre på prosjektoppgaven, og de to bør derfor sees i sammenheng for full forståelse. Kort fortalt baserer metoden seg på historiske rehabiliteringsdata, og et viktig element er å år for år velge ut en andel operative ledninger som skal overføres til en estimert kalibreringskurve. Det er da vesentlig at den årlige ledningslengden som velges ut tilsvarer en rehabiliteringsrate som opprettholder et tilfredsstillende service-nivå, noe som forklares nærmere i kapittel 3.1. Den årlige utvelgelsen av ledninger er hittil blitt gjort manuelt, noe som er svært tidkrevende.

1.3 Mål med oppgaven

Målet med denne oppgaven er derfor å konstruere en funksjon som automatisk utfører en slik utvelgelse av ledninger til rehabilitering.

Ettersom kalibreringsfunksjonen forutsetter et utvelgingsmønster som er slik at aldersfordelingen til de ledningene som velges ut faktisk er representativ for de ledningene som rehabiliteres i virkeligheten, ble en dataanalyse av aldersfordelingen til nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune gjennomført i nevnte prosjektoppgave. Den samme analysen skal i masteroppgaven gjennomføres for Bergen og Stavanger slik at resultatene kan sammenlignes med resultatene fra prosjektoppgaven. Analysen skal, i tillegg til å danne grunnlag for utvelgingsmønsteret i kalibreringsfunksjonen, underbygge en påstand om at norske byer har noenlunde lik eller ulik praksis for utvelgelse av rehabiliteringsprosjekter.

Kalibreringsfunksjonen skal testes ved å utføre en LTP-analyse for en norsk by, hvor levetidskurver kalibreres etter anbefalt metode. Resultatene sammenlignes med et LTP-prosjekt utført i Trondheim Kommune uten kalibrering.

1.4 Disposisjon

Rapporten er inndelt i tre hoveddeler. Den første delen omfatter analysen av nedlagte og renoverte vannledninger. Metoden for analysen beskrives, før resultatene systematisk presenteres by for by. Delen avsluttes med drøfting og sammenligning av resultatene.

Andre del dreier seg om kalibreringsfunksjonen for automatisk utvelgelse av ledninger. En kort beskrivelse av kalibreringsmetoden etterfølges av et avsnitt om utarbeidelsen av utvelgingsprinsippet som benyttes i den konstruerte kalibreringsfunksjonen. Den ferdige kalibreringsfunksjonen blir så beskrevet og drøftet.

Siste del er case-studiet hvor den konstruerte kalibreringsfunksjonen testes ut. Fremtidige rehabiliteringsrater bestemmes først ved å analysere historiske rehabiliteringsrater og feilrater, og benyttes deretter til å kalibrere levetidskurver med kalibreringsfunksjonen. Resultater fra programvaren CARE-W LTP med kalibrerte og antatte levetidskurver presenteres og sammenlignes. Til slutt følger diskusjon og konklusjon.

Hele koden til kalibreringsfunksjonen og de kalibrerte levetidskurvene fra case-studiet finnes i henholdsvis vedlegg A og B. Excel-filen med kalibreringsfunksjonen er også tilgjengelig elektronisk.

2 Analyse av nedlagte og renoverte drikkevannsledninger

God kunnskap om fortiden er viktig, og ofte avgjørende, for å kunne si noe om fremtiden. Selv om teknologien er i konstant utvikling, bruker vi mennesker tid på å omstille oss og endre rutinene våre. Metoder og prosedyrer som er gjeldende i dag, kan dermed antas å gjelde også i lang tid fremover. Dette omfatter blant annet hvordan vannledninger velges ut for renovering og utskifting. En rekke ulike årsaker, alt fra bruddproblematikk til kapasitetsmangel, kan ligge til grunn for at det besluttes å fornye en ledning. På denne måten blir ledningenes aldersfordeling et resultat av en mer eller mindre ubevisst praksis. Det er dermed ikke mulig å forutsi nøyaktig hvilke ledninger som vil bli rehabilitert de kommende tiårene, men i historiske data kan man finne mønster og trender som trolig vil være representative også for fremtiden.

Aldersfordelingen til allerede rehabiliterte drikkevannsledninger i tre norske byer (Trondheim, Bergen og Stavanger) er i dette kapitlet blitt analysert. Som rehabiliterte ledninger inkluderes og likestilles både nedlagte og renoverte ledninger, da rehabiliteringsmetoden i denne sammenhengen anses som likegyldig for levetiden. Nedlagte ledninger omfatter for det meste ledninger som er blitt skiftet ut med nye, men også tilfeller der selve traseen er blitt nedlagt. Analysen gir grunnlag for et utvelgingsmønster som skal benyttes i funksjonen for kalibrering av levetidskurver.

2.1 Metode

Utgangspunktet for data-analysen var for hver av de tre kommunene et Excel-ark med samtlige av kommunens nåværende og tidligere drikkevannsledninger. Hver ledningsseksjon var her lagt inn med informasjon om bl.a. materiale, lengde, diameter, leggear og eventuell dato for nedleggelse. I analysen skulle rehabiliteringsprosjekter i form av nedlagte og renoverte ledninger fremstilles år for år frem til siste registrerte år. Hvilket år som ble det første i analysen, og dermed bestemte lengden på observasjonsperioden, varierte mellom byene og var avhengig av når den enkelte kommune tidligst hadde begynt å registrere et betydelig antall nedlagte ledninger. I Excel-arket var alle nedlagte ledninger merket med status *N*, *EF*, *EN* eller *F* ("Nedlagt", "Erstattet Fjernet", "Erstattet nedlagt" og "Fysisk fjernet"), mens ledninger som fortsatt var i drift hadde status *D*. Renoverte ledninger kunne gjenkjennes ved at de var oppført med informasjon om blant

annet forrige materiale, dimensjon og leggeår i egne kolonner. Alderen til de renoverte ledningene var dermed differansen mellom opprinnelig og nytt leggeår.

Det første som ble gjort var å fjerne kolonner som ikke var relevante for analysen. Videre ble alle private ledninger fjernet, da det kun var de kommunale ledningene som skulle analyseres. Det ble gjort en vurdering av hvor korte ledninger som skulle inkluderes i analysen, og 1 meter ble funnet å være en fornuftig grense. Alle ledninger registrert som kortere enn 1 meter ble derfor filtrert vekk. I tilfeller der ledninger sto oppført med manglende viktig informasjon, som for eksempel leggeår, eller at den registrerte informasjonen virket ulogisk, ble også disse ledningene utelatt fra analysen. Alle nedlagte ledninger ble kopiert over i et eget ark, hvor en kolonne for alder ved nedleggelse ble opprettet. Tilsvarende ble gjort for renoverte ledninger.

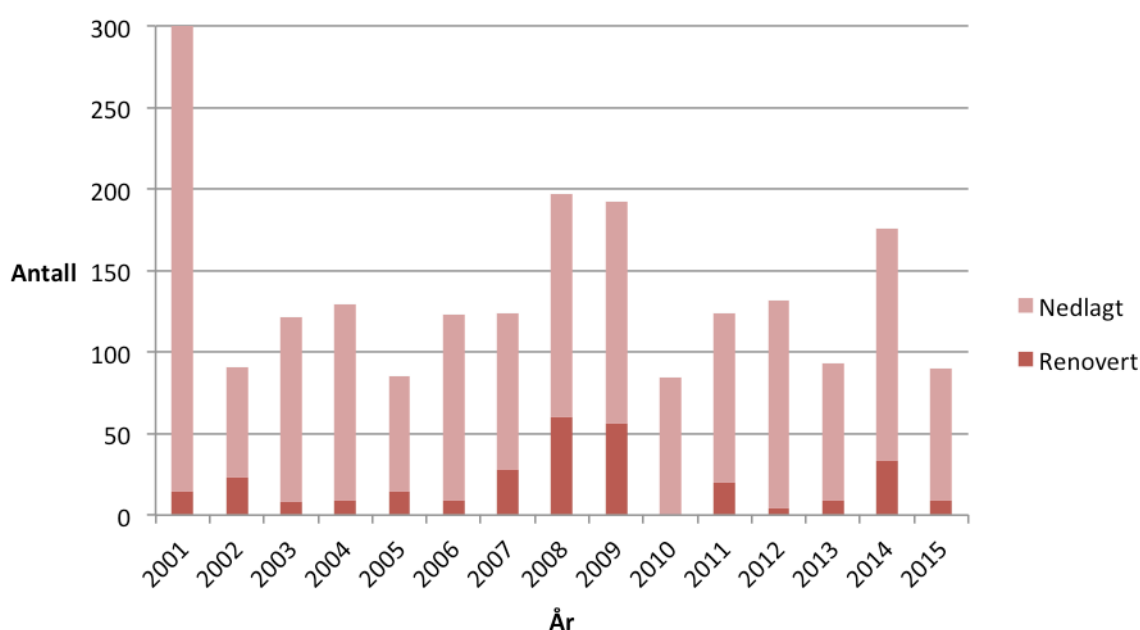
Et nytt Excel-dokument ble opprettet for hver kommune, hvor alle operative ledninger ved inngangen av første analyseår og deres tilhørende alder først ble lagt i et eget ark. De ble sortert etter alder og tildelt prosentverdier fra 0 til 100 % etter hvor stor andel av det totale ledningsantallet som var eldre enn den enkelte ledning (100 % er eldre enn den yngste ledningen og 0 % er eldre enn den eldste). Ledningsseksjonene som i løpet av første analyseår var blitt registrert som nedlagt eller renovert fikk en markering som skilte dem fra de resterende, fortsatt operative, ledningene. De fortsatt operative ledningene ble deretter kopiert over til et nytt ark for påfølgende år, og alderen deres ble økt tilsvarende. Alle nye ledninger som var blitt lagt i løpet av det første analyseåret ble også lagt inn i det nye arket med alderen 1 år, og prosentfordelingen ble gjort på nytt med det nye totale ledningsantallet. Denne prosessen, med utlukning av nedlagte og renoverte ledninger og tilføring av nye, ble repetert til og med siste registrerte år, og for hvert år ble gjennomsnittsalder med standardavvik og medianalder for de nedlagte og renoverte ledningsseksjonene beregnet.

En blå ledningskurve med alle de sorterte operative ledningsseksjonene ble plottet for hvert år, med prosentverdi langs y-aksen og alder langs x-aksen, og på denne blå kurven ble alle nedlagte og renoverte ledninger markert med rødt. Gjennomsnittsalderen og standardavviket til de nedlagte og renoverte ledningene ble også lagt inn på korresponderende sted langs kurven. Gjennomsnittlige verdier og standardavvik fra hvert år ble til slutt samlet i felles tabeller og figurer for sammenligning av resultatene fra hele analyseperioden.

2.2 Resultater

2.2.1 Trondheim

Første nedlagte ledning i Trondheim Kommune ble registrert i 2001. Data på renoverte ledninger eksisterer derimot tilbake til 1970, men data fra så langt tilbake i tid vil kunne anses som mindre pålitelige og mindre representative for dagens rehabiliteringspraksis i Trondheim Kommune. For å få et felles observasjonsvindu med data på både renoverte og nedlagte ledninger, ble første analyseår dermed satt til 2001.

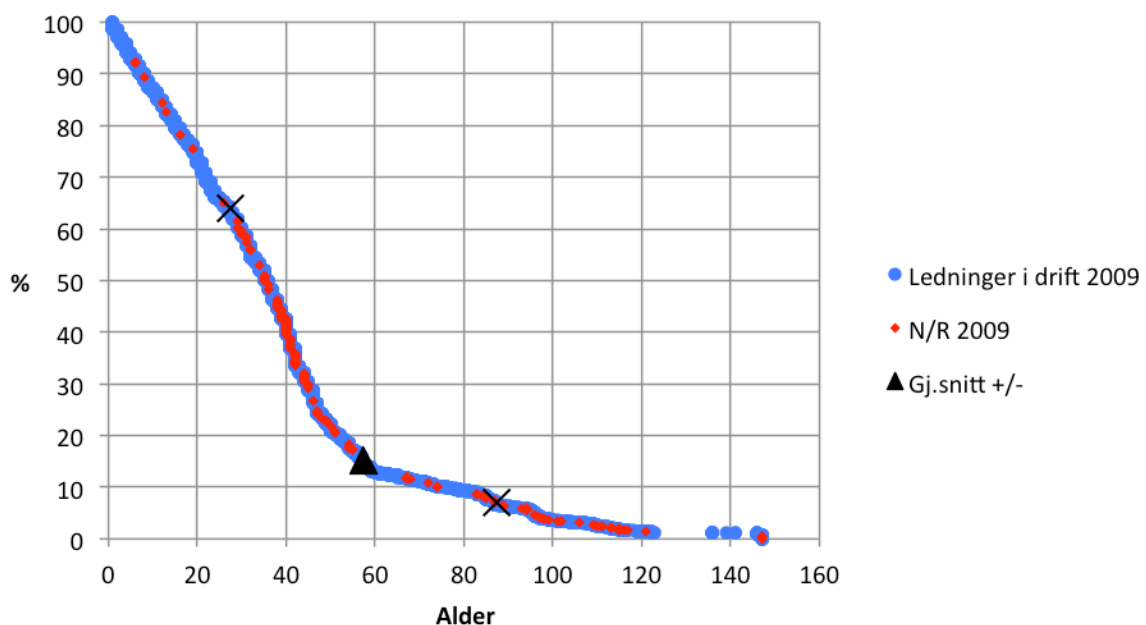


Figur 1 | Nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune

Av Figur 1 kan man se at antallet nedlagte vannledninger i 2001 er mye høyere enn i de påfølgende årene. Faktisk er tallet på nedlagte ledninger så mye som 840, men denne søylen er kuttet i figuren for å best mulig illustrere de resterende årene. Det høye antallet skyldes trolig at også mange ledninger nedlagt før 2001 først ble registrert dette året. Tallene fra 2001 er likevel tatt med i analysen da aldersfordelingen fra dette året ikke skiller seg ut blant de øvrige årene, og dermed anses som representativ. Figuren viser også at det i 2008 og 2009 ble nedlagt og renovert mange flere ledninger enn de andre årene, henholdsvis 196 og 191 ledninger totalt. Kun 2014 er i nærheten av et slikt antall, med totalt 176 ledninger. Som det fremgår av Tabell 1, har verken medianalder eller gjennomsnittsalder til ledningene i drift blitt påvirket av dette, og medianalderen

og gjennomsnittsalderen til de nedlagte og renoverte ledningene disse årene skiller seg ikke ut fra de andre årene. Standardavviket i 2008, med det største antallet nedlagte og renoverte ledninger i løpet av den observerte perioden er faktisk det tredje laveste. Dette er mye lavere enn for de fleste andre år, og det er dermed ingen grunn til å tro at aldersspredningen blant nedlagte og renoverte ledninger er større i år med et stort antall enn i år med få.

For samtlige år er gjennomsnittsalderen til de nedlagte og renoverte ledningene høyere enn medianalderen. Dette skyldes at nedleggelse av noen få særlig gamle ledninger trekker opp gjennomsnittet. At differansen mellom gjennomsnittet og medianen noen år er ganske liten, trenger ikke å bety at ingen av de eldste ledningene ble nedlagt, men derimot at også noen av de yngste ledningene ble nedlagt eller renovert. I løpet av de 15 observerte årene ble totalt tre ledninger nedlagt etter bare ett år i drift. At en ledning rehabiliteres i så ung alder kan for eksempel skyldes komplikasjoner som oppstod under legging eller koordinering med andre, uforutsette, rehabiliteringsprosjekter. Aldersspennet blant ledninger som blir nedlagt og renovert er med andre ord stort. Dette er synliggjort i Figur 2, som viser den operative ledningskurven fra et vilkårlig år midt i observasjonsperioden. De røde prikkene spredt utover hele kurven er nedlagte og renoverte ledninger dette året, med gjennomsnittlig alder på i underkant av 58 år og standardavvik på 30 år.

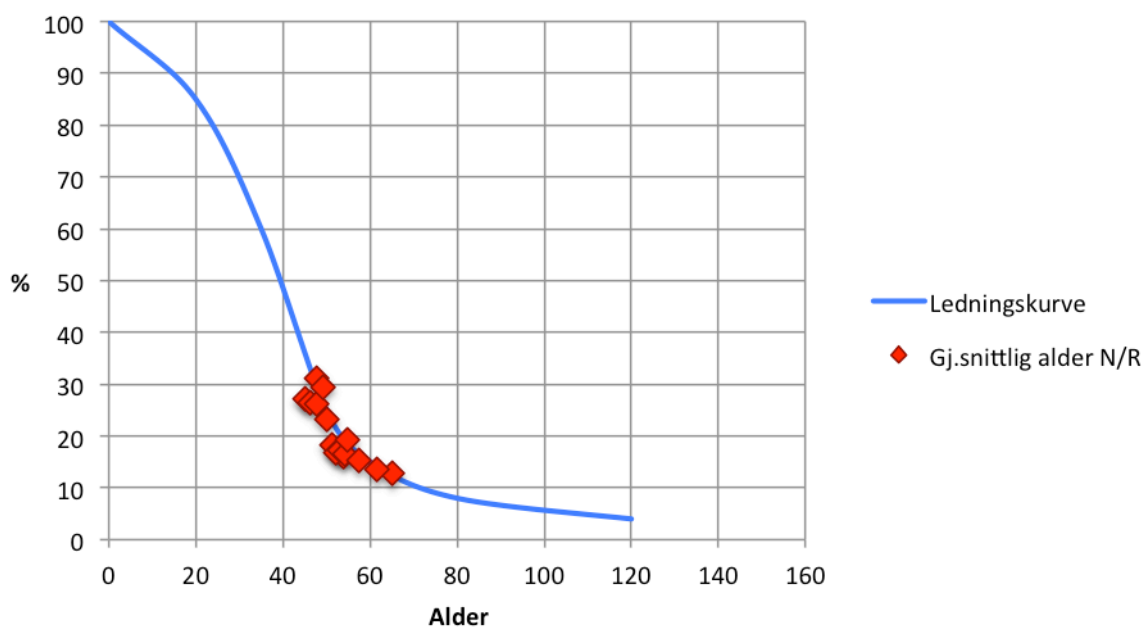


Figur 2 | Eksempel på ledningskurve fra analysen av Trondheim Kommune

Tabell 1 | Samletabell for nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune 2001-2015

År	Operative			Nedlagte og renoverte				Prosentverdi		
	Antall	Alder		Antall	Median			Gj.snitt	Std.avvik	
		Median	Gj.snitt		Alder	Gj.snitt	Std.avvik		Øvre	Nedre
2001	10160	32	37,01	854	39	51,26	29,65	18,30	54,33	9,25
2002	9435	32	36,22	91	45	53,93	29,47	16,00	50,60	8,35
2003	9490	33	36,49	121	38	52,26	32,61	16,90	56,36	9,54
2004	9489	33	36,83	129	62	65,19	33,37	12,90	41,52	8,88
2005	9484	34	36,96	85	40	53,04	30,52	17,30	52,90	9,73
2006	9565	34	37,18	123	46	54,20	30,14	16,50	51,80	8,98
2007	9560	35	37,50	124	38	45,05	19,00	27,10	38,94	14,74
2008	9585	35	37,82	196	39	46,10	20,76	26,50	40,03	14,58
2009	9517	35	38,14	191	42	57,42	29,98	15,20	48,71	8,16
2010	9446	36	38,27	84	43	47,79	22,29	26,30	38,94	15,33
2011	9461	36	38,78	124	42	50,20	28,64	23,20	49,93	13,79
2012	9444	37	39,19	132	50	54,70	29,48	19,20	47,90	10,68
2013	9455	37	39,38	92	54	61,59	35,19	13,60	51,93	8,32
2014	9484	37	39,66	176	45	47,67	21,56	31,10	35,77	20,27
2015	9384	38	40,19	90	49	49,21	20,59	29,50	33,63	18,69
Gjennomsnitt:					44,8	52,6	27,5	20,6	46,2	12,0

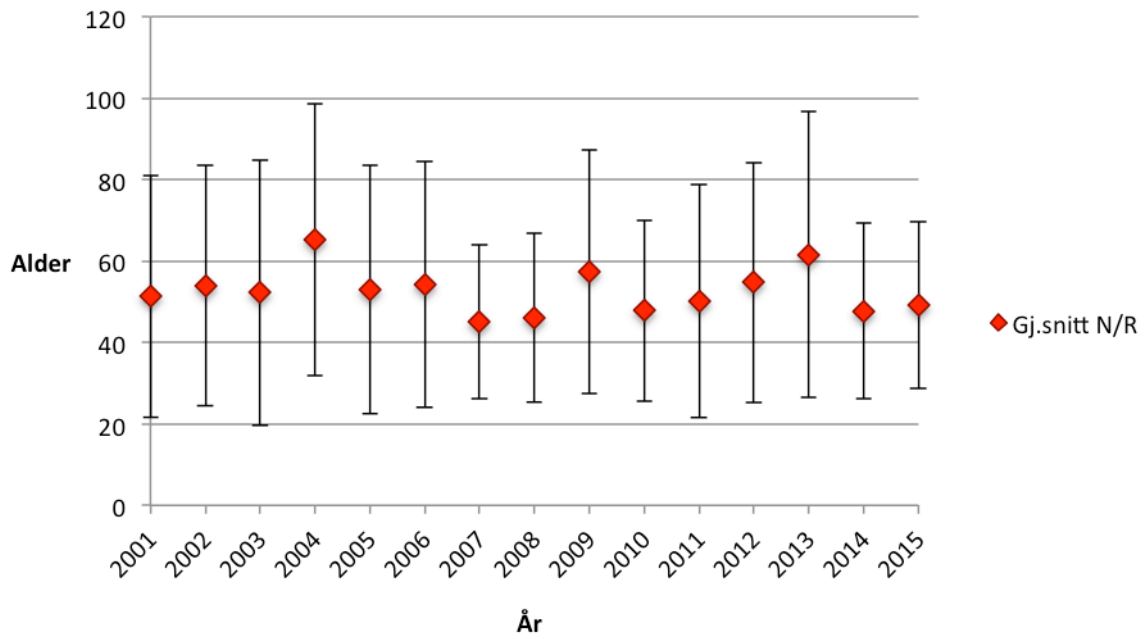
Tabell 1 inkluderer alle beregnede tallverdier fra data-analysen. Med Figur 2 som eksempel, uttrykker de tre kolonnene til høyre henholdsvis trekantens verdi på y-aksen (altså prosentverdien som gjennomsnittsalderen til de nedlagte og renoverte ledningene tilsvarer på ledningskurven); den vertikale avstanden fra trekanten til det øvre krysset; og den vertikale avstanden fra trekanten til det nedre krysset. De to kolonnene lengst til høyre representerer altså standardavviket i form av prosentpoeng, men ettersom ledningskurven ikke er lineær, vil avviket den ene retningen være ulikt avviket i den andre.



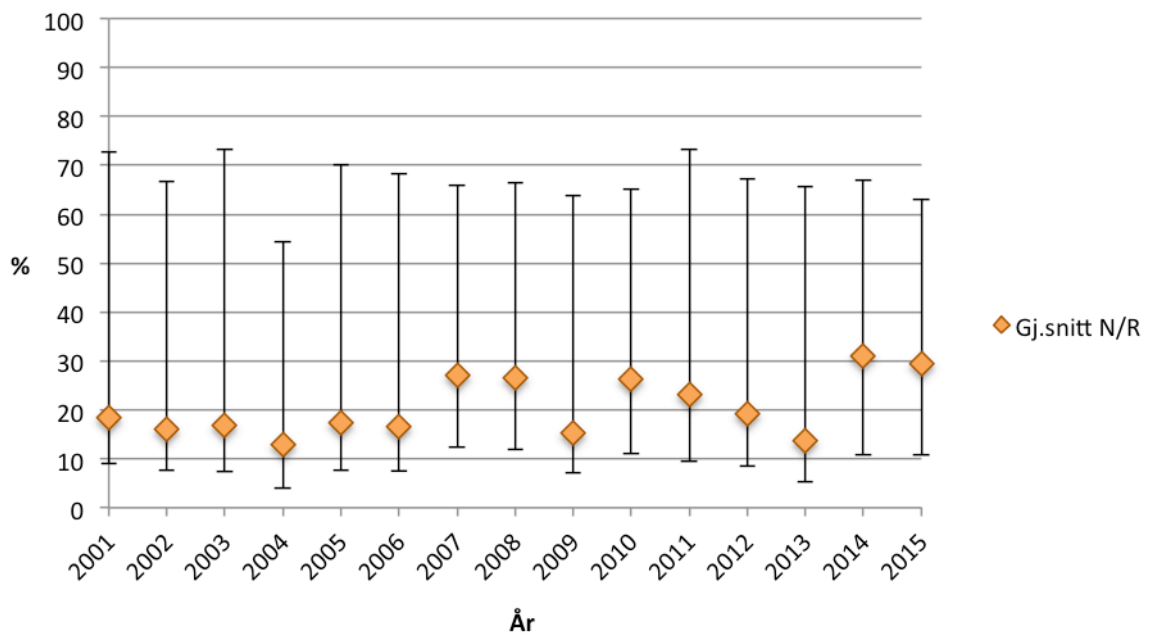
Figur 3 | Årlig gjennomsnittsalder til nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune fra 2001 til 2015 plottet mot en fiktiv ledningskurve

I Figur 3 er gjennomsnittsalderen for nedlagte og renoverte ledninger fra hvert av årene plottet mot en fiktiv ledningskurve, og man kan se at de ligger samlet innenfor de 10-30 % eldste ledningene.

Figur 4 viser gjennomsnittsalderen for nedlagte og renoverte ledninger fra hvert av årene med tilhørende standardavvik. Selv om gjennomsnittsalderen de fleste årene ligger mellom 40 og 60 år, gjør variasjonen i standardavviket at aldersfordelingen er lite entydig.

