

# Rapport

## Samfunnsøkonomisk optimale investeringer i robust drikkevannsinfrastruktur

### Forfatter(e)

Arnt-Gunnar Lium, Trond Halvorsen og Thor Bjørvoll



Foto: Multikonsult og IVAR

**SINTEF Teknologi og samfunn**

Postadresse:  
Postboks 4760 Sluppen  
7465 Trondheim  
Sentralbord: 73590300

ts@sintef.no  
www.sintef.no  
Foretaksregister:  
NO 948007029 MVA

**EMNEORD:**  
Vannforsyning, infrastruktur,  
optimering,  
samfunnsøkonomi

# Rapport

## Samfunnsøkonomisk optimale investeringer i robust drikkevannsinfrastruktur

**VERSJON**  
1.0

**DATO**  
9. november 2015

**FORFATTER(E)**  
Arnt-Gunnar Lium, Trond Halvorsen og Thor Bjørvoll

**OPPDRAGSGIVER(E)**  
Oslo VAV

**OPPDRAGSGIVERS REFERANSE**

**PROSJEKT**  
102009882 Robust og kostnadseffektiv drikkevannsforsyning

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG**  
24

### SAMMENDRAG

Denne rapporten diskuterer en matematisk modell for optimale investeringer og reinvesteringer i drikkevannsinfrastruktur ut fra et samfunnsøkonomisk ståsted. Modellen tar hensyn til usikkerhet om svikt i rørledningsnettverket og inkluderer kostnader for tredjepart knyttet til manglende drikkevannsleveranser og/eller leveranser av utilstrekkelig kvalitet, f.eks. forurenset vann.

Rapporten beskriver en ny metodikk for kommunale investeringer basert på samfunnsøkonomisk teori og stokastisk programmering. Metoden skiller seg fra dagens praksis ved at den ikke ser på enkeltinvesteringer, men søker å koordinere mange ulike investeringsalternativer i tid og rom i en samlet investeringsportefølje enten innen den enkelte sektor eller på tvers av sektorer. Målet er økt kostnadseffektivitet og/eller redusert finansiell risiko.

**UTARBEIDET AV**  
Arnt-Gunnar Lium

**SIGNATUR**  


**KONTROLLERT AV**  
Adrian Werner

**SIGNATUR**  


**GODKJENT AV**  
Frode Rømo

**SIGNATUR**  


**RAPPORTNUMMER**  
SINTEF A27236

**ISBN**  
9788214059816

**GRADERING**  
Åpen

**GRADERING DENNE SIDE**  
Åpen

## Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Dagens tilnærming til investering i infrastruktur</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Metodiske utfordringer</b>	<b>4</b>
3.1	Verdsetting og beregning av konsekvens ved brudd . . . . .	4
3.2	Evaluering og koordinering av flere prosjekter . . . . .	4
3.3	Prosjektrekkefølge og alternativer . . . . .	5
3.4	Håndtering av risiko og usikkerhet . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Målsetting for investering i drikkevannsinfrastruktur</b>	<b>7</b>
4.1	Strategiske investeringsbeslutninger . . . . .	7
4.2	Mål for investeringene . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Hva er optimering?</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Kan optimering brukes ved investering i drikkevannsinfrastruktur?</b>	<b>9</b>
6.1	Investeringsportefølje og prosjektrekkefølge . . . . .	10
6.2	Håndtering av usikkerhet ved simultan evaluering av mange scenarier . . . . .	10
6.3	Design av robuste, fleksible og kostnadseffektive drikkevannsnettverk . . . . .	11
6.4	Samfunnsøkonomisk verdsetting og investeringsanalyser . . . . .	12
6.5	Målfunksjon . . . . .	13
<b>7</b>	<b>Matematisk modell for samfunnsøkonomisk optimal investering i drikkevannsinfrastruktur</b>	<b>13</b>
7.1	Infrastrukturens elementer . . . . .	14
7.2	Hendelser og scenarier . . . . .	14
7.3	Forurensning og tosidig forsyning . . . . .	15
7.4	Flyt, kapasitet og etterspørsel . . . . .	16
7.5	Investeringsalternativer . . . . .	16
7.6	Effekt av investeringer på driftsstabilitet og kapasitet og degradering av infrastruktur . . . . .	17
7.7	Budsjettrestriksjoner . . . . .	17
7.8	Nedskrivninger og restverdi . . . . .	18
7.9	Målfunksjon . . . . .	18
7.10	Avgrensninger i modellen . . . . .	20
<b>8</b>	<b>Databehov</b>	<b>20</b>
<b>9</b>	<b>Oppsummering</b>	<b>21</b>
<b>10</b>	<b>Matematisk notasjon</b>	<b>22</b>

## 1 Introduksjon

Fungerende drikkevannsinfrastruktur er kritisk for å opprettholde et velfungerende samfunn med høy verdiskaping. I likhet med de fleste typer infrastrukturinvesteringer er drikkevannsinfrastruktur preget av til dels svært lang levetid, høye kostnader og få (om noen) alternative anvendelser. Videre er det i mange tilfeller slik at investeringer som allerede er foretatt kan legge føringer for senere investeringer og således påvirke fremtidige beslutninger.