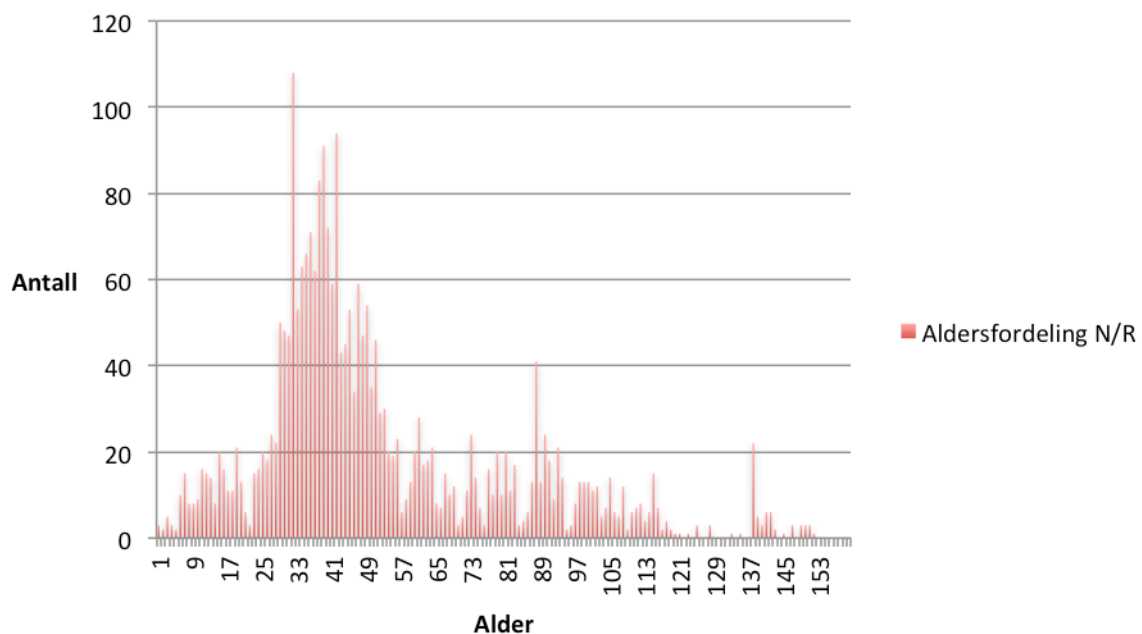


Figur 4 | Gjennomsnittlig alder med standardavvik for nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune



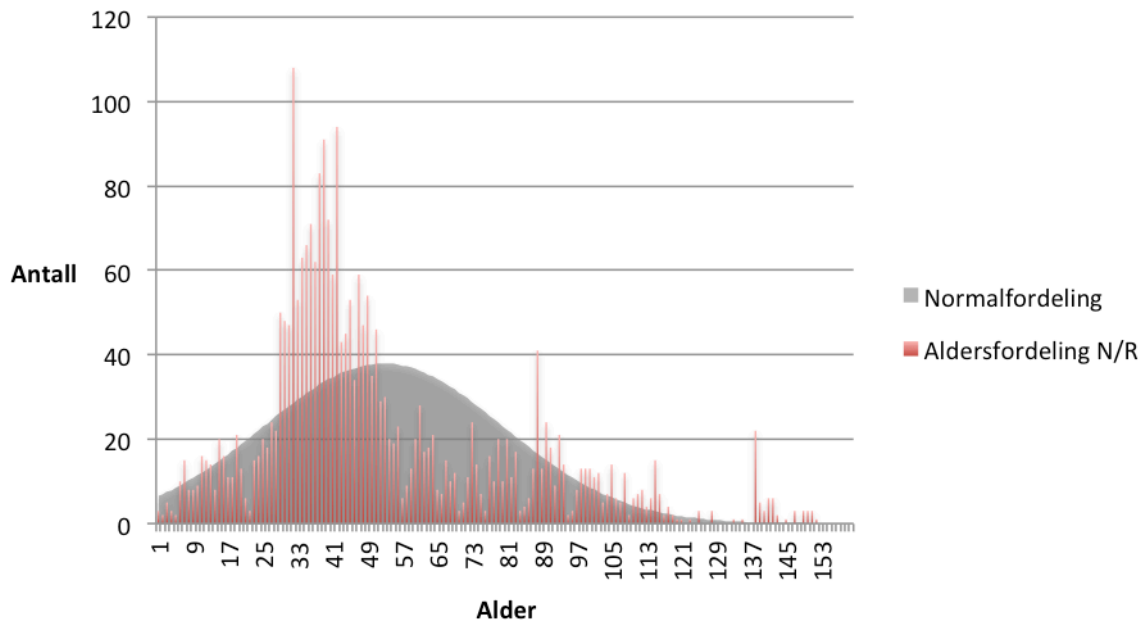
Figur 5 | Korresponderende prosentverdier til nedlagte og renoverte vannledningers gjennomsnittlige alder og standardavvik i Trondheim Kommune

De korresponderende prosentverdiene i Figur 5 gir derimot inntrykk av en mer helhetlig trend. Her er gjennomsnittsalderen til nedlagte og renoverte ledninger for hvert år knyttet opp mot den tilhørende prosentverdien på ledningskurven. Figuren illustrerer altså de tre kolonnene til høyre i Tabell 1. For eksempel tilsvarte 49,21 år i 2015 en prosentverdi på 29,5, som betyr at 29,5 % av alle operative ledninger i 2015 var eldre enn gjennomsnittsalderen til de nedlagte og renoverte ledningene. Det samme er gjort med standardavviket, men som påpekt i forbindelse med tabellen, er ikke ledningskurvene lineære, og standardavvikets tilhørende prosentverdier har dermed ikke like stor differanse til den gjennomsnittlige prosentverdien på begge sider. Basert på standardavvikenes ytterpunkter kan man se at det er relativt liten variasjon gjennom analyseperioden.



Figur 6 | Aldersfordeling på nedlagte og renoverte vannledninger i Trondheim Kommune

Figur 6 viser aldersfordelingen til alle de nedlagte og renoverte ledningene i Trondheim gjennom hele analyseperioden, og fordelingen virker i stor grad å være normalfordelt. Ved å legge inn en normalfordelt kurve med gjennomsnittsalder og standardavvik fra Tabell 1, på henholdsvis 52,6 og 27,5, blir det seende ut som i Figur 7.

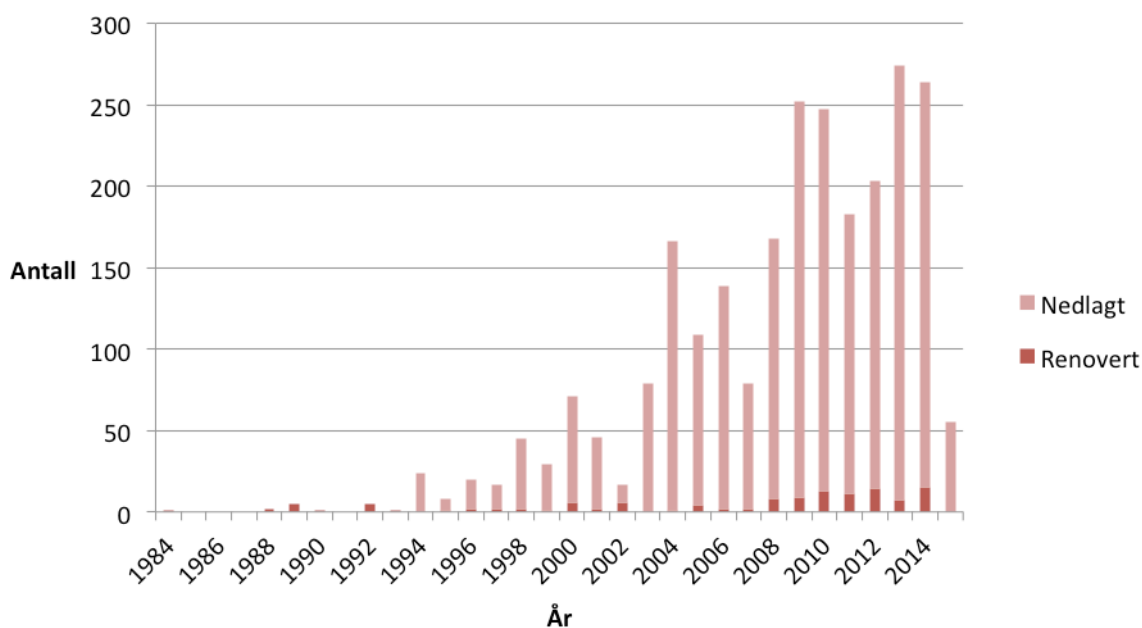


Figur 7 | Aldersfordeling og normalfordelingskurve, Trondheim Kommune

Den grå normalfordelte kurven er noe forskjøvet mot høyre i forhold til den faktiske aldersfordelingen som fremgår av de røde søylene. Dette skyldes at gjennomsnittsalderen er høyere enn hva toppen i aldersfordelingen antyder. Avstanden opp til de eldste nedlagte og renoverte ledningene i analysen er nemlig mye større enn ned til de yngste, og dette blir gjennomsnittet, i motsetning til medianen, påvirket av.

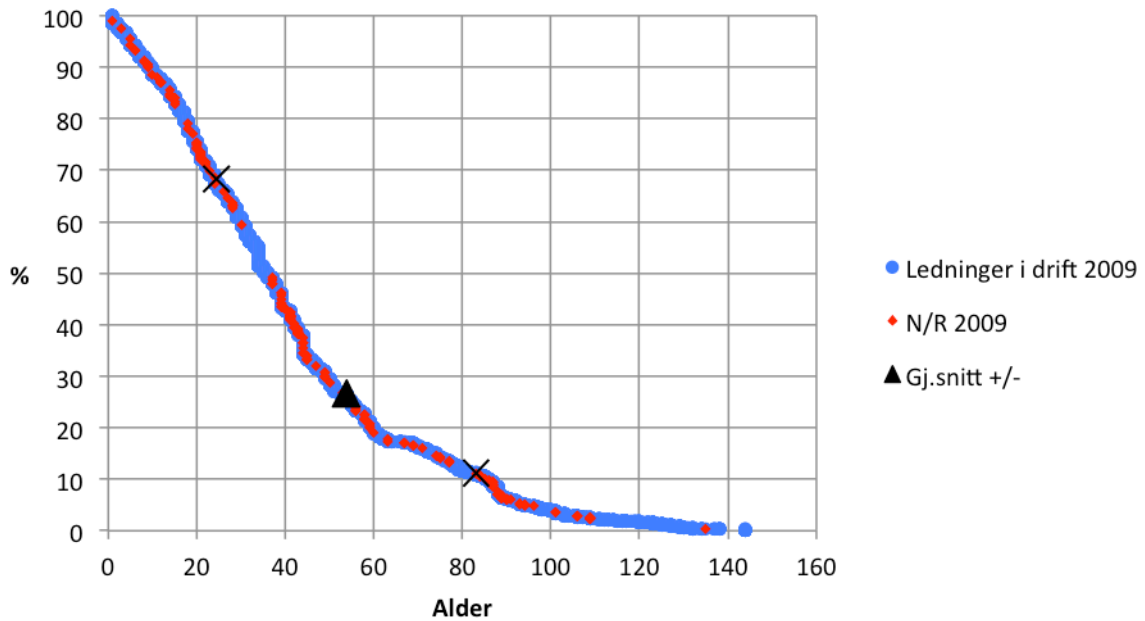
2.2.2 Bergen

Bergen Kommune er vesentlig større enn Trondheim, noe som også gjenspeiles i ledningsdataene. Mens Trondheim ligger på i underkant av 10.000 operative vannledninger, er Bergen oppe i nærmere 16.000. I årlig antall nedlagte er det derimot ingen tydelig forskjell, noe som gir et godt grunnlag for sammenligning av resultater.



Figur 8 | Nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune

Som Figur 8 viser, har det i Bergen vært en gradvis økning i antall nedlagte vannledninger. Første nedlagte ledning ble registrert i 1994, mens første renoverte ledning ble registrert ti år tidligere, i 1984. I Trondheim lå årlig antall nedlagte og renoverte på rundt 100 stk., og ikke noen av årene i analyseperioden var det færre enn femti nedlagte og renoverte ledninger. Det ble derfor besluttet å sette femti som grenseverdi for første analyseår i Bergen, for å få et best mulig sammenligningsgrunnlag. Første analyseår i Bergen Kommune ble dermed år 2000.

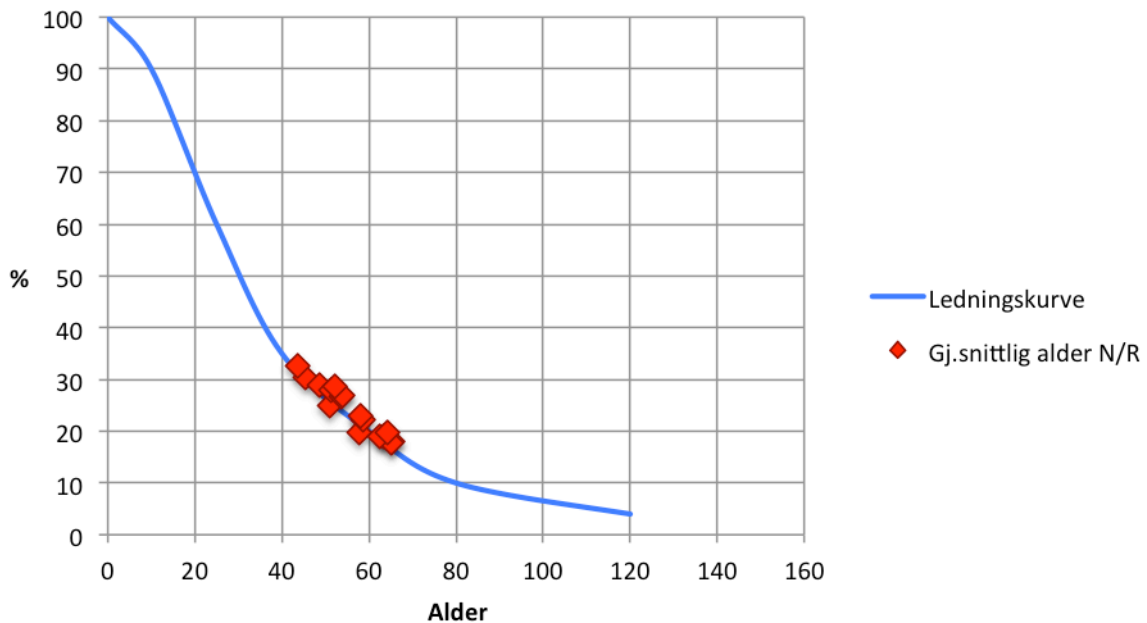


Figur 9 | Eksempel på ledningskurve fra analysen av Bergen Kommune

Figur 9 viser den operative ledningskurven fra det samme året som Figur 2 for Trondheim. 2009 ble valgt som eksempel fordi det er et år med mange nedlagte og renoverte ledninger i alle de tre byene. Ved å vise eksempler fra samme år, kan også de tre ledningskurvene sammenlignes. Denne ledningskurven er noe rettere enn ledningskurven for Trondheim. Dette stemmer godt overens med høyere gjennomsnittsalder og medianalder i kombinasjon med at eldste ledning er yngre enn i Trondheim.

Tabell 2 | Samletabell for nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune 2000-2015

År	Operative			Nedlagte og renoverte				Prosentverdi		
	Antall	Alder		Antall	Alder			Gj.snitt	Std.avvik	
		Median	Gj.snitt		Median	Gj.snitt	Std.avvik		Øvre	Nedre
2000	15307	30	36,94	71	42	45,34	24,93	30,54	39,44	16,02
2001	15397	31	37,52	46	44	50,85	31,47	25,04	47,18	17,57
2002	15528	32	38,05	17	35	43,65	18,65	32,64	31,07	13,32
2003	15697	33	38,60	79	54	57,72	27,62	19,80	35,52	12,91
2004	15799	34	39,06	166	66	63,48	28,01	18,99	28,00	13,72
2005	15851	34	39,26	109	46	48,70	21,71	28,83	33,87	12,90
2006	15924	35	39,75	139	51	51,18	19,93	27,95	28,71	12,05
2007	15924	35	40,30	79	75	65,29	30,73	18,05	33,33	13,31
2008	15988	36	40,82	168	57	65,06	36,57	17,81	45,13	14,29
2009	16061	36	40,95	252	45	53,75	29,34	26,67	41,67	15,49
2010	16070	36	41,09	247	55	58,71	29,42	22,28	39,95	13,22
2011	15966	36	41,45	183	56	58,04	29,51	22,88	40,69	13,38
2012	15970	37	41,77	203	62	62,55	30,73	19,05	40,79	13,28
2013	15965	38	41,99	274	49	53,85	29,65	26,98	44,02	16,24
2014	15889	39	42,26	264	42	52,07	31,53	28,69	49,17	17,63
2015	16027	39	42,90	55	63	64,09	34,36	19,74	43,87	14,81
Gjennomsnitt:					52,6	55,9	28,4	24,1	38,9	14,4

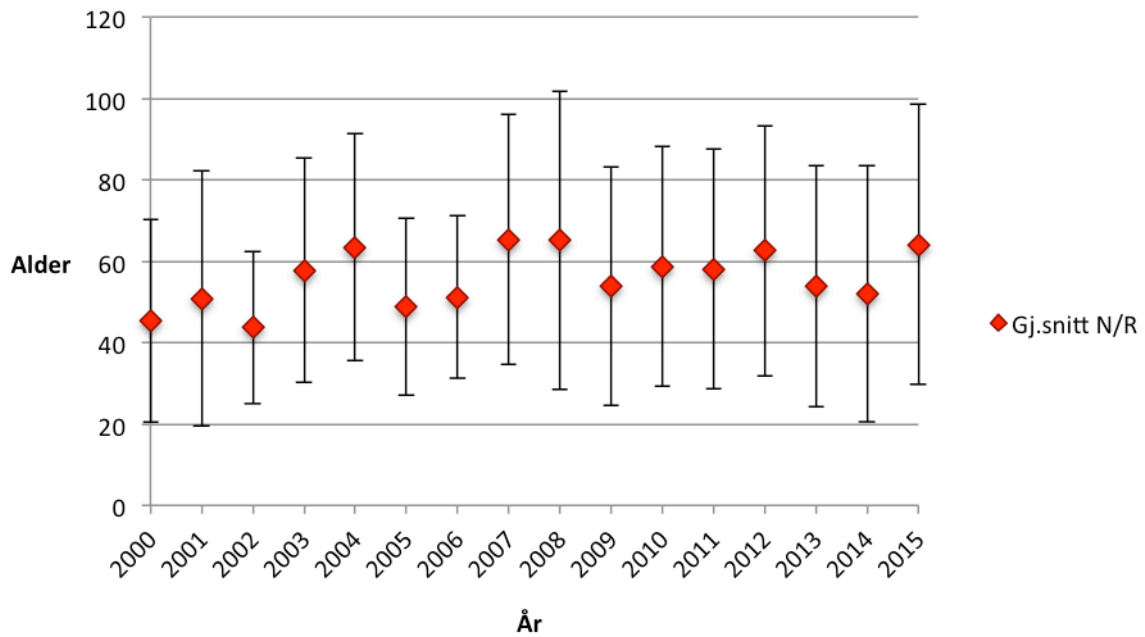


Figur 10 | Årlig gjennomsnittsalder til nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune fra 2000 til 2015 plottet mot en fiktiv ledningskurve

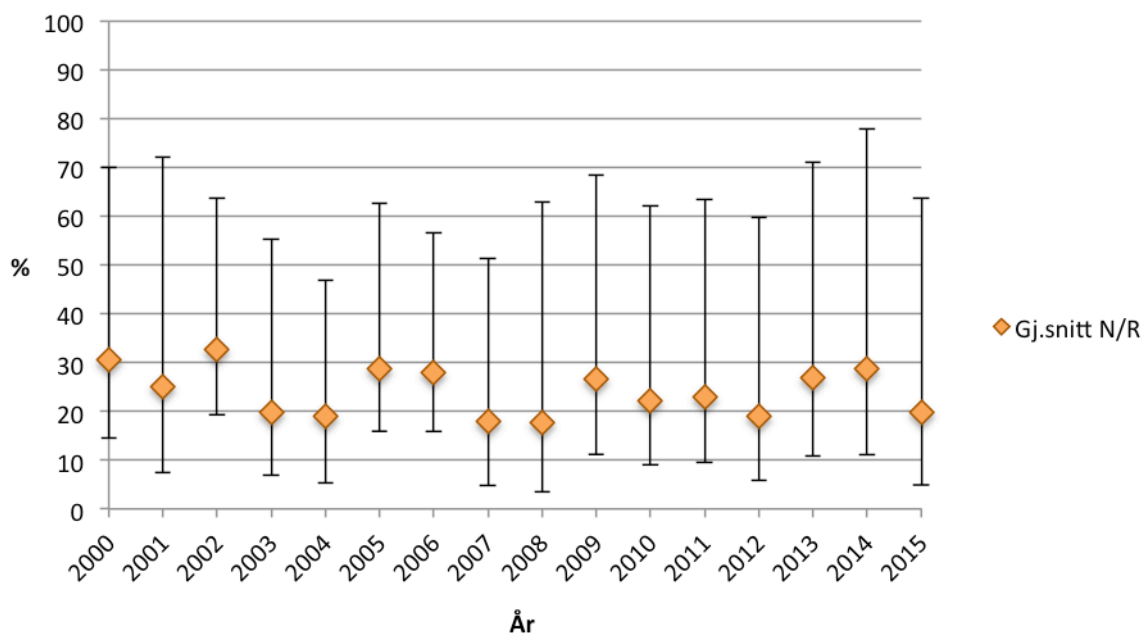
Av Figur 10 kan man se at de plottede gjennomsnittsverdiene for alderen til nedlagte og renoverte ledninger er noe mer spredt enn for Trondheim, og at de har litt høyere prosentverdier. Det siste skyldes trolig at gjennomsnittsalderen på de operative ledningene i Bergen er noe høyere enn i Trondheim.

Figur 11 viser en noe høyere gjennomsnittsalder også for de nedlagte og renoverte ledningene enn for Trondheim, men at standardavviket er temmelig likt.

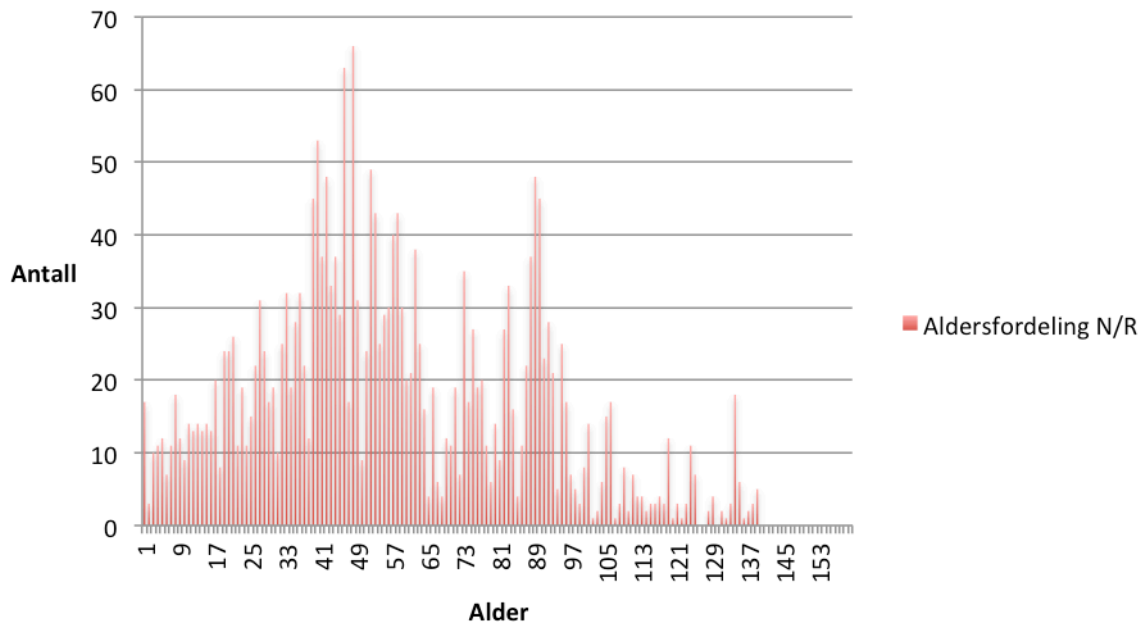
Av Tabell 2 kan man se at listen med standardavvik ikke skiller seg nevneverdig fra Trondheim, men i kombinasjon med gjennomsnittsalderen til de nedlagte og renoverte ledningene varierer prosentområdet som standardavviket dekker mer fra år til år i Bergen enn i Trondheim, slik Figur 12 illustrerer. Helhetlig kan man likevel se at området er omtrent det samme, ca. 10 – 65 %.



Figur 11 | Gjennomsnittlig alder med standardavvik for nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune

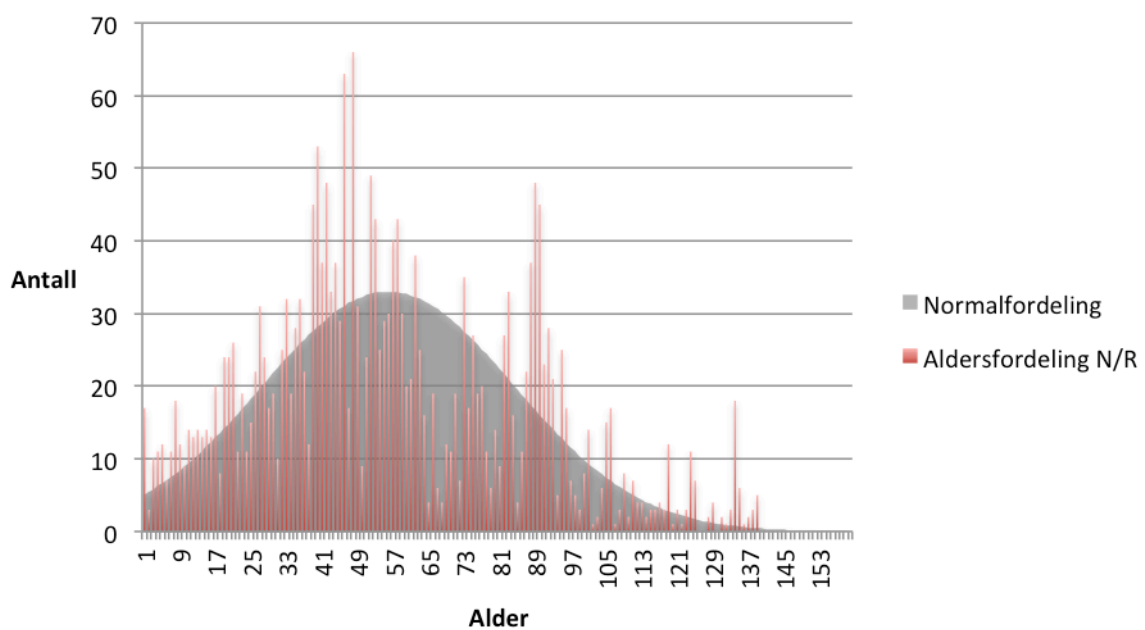


Figur 12 | Korresponderende prosentverdier til nedlagte og renoverte vannledningers gjennomsnittlige alder og standardavvik i Bergen Kommune



Figur 13 | Aldersfordeling på nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune

I enda større grad enn for Trondheim har Bergen en aldersfordeling på de nedlagte og renoverte ledningene som minner om en normalfordeling. Med gjennomsnittsalder og standardavvik fra Tabell 2, på henholdsvis 55,9 og 28,4, blir normalfordelingskurven seende ut som i Figur 14.



Figur 14 | Aldersfordeling og normalfordelingskurve, Bergen Kommune

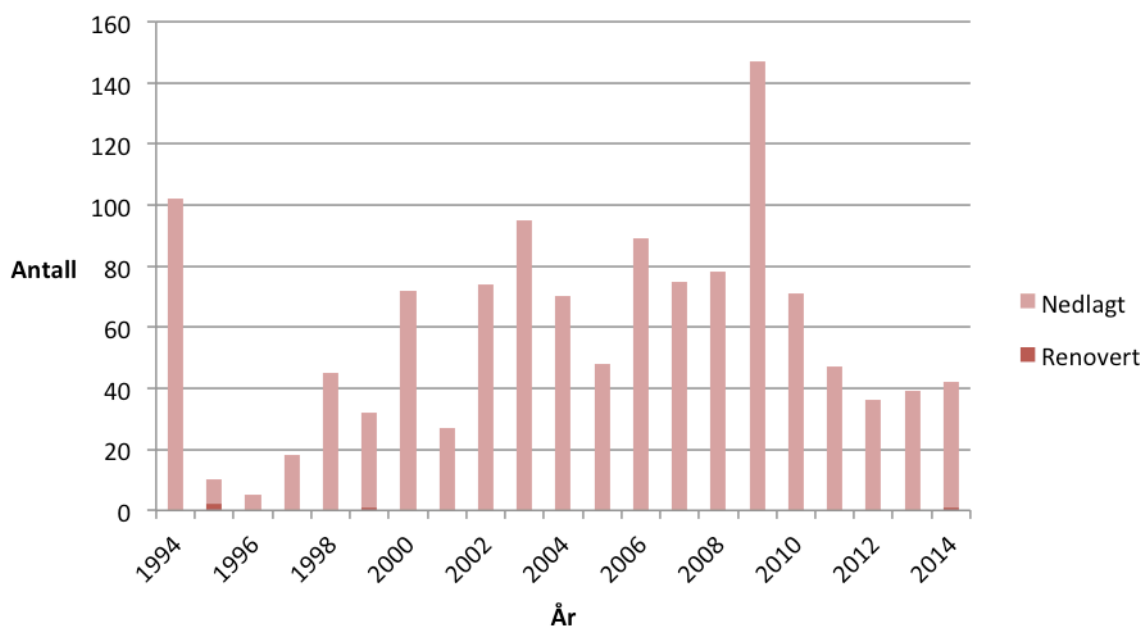
2.2.3 Stavanger

Svært mange ledninger i Stavanger-analysen måtte fjernes grunnet manglende og ulogiske data. Blant annet var ca. 1300 ledninger oppført med datoer i kolonnen for lengde. Av de kommunale vannledningene var det kun 20 ledninger som var registrert som renovert. Kun 4 av dem var blitt renovert etter 1994, som var det første året med nedlagte ledninger. Ifølge Karin Vaksdal, rådgiver Vann- og avløpsverket i Stavanger Kommune, skyldes dette trolig at bruk av no-dig, renoveringsmetoder som ikke involverer graving av grøft, av ulike årsaker er relativt nytt i Stavanger (epost-utveksling 6. mars 2017). Leder for forvaltning av Vann- og avløpsverket i Stavanger Kommune, Bjørn Zimmer Jacobsen, utdyper videre at hovedårsakene til at det historisk er brukt lite no-dig kan oppsummeres med tre stikkord: *samhandling, kompakt by og levetid*.

Samhandling innebærer at fornyelse av VA-systemet gjerne koordineres med store infrastrukturprosjekter hvor full oppgraving ofte er eneste naturlige løsning.

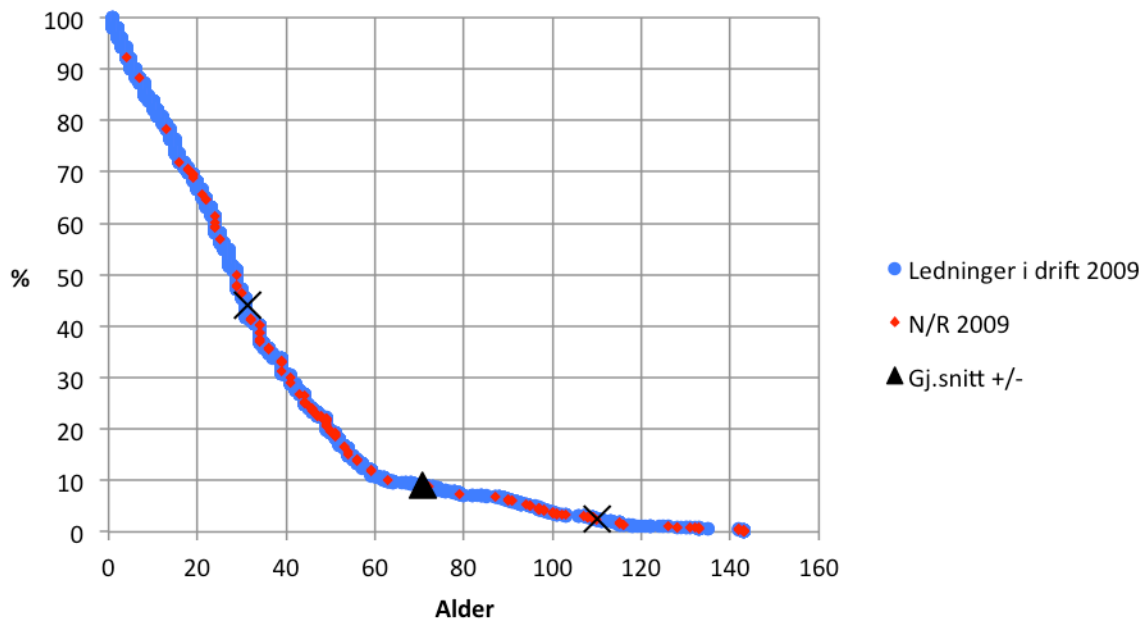
Stavanger er en kompakt by, og det er dermed svært tett mellom hver påkobling. Ettersom det har vært nødvendig å grave ned til påkoblingspunktene, har grøftefrie tiltak hatt mindre hensikt her enn mange andre steder.

Levetid har vært en styrende faktor for alle tiltak i Stavanger, og levetiden er vurdert til å være langt høyere på et nytt anlegg med nye omfyllingsmasser enn ved ulike former for grøftefrie tiltak. (epost-utveksling 7. mars 2017).



Figur 15 | Nedlagte og renoverte vannledninger i Bergen Kommune

Av Figur 15 er det mulig å se at det ble renovert to ledninger i 1995, én i 1999 og én i 2014, og at de resterende er registrert som nedlagt. Som i Trondheim er det også her registrert et relativt stort antall nedlagte ledninger det første analyseåret, og det er rimelig å tro at flere av disse ble nedlagt tidligere, men registrert først i 1994.

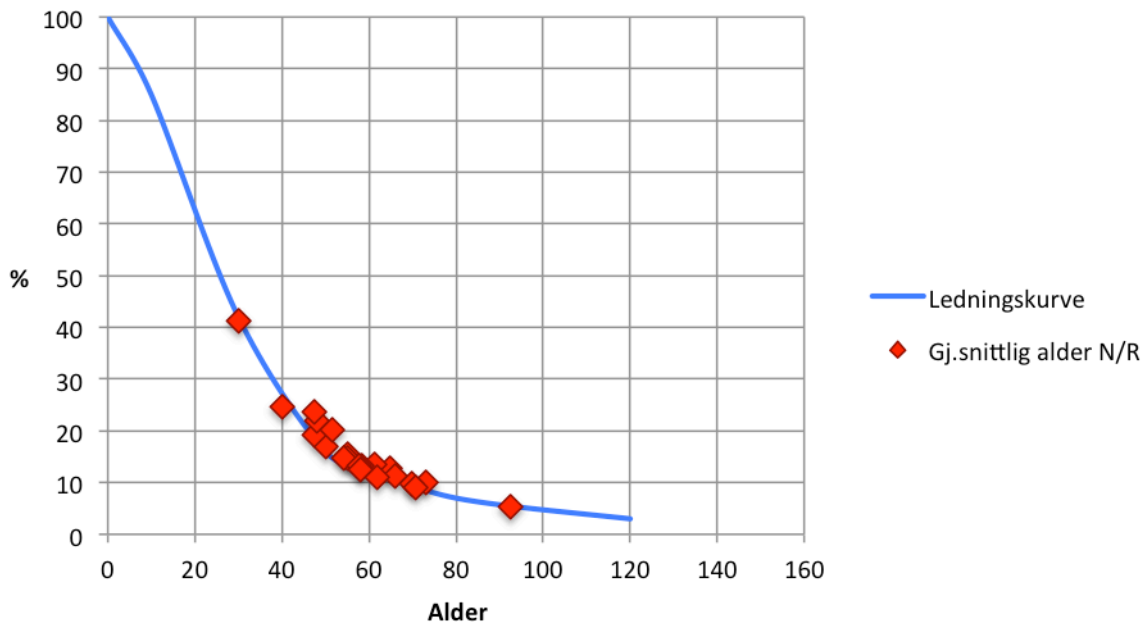


Figur 16 | Eksempel på ledningskurve fra analysen av Stavanger Kommune

Ledningskurven i Figur 15 ligner mer på ledningskurven til Trondheim enn Bergen og har en tydelig knekk rundt 10 %. Med andre ord var 90 % av de operative ledningene i Stavanger yngre enn 60 år i 2009. Man kan av Tabell 3 se at de operative ledningene i Stavanger har en gjennomsnittsalder på under 35 år gjennom hele analyseperioden, noe som er mye yngre enn i både Trondheim og Bergen.

Tabell 3 | Samletabell for nedlagte og renoverte vannledninger i Stavanger Kommune 1994-2014

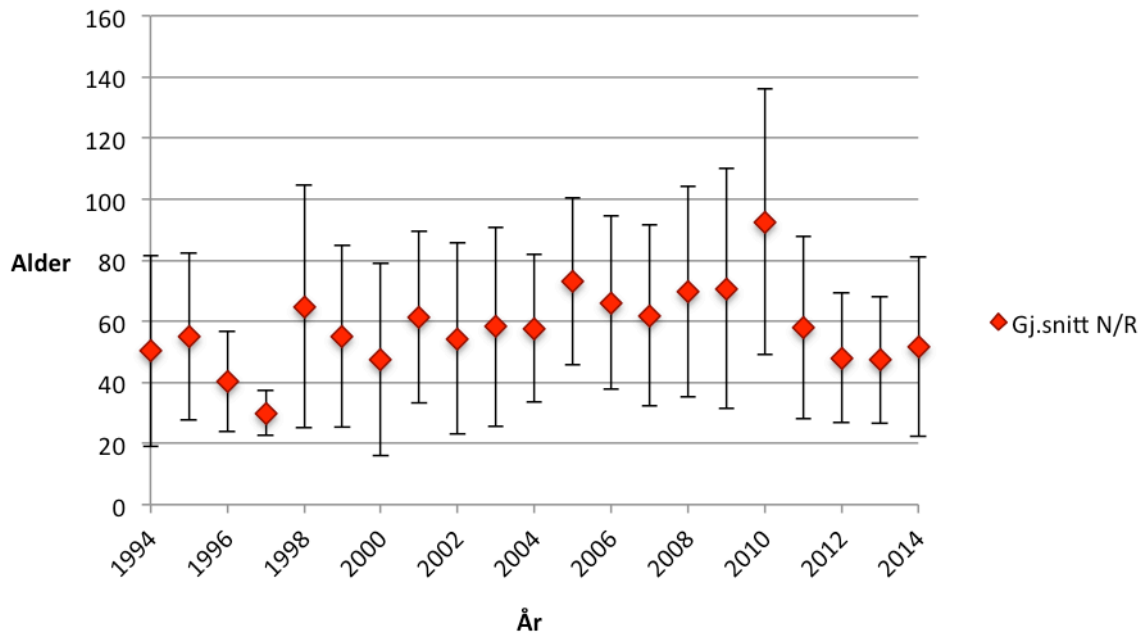
År	Operative			Nedlagte og renoverte				Prosentverdi		
	Antall	Alder		Antall	Alder			Gj.snitt	Std.avvik	
		Median	Gj.snitt		Median	Gj.snitt	Std.avvik		Øvre	Nedre
1994	5921	24	31,36	102	41	50,22	31,13	17,01	42,64	7,95
1995	6009	23	31,04	10	44	55,00	27,31	15,56	27,91	7,06
1996	6138	23	31,30	5	40	40,20	16,40	24,62	24,98	9,61
1997	6215	23	31,88	18	32	30,00	7,31	41,16	11,42	10,70
1998	6289	24	32,42	45	56	64,87	39,86	12,90	36,27	10,62
1999	6340	24	32,70	32	41	55,13	29,73	14,73	34,23	6,56
2000	6435	25	32,94	72	35	47,53	31,47	19,16	52,73	8,64
2001	6424	26	33,47	27	42	61,41	28,10	13,57	25,73	6,79
2002	6567	27	33,48	74	37	54,34	31,20	14,80	42,26	6,58
2003	6573	26	33,84	95	39	58,20	32,58	13,37	38,49	6,77
2004	6593	26	33,90	70	53	57,64	24,21	13,33	27,01	4,16
2005	6660	27	33,95	48	84	73,06	27,43	10,03	14,40	5,87
2006	6766	27	33,90	89	56	66,12	28,31	11,17	22,91	5,69
2007	6801	28	33,86	75	47	61,91	29,72	11,03	31,38	4,90
2008	6868	28	33,86	78	76	69,71	34,50	9,77	27,05	6,32
2009	6924	29	33,80	147	53	70,76	39,38	9,08	34,94	6,56
2010	6883	29	33,49	71	104	92,51	43,53	5,23	16,05	4,84
2011	6916	29	33,38	47	46	57,89	29,95	12,43	41,02	6,97
2012	7001	30	33,59	36	52	47,97	21,24	21,94	35,78	14,10
2013	7028	31	34,21	39	50	47,33	20,68	23,71	35,16	15,82
2014	7071	31	34,74	42	49	51,64	29,27	20,15	45,18	14,01
Gjennomsnitt:					51,2	57,8	28,7	15,9	31,8	8,1



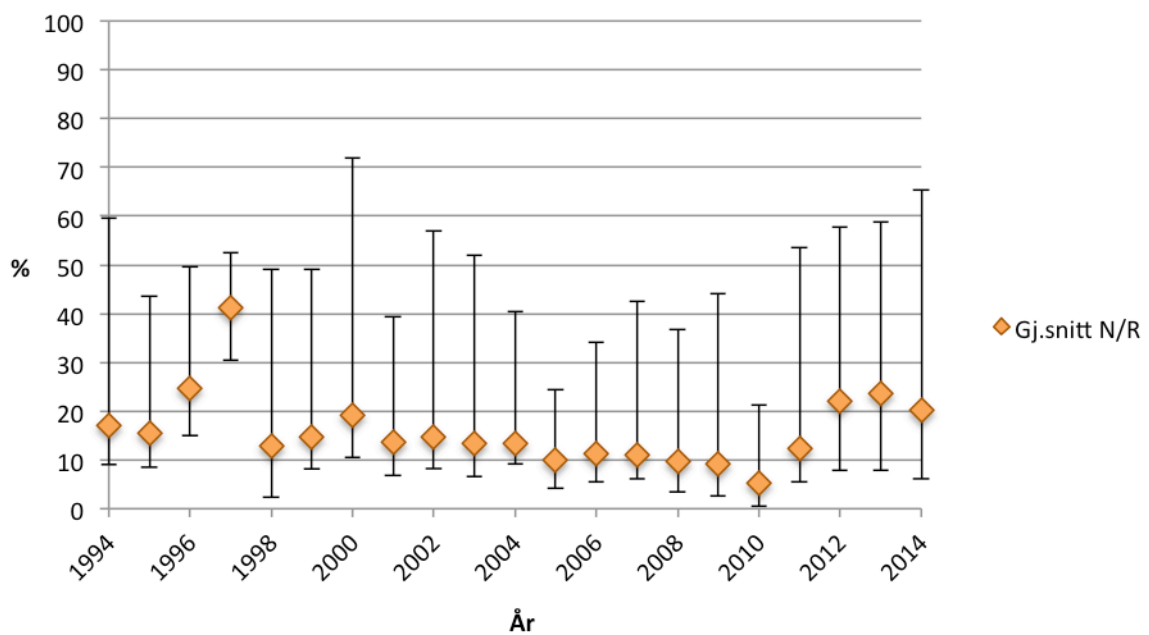
Figur 17 | Årlig gjennomsnittsalder til nedlagte og renoverte vannledninger i Stavanger Kommune fra 1994 til 2014 plottet mot en fiktiv ledningskurve

Figur 17 viser at gjennomsnittsalderen fra to av analyseårene tydelig avviker fra resten. Disse kan også sees i Figur 18 som gjennomsnittsalderen for 1997 og 2010. På grunn av ledningskurvens fasing, vil en lav gjennomsnittsalder lettere stikke seg ut på ledningskurven enn en høy gjennomsnittsalder. 1997 var året med det tredje laveste antallet nedlagte og renoverte ledninger (kun 18 stk.), og den lave gjennomsnittsalderen har dermed høy usikkerhet knyttet til seg. Den høye gjennomsnittsalderen i 2010 er derimot vanskeligere å forklare, da dette var et år med relativt mange nedlagte ledninger (71 stk.).

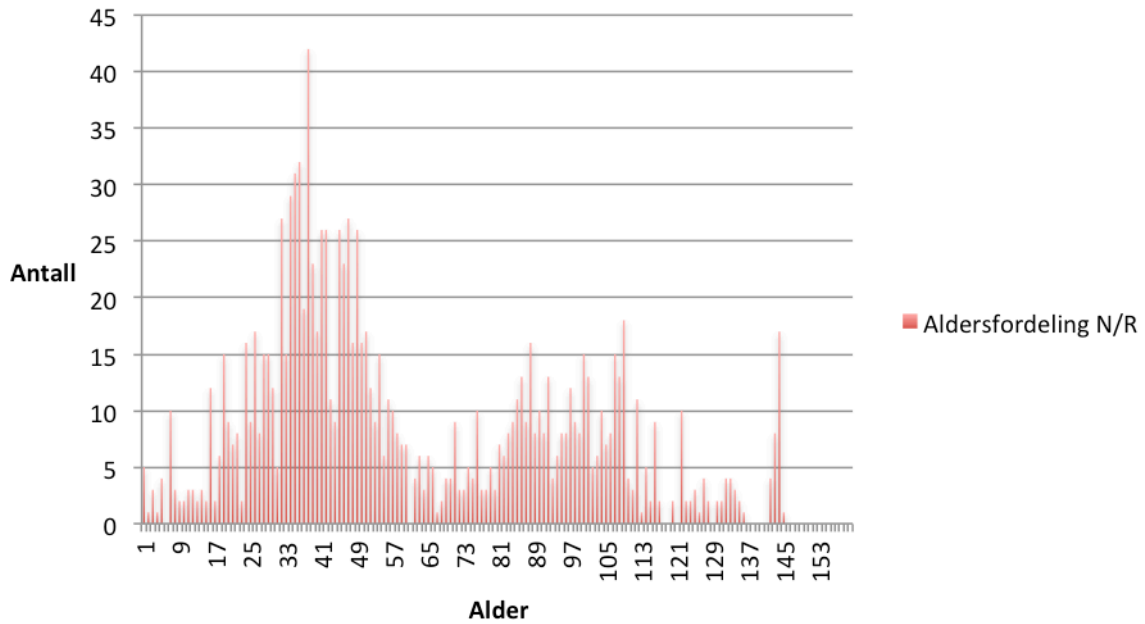
Det generelt lave og relativt varierende antallet nedlagte og renoverte ledninger gjennom analyseperioden for Stavanger er nok en avgjørende årsak til at resultatene spriker så mye som Figur 18 illustrerer. Om man ser på de korresponderende prosentverdiene på ledningskurven til de ulike årene i Figur 19, er disse likevel noe mer konsekvente. Dette tyder på at det er en viss sammenheng mellom aldersfordelingen på de operative ledningene og aldersfordelingen på de nedlagte og renoverte ledningene. Her kan man igjen se at en lav gjennomsnittsalder gir større utslag enn en høy gjennomsnittsalder, da det i Figur 19 bare er 1997 som skiller seg betydelig ut hva gjennomsnittsverdi angår.



Figur 18 | Gjennomsnittlig alder med standardavvik for nedlagte og renoverte vannledninger i Stavanger Kommune

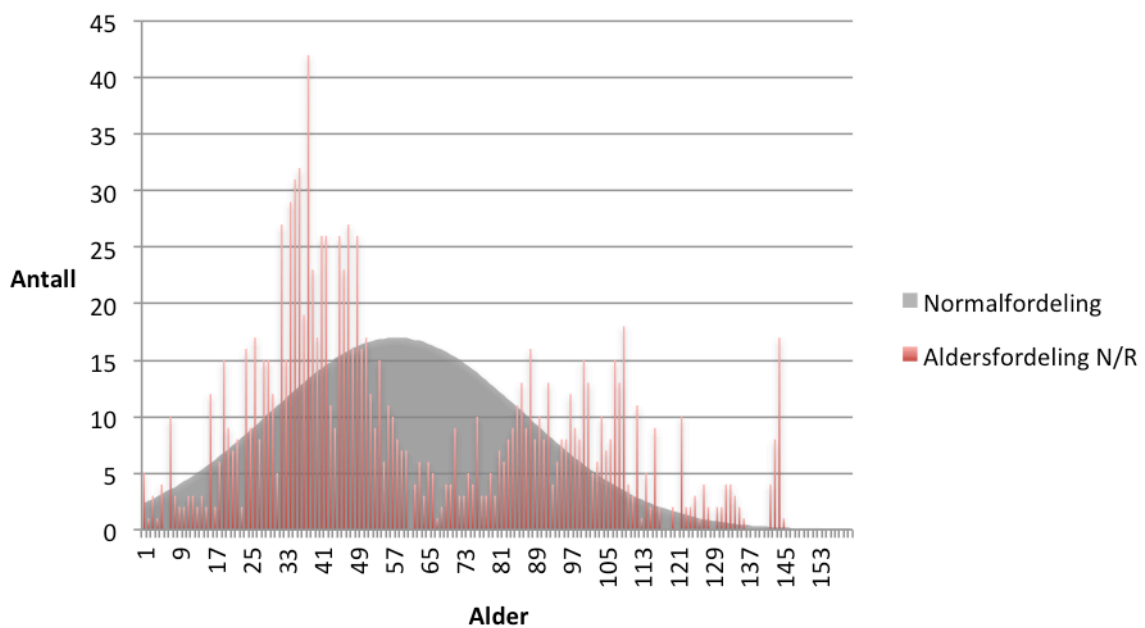


Figur 19 | Korresponderende prosentverdier til nedlagte og renoverte vannledningers gjennomsnittlige alder og standardavvik i Stavanger Kommune



Figur 20 | Aldersfordeling på nedlagte og renoverte vannledninger i Stavanger Kommune

Aldersfordelingen til de nedlagte og renoverte ledningene i Stavanger har visse likhetstrekk med de to andre byene, men denne er mye mer spredt og har to tydelige toppe. Normalfordeling med gjennomsnittsalder og standardavvik fra Tabell 3 passer dermed ikke like godt i dette tilfellet, slik Figur 21 viser.



Figur 21 | Aldersfordeling og normalfordelingskurve, Stavanger Kommune

2.3 Drøfting av analyseresultater

Dataanalysen har vist både likheter og forskjeller mellom de tre byene. Selv om alle tre er blant de fire mest folkerike kommunene i landet, er det store forskjeller i antall operative ledninger. Antallet nedlagte og renoverte ledninger er likevel ikke så ulikt, noe som har gitt et godt grunnlag for sammenligning. Antall ledninger sier riktignok ikke så veldig mye om hvor omfattende ledningsnett er, da en ledningsseksjon kan være alt fra én til hundrevis av meter. Det beste ville nok derfor vært å sammenligne den totale lengden på de ulike ledningsnettene.

Av tabellene kan man se at det gjennomsnittlige standardavviket er så godt som likt i alle de tre byene. Dette antyder en noenlunde lik aldersspredning, om enn ikke om det samme gjennomsnittet. Stavanger er den byen som har høyest gjennomsnittlig alder på de nedlagte og renoverte ledningene, dette til tross for at byen har en vesentlig yngre gjennomsnittsalder på de operative ledningene enn både Trondheim og Bergen gjennom hele analyseperioden. Dette fører naturlig nok til at den korresponderende prosentverdien til gjennomsnittsalderen er mye lavere enn i de to andre byene. Per definisjon vil en mindre andel av ledningene ha nådd en høy alder enn en lavere alder, derav ledningskurvenes synkende prosentverdi med økende alder. Men i Bergen tilsvarende likevel gjennomsnittsalderen en høyere prosentverdi på ledningskurven enn i Trondheim, selv om også gjennomsnittsalderen er høyere. Dette skyldes trenden som fremgår av de operative ledningskurvene i Figur 2 og Figur 9, hvor ledningskurven til Bergen er rettere enn ledningskurven til Trondheim.

Denne aldersanalysen tar for seg alle vannledninger uavhengig av materiale, dimensjon og lignende faktorer som påvirker rehabilitering. Resultatene er dermed en forenkling som utelater mange typiske trekk. Samtidig er det viktig at et utvelgingsmønster basert på resultatene ikke blir så komplekst at det ikke lar seg programmere inn i kalibreringsfunksjonen.

De tydeligste trendene ser ut til å fremgå om man fremfor å se på alderen til de nedlagte og renoverte ledningene, heller ser på deres plassering på ledningskurvene. Av Figur 5 for Trondheim ser man tydelig at standardavviket med noen få unntak omfatter et

område omtrent mellom de 65 % eldste ledningene og de 10 % eldste ledningene. Denne trenden er noe mer søkt for de to andre byene, og Bergen har i tilsvarende Figur 12 mye større variasjon fra år til år. Likevel stemmer også her de samme tallene relativt godt. Stavanger skiller seg enda mer ut, og de nedlagte og renoverte ledningene plasserer seg som nevnt lavere på ledningskurven. Her omfatter standardavviket et område omtrent mellom de 50 % eldste og de 5 % eldste ledningene.

En normalfordeling er langt fra den perfekte representasjonen av aldersfordelingen til de nedlagte og renoverte ledningene i de tre byene. Men når det først skal velges en matematisk tilnærming til et utvelgingsmønster, er nok dette en av de bedre.

Trondheim har en overvekt av nedlagte og renoverte ledninger i omtrentlig alder 30-50 år, noe som nok kommer av at dette også er alderen på nesten halvparten av ledningsnettets i Trondheim. Dette fremgår av Figur 2, hvor ledningskurven er på sitt bratteste for det nevnte alderssegmentet. Den normalfordelte kurven i Figur 7 har riktignok en topp som er noe forskjøvet mot høyre. Dette skyldes at nedleggelse og renovering av nokså mange ledninger med høy alder har dratt gjennomsnittsalderen opp. Bergen har en rettere ledningskurve enn Trondheim, med ledninger mer jevnt fordelt i alder. Dette gjenspeiles også i aldersfordelingen på Figur 14, som er den av de tre byene som stemmer best med den normalfordelte kurven.

Stavanger er den byen hvor en normalfordeling stemmer dårligst med aldersfordelingen til de nedlagte og renoverte ledningene.

Det er vanskelig å konkludere med en generell utvelgingsstrategi som kan gjelde på landsbasis basert på det som har fremkommet av disse tre byene. Det er absolutt visse likheter i aldersspredningen, men om man ser på alderen til de nedlagte og renoverte ledningene opp mot de operative ledningene skiller særlig Stavanger seg ut fra de to andre. Stavanger var riktignok den byen med færrest nedlagte og renoverte ledninger gjennom analyseperioden og også størst variasjon i antall fra år til år, så resultatene fra Stavanger bør kanskje ikke legges like stor vekt på som de fra Trondheim og Bergen.

Aldersfordelingene er forøvrig i stor grad et resultat av en material- og byggeteknisk utvikling gjennom det siste århundret. Denne utviklingen gir ledninger med stadig lengre levetid, noe som trolig vil påvirke fremtidige aldersanalyser.

3 Automatisert kalibrering

Service-nivå er en viktig parameter som sier noe om hvor godt VA-infrastrukturen oppfyller de kravene som stilles til for eksempel kvalitet og mengde. En god indikator på service-nivået til drikkevannsrør kan være antall feil, altså brudd og lekkasjer, på ledningen over en periode. Indikatoren antyder om service-nivået er blitt opprettholdt, eller om det har økt eller sunket. Service-nivået kan igjen relateres til ledningsnettets pålitelighet. Historiske levetidskurver (som blir definert i kapittel 3.1) er et resultat av tidligere rehabiliteringsrater, og et akseptabelt service-nivå i fortiden kan tyde på at rehabiliteringsraten har vært tilstrekkelig eller høyere enn hva som er nødvendig (Malm *et al.*, 2013).

Levetid for grupper av ledninger representeres oftest i form av levetidskurver, eller overlevelseskurver. Dette er fordelaktig, da de i motsetning til for eksempel gjennomsnittlig levetid representerer service-levetiden som en funksjon av ulike årsaker til fornyelse (Renaud *et al.*, 2014). En levetidskurve uttrykker prosentandel over tid og viser hvor stor andel av en ledningskohort, altså en gruppe bestående av en bestemt type enkeltledninger, som når ulike aldre. Levetidskurvene kan konstrueres matematisk ved hjelp av Herz-funksjonen (Herz, 1996), som er definert slik:

$$F(t) = P(T \geq t) = 1 \quad \text{når } t \leq c$$

$$F(t) = P(T \geq t) = \frac{a+1}{a+e^{b(t-c)}} \quad \text{når } t > c$$

$$F(t = \infty) = 0$$

Funksjonen uttrykker sannsynligheten P for at en lednings alder T vil overstige tiden t, og ved hjelp av de tre parameterne a, b og c kan funksjonen tilpasses ulike kohorters aldringsmønstre. Ledningsnettets service-nivå blir imidlertid ikke tatt hensyn til ved tilpassing av Herz-parameterne. Bruaset *et al.* (2017) har tatt tak i dette og kommet opp med en metode for å kalibrere levetidsfunksjoner med service-nivå som kalibreringsparameter.

3.1 Kalibreringsmetoden

En kohorts *historiske levetidskurve* konstrueres fra empiriske data på alderen til alle tidligere rehabiliterte ledninger i den samme kohorten. Denne kurven består altså av ledninger som ikke bare er rehabilitert av fysiske årsaker, men også av årsaker som sonevis utskiftning og behov for hydraulisk kapasitetsøkning. Den historiske levetidskurven danner sammen med kohortens operative ledningskurve grunnlaget for den *kalibrerte levetidskurven*. I en fiktiv forlengelse av den historiske levetidskurven overføres ledninger fra ledningskurven til en kalibreringskurve ved å *estimere* hvordan de operative ledningene vil rehabiliteres i fremtiden. Hvor stor andel av ledningene i ledningskurven som skal overføres årlig, bestemmes ved å anta en fremtidig rehabiliteringsrate basert på service-nivået.