Infrastrukturens viktighet, betydelige kostnader og konsekvensene for fremtidig utbygging av infrastruktur tilsier at metodikk for optimale investeringer har stor verdi. Forprosjektet *Robust og kostnadseffektiv drikkevannsforsyning* søker å belyse hvilken kunnskap som må fremskaffes for å oppnå samfunnsøkonomisk optimale investeringsbeslutninger i drikkevannsinfrastruktur.

Investering i ny, og oppgradering av eksisterende, infrastruktur påvirker kapasiteten og risikoen for forsyningsavbrudd. Videre vil de investeringer som gjøres også ha en effekt på vedlikeholdskostnader, produksjonskostnader og håndtering av avløpsvann. I tillegg vil investeringene kunne påvirke de kostnader som påløper i forbindelse med brudd, knyttet til reparasjoner, levering av nødvann, innlosjering på hotell osv. Investeringene vil også påvirke tredjeparts kostnader. Det er forventet at en ikke ubetydelig del av tredjeparts kostnader er knyttet til andre ting enn selve abonnementskostnaden.

Per i dag finnes ingen metodikk for en samfunnsøkonomisk korrekt tilnærming til investering i drikkevannsinfrastruktur. Det finnes heller ingen verktøy, så vidt vi kjenner til, som evner å gi råd om hva som er den samfunnsøkonomisk optimale sammensetningen av et stort antall prosjekter over en lang planhorisont under usikkerhet. Denne rapporten er et første skritt på veien mot et optimeringsstøttet verktøy for samfunnsøkonomisk optimale investeringer i drikkevannsinfrastruktur under usikkerhet.

Arbeidet med rapporten er finansiert av Regionalt Forskningsfond Hovedstaden. Vann og avløpsetaten i Oslo kommune (Oslo VAV) er prosjekteier. Søsterrapporten *Verdien av en robust vannforsyning* av Bjørkvoll et al. [2015] beskriver norsk og internasjonal litteratur og empirisk rapportering i Norge knyttet til robusthet i drikkevannsforsyningen. Rapportene kan leses uavhengig av hverandre.

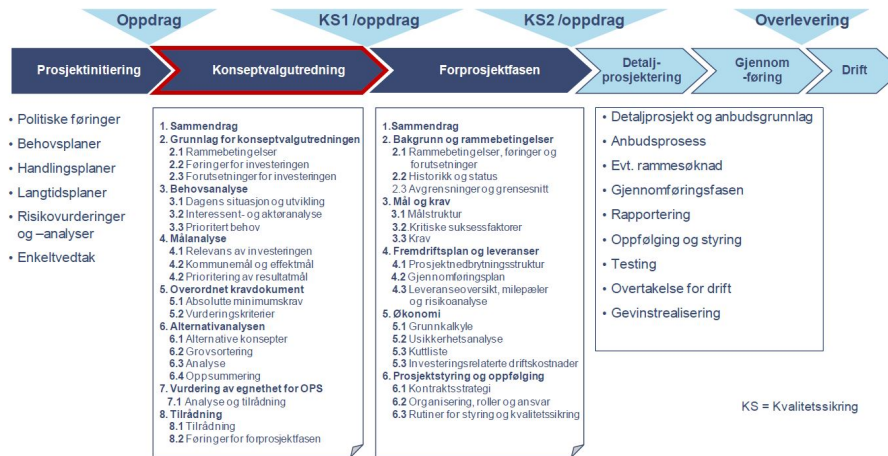
## 2 Dagens tilnærming til investering i infrastruktur

Veilederen *Konseptvalgutredning (KVU) i Oslo Kommune* [Oslo kommune, 2011] beskriver metodikken for investeringsanalyser for Oslo kommune. Fokus i veilederen er på å evaluere ulike enkeltprosjekter som vurderes gjennomført og å knytte enkeltprosjektene opp mot kommunens mål og planer. Figur 1 gir en oversikt over investeringsprosessen, fra prosjektinitiering via KVU og forprosjektfasen helt frem til prosjektet eventuelt kommer i drift.

Oslo kommunes investeringsregime tilsier at større prosjekter gjennomgår en konseptvalgutredning der en sammenligner investeringskostnader og driftskostnader med potensielle ulemper ved å ikke gjennomføre prosjektet. Ved analyser av drikkevannsinfrastruktur inngår også sårbarhetsanalyser, da med hovedfokus på kritiske ledninger. Etter konseptvalgutredningen gjennomføres en ekstern kvalitetssikring (KS1). For noen prosjekter vil det etter KS1 være aktuelt med en ytterligere ekstern kvalitetssikring (KS2). Denne fokuserer i all hovedsak på kvaliteten til kostnadsoverslagene. En eventuell investeringsbeslutning tas av byrådet.

Som Figur 1 viser er fokuset på å evaluere en rekke aspekter knyttet til et eller flere *enkeltprosjekt*, prosjekt som i all hovedsak evalueres hver for seg