Med observert feilrate som en indikator på service-nivåets utvikling, skisserer Bruaset *et al.* (2017) fem ulike scenarier ved bestemmelse av den fremtidige rehabiliteringsraten:

- 1) Jevnt minkende feilrate: eksisterende rehabiliteringsrate kan beholdes inntil feilraten begynner å flate ut, eller senkes dersom kost-nytte-forholdet er for lavt.
- 2) Konstant feilrate: dersom feilraten er på et akseptabelt lavt nivå, kan eksisterende rehabiliteringsrate beholdes eller eventuelt senkes. Rehabiliteringsraten kan også senkes gradvis mens effekten på feilraten observeres.
- 3) Jevnt økende feilrate: eksisterende rehabiliteringsrate bør økes gradvis mens effekten på feilraten observeres.
- 4) Feilraten minker for så å flate ut: eksisterende rehabiliteringsrate bør beholdes eller reduseres forsiktig mens effekten på feilraten observeres.
- 5) Feilraten øker for så å flate ut: dersom feilraten er på et akseptabelt nivå, bør eksisterende rehabiliteringsrate beholdes. Hvis ikke, bør den økes.

En fremtidig rehabiliteringsrate velges altså med bakgrunn i tidligere rehabiliteringsraters evne til å opprettholde service-nivået. I praksis bør man velge rehabiliteringsrate for en kortere periode, for så å øke eller redusere den fra forrige periode avhengig av service-nivåets utvikling. Kommunale hovedplaner utarbeides for tiårsperioder, og det anbefales å gjennomføre en ny kalibreringsprosess for eksempel i forbindelse med utarbeidelse av ny hovedplan. Man kan da evaluere forrige kalibreringsprosess, og basert på ny data vurdere om man skal holde seg på samme kurve eller endre denne. En slik iterasjonsprosess gjør kalibreringsmetoden anvendelig også på unge ledningskohorter hvor det eksisterer historiske data kun for en kort periode.

3.2 Excel-funksjon

Metoden beskrevet over er så langt bare blitt testet ut manuelt. Manuell utvelgelse av ledninger år for år er svært tidkrevende, og det var ønskelig å utvikle en funksjon som utfører denne utvelgelsen basert på noen enkle kriterier, og som dermed lager den kalibrerte levetidskurven automatisk. Det ble tidlig besluttet å benytte Excel som plattform for utarbeidelse av en slik funksjon, hovedsakelig på grunn av programmets brukervennlighet og utbredelse i kombinasjon med muligheten for å lage makroer (Microsoft, 2007) som utfører oppgaver gjennom programmerte kommandoer.

Hvilke ledninger som årlig velges ut til å forflyttes fra ledningskurven vil få betydning for forløpet til den kalibrerte levetidskurven. Dersom alderssegmentet til ledningene som forflyttes for eksempel er veldig avgrenset, vil kalibreringskurven bli brattere enn om ledningene velges ut blant et bredere alderssegment. Der var derfor viktig å finne et utvelgingsprinsipp som best mulig representerer aldersfordelingen til rehabiliterte ledninger i virkeligheten.

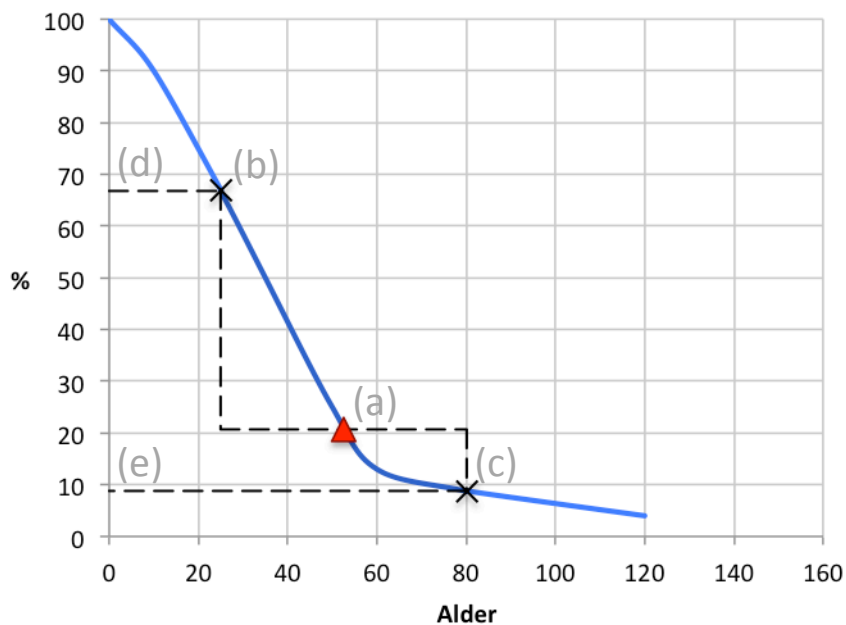
3.2.1 Utarbeidelse

En stor del av arbeidet med programmeringen av kalibreringsfunksjonen var å konkretisere resultatene fra aldersanalysen. Ettersom aldersanalysen ble utført på hele ledningsnett, med årlig tilførsel av nye ledninger i takt med økende alder på de eksisterende, holdt de operative ledningene en relativt jevn gjennomsnittsalder gjennom observasjonsperioden. Dette er ikke tilfellet i kalibreringsmetoden, hvor ingen nye ledninger tilføres den opprinnelige kohorten. Alderen til de operative ledningene

øker dermed gradvis, helt til alle er overført til den kalibrerte levetidskurven. Dersom rehabiliteringsraten er lav, vil alderen til ledningene øke mye innen kalibreringen er fullført. For eksempel, med en rehabiliteringsrate på 1 %, vil de siste ledningene som velges ut ha blitt 100 år eldre. På denne måten vil de operative ledningene raskt havne utenfor et eventuelt aldersområde for utvelgelse.

Det ble derfor besluttet at utvelgingsprinsippet burde basere seg på ledningenes plassering på den operative ledningskurven, da dette også viste seg å være den tydeligste trenden i aldersanalysen. På denne måten ville man kunne få en generell utvelgelse som var anvendelig på kohorter med ulike aldre og aldersfordelinger.

Under utviklingen av funksjonen ble det arbeidet med to ulike utvelgingsprinsipper. I begge prinsippene gikk funksjonen gjennom de operative ledningene én etter én fra yngst til eldst. Et tilfeldig desimaltall mellom 0 og 1 ble generert for hver ledning og brukt til å avgjøre om den enkelte ledning skulle bli nedlagt eller ikke ut fra individuelle grenseverdier. Forskjellen på de to utvelgingsprinsippene var hvordan sannsynligheten for nedleggelse ble fordelt.



Figur 22 | Standardavvik representert som prosent

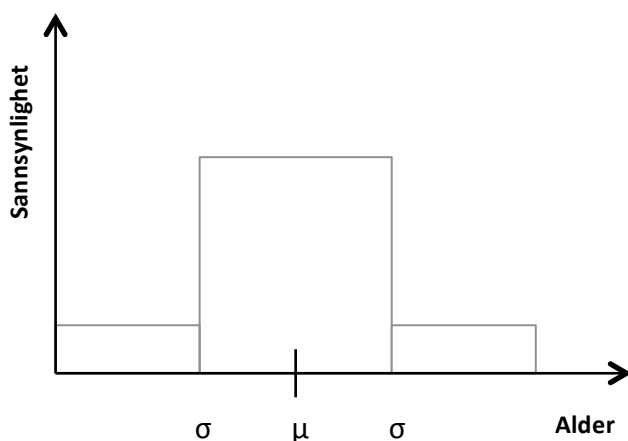
Utvelgingsprinsipp 1.0

Analysen av nedlagte og renoverte vannledninger viste at aldersfordelingen kunne representeres gjennom en normalfordelt tilnærming, og både gjennomsnittsverdier og standardavvik til de nedlagte og renoverte vannledningene var allerede beregnet.

I en normalfordeling representerer standardavviket differansen fra gjennomsnittsverdien som 68,27 % av dataene befinner seg innenfor. Dette dannet grunnlaget for det første utvelgingsprinsippet ved at den øvre og nedre alderen som ligger ett standardavvik fra gjennomsnittsalderen ble brukt som grenseverdier. Ledninger med en alder innenfor standardavviket ble dermed gitt en større sannsynlighet for å bli valgt ut til nedleggelse enn ledninger som var yngre eller eldre enn grenseverdiene.

For å unngå å bruke alder som grenseverdier, ble grenseverdiene i stedet representert i form av aldrenes korresponderende prosentverdier på den operative ledningskurven. For Trondheim og Bergen ble for eksempel området som omfattes av standardavviket til gjennomsnittsalderen på nedlagte og renoverte ledninger vurdert til å ligge mellom de 65 % eldste og de 10 % eldste ledningene i drift, slik Figur 22 viser. Ved å sette punktene (d) og (e) som grenseverdier, ville ledninger mellom punkt (b) og (c) på ledningskurven med dette utvelgingsprinsippet hatt en større sannsynlighet for utvelgelse enn ledningene over og under.

Av Figur 23 kan man se hvordan sannsynligheten for nedleggelse med dette utvelgingsprinsippet ble fordelt i form av bokser med standardavviket som grense mellom boksene.



Figur 23 | Sannsynlighet fordelt som bokser

Utvelgingsprinsipp 2.0

Utvelgingsprinsipp nummer to baserte seg også på en aldersmessig normalfordeling av de nedlagte og renoverte ledningene, og var en videreutvikling av det første. Sannsynligheten for at den enkelte operative ledning skulle nedlegges ble nå beregnet av Excels innebygde normalfordelings-funksjon basert på gjennomsnittsalder, standardavvik og alderen til den enkelte ledning. Fortsatt var det et tilfeldig desimaltall mellom 0 og 1 som avgjorde skjebnen til hver ledning, men sannsynligheten for nedleggelse økte kontinuerlig mot gjennomsnittsalderen, for så å avta, i stedet for å gjøre et sprang ved standardavviket slik som i det første prinsippet. Dette prinsippet baserte seg dermed på en gjennomsnittsalder og et standardavvik. På samme måte som grenseverdiene i forrige utvelgingsprinsipp ble gjennomsnittsalderen her definert i form av en prosentverdi på den kumulative ledningskurven for å ta hensyn til den tidligere nevnte aldringen av de operative ledningene. Grunnet ledningskurvenes ikke-lineære fasing ville derimot standardavviket måtte uttrykkes som to verdier avhengig av retningen fra gjennomsnittsalderen. Det ble dermed funnet enklest å ta inn denne i form av alder, da den representerer en avstand fra gjennomsnittet.

Under uttesting av funksjonen ble det imidlertid oppdaget at aldersspredningen til kohortene varierte mye. I Trondheim Kommune var det for eksempel 150 år mellom yngste og eldste ledning i ledningsnettets som helhet, mens det for enkelte av kohortene var under 50 år som skilte yngste og eldste. Ved å bruke et beregnet standardavvik på nærmere 30 år på en slik kohort ville normalfordelingen miste sin effekt. Det ble dermed besluttet at også standardavviket må tilpasses hver kohort ved å uttrykke det i form av prosentverdier.

Utvelgingsprinsipp 3.0

Den endelige løsningen ble en kombinasjon av de to beskrevne utvelgingsprinsippene. Som i det første prinsippet, blir to grenseverdier i form av prosentverdier ((d) og (e) på Figur 22) brukt til å for hvert år i kalibreringen beregne øvre og nedre alder, slik at gjennomsnittlig alder for utvelgelse (a) blir gjennomsnittsverdien av de to, og standardavviket blir halve differansen mellom dem. Sannsynligheten for utvelgelse av den enkelte ledning kan videre beregnes med normalfordelings-funksjonen, slik som i det andre prinsippet. Forskjellen er nå at også standardavviket er tilpasset ledningskohortens spredning i alder.

3.2.2 Beskrivelse av funksjonen

Rammen for kalibreringsfunksjonen er en Excel-fil der selve kalibreringen utføres av en makro. Excel-filen består av tre ark: Input, Resultat og Herz. Input-arket er avbildet i Figur 24, og utgjør startsiden til kalibreringsfunksjonen. Startsidene består av to tabeller og to innstillingsruter, og man fyller inn og kalibrerer kun én kohort av gangen. I den venstre tabellen skal kohortens operative ledninger fylles inn med lednings-ID, lengde og leggeår. I den høyre tabellen skal kohortens nedlagte og renoverte ledninger fylles inn med lednings-ID, lengde og alderen deres da de ble nedlagt eller renovert. Slik kalibreringsfunksjonen fremstår i dag, er det strengt tatt ikke nødvendig å fylle inn kolonnene med lednings-ID, men ved å bruke dem, er det enklere å holde orden på hvilke ledninger man har inkludert i kalibreringen og ikke.

Den øverste innstillingsruten inneholder innstillinger som kan variere fra kohort til kohort. *Første analyseår* er normalt det første året man ikke har ledningsdata for, og dette vil bestemme alderen til alle de operative ledningene ved kalibreringsstart. *Rehabiliteringsrate fra start* er en prosentandel av den totale lengden til de operative ledningene som skal rehabiliteres, altså flyttes fra ledningskurven til den kalibrerte levetidskurven, årlig. Dersom det er ønskelig at rehabiliteringsraten skal økes eller minkes etter en gitt tid, kan dette bestemmes under *Ny rehabiliteringsrate fra år...* Dette kan gjøres for to årstall, noe som gir mulighet for en gradvis endret rehabiliteringsrate. Dersom endret rehabiliteringsrate ikke er aktuelt, kan feltene stå blanke. Rehabiliteringsraten vil alltid være en prosentandel av de operative ledningenes opprinnelige total lengde, slik at det for eksempel vil ta 100 år å skifte ut hele kohorten ved en rehabiliteringsrate på 1 %.

Den nederste innstillingsruten inneholder innstillinger for hvordan kalibreringsfunksjonen velger ut ledninger fra ledningskurven. Som tidligere nevnt, er utvelgelsen av ledninger normalfordelt med et standardavvik som omfatter en viss andel av ledningskurven. Øvre og nedre grenseverdi for dette området bestemmes i denne innstillingsruten. Disse bør ideelt sett bestemmes lokalt for hvert enkelt kalibreringstilfelle ved å gjennomføre en aldersanalyse av nedlagte og renoverte ledninger. Dersom man ikke har ressurser til å gjennomføre en slik analyse, kan de illustrerte verdiene 65 % og 10 % benyttes.

Et trykk på den grønne knappen "Start kalibrering" aktiverer makroen som utfører kalibreringen. Koden til denne makroen er i sin helhet vedlagt som Vedlegg A.

Kalibreringsfunksjon for ledningskohorters levetidskurve

Laget av: Martin Okstad

Operative ledninger			Nedlagte/renoverte ledninger		
LSID*	Lengde [m]	Leggeår	LSID*	Lengde [m]	Alder

Innstillinger

Første analyseår :

Rehabiliteringsrate fra start : %

Ved evt. endret rehabiliteringsrate:

Ny rehabiliteringsrate fra år : %

Ny rehabiliteringsrate fra år : %

Avanserte innstillinger

Øvre grenseverdi for standardavvik : 65 %

Nedre grenseverdi for standardavvik : 10 %

Innstillinger

Første analyseår :

Rehabiliteringsrate fra start : %

Ved evt. endret rehabiliteringsrate:

Ny rehabiliteringsrate fra år : %

Ny rehabiliteringsrate fra år : %

Avanserte innstillinger

Øvre grenseverdi for standardavvik : 65 %

Nedre grenseverdi for standardavvik : 10 %

Start kalibrering

Antall operative ledninger : 0

Antall rehabiliterte ledninger : 0

Totalt : 0

*LSID er ikke nødvendig for kalibreringen

Figur 24 | Skjermbilde av startsiden til kalibreringsfunksjonen

Etter at "Start kalibrering" er trykket, vil funksjonen først kontrollere om de nødvendige innstillingene er fylt ut, før den stiller et kontrollspørsmål. Ved bekreftende svar vil funksjonen fjerne eventuelle resultater fra forrige kalibrering i Resultat-arket, som er illustrert i Figur 25. Rehabiliteringsraten i innstillingsruten benyttes til å beregne en årlig totallengde med ledninger som skal velges ut. Denne årlige lengden beholdes helt til funksjonen eventuelt når et år med en ny rehabiliteringsrate.

Lengde og alder på de nedlagte og renoverte ledningene kopieres og limes inn i tabellen i Resultat-arket. Det samme blir gjort med de operative ledningene, hvor første analyseår brukes til å beregne alderen til ledningene. Alle ledningene ligger nå etter hverandre i samme tabell, og for å skille dem fra hverandre, tildeles de nedlagte og renoverte ledningene status 0 og de operative status 1 i en skjult kolonne. Prosentkolonnen til venstre fylles ut fra 100 for øverste element til 0 for nederste element, og denne forblir uberørt resten av kalibreringen. Ledningene sorteres etter status og alder slik at yngste nedlagte ledning havner øverst og eldste operative havner nederst. Funksjonen er nå klar til å begynne utvelgelsen.

Funksjonen går videre inn i en løkke hvor den blir værende helt til den totale lengden operative ledninger er mindre enn den årlige lengden som skal velges ut. Basert på øvre og nedre grenseverdi defineres standardavvik og gjennomsnittsalder for utvelgelsen. Funksjonen begynner så med den yngste operative ledningen. Excel-funksjonen NORM.FORD genererer en sannsynlighetsverdi for den gjeldende ledningen basert på gjennomsnittsverdi, standardavvik og ledningens alder. Denne verdien vil øke jo nærmere ledningens alder er gjennomsnittsalderen. For å tilpasse sannsynlighetsverdien til den ønskede årlige rehabiliteringsraten, må den multipliseres med årlig antall utvalgte ledninger. Dette årlige antallet er bare en førende verdi ettersom ledningene har ulik lengde og det er årlig *lengde* som avgrenser hvor mange ledninger som faktisk velges ut. Videre deles sannsynligheten på antallet ledninger som har samme alder som den gjeldende ledningen. Dette er for å unngå at levetidskurven skal bli påvirket av at det eventuelt finnes mange ledninger med samme alder blant de operative ledningene i kohorten. Den tilpassede sannsynlighetsvariabelen blir dermed:

$$\text{Sannsynlighetsvariabel} = (\text{normFord} * \text{arligAntall} / \text{antAlder}) \quad (1)$$

hvor

normFord = NORM.FORD(*alder*; *gjennomsnittsverdi*; *standardavvik*)

arligAntall = *rehabiliteringsrate* * *opprinnelig antall operative ledninger*

antAlder = *antall ledninger med samme alder som gjeldende ledning*

Et tilfeldig desimaltall mellom 0 og 1 genereres, og for at den gjeldende ledningen skal bli valgt ut, må følgende krav være oppfylt:

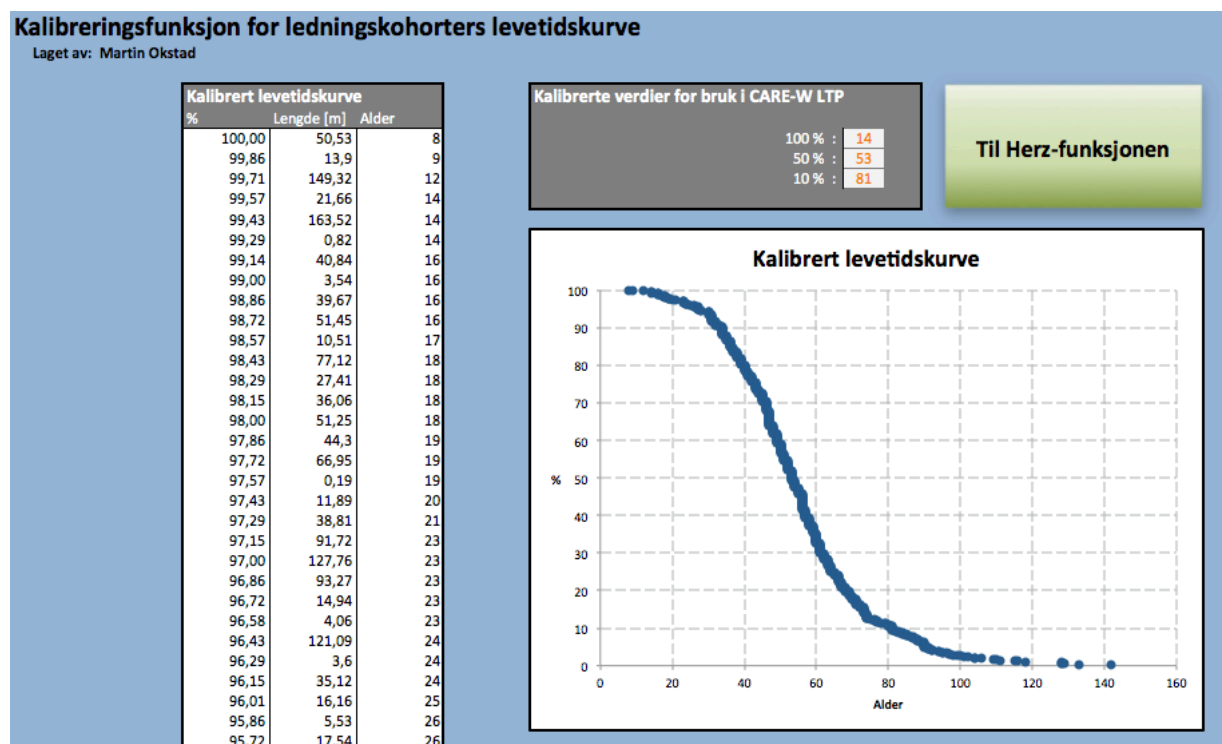
$$\text{tilfeldig} < \text{Sannsynlighetsvariabel} \quad (2)$$

Det tilfeldige desimaltallet må altså være mindre enn den tilpassede sannsynlighetsvariabelen. Dersom dette er tilfellet, vil ledningens status endres fra 1 til 0 og dens lengde legges til i en lengdevariabel. Denne lengdevariabelen vil til en hver tid være lik summen av lengdene til alle ledninger som er blitt valgt ut i inneværende år.

Funksjonen går videre til neste ledning i lista og genererer en ny sannsynlighetsvariabel og et tilfeldig desimaltall. Prosedyren gjentas, ledning for ledning, helt til

lengdevariabelen er større enn årlig lengde. Dersom årlig lengde ikke er nådd når funksjonen har gått gjennom lista med alle de operative ledningene, starter funksjonen fra toppen av lista igjen.

Når årlig lengde er nådd, trekkes lengdevariabelens verdi fra den totale lengden operative ledninger og lengdevariabelen tilbakestilles til 0. Ledningene sorteres på nytt og alderen på ledningene som fortsatt er operative økes med 1 år. Funksjonen sjekker også om den har nådd et år hvor rehabiliteringsraten skal endres.

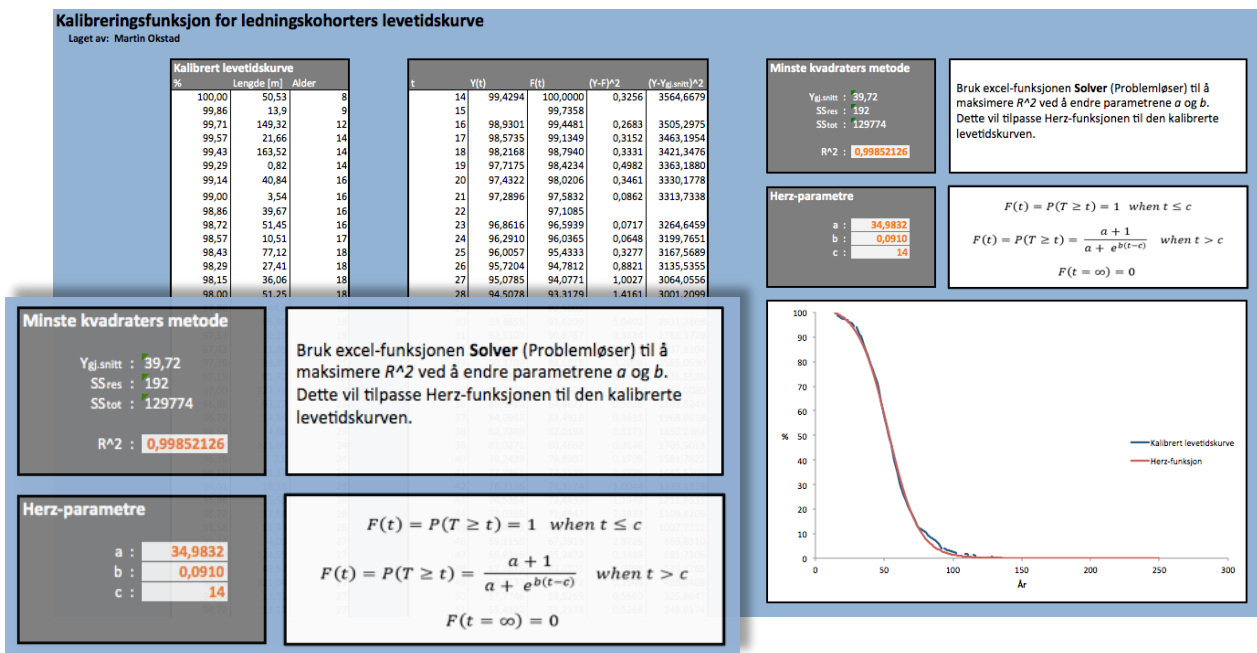


Figur 25 | Skjerm bilde av resultatsiden til kalibreringsfunksjonen

Når den totale lengden operative ledninger til slutt er mindre enn årlig lengde, avsluttes løkken og de gjenværende operative ledningene endrer status før alle ledningene sorteres en siste gang. Alderen til punktene 100 %, 50 % og 10 % hentes ut av lista, da disse er standard-input for levetidskurver i bl.a. programvaren CARE-W LTP. Alderen som representerer 100 % vil være den første alderen som flere enn bare én ledning innehar.

Underveis er det ingen indikator som viser om kalibreringsfunksjonen kjører eller hvor lang tid som gjenstår. Man vil imidlertid se at funksjonen er ferdig ved at resultatarket aktiveres.

Dersom det er ønskelig å uttrykke den kalibrerte levetidskurven i form av Herz-funksjonen, kan dette gjøres i Herz-arket. Ved å trykke på knappen "Til Herz-funksjonen", aktiverer man en makro som fyller inn Herz-arket med nødvendig data, slik at det blir seende ut omtrent som på Figur 26. Herz-funksjonen tilpasses ved hjelp av en variant av minste kvadraters metode (Pobočková og Sedliačková, 2014). I denne metoden beregnes en såkalt *determinantkoeffisient* R^2 som et tall på hvor godt funksjonen stemmer overens med den kalibrerte kurven. Resultatet fra dette arket er de tre Herz-parameterne a , b og c . Mens *motstandstiden* c allerede er bestemt av alderen på 100 %-ledningen, er *aldringsfaktoren* a og *feilfaktoren b tildelt standardverdier. Disse kan tilpasses ved å benytte det innebygde Excel-verktøyet *Problemløser* (*Solver* på engelsk). Ettersom denne ikke er aktivert i Excel som standard, er den ikke blitt bygget inn i noen makro. Man må derfor manuelt få Problemløseren til å endre parameterne a og b slik at R^2 blir maksimert.*



Figur 26 | Skjerm bilde av siden for tilpassing av Herz-funksjonen

3.3 Drøfting av kalibreringsfunksjonen

I case-studiet til Bruaset *et al.* (2017) blir kalibreringsmetoden testet ut på ledninger i asbestsement. De beregner at gjennomsnittsalderen til rehabiliterte asbestsement-ledninger gjennom en 20-årig observasjonsperiode er 52 år. De påpeker også at ettersom det ikke lenger legges nye ledninger av dette materialet, øker gjennomsnittsalderen på ledninger som rehabiliteres. Dette er et prinsipp som også er blitt ivaretatt i kalibreringsfunksjonen. Ledningene velges ikke ut etter en bestemt alder, men heller etter hvor på ledningskurven de befinner seg. Med andre ord øker alderen på ledningene som velges ut med alderen på den operative ledningsmassen.

Bruaset *et al.* (2017) velger videre ut ledninger jevnt blant de eldste ledningene. Etter å ha gjennomført aldersanalysen på nedlagte og renoverte drikkevannsledninger, var en slik jevnt fordelt utvelgelse aldri aktuell da kalibreringsfunksjonen skulle utarbeides. Til dette var enkelte aldersgrupper alt for godt representert blant de rehabiliterte i forhold til andre. Aldersfordelingen som fremgår av ledningsnettet som helhet representerer selvsagt ikke hver enkeltkohort like godt, og det er nok mange typiske trekk ved de ulike ledningsmaterialene som ikke blir ivaretatt. For å ta høyde for nettopp dette kunne man sikkert utviklet en kalibreringsfunksjon med flere innstillingsmuligheter, men det ville trolig bare resultert i et mer upraktisk brukergrensesnitt uten at de kalibrerte levetidskurvene nødvendigvis ville blitt nevneverdig forandret.

Når funksjonen velger ut ledninger, begynner den på toppen av lista hver gang den har gått gjennom alle de operative ledningene og enda ikke fylt opp årets kvote. Dette gjør at andelen unge ledninger som blir nedlagt øker litt i forhold til gamle ledninger. Det samme skjer dersom kvoten er fylt opp før funksjonen har kommet gjennom hele lista; Færre av de eldste ledningene blir nedlagt. Dette kan tilsynelatende være en ulempe, og ideelt sett burde det kanskje også vært tilfeldighet som styrer hvor i lista man befinner seg. I så fall måtte ledningene blitt sortert hver gang en ledning blir nedlagt, for å hindre at denne blir valgt igjen. Dette ville ført til en voldsom økning i antall operasjoner for å få alle ledningene over på den kalibrerte kurven, og funksjonen ville trolig blitt mye tyngre å kjøre.

I kohorter med et stort antall ledninger vil nok dette være av liten betydning, men det kan også vise seg å kompensere for en annen ulempe. Aldersanalysen i forrige del viser

nemlig at i alle de tre byene er gjennomsnittsalderen eldre enn hva toppen i figurene med aldersfordeling tilsier. Dette kommer av at de eldste nedlagte ledningene avviker mye mer fra toppen enn de yngste, og at aldersfordelingene i varierende grad har antydning til en ekstra topp blant de eldre ledningene. Dette kommer tydeligst frem av Figur 20. Normalfordelingskurven, generert av gjennomsnittsverdien, er dermed noe forskjøvet mot de eldre ledningene i forhold til hva den faktiske aldersfordelingen tilsier. Dette fremgår både av Figur 7, Figur 14 og Figur 21. Normalfordelingen vil dermed legge ned flere eldre ledninger enn det som faktisk er tilfellet, og da er det bare en fordel om antallet yngre øker ved at en ny runde påbegynnes fra toppen innimellom.

Et annet potensiale for forbedring ligger i måten funksjonen avgjør om den årlige kvoten er fylt opp på. Funksjonen vil fortsette å velge ut ledninger helt til den samlede lengden på de utvalgte ledningene har passert årlig lengde gitt av rehabiliteringsraten. Dermed vil den faktiske årlige lengden alltid gå litt over den lengden som rehabiliteringsraten tilsier. Igjen er nok dette et nærmest ubetydelig problem for kohorter med mange ledninger. Om man likevel skulle gjort et tiltak, kunne man bedt funksjonen om å heller utelate siste valgte ledning dersom den samlede lengden er nærmere årlig lengde uten enn med. På denne måten ville man noen ganger havnet over og noen ganger havnet under den årlige lengden, og dermed totalt sett truffet bedre.

I det store og hele har kalibreringsfunksjonen endt opp med å bli både rask og velfungerende. Det er imidlertid skrevet svært lite kode som fanger opp manglende eller feil data fra brukeren, og man kan derfor risikere at funksjonen krasjer eller kjører seg fast i en uendelig loop dersom den ikke blir brukt riktig. Dette kan lett fanges opp av brukeren hvis makroen for eksempel bruker over et minutt på å fullføre kalibreringen. Makroen kan da avbrytes ved å trykke *esc* på tastaturet. Trolig vil ikke dette utgjøre noe stort problem, da vinduene består av få og for det meste lettfattelige valgmuligheter.

4 CASE: LTP-analyse, Trondheim Kommune

I 2014 skrev Selseth og Røstum (2014) en rapport om behovet for langtidsrehabilitering for vannledninger i Trondheim Kommune i forbindelse med at det skulle lages ny hovedplan for Vann. Rapporten ble utarbeidet med bruk av programvaren CARE-W LTP og basert på antagelser om levetid for ulike grupper av ledninger.

I dette case-studiet skal kalibreringsfunksjonen benyttes til å lage kalibrerte levetidskurver for de samme kohortene som det opereres med i LTP-rapporten. Ved å bruke CARE-W LTP gjennomføres tilsvarende analyse, slik at resultatet fra kalibrerte levetidskurver kan sammenlignes med resultatet fra antatte levetidskurver.

4.1 Metode

4.1.1 Kohort-inndeling

Ledningene deles inn i de samme kohortene som ble benyttet i kommunens LTP-analyse. Tabellene er direkte kopi fra LTP-rapporten til Trondheim Kommune, men tallene på antall, lengde og prosent er basert på egne data, hvor 2015 er siste år.

Duktile støpejernsledninger er inndelt etter hvorvidt de er beskyttet mot SRB-korrosjon. I tillegg er de ubeskyttede ledningene inndelt i de som har hatt brudd og de som ikke har hatt brudd, da sannsynligheten for flere brudd øker når brudd først har oppstått.

Tabell 4 | Inndeling av duktile støpejernsledninger (SJK)

Materialkode	Anleggsår	Registrert brudd på ledning?	Innvendig/utvendig beskyttelse
SRB0	1964-75	Nei	Ingen
SRB1	1964-75	Ja	Ingen
bSJK	<1964 og >1975		Ja

Tabell 5 | Kohortinndeling etter ledningsmateriale

Nr	Kohort	Material-kode i GVA	Antall ledninger	Lengde [km]	Prosent [%]
1	bSJK	SJK (se tabellen over)	3107	262,4	33,1 %
2	PE	PE, PE100, PE50, PE80, PEH, PEL	944	75,3	9,5 %
3	PVC	PVC	917	97,1	12,3 %
4	SJG	SJG	2152	165,8	21,0 %
5	SRB0	SJK (se tabellen over)	1116	75,1	9,5 %
6	SRB1	SJK (se tabellen over)	643	61,9	7,8 %
7	Store	BET, GUP	143	38,8	4,9 %
8	Stål_asbest	AAS, GSE, MGA, MCU, MST, STF	277	15,3	1,9 %
	Sum		9299	791,7	100,0 %

4.1.2 Service-nivå

For at de kalibrerte levetidskurvene skal bli best mulig, er andelen ledninger som nedlegges hvert år avgjørende. Rehabiliteringsraten, eller fornyelsesraten, har stor innvirkning på hvordan service-nivået til de ulike ledningskohortene utvikler seg, og en viktig indikator på en vannlednings service-nivå er frekvensen av brudd og andre feil. Ved å sette historiske feilrater opp mot historiske rehabiliteringsrater, kan man avgjøre om fremtidig rehabiliteringsrate bør heves, senkes eller videreføres som den er for å oppnå et tilstrekkelig service-nivå. Det er dermed viktig å definere hva som er et tilstrekkelig service-nivå.

Norsk Vann utgir årlig en rapport som beskriver tilstanden for de kommunale vann- og avløpstjenestene. Gjennom rapporterings- og benchmarkingsportalen bedreVANN kan hver deltakende kommune og interkommunale selskap (IKS) måle sin egen resultatutvikling over tid, både kostnader og standard på tjenester. I 2015 deltok 83 kommuner, men Norsk Vanns ambisjon er at alle medlemskommunene skal ta i bruk verktøyet.

I den årlige rapporten vurderes blant annet standarden på vannforsyningen til deltakerkommunene, hvor *ledningsnettets funksjon* er en av faktorene. For standarden på ledningsnettets funksjon stilles følgende vurderingskriterier:

God: Beregnet vanntap er < 20 % av den totale vannmengden som er produsert og levert på distribusjonsnett

Dårlig: < 0,5 % av det totale ledningsnett

et blir fornyet i året (beregnet som gjennomsnitt for de siste tre årene) og beregnet vanntap er > 40 % eller antall lekkasjereparasjoner på nettet er > 0,10 pr. km pr. år

Mangelfull: Standard som ligger mellom kriteriene for God og Dårlig

Det fremgår av rapporten fra 2015 at Trondheim dette året hadde et beregnet vanntap på omtrent 29 % og en gjennomsnittlig årlig fornyelsesrate på 0,9 %, noe som gjorde at ledningsnettets funksjon ble vurdert som Mangelfull (Norsk_Vann, 2015). Dette gjelder forøvrig et flertall av deltakerne i rapporten. De fleste, inkludert Trondheim, scorer imidlertid bra på faktorer som leveringsstabilitet og hygienisk og bruksmessig kvalitet.

Ifølge May Rostad, faglig ansvarlig for bedreVANN, er disse grenseverdiene basert på en løpende vurdering av beste praksis, og justeres år for år etter hvert som antall deltakerkommuner øker og bedre data blir tilgjengelig (epost-utveksling, 1. mars 2017).

I denne oppgaven var det ønskelig å kunne benytte de ulike ledningskohortenes feilrater som indikator på hvorvidt de tidligere rehabiliteringsratene burde videreføres eller økes/redueres. Rapporten fra Norsk Vann sier riktignok ingenting om hvilke feilrater som kreves for å oppnå god tilstand, bare at flere enn 0,10 lekkasjereparasjoner pr. km pr. år, i kombinasjon med en rehabiliteringsrate på under 0,5 %, kvalifiserer til dårlig tilstand.

Avdelingsleder for vann, avløp og renovasjon i Trondheim kommune, Kristin Greiff Johnsen, har uttalt (epost-utveksling, 5. April 2017) at de blant annet jobber mot følgende mål:

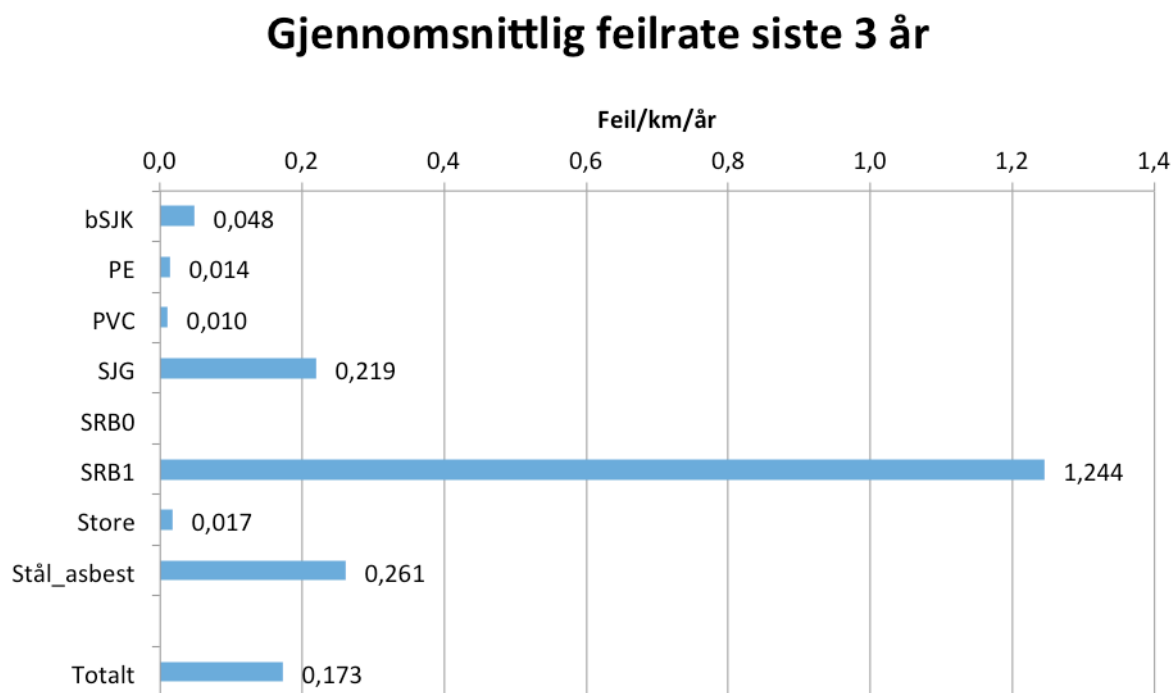
- Oppgraving på ledningsnett: <300 stk/år
- Påviste lekkasjer, kommunal ledning: 130 stk/år
- Lekkasjer på kommunal vannledning: 335 stk

Av disse fremstår målet om påviste lekkasjer som det mest ambisiøse, men mot et ledningsnett på over 791 km, blir dette en rate på 0,16 lekkasjereparasjoner pr. km pr. år (dersom man antar at alle påviste lekkasjer repareres), altså langt over det antallet som bedreVANN klassifiserer som dårlig tilstand. Det som ikke kommer tydelig frem, er om dette derimot uttrykker en ambisjon om aktiv lekkasjesøking, og at kommunen har et mål om å årlig påvise *minst* 130 av de mange lekkasjene som man vet eksisterer på drikkevannsnettet.

Dette er et eksempel på hvorfor lekkasjereparasjoner er en litt vanskelig indikator å ha med å gjøre. Man vet at lekkasjene er der, og jo flere lekkasjer, desto dårligere tilstand på ledningsnettet. Påvisning av lekkasjer, og dermed reparasjon av disse, kan ses på som positivt i form av at lekkasjer blir redusert og at tilstanden til ledningsnettet dermed bedres. Samtidig får man ved påvisning av lekkasjer tallfestet antall feil på ledningsnettet, og økende feilrate assosieres med redusert tilstand.

For å finne en grense for feilraten som kunne kvalifisere til god tilstand, ble det antatt at antall lekkasjereparasjoner pr. km pr. år tilsvarer feilraten. Det ble videre funnet naturlig å sammenligne vanntapet ved god og dårlig tilstand i bedreVANN-rapporten, da en kommune med et lavere lekkasjenivå som oftest vil ha færre brudd og et mindre behov for å reparere lekkasjer. Å gå fra dårlig til god tilstand krever en halvering i lekkasjenivået fra 40 % til 20 %, og det ble dermed antatt at $< 0,05$ lekkasjereparasjoner pr. km pr. år, en halvering av kriteriet for dårlig tilstand, ville være et egnet kriterium for god tilstand.

4.1.3 Valg av rehabiliteringsrater

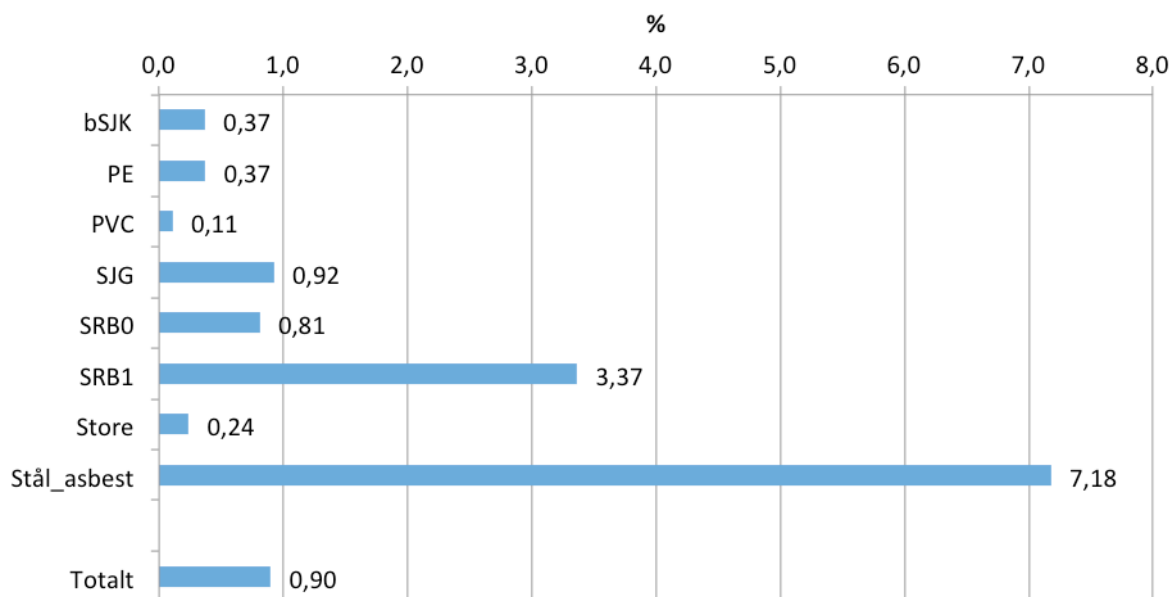


Figur 27 | Feilrate for kohortene beregnet som gjennomsnitt av de siste tre årene

Det er i det følgende antatt at feilraten tilsvarer antall reparasjoner. Figur 27 illustrerer den gjennomsnittlige feilraten (feil/km/år) for de åtte ledningskohortene og for ledningsnettets som helhet basert på ratene fra årene 2013 til 2015. Av figuren kan man se at de tre kohortene SJG, SRB1 og Stål_asbest skiller seg tydelig ut med svært høye feilrater. Dette er i utgangspunktet uproblematisk, så lenge den totale feilraten likevel er lavere enn grenseverdien på 0,05 feil/km/år. Imidlertid har Trondheim Kommune de siste tre årene hatt en gjennomsnittlig feilrate på 0,17 feil/km/år, altså over tre ganger så høyt som grenseverdien.

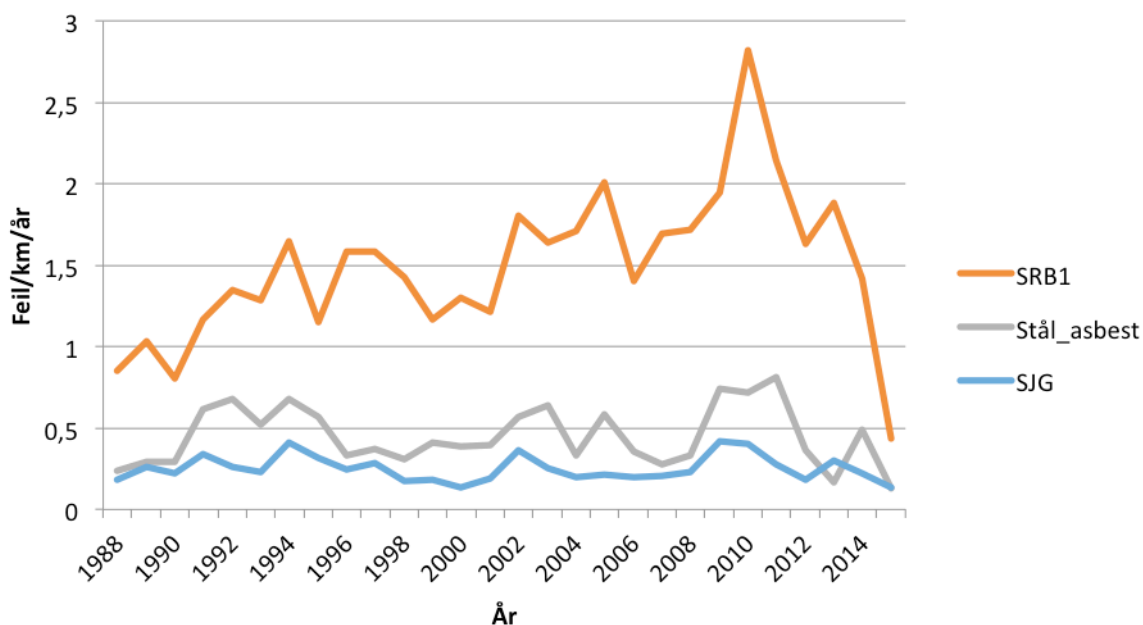
De duktile støpejernsrørene fra perioden 1964-1975 er delt opp i SRB0, som bare består av ledninger som det ikke er registrert feil på, og SRB1, som bare består av ledninger som har hatt feil. SRB0 har naturlig nok en feilrate på 0, mens SRB1 dermed har en overdrevent høy feilrate. Ved å betrakte de to kohortene som én, ville feilraten blitt 0,574 feil/km/år. Dette er fortsatt langt over de øvrige kohortene, og den totale feilraten ville naturligvis forblitt uendret.

Gjennomsnittlig rehabiliteringsrate siste 3 år



Figur 28 | Rehabiliteringsrate for kohortene beregnet som gjennomsnitt av de siste tre årene

Av Figur 28, som illustrerer den prosentvise rehabiliteringen av ledningskohortene i gjennomsnitt basert på år 2013 til 2015, kan man se at de samme tre kohortene også her ligger høyest, selv om forskjellene ikke er like store. Med andre ord er innsatsen på de tre kohortene allerede stor, men ikke stor nok til å oppnå et akseptabelt service-nivå i henhold til det definerte kriteriet for god tilstand.



Figur 29 | Utvikling av feilraten til de tre mest kritiske ledningsgruppene

Figur 29 illustrerer hvordan feilraten til de tre mest kritiske ledningsgruppene har utviklet seg gjennom de tre siste tiårene. Feilraten til SRB1 har, i tillegg til å være den høyeste, hatt en ganske tydelig økning. Det skyldes nok hovedsakelig at det årlige antallet feil har vært relativt jevnt, mens den totale ledningslengden har sunket år for år. I 2015 var lengden på denne ledningsgruppen redusert til i underkant av 60 % av hva den var 30 år tidligere. Ifølge Bruaset *et al.* (2017) bør en slik økende feilrate håndteres med en gradvis økt rehabiliteringsrate og overvåking av effekten. Det anbefales derfor å starte med en rehabiliteringsrate på 4 %, som i løpet av en tiårsperiode økes til 6 %.

De to andre ledningsgruppene har hatt en noe mer jevn feilrate som er mye lavere enn for SRB1. Felles for alle tre gruppene er at de har hatt en synkende trend de senere årene, men denne trenden kan man også finne igjen i tidlige perioder, hvorpå feilraten har steget igjen, og bør nok derfor ikke vektlegges for tungt.

Stål_asbest-kohorten er den minste av alle kohortene, og utgjør bare i underkant av 2 % av hele drikkevannsnettet. Den består av ledningsmaterialer som det i dag legges minimalt av, og minker derfor hurtig. Ved å anbefale en rehabiliteringsrate på 10 %, vil hele kohorten være erstattet i løpet av en tiårsperiode.

SJG holder seg, som Stål_asbest, på et jevnt høyt nivå, men utgjør derimot en mye større andel av drikkevannsnettet. Denne bør derfor, som SRB1, økes gradvis over en tiårsperiode, fra 1,2 % til 1,6 %.

De øvrige ledningsgruppene har til sammenligning så lave feilrater (som alle ligger under 0,05 feil/km/år) at rehabiliteringsratene kan senkes fra starten av. SRB0 foreslås senket til 0,5 %, da det virker lite bærekraftig å opprettholde en så høy rehabiliteringsrate som 0,81 % på en kohort som består av ledninger som det aldri har vært feil på. Om 20 til 30 år, når kohortene som i dag består av primært unge ledninger begynner å bli eldre, vil trolig også deres feilrater utgjøre et større problem. De blir dermed kalibrert med en økning i rehabiliteringsrate frem mot dette. På dette tidspunktet vil trolig så store andeler av de kohortene som i dag er kritiske være rehabilitert, at disse ikke lenger vil bidra like mye til den totale rehabiliteringsraten.

Ved kalibrering av levetidskurver blir dermed følgende rehabiliteringsrater benyttet:

Tabell 6 | Anbefalte rehabiliteringsrater

Kohort	Rehab.rate siste 3 år	Fremtidig rehab.rate		
		% av kohorten		% av total
bSJK	0,37	0,4	(økes til 0,6 ila. 30 år) →	0,13
PE	0,37	0,1	(økes til 0,4 ila. 30 år) ↘	0,01
PVC	0,11	0,05	(økes til 0,4 ila. 30 år) →	0,006
SJG	0,92	1,2	(økes til 1,6 ila. 10 år) ↗	0,25
SRB0	0,81	0,5	↘	0,05
SRB1	3,37	4	(økes til 6 ila. 10 år) ↗	0,31
Store	0,24	0,1	(økes til 0,3 ila. 30 år) ↘	0,01
Stål_asbest	7,18	10	↗	0,19
Sum:				0,956

Piler illustrerer i Tabell 6 om den fremtidige rehabiliteringsraten er en økning, redusering eller omtrentlig videreføring av den gjennomsnittlige rehabiliteringsraten de siste tre årene. Kolonnen helt til høyre viser den umiddelbare rehabiliteringsraten til hver kohort som andel av hele vannledningsnett. Summen er dermed rehabiliteringsraten på drikkevannsnettet som helhet og utgjør en liten økning fra dagens rate, som er på 0,9 %.

Det er imidlertid viktig å påpeke at valg av rehabiliteringsrater til kalibreringen av levetidskurver er et ledd i en iterasjonsprosess som bør gjentas jevnlig, for eksempel hver gang en ny hovedplan skal utarbeides. Rehabiliteringsratene gir dermed først og fremst mening på et taktisk nivå i fornyelsesplanleggingen. Resultatet av de foreslåtte rehabiliteringsratene må observeres og vurderes, slik at nye, og bedre, rater kan foreslås ved neste kalibreringsprosess.

4.1.4 Kalibrering av levetidskurver og input i CARE-W LTP

De foreslåtte fremtidige rehabiliteringsratene ble benyttet i kalibreringsfunksjonen. For hver kohort ble data på operative og allerede rehabiliterte ledninger brukt til å lage kalibrerte levetidskurver ved at en årlig lengde tilsvarende rehabiliteringsraten ble flyttet over fra de operative ledningene. I Vedlegg B finnes for hver kohort både en figur

med historisk levetidskurve og ledningskurve i form av henholdsvis nedlagte/renoverte ledninger og operative ledninger og en figur med den kalibrerte levetidskurven sammen med tilpasset Herz-funksjon. I Tabell 7 er alle kohortenes kalibrerte levetidskurver samlet. Kalibreringsfunksjonen gir kun et midlere resultat, så et slingringsmann på ± 5 år ble tillagt hver verdi for å ha en pessimistisk og en optimistisk input til CARE-W LTP.

Tabell 7 | Verdier fra de kalibrerte levetidskurvene

Kohort	Pessimistisk/optimistisk kurve			Midlere kurve		
	100 %	50 %	10 %	100 %	50 %	10 %
bSJK	0 - 10	95 - 105	170 - 180	5	100	175
PE	0 - 10	120 - 130	210 - 220	5	125	215
PVC	0 - 10	130 - 140	220 - 230	5	135	225
SJG	35 - 45	95 - 105	130 - 140	40	100	135
SRB0	10 - 20	95 - 105	200 - 210	15	100	205
SRB1	15 - 25	40 - 50	60 - 70	20	45	65
Store	30 - 40	75 - 85	135 - 145	35	80	140
Stål_asbest	10 - 20	50 - 60	75 - 85	15	55	80

I CARE-W LTP ble lengde og leggeår på alle ledninger lagt inn for hver kohort i tillegg til de kalibrerte levetidskurvene. For å kunne måle resultatene opp mot bedreVANN sitt krav, var det viktig å blant annet beregne fremtidig feilrate for ledningsnett ved hjelp av programvaren. En "erstatnings-kohort" ble derfor opprettet, og alle de eksisterende kohortene ble valgt å skulle byttes til denne ved rehabilitering. Denne nye kohorten ble tildelt en feilrate det første året på 0,012 feil/km/år med en årlig stigning på 1,14 % av Bruaset og Sægrov (2016). Dagens beregnede feilrater fra Figur 27 ble lagt inn i programmet for de respektive kohortene. For disse ble en årlig stigning på 1,5 % antatt. Tallet er basert på en artikkel av Herz (2002), som argumenterer for en årlig stigning på 2 %. Dette ble vurdert til å være i høyeste laget sammenlignet med stigningen til erstatnings-kohorten, og den ble derfor moderert. På sikt vil også erstatningskohorten kunne forventes å ha en stigning i feilrate på samme nivå som de eksisterende kohortene, men det er naturlig å anta at feilraten vil øke saktere hos nye kohorter enn hos eldre.

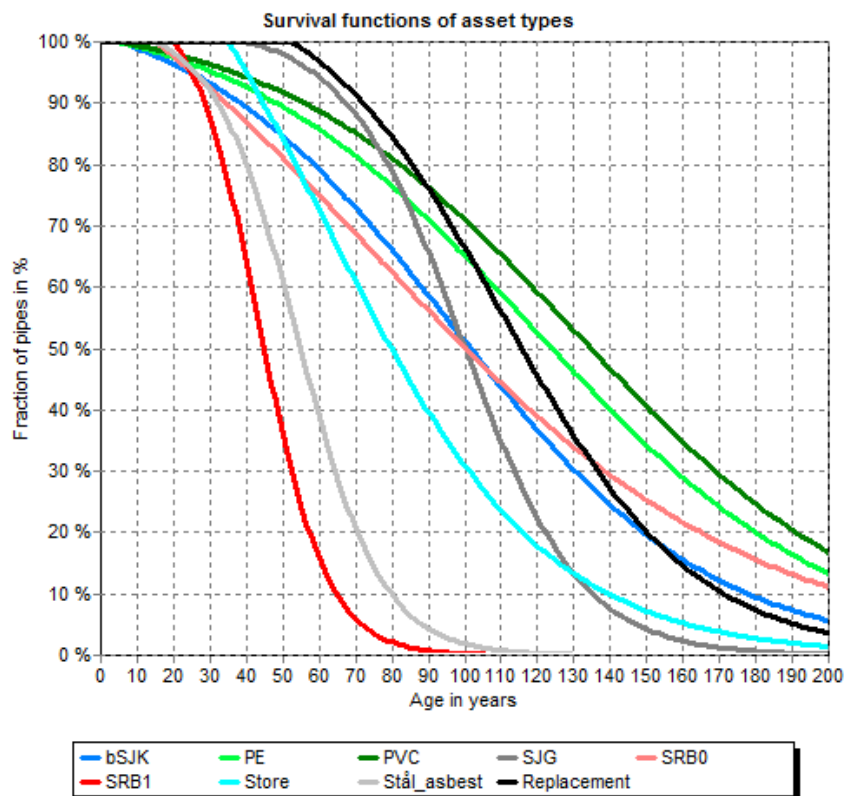
4.2 Resultater og sammenligning med LTP-rapport uten kalibrering

Figur 30 viser levetidskurvene til alle kohortene generert av CARE-W LTP fra tallene i Tabell 7. I tillegg til de åtte kohortene er også erstatningskohorten inkludert med sort strek. Ettersom denne kohorten kun er fiktiv, er den i motsetning til de andre kohortene ikke basert på historiske rehabiliteringsdata, men rene antagelser.

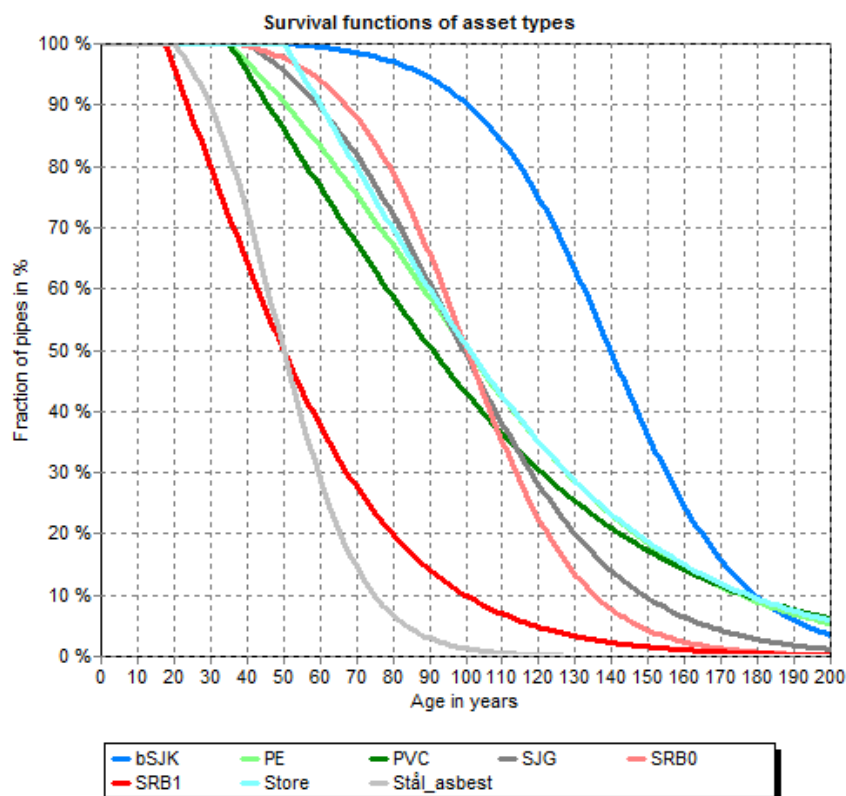
Av Figur 31, som viser de antatte levetidskurvene fra rapporten til Trondheim Kommune, kan man se at alle kohortene har en motstandstid, altså en minstetid før man tidligst kan forvente rehabilitering, på rundt 20 til 50 år. Dette kommer av at levetidskurvene hovedsakelig gjenspeiler rehabilitering som en konsekvens av fysisk tilstand. De historiske levetidskurvene, som danner grunnlaget for de kalibrerte levetidskurvene, inneholder derimot ledninger som er rehabilitert av årsaker langt utover bare fysisk tilstand. Disse årsakene kan være koordinering med andre prosjekter, behov for økt hydraulisk kapasitet, sonevis utskifting osv. De fleste kohortene har dermed mange tilfeller av ledninger som er blitt rehabilitert i svært ung alder, noe som gjør at motstandstiden til de kalibrerte levetidskurvene er nærmest ikke-eksisterende.

Den kalibrerte levetidskurven til SJG-kohorten har en motstandstid på rundt 40 år, og er dermed en av de kalibrerte ledningskurvene med lengst motstandstid. Dette kommer trolig av at det i nyere tid ikke er blitt lagt nye ledninger i grått støpejern. I tiden frem til man først begynte å registrere rehabilitering har dermed de yngste ledningene rukket å oppnå en viss alder.

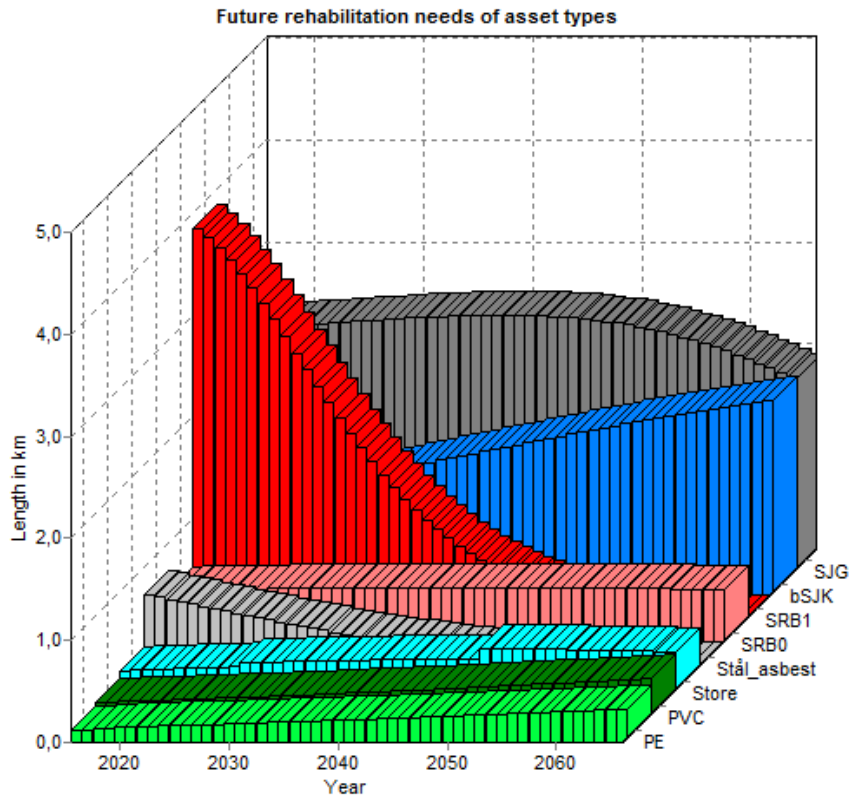
Mange av kohortene har også kalibrerte levetidskurver som er slakere enn de antatte levetidskurvene fra rapporten til Trondheim Kommune. Dette gjelder særlig kohorter som PE og PVC, som på grunn av lave feilrater ble kalibrert med tilsvarende lave rehabiliteringsrater. De ble kalibrert med en gradvis økning i rehabiliteringsratene over 30 år, men dersom feilratene viser seg å stige raskere enn antatt, vil senere kalibreringer kunne gi brattere levetidskurver. SRB1-kohorten består derimot av ledninger lagt innenfor kun en tiårsperiode, og med et stort behov for rehabilitering blir levetidskurven nødvendigvis ganske bratt.



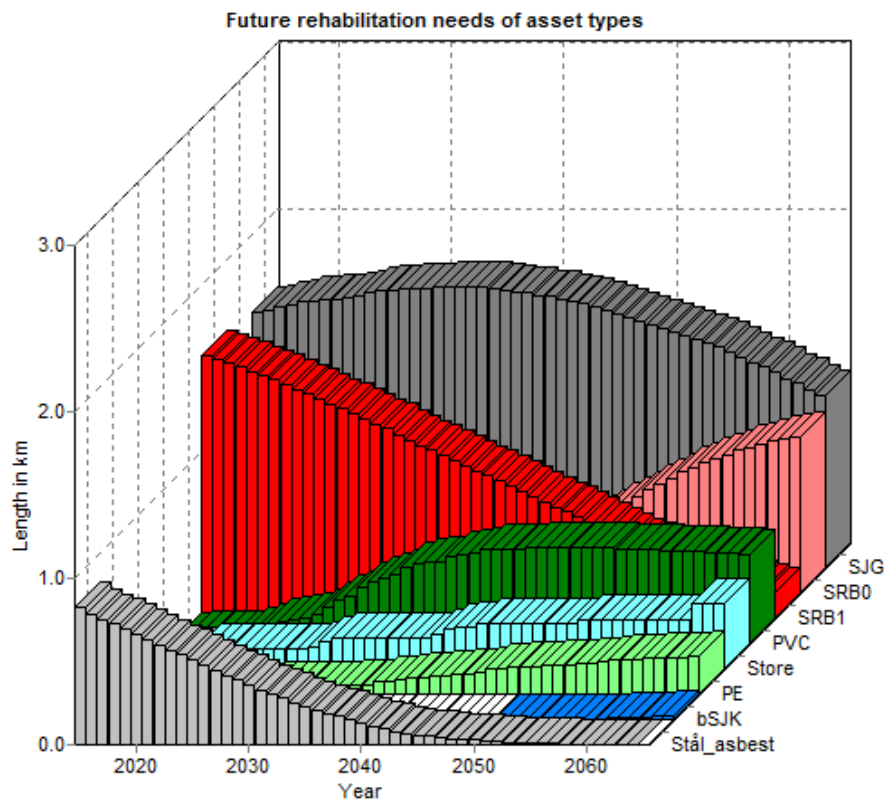
Figur 30 | Kalibrerte levetidskurver fra CARE-W LTP



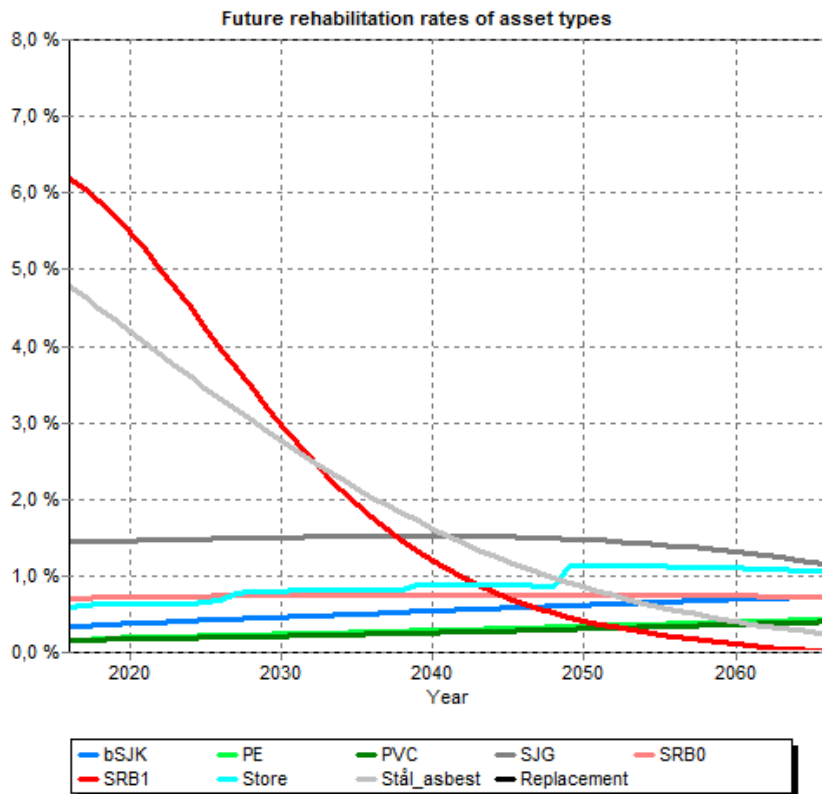
Figur 31 | Levetidskurver fra rapporten til kommunen (Selseth og Røstum, 2014)



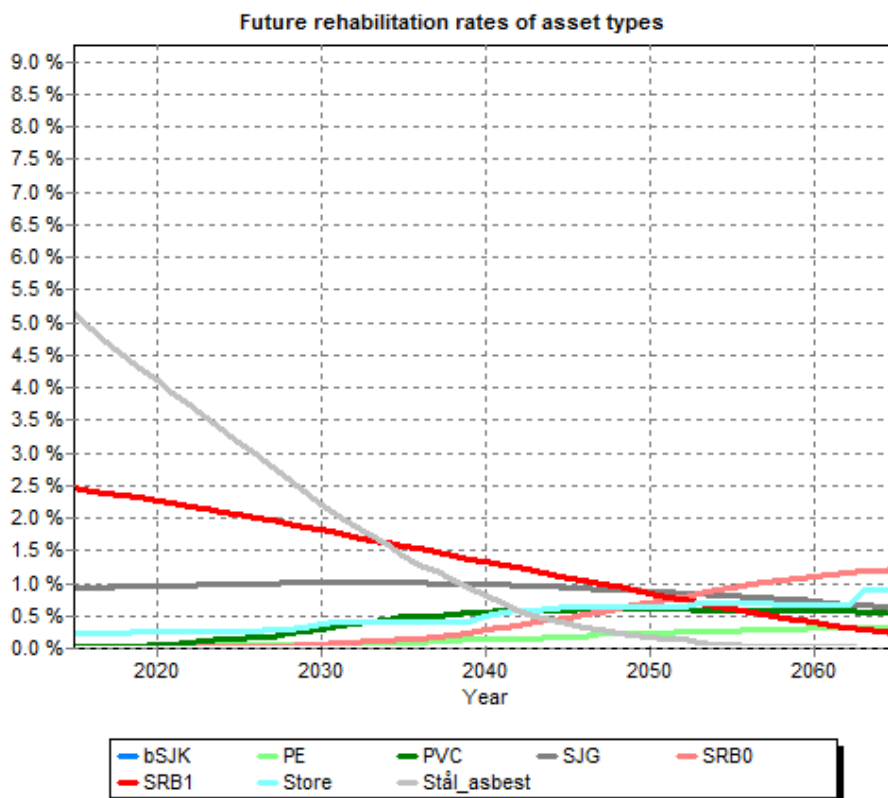
Figur 32 | Fremtidig rehabiliteringsbehov basert på de kalibrerte levetidsskurvene



Figur 33 | Fremtidig rehabiliteringsbehov fra rapporten til kommunen (Selseth og Røstum, 2014)



Figur 34 | Fremtidige rehabiliteringsrater basert på de kalibrerte levetidskurvene



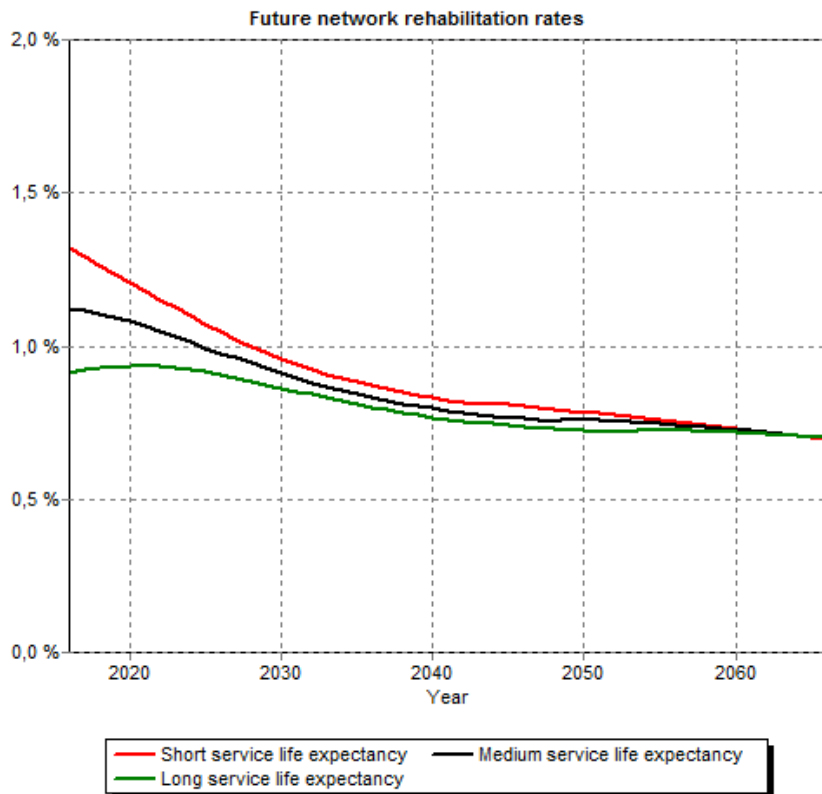
Figur 35 | Fremtidige rehabiliteringsrater fra rapporten til kommunen (Selseth og Røstum, 2014)

Ved å sammenligne de fremtidige rehabiliteringsbehovene på Figur 32 og Figur 33 og rehabiliteringsratene på Figur 34 og Figur 35 ser man at hovedtrekkene for det meste er de samme. Samtidig er de store utslagene fordelt litt ulikt. SRB1, som slett ikke er blant de største kohortene i total lengde, har ledninger som alle er i 40- og 50-årsalderen. Dette er den alderen hvor den kalibrerte levetidskurven er aller brattest, og den umiddelbare rehabiliteringsraten er dermed så stor at kohorten står for det største rehabiliteringsbehovet i årlige rehabiliterte kilometer flere år fremover. Ettersom det beregnede behovet på kohorten umiddelbart er over dobbelt så stort som det rapporten til Trondheim Kommune antyder, minker det også mye raskere.

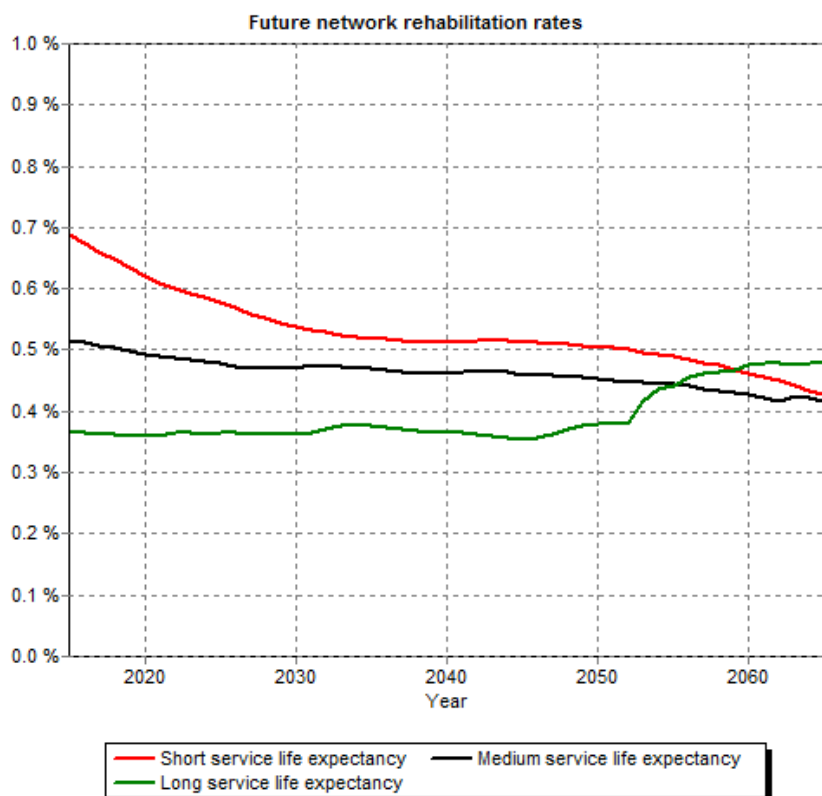
SRB0, som består av ledninger i samme alder som SRB1, har med den kalibrerte levetidskurven fått et jevnt lavt behov for rehabilitering. Dette skyldes at den nåværende rehabiliteringsraten ble vurdert til å være unødvendig høy på en kohort som utelukkende består av feilfrie ledninger. Den senkede rehabiliteringsraten har derfor gitt en mye slakere kalibrert levetidskurve enn den kommunen har anslått, noe som gjenspeiles i både rehabiliteringsbehov og rehabiliteringsrate.

Et av de merkeligste resultatene fra rapporten til Trondheim Kommune er det beregnede rehabiliteringsbehovet på kohorten bSJK. At kohorten som utgjør en tredjedel av ledningsnettets skal ha et nærmest ikke-eksisterende rehabiliteringsbehov de neste 50 årene virker svært lite sannsynlig. Historiske data på feil og rehabiliterte data antyder derimot at behovet for rehabilitering på denne kohorten kan forventes å stige jevnt.

Figur 36 og Figur 37 viser hvordan rehabiliteringsraten for drikkevannsnettets som helhet vil utvikle seg. Trondheim Kommune opererer i sin rapport med større forskjeller mellom pessimistiske og optimistiske verdier for levetidskurvene, noe som gjenspeiles i de tre kurvene i Figur 37. De kalibrerte levetidskurvene, hvor kun 10 år skiller de pessimistiske og optimistiske verdiene, resulterer i en entydig forventet rehabiliteringsrate. Denne rehabiliteringsraten er dessuten mye høyere enn hva rapporten til kommunen forespeiler. I rapporten ligger den fremtidige rehabiliteringsraten på bare 0,5 %. Dette er litt over halvparten av hva som praktiseres i dag, da gjennomsnittlig rehabiliteringsrate fra de siste tre årene ligger på 0,9 %.

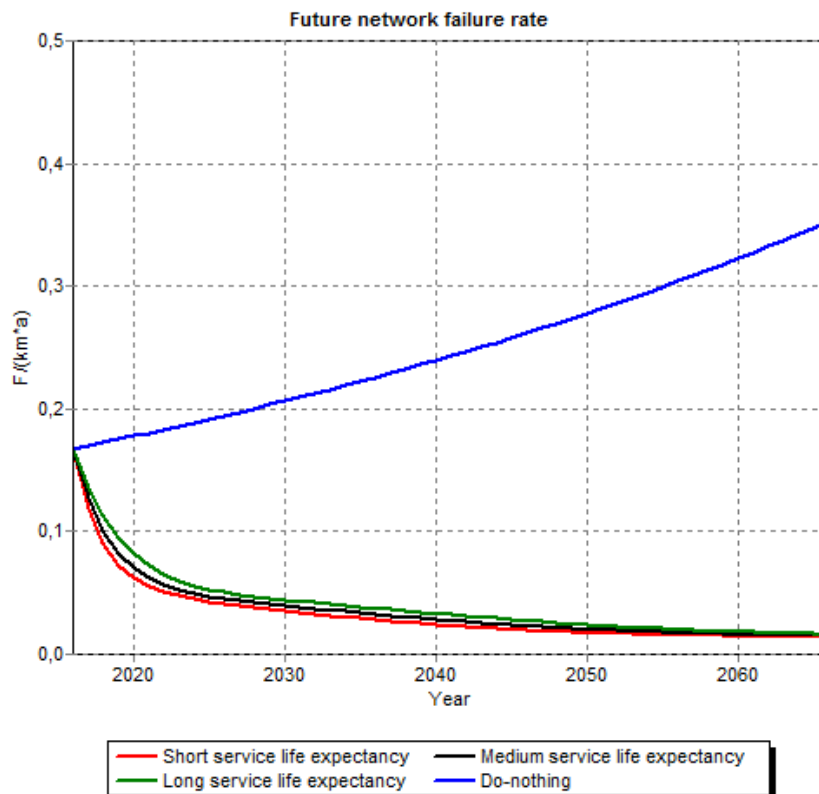


Figur 36 | Rehabiliteringsrate for hele nettet basert på de kalibrerte levetidskurvene



Figur 37 | Rehabiliteringsrate fra rapporten til kommunen (Selseth og Røstum, 2014)

Ved å gå hardere ut, slik rehabiliteringsraten fra de kalibrerte levetidskurvene antyder, vil man kanskje greie å komme ovenpå med rehabiliteringen slik at raten gradvis kan senkes. Figur 38 illustrerer en prognose for den fremtidige feilraten. Den blå kurven viser derimot utviklingen dersom all rehabilitering stanses. I innledningen til case-studiet ble 0,05 feil/km/år foreslått som grenseverdi for at ledningsnettets skulle kvalifisere til god tilstand. Med den foreslåtte rehabiliteringsraten vil ledningsnettets potensielt kunne oppfylle det kravet i løpet av perioden 2020-2030.



Figur 38 | Fremtidig feilrate basert på de kalibrerte levetidskurvene, dagens feilrater og deres forventede økning

5 Diskusjon

Rehabiliteringsratene som Trondheim Kommune presenterer er mye lavere enn de som ble generert av de kalibrerte levetidskurvene. Det er i rapporten deres ikke fokusert på utviklingen av service-nivået, og det kan derfor ikke med sikkerhet fastslås hvordan den fremtidige feilraten vil se ut. Likevel er det tvilsomt at feilraten i nær fremtid vil komme ned på det nivået som her er definert som god tilstand. Trondheim Kommunes mål i denne kategorien viste seg heller ikke å være særlig ambisiøse sammenlignet med kriteriene som bedreVANN stiller til ledningsnettets tilstand. Rapporten til bedreVANN viste imidlertid gode resultater på faktorer som leveringsstabilitet og hygienisk og bruksmessig kvalitet, hvilket tyder på at Trondheim Kommune trolig arbeider ut fra andre innfallsvinkler som ikke fremgår av den langsiktige rehabiliteringsraten.

Grunnen til at rapporten til Trondheim Kommune ender opp med en så mye lavere rehabiliteringsrate enn den som er beregnet i denne oppgaven ligger i forskjellen mellom de antatte og de kalibrerte levetidskurvene. De kalibrerte levetidskurvene, med historiske levetidskurver som grunnlag, inneholder ledninger rehabilitert av eksterne årsaker så vel som fysiske, og har som følge av dette svært kort motstandstid. På mange måter representerer de kalibrerte levetidskurvene dermed gjeldende praksis fremfor hvilket potensiale hver ledning isolert sett og under optimale forhold har til å leve lenge. Levetidskurvene som Trondheim Kommune opererer med er derimot kun basert på ledningenes fysiske tilstand. Kommunen jobber mot interne mål, og andre forutsetninger ligger dermed til grunn for resultatene som presenteres i LTP-rapporten.

Utvelgingsprosessen som kalibreringsfunksjonen benytter seg av er som tidligere nevnt en forenklet tilnærming til virkeligheten. Faktorer som dimensjon, ytre faktorer (dybde, jordsmonn osv.) og kapasitet tas ikke direkte hensyn til, selv om dette for så vidt er faktorer som har vært med å forme aldersfordelingen til de nedlagte og renoverte ledningene til det som kommer frem av analysen. Den automatiske utvelgingsprosessen skiller heller ikke mellom ulike kohorters materialegenskaper og andre faktorer som påvirker levetid, og egner seg dermed dårlig til annet enn langtidsplanlegging på strategisk nivå. Om aldersfordelingen til hver kohort hadde blitt analysert, hadde det trolig vært store variasjoner som resultat av typiske trekk ved hver kohort.

Ett felles utvelgingsprinsipp er med andre ord en kraftig forenkling. Det har samtidig liten hensikt å være for nøyaktig på strategisk nivå, da det uansett er store usikkerheter relatert til det lange tidsperspektivet. Da er det vel så viktig å ta hensyn til brukervennlighet, og at flere er i stand til å benytte seg av verktøyet.

Fornuftig kohortinndeling i kalibreringsprosessen er imidlertid viktig, da dette blant annet vil gi grunnlag for mer presis analyse av utviklingen til service-nivået. Siden resultatene i denne casen skulle sammenlignes med LTP-rapporten til Trondheim Kommune, var kohortinndelingen allerede bestemt.

Utvelgingsprosessen er blitt programmert til å velge ledninger ut fra posisjon på den operative ledningskurven fremfor spesifikk alder. På den måten vil det nødvendigvis velges ut unge ledninger i unge kohorter med liten aldersspredning. Lave feilrater vil imidlertid stimulere til så lave rehabiliteringsrater at det ikke er snakk om mer enn en håndfull ledninger i året. Det er ledninger som trolig vil rehabiliteres av andre årsaker enn alder. Rehabiliteringsraten for slike kohorter bør derimot økes når ledningene begynner å komme opp i en alder hvor det er sannsynlig at feilraten øker.

Fornuftige rehabiliteringsrater er med andre ord kanskje vel så viktig som selve utvelgelsen, og grundig kartlegging av service-nivå er avgjørende for å få et godt resultat. Selv om kalibreringsmetoden på mange måter har en sterkere historisk forankring enn mange andre metoder for langtidsplanlegging, er også denne i stor grad basert på noen antagelser. Det leddet i kalibreringsprosessen som har størst usikkerhet knyttet til seg er nettopp valg av fremtidige rehabiliteringsrater basert på de nåværende rehabiliteringsratene og indikatoren på service-nivå for de ulike kohortene. Dette kommer tydelig frem i de langsiktige rehabiliteringsratene som CARE-W LTP genererer. Disse rehabiliteringsratene stemmer ikke nødvendigvis overens med de anslåtte rehabiliteringsratene som er benyttet til å kalibrere levetidskurvene. Å finne beste rehabiliteringsrate basert på feilrater er en prosess på taktisk nivå, og disse rehabiliteringsratene kan derfor ikke brukes som noen fasit ved planlegging i et langtidsperspektiv. Det strategisk mest fornuftige rehabiliteringsnivået finner man først når de taktiske rehabiliteringsratene er knyttet opp mot historiske levetidskurver og aldersfordelingen på det eksisterende ledningsnett gjennom den foreslåtte og nå automatiserte kalibreringsmetoden.

Rehabiliteringsraten til unge kohorter er som regel lav, men vil nødvendigvis øke med alderen. Kalibreringsfunksjonen åpner for dette ved at den er konstruert med mulighet for å endre rehabiliteringsraten underveis. Samtidig som en tilstrekkelig høy rehabiliteringsrate er viktig, er det lite bærekraftig å kalibrere med en høyere rehabiliteringsrate enn det som er nødvendig. Om rehabiliteringsraten er aldri så høy, vil man uansett ikke greie å oppnå et akseptabelt service-nivå dersom "feil" ledninger velges ut til rehabilitering. På samme måte hjelper det ikke om de riktige ledningene velges, så lenge rehabiliteringsraten er for lav. Dette understreker hvor tett det strategiske og det taktiske nivået i fornyelsesplanlegging henger sammen, ettersom valg av ledninger til rehabilitering foregår på taktisk nivå.

Viktigheten av å gjenta kalibreringsprosessen jevnlig er stor. For hver gang prosessen gjentas, for eksempel i forbindelse med ny hovedplan, vil man både ha flere ledninger i den historiske levetidskurven og en tydeligere trend å basere fremtidige rehabiliteringsrater på. Den historiske levetidskurven er på mange måter fasiten, da denne utelukkende består av allerede rehabiliterte ledninger. Dette kan være et problem for gamle kohorter, ettersom mange ledninger er blitt rehabilitert før det ble vanlig å loggføre drifts- og vedlikeholds-operasjoner. Slike tilfeller av venstre-avkortede data innebærer kalibreringsmetoden ingen korrigeringsfor. Det gjør derimot metoden til Large *et al.* (2015), som ble gjennomgått i prosjektoppgaven (Okstad, 2016).

Med økende alder vil den historiske levetidskurven utgjøre en stadig større del av den kalibrerte levetidskurven, ettersom andelen ledninger i kohorten som er blitt rehabilitert øker og andelen gjenværende operative ledninger dermed minker. Aldringsfaktoren a i Herz-funksjonen, som bestemmes av helningen til levetidskurven, vil dermed kunne fastslås med stadig større sikkerhet. Etter hvert, når den historiske levetidskurven blir tilstrekkelig lang, vil denne kunne brukes som levetidskurve uten å måtte kalibrere med de operative ledningene.

6 Konklusjon

Aldersfordelingen på nedlagte og renoverte vannledninger varierer fra kommune til kommune. Noen trender er imidlertid like, og den mest gjennomgående ser ut til å være hvor på ledningskurven de rehabiliterte ledningene er hentet fra. Dette er derfor valgt som grunnlag for utvelgingsprinsippet i kalibreringsfunksjonen. Vannverk oppfordres til å utføre en egen aldersanalyse dersom de skal gjennomføre kalibrering. Om det ikke er ressurser nok til å gjennomføre en slik analyse, foreslås det å benytte 65 % og 10 % som input-parametere i kalibreringsfunksjonen, da dette var representativt for de to største byene i analysen.

Kalibreringsprosessen gir levetidskurver med større forankring i empiriske data. Ved å tettere knytte sammen taktisk og strategisk planleggingsnivå, vil de kalibrerte levetidskurvene mer aktivt kunne bidra til bedre tilstand på ledningsnettet. Den konstruerte kalibreringsfunksjonen innebærer en automatisk utvelgelse basert på en forenklet tilnærming til den virkeligheten som aldersanalysen fremstiller. Med den store usikkerheten som uansett er relatert til tidsperspektivet på strategisk nivå, vil dette trolig gi kalibrerte levetidskurver som er gode nok til å si noe om det fremtidige rehabiliteringsbehovet. Usikkerheten vil forøvrig reduseres av at både historiske data og service-nivå som kalibreringsparameter blir benyttet i kalibreringsprosessen. Ikke minst, vil prosessen resultere i mer presise levetidskurver for hver gang den gjentas, ettersom det historiske grunnlaget stadig øker.

Ut fra definisjonen på god tilstand som her er blitt foreslått med bedreVANN som utgangspunkt, viser case-studiet at ledningsnettet i Trondheim Kommune har en feilrate som er for høy. Dette kan bedres dersom det blir fokusert på å øke rehabiliteringsraten til de mest kritiske kohortene. Det vil trolig gå på bekostning av andre kohorter, men mange av kohortene har så lave feilrater at rehabiliteringsraten til disse godt kan senkes uten at det vil ha negative konsekvenser. Å opprettholde en høyere rehabiliteringsrate enn det som er nødvendig er derimot lite bærekraftig. Ved en økt innsats i rehabiliteringen av de grå støpejerns-rørene, de ubeskyttede duktile støpejernsrørene og stål- og asbestsementrørene, vil ledningsnettets feilrate potensielt kunne komme ned på under 0,05 feil/km/år i løpet av en tiårsperiode.

7 Referanser

- BRUASET, S. & SÆGROV, S. 2016. Sustainable management of urban water infrastructures by implementation of a risk-based framework for long-term rehabilitation- and capital maintenance planning. *Under review*.
- BRUASET, S., SÆGROV, S. & UGARELLI, R. 2017. Performance-based modelling of long-term deterioration to support rehabilitation- and investment decisions in drinking water distribution systems. *Under review*.
- HERZ, R. 1996. Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 45, 221-231.
- 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. 2003. Software for strategic network rehabilitation and investment planning. *Water Intelligence Online*.
- LARGE, A., LE GAT, Y., ELACHACHI, S., RENAUD, E., BREYSSE, D. & TOMASIAN, M. 2015. Improved modelling of 'long-term' future performance of drinking water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 64, 404-414.
- 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.
- MICROSOFT. 2007. *Introduction to macros* [Online]. Microsoft Office. Available: <https://support.office.com/en-US/article/Introduction-to-macros-A39C2A26-E745-4957-8D06-89E0B435AAC3> [Accessed 16. 05. 2017].
- NORSK_VANN 2015. Tilstandsvurdering av kommunale vann- og avløpstjenester. bedreVann.no.
- OKSTAD, M. 2016. *Modellering av langtidsbehov for fornyelse av drikkevannsledninger*. Thesis (MSC), Norwegian University of Science and Technology.
- POBOČÍKOVÁ, I. & SEDLIAČKOVÁ, Z. 2014. Comparison of Four Methods for Estimating the Weibull Distribution Parameters. *Applied Mathematical Sciences*, 8, 4137-4149.

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.

SELSETH, I. & RØSTUM, J. 2014. Langtidsrehabiliteringsbehov for vannledninger i Trondheim Kommune. SINTEF Byggforsk.

Vedlegg

Vedlegg A:

Fullstendig kode til kalibreringsfunksjonen

```
Sub Kalibrering()  
  
    'Feilmeldinger ved manglende innstillinger  
    If Range("Q6") = "" Then  
        MsgBox "Angi første analyseår i innstillinger!"  
        Exit Sub  
    ElseIf Range("Q8") = "" Then  
        MsgBox "Angi rehabiliteringsrate i innstillinger!"  
        Exit Sub  
    ElseIf Range("Q19") = "" Then  
        MsgBox "Angi øvre grenseverdi i avanserte innstillinger!"  
        Exit Sub  
    ElseIf Range("Q20") = "" Then  
        MsgBox "Angi nedre grenseverdi i avanserte innstillinger!"  
        Exit Sub  
    End If  
  
    'Kontrollspørsmål før kalibreringen starter  
    If MsgBox("Vil du starte kalibrering av levetidskurve?", vbYesNo _  
        + vbQuestion) = vbYes Then  
  
        Application.ScreenUpdating = False  
  
        Dim wsIn As Worksheet  
        Dim wsRes As Worksheet  
        Dim wsHerz As Worksheet  
        Set wsIn = Worksheets(1)  
        Set wsRes = Worksheets(2)  
        Set wsHerz = Worksheets(3)  
  
        Dim varYear As Integer  
        Dim newRateYear_I As Integer  
        Dim newRateYear_II As Integer  
        Dim startRate As Double  
        Dim newRate_I As Double  
        Dim newRate_II As Double  
        Dim startAntO As Integer  
        Dim AntO As Integer  
        Dim AntN As Integer  
        Dim startLenO As Double  
        Dim LenO As Double  
        Dim firstORow As Integer  
        Dim endListRow As Integer
```

```

Dim arligLengde As Double
Dim arligAntall As Double
Dim lengde As Double
Dim prosOpp As Integer
Dim prosNed As Integer
Dim stdEldst As Integer
Dim stdYngst As Integer
Dim snittAlder As Integer
Dim stdAvvik As Integer
Dim tilfeldig As Double
Dim normFord As Double
Dim antAlder As Double
Dim alder As Integer

'Fjern evt. tall i Restultat-arket
wsRes.Activate
Range("C6", Cells(6, "F").End(xlDown)).ClearContents
Range("L6", "L8").ClearContents

'Skaff oversikt over antall og lengde
wsIn.Activate
startAntO = Range(Cells(6, "E"), Cells(6, "E").End(xlDown)).Count
AntO = startAntO
AntN = Range(Cells(6, "I"), Cells(6, "I").End(xlDown)).Count
startLenO = WorksheetFunction.Sum(Range(Cells(6, "D"), Cells _
(6, "D").End(xlDown)).Value)
LenO = startLenO
firstORow = AntN + 6
endListRow = AntO + AntN + 5

'Verdier fra innstillinger
varYear = Range("Q6").Value
startRate = Range("Q8").Value
newRateYear_I = Range("O13").Value
newRate_I = Range("Q13").Value
newRateYear_II = Range("O14").Value
newRate_II = Range("Q14").Value
prosOpp = Range("Q19").Value
prosNed = Range("Q20").Value

'Årlig nedlagt lengde gitt av rehabiliteringsraten
arligLengde = startRate * startLenO / 100
'Årlig (omtrentlig) antall nedlagte ledninger
arligAntall = startRate * startAntO / 100

'Kopier nedlagte ledninger over i Resultat-ark
wsIn.Range(Cells(6, "H"), Cells(6, "H").End(xlDown).Offset(0, 1)).Copy
wsRes.Range("D6").PasteSpecial

```

```

'Kopier operative ledninger over i Resultat-ark
wsIn.Range(Cells(6, "D"), Cells(6, "E").End(xlDown)).Copy
wsRes.Activate
Cells(firstORow, "D").PasteSpecial

'Fyll inn alder på operative ledninger ved første analyseår
For Each cell In Range(Cells(firstORow, "E"), Cells(endListRow, "E"))
    cell.Value = varYear - cell.Value
Next

'Klassifiser som operativ eller nedlagt
Range(Cells(6, "F"), Cells(firstORow - 1, "F")).Value = 0
Range(Cells(firstORow, "F"), Cells(endListRow, "F")).Value = 1

'Fyll inn prosentverdi
Range("C6").Value = 100
Range("C7").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-1]C-100/Input!R34C17"
Selection.Copy
Range("C7", Cells(endListRow, "C")).Select
Selection.PasteSpecial
Range("C6").Select

'Sorter nedl. og opr. ledninger hver for seg fra yngst til eldst
Range("D6", Cells(endListRow, "F")).Sort key1:=Range("F6"), _
    order1:=xlAscending, key2:=Range("E6"), order2:=xlAscending

Do While arligLengde < Len0

    'Beregn standardavvik basert på øvre og nedre prosentverdi
    stdEldst = Cells(firstORow + CInt(AntO * _
(1 - (prosNed / 100))), "E").Value
    stdYngst = Cells(firstORow + CInt(AntO * _
(1 - (prosOpp / 100))), "E").Value
    stdAvvik = (stdEldst - stdYngst) / 2
    'Forhindre at standardavviket blir 0 når det er få ledninger igjen
    If stdAvvik < 1 Then
        stdAvvik = 1
        snittAlder = Cells(firstORow, "E").Value
    Else
        'Beregn gj.snittsalder basert på øvre og nedre prosentverdi
        snittAlder = (stdEldst + stdYngst) / 2
    End If

    'Gå gjennom lista med operative ledninger
    For Each cell In Range(Cells(firstORow, "D"), _
Cells(endListRow, "D"))

        If cell.Offset(0, 1).Value <> alder Then
            alder = cell.Offset(0, 1).Value

```

```

'Definer sannsynligheten for at ledninger med gjeldende
  alder blir nedlagt basert på normalfordeling
normFord = WorksheetFunction.NormDist _
  (alder, snittAlder, stdAvvik, 0)
'Finn antall ledninger med gjeldende alder
antAlder = WorksheetFunction.CountIf(Range(Cells _
  (firstORow, "E"), Cells(endListRow, "E")), alder)
End If

'Generer tilfeldig desimaltall mellom 0 og 1
tilfeldig = Rnd

If tilfeldig < (normFord * arligAntall / antAlder) Then
  'Ved nedleggelse:
  cell.Offset(0, 2).Value = 0
  AntN = AntN + 1
  AntO = AntO - 1
  lengde = lengde + cell.Value
End If

'Avslutt listegjennomgangen dersom årlig lengde er nådd
If lengde > arligLengde Then
  Exit For
End If
Next

'Sorter ledningene på nytt
Range("D6", Cells(endListRow, "F")).Sort key1:=Range("F6"), _
order1:=xlAscending, key2:=Range("E6"), order2:=xlAscending

firstORow = AntN + 6

If lengde > arligLengde Then
  'Dersom årlig lengde er nådd
  LenO = LenO - lengde
  lengde = 0

  'Øk alder på operative ledninger med 1 år
  For rad = firstORow To endListRow
    Cells(rad, "E").Value = Cells(rad, "E").Value + 1
  Next
  varYear = varYear + 1

  'Evt. endre rehabiliteringsrate
  If varYear = newRateYear_I Then
    arligLengde = newRate_I * startLenO / 100
    arligAntall = newRate_I * startAntO / 100
  ElseIf varYear = newRateYear_II Then
    arligLengde = newRate_II * startLenO / 100
    arligAntall = newRate_II * startAntO / 100

```

```

        End If
    End If

Loop

'Legg ned de siste opr. ledn. ved å endre statusen deres fra 1 til 0
Range(Cells(firstORow, "F"), Cells(endListRow, "F")).Value = 0

'Sorter én siste gang
Range("D6", Cells(endListRow, "F")).Sort key1:=Range("F6"), _
    order1:=xlAscending, key2:=Range("E6"), order2:=xlAscending

'Hent ut verdier for 100, 50 og 10 %

Dim prosentC As Boolean
Dim prosentL As Boolean
Dim prosentX As Boolean
prosentC = False
prosentL = False
prosentX = False

'Yngste alder som har mer enn 1 ledning
For Each cell In Range("C6", Cells(endListRow, "C"))
    If (cell.Offset(1, 2).Value = cell.Offset(0, 2).Value) And _
        prosentC = False Then
        Range("L6").Value = cell.Offset(0, 2).Value
        prosentC = True
    End If

    If cell.Value < 50 And prosentL = False Then
        Range("L7").Value = cell.Offset(-1, 2).Value
        prosentL = True
    End If

    If cell.Value < 10 And prosentX = False Then
        Range("L8").Value = cell.Offset(-1, 2).Value
        prosentX = True
        Exit For
    End If
Next

'Fjern evt. tall i Herz-arket
wsHerz.Activate
Range("C6", Cells(6, "C").End(xlDown).Offset(0, 8)).ClearContents
Range("P6", "P17").ClearContents

wsRes.Activate
Range("L6").Select

```



```
Application.CutCopyMode = False  
Application.ScreenUpdating = True
```

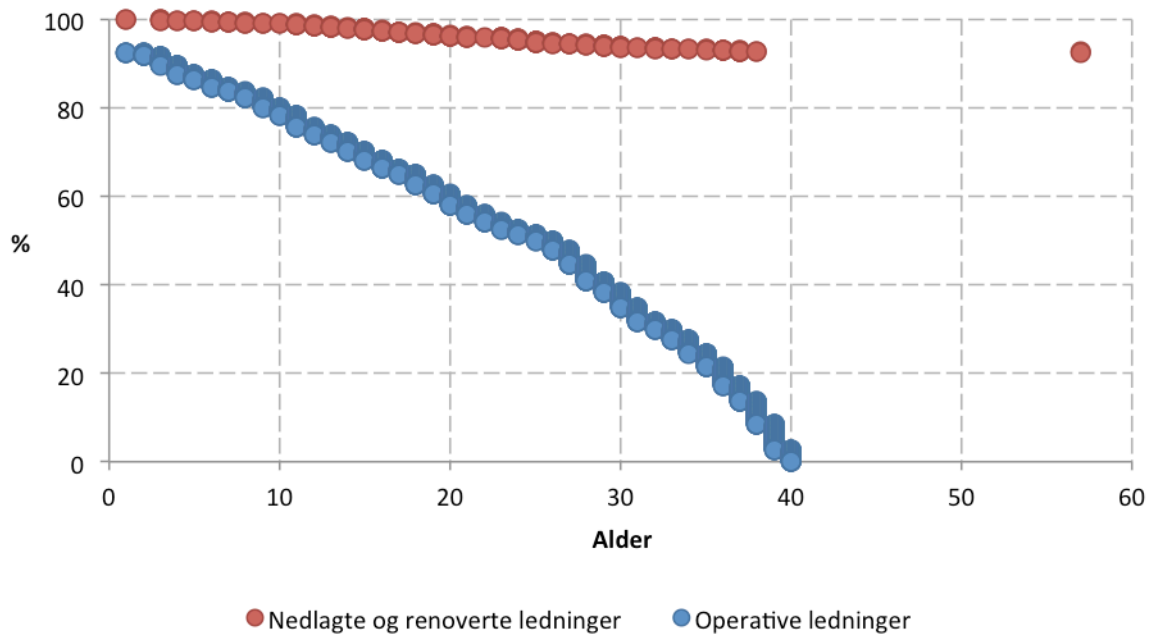
```
End If
```

```
End Sub
```

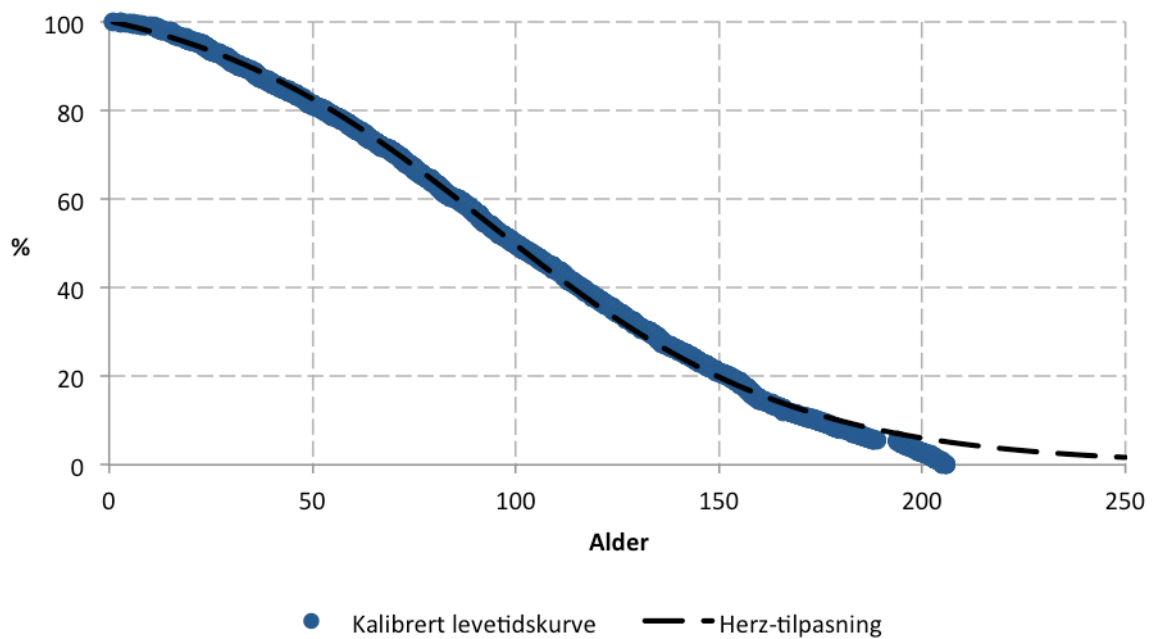
Vedlegg B:

Figurer fra kalibreringsfunksjonen

bSJK:

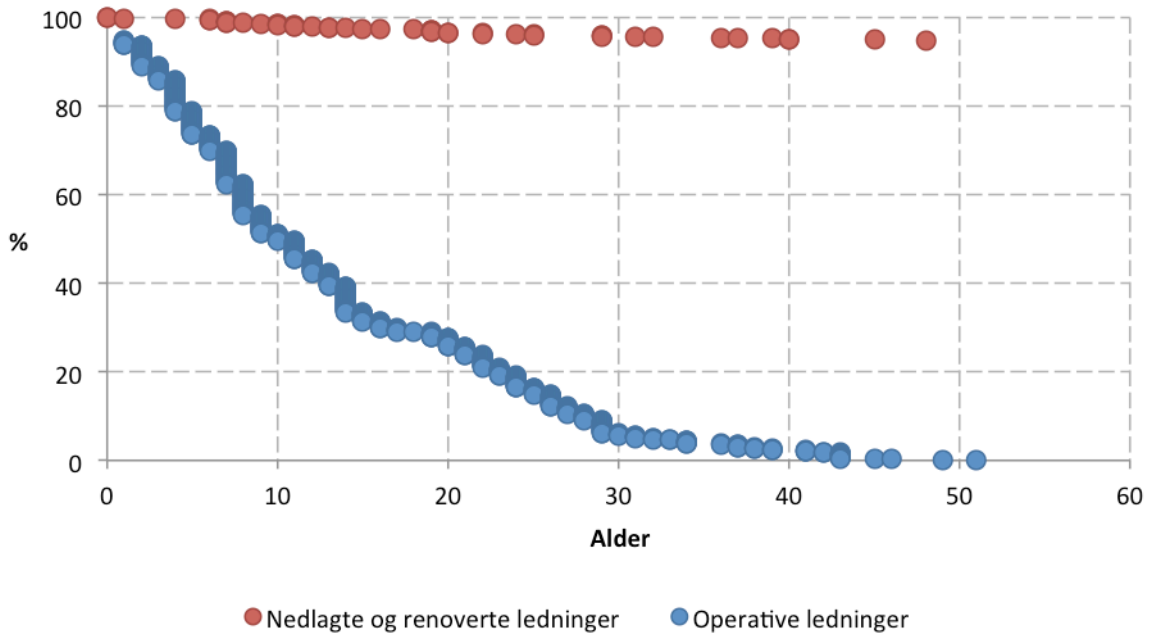


Figur B-1 | Historisk levetidsskurve og operativ ledningskurve for kohorten *bSJK*

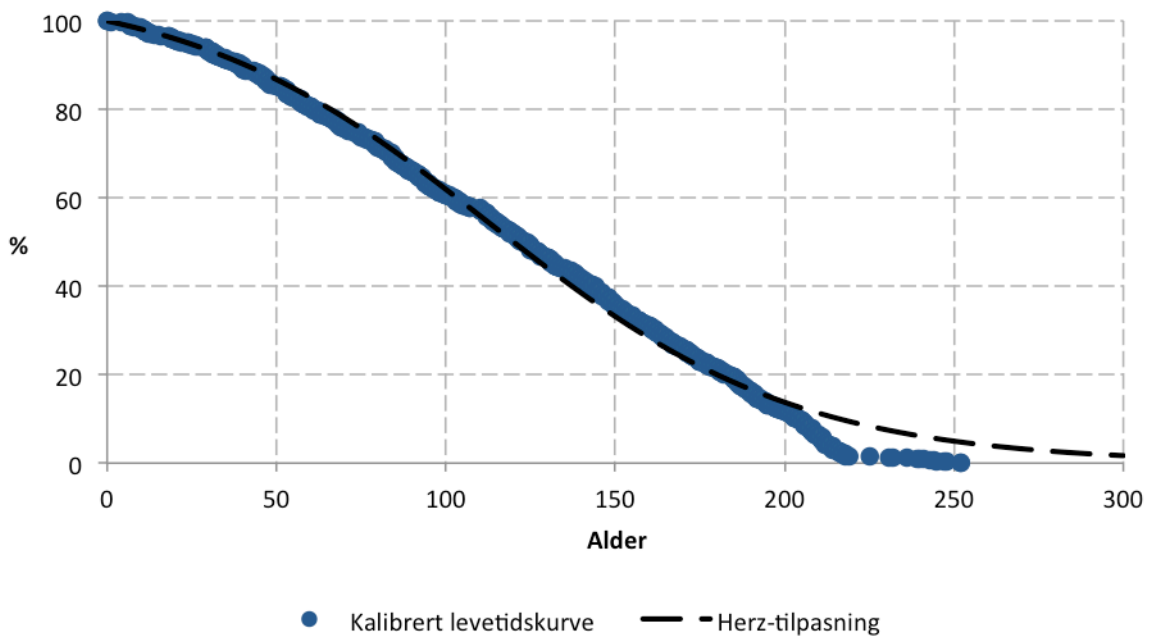


Figur B-2 | Kalibrert levetidsskurve og tilpasset Herz-kurve for kohorten *bSJK*

PE:

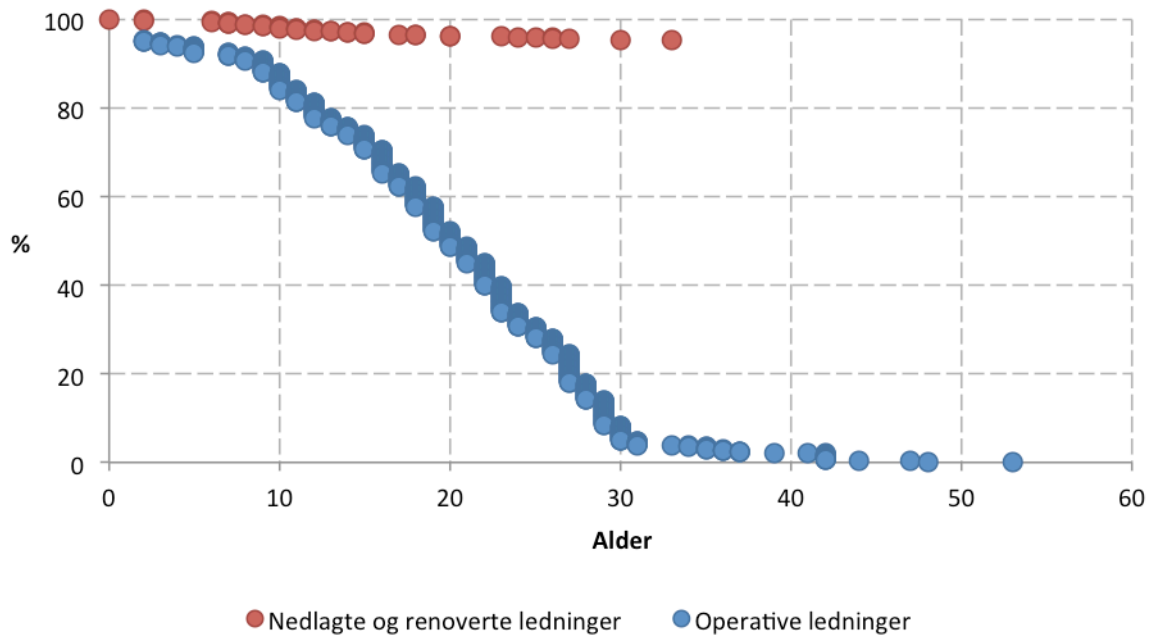


Figur B-3 | Historisk levetidsskurve og operativ ledningskurve for kohorten PE

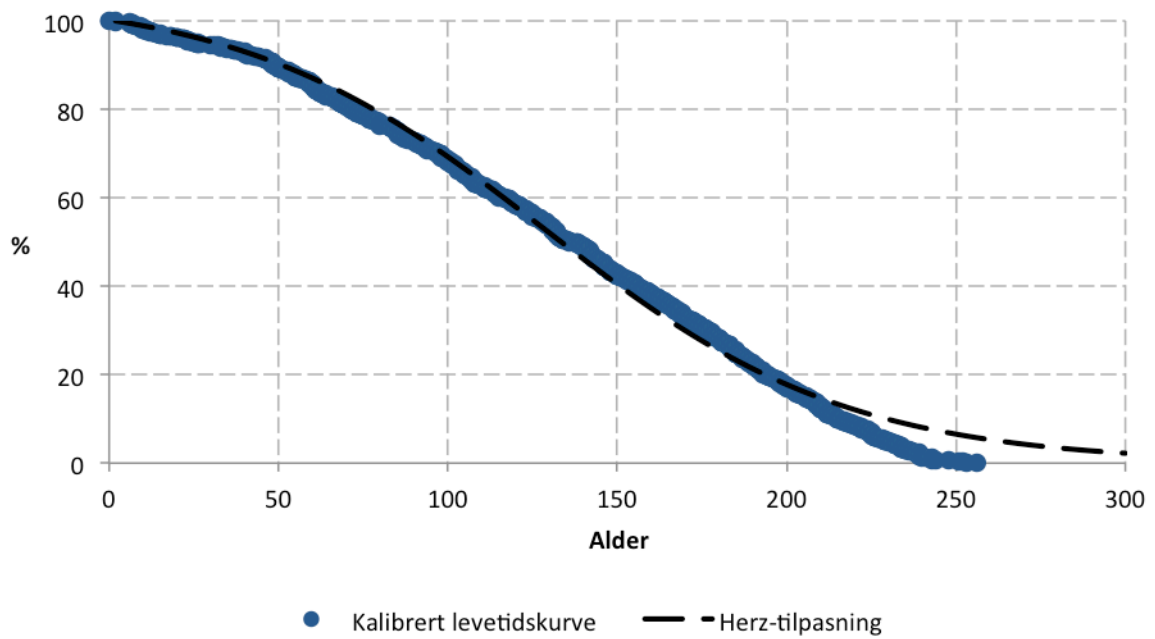


Figur B-4 | Kalibrert levetidsskurve og tilpasset Herz-kurve for kohorten PE

PVC:

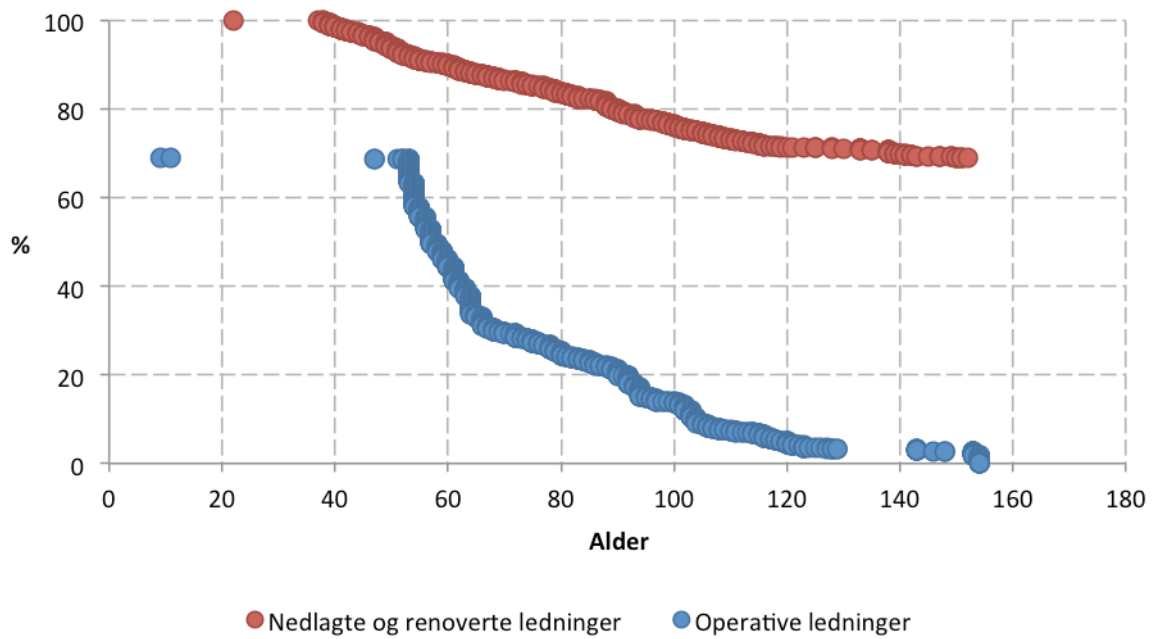


Figur B-5 | Historisk levetidskurve og operativ ledningskurve for kohorten PVC

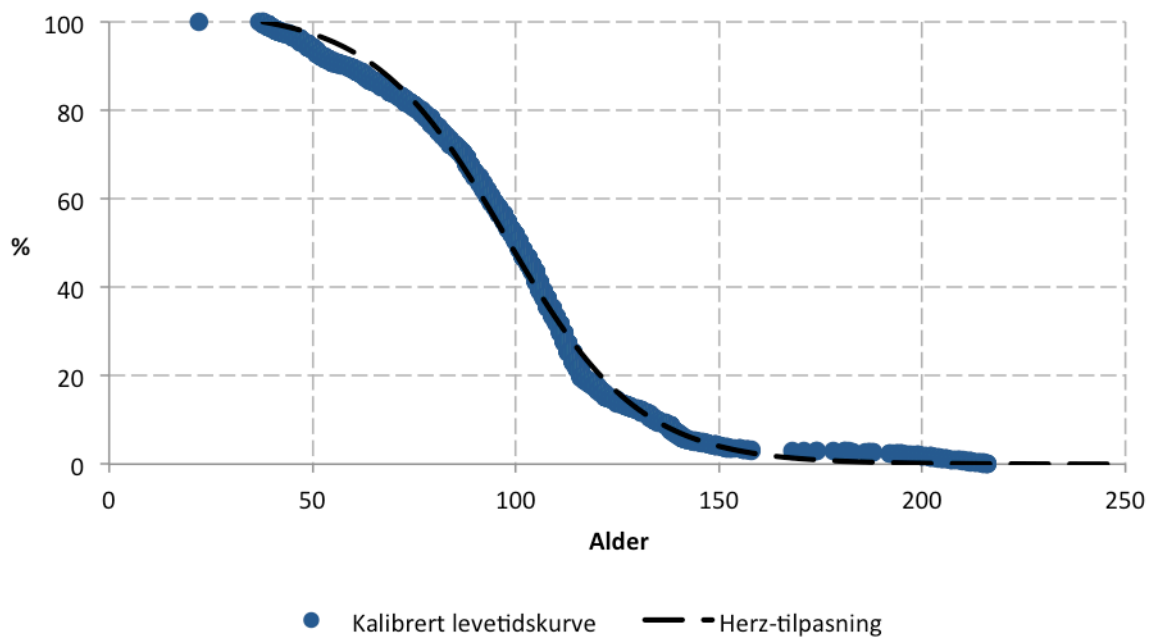


Figur B-6 | Kalibrert levetidskurve og tilpasset Herz-kurve for kohorten PVC

SJG:

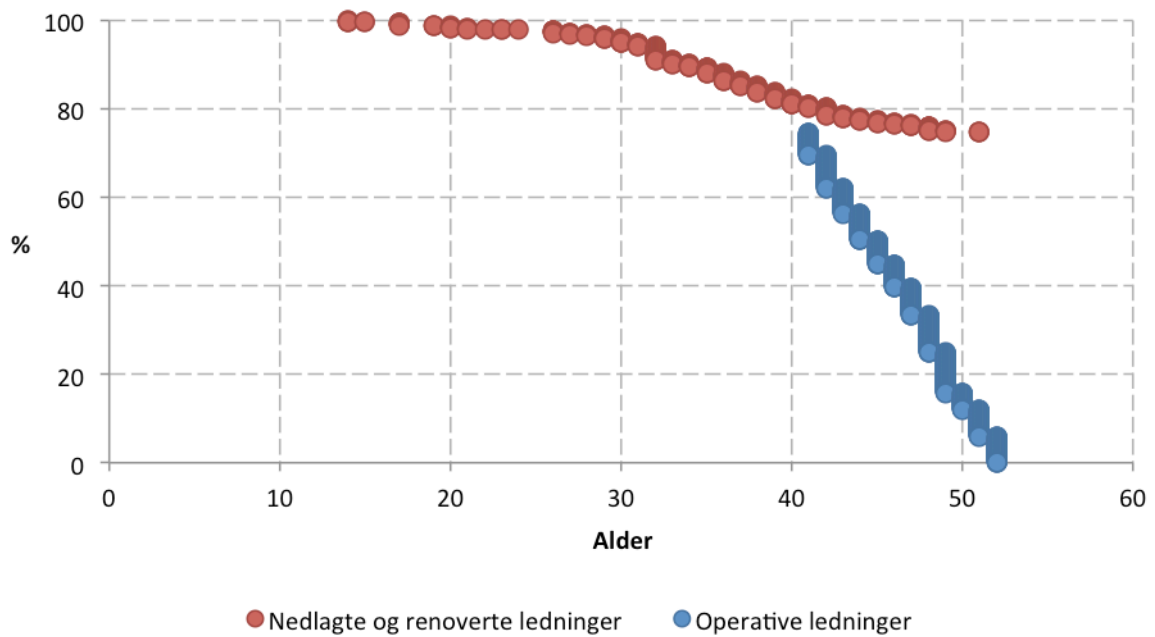


Figur B-7 | Historisk levetidskurve og operativ ledningskurve for kohorten SJG

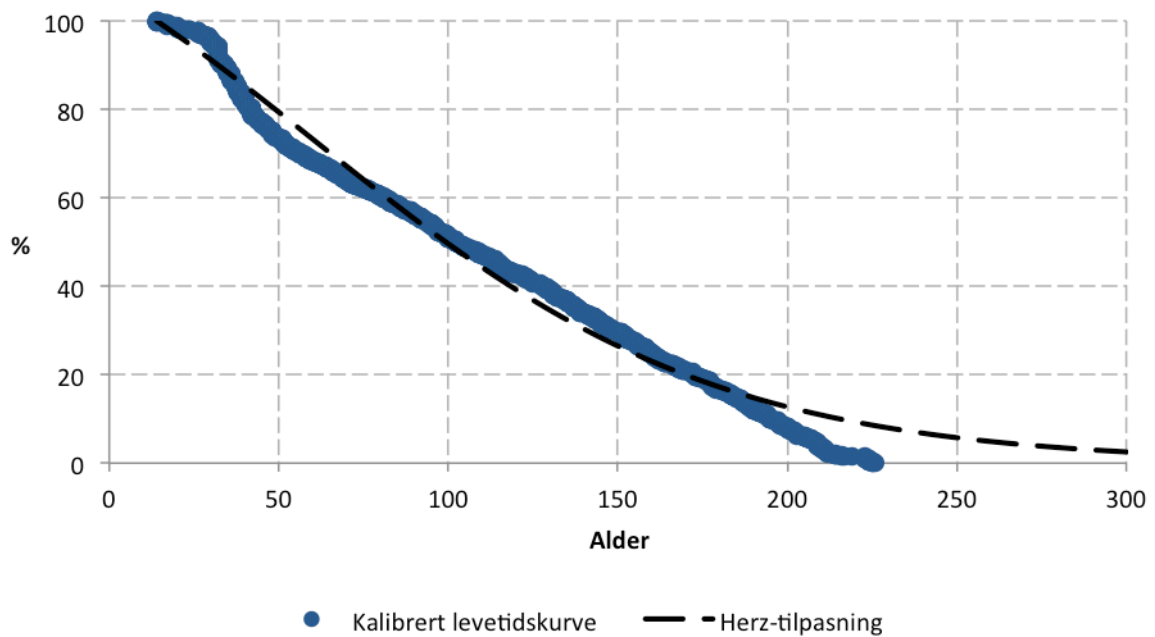


Figur B-8 | Kalibrert levetidskurve og tilpasset Herz-kurve for kohorten SJG

SRB0:

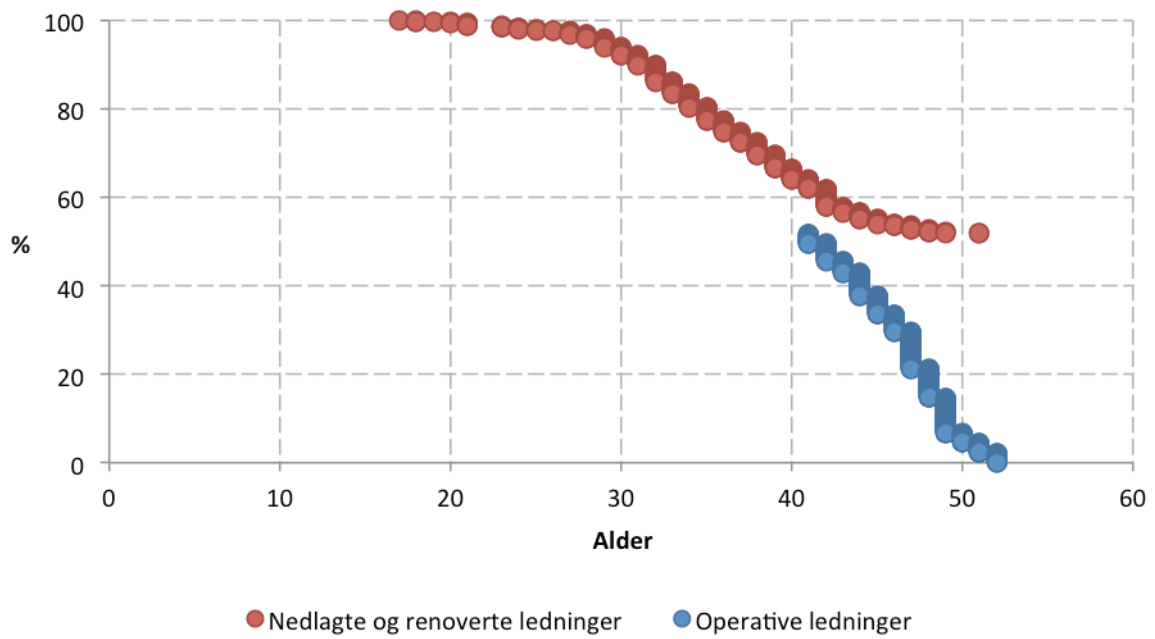


Figur B-9 | Historisk levetidskurve og operativ ledningskurve for kohorten SRB0

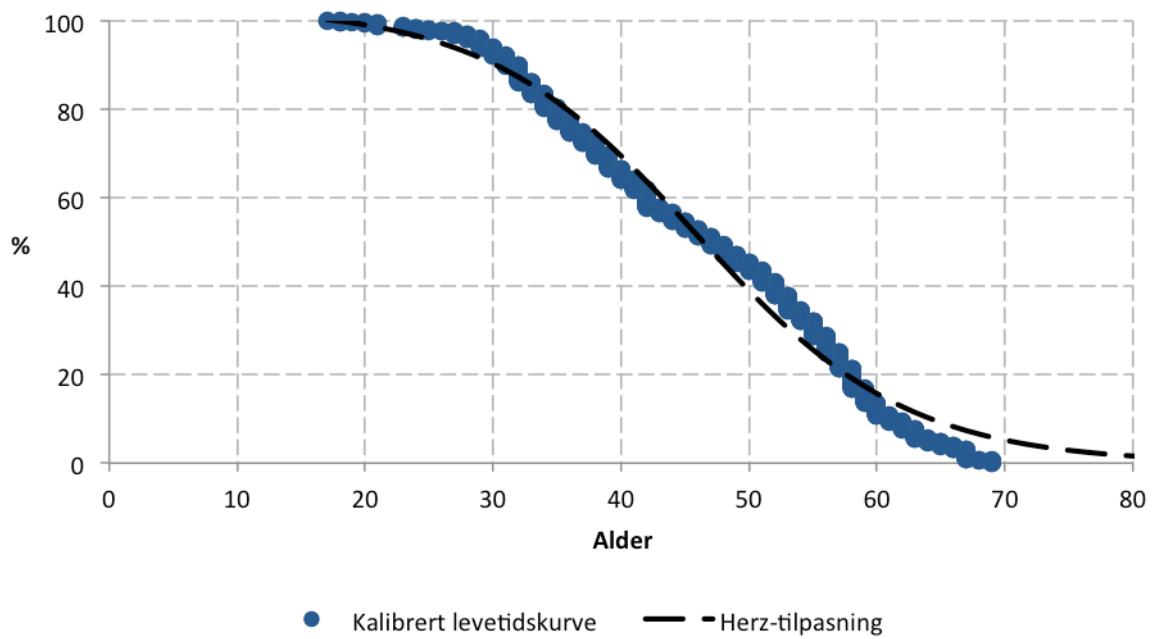


Figur B-10 | Kalibrert levetidskurve og tilpasset Herz-kurve for kohorten SRB0

SRB1:

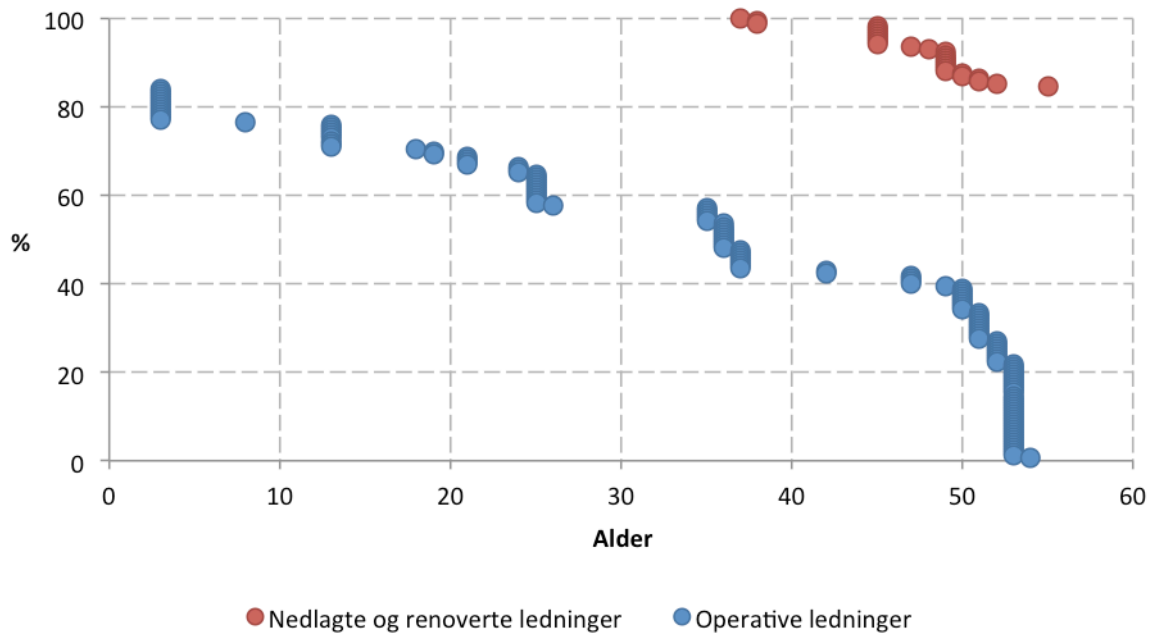


Figur B-11 | Historisk levetidskurve og operativ ledningskurve for kohorten SRB1

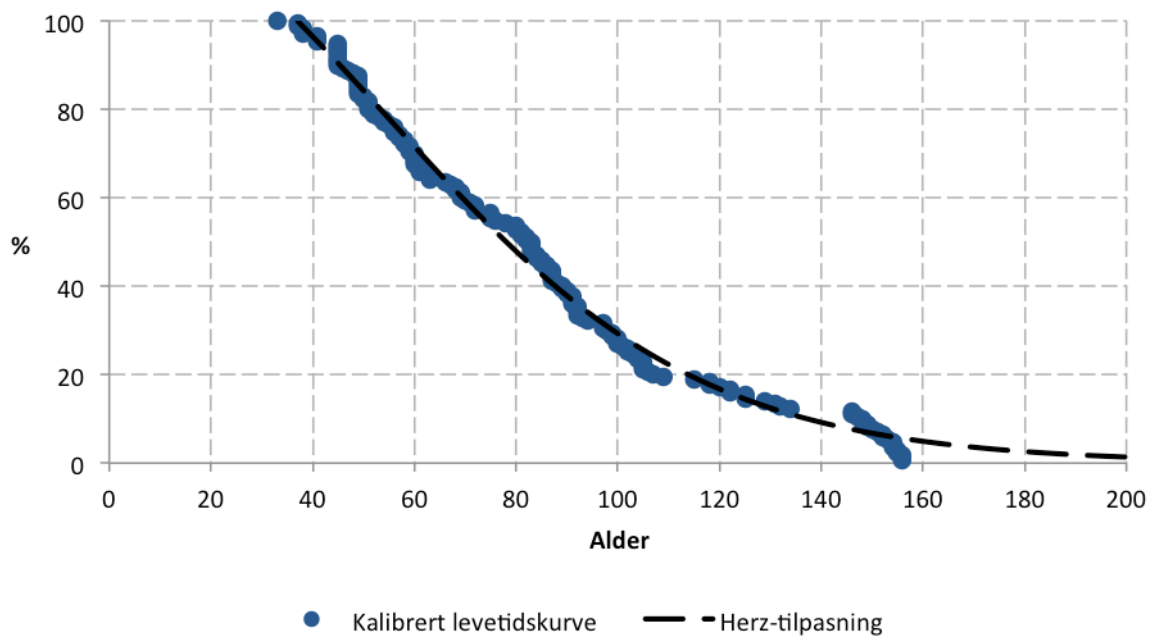


Figur B-12 | Kalibrert levetidskurve og tilpasset Herz-kurve for kohorten SRB1

Store:

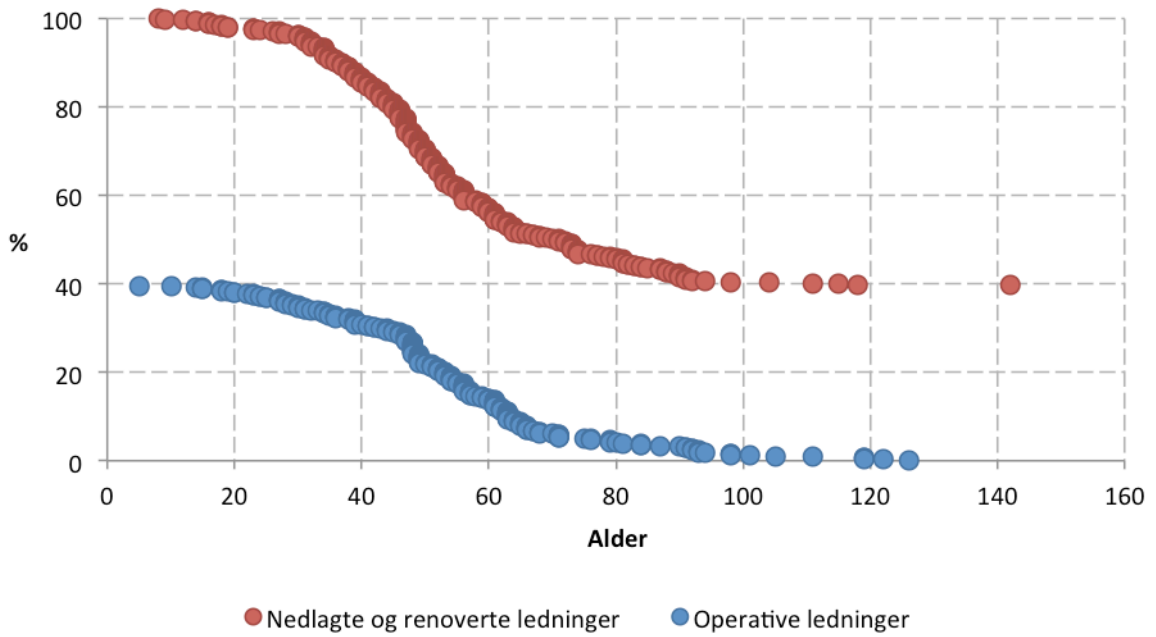


Figur B-13 | Historisk levetidskurve og operativ ledningskurve for kohorten Store

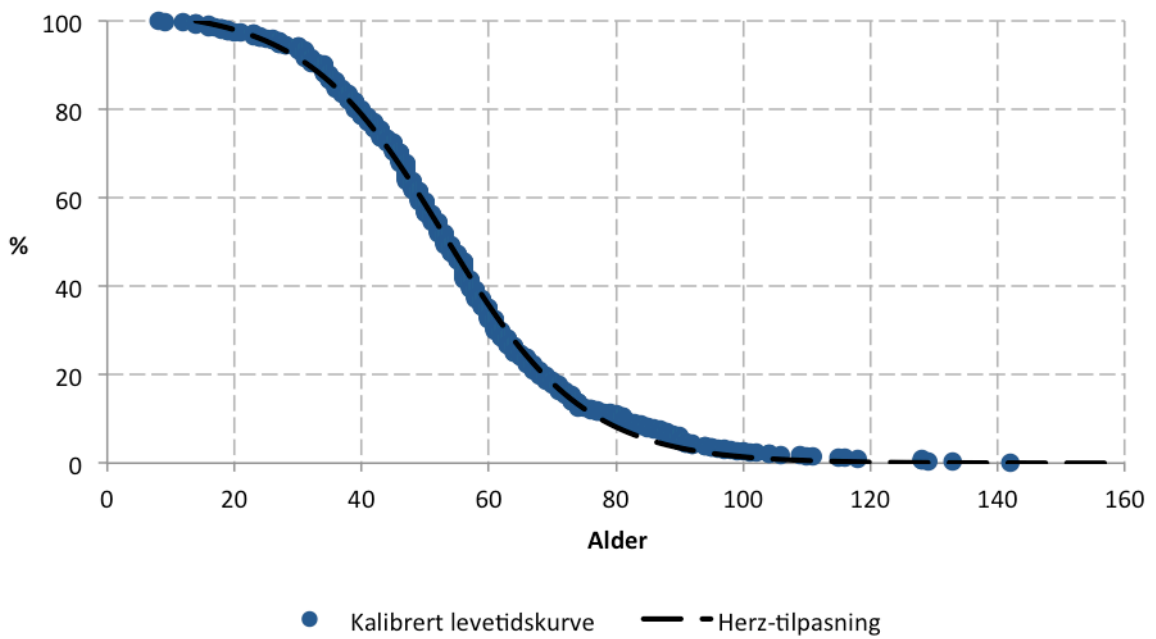


Figur B-14 | Kalibrert levetidskurve og tilpasset Herz-kurve for kohorten Store

Stål_asbest:



Figur B-15 | Historisk levetidskurve og operativ ledningskurve for kohorten *Stål_asbest*



Figur B-16 | Kalibrert levetidskurve og tilpasset Herz-kurve for kohorten *Stål_asbest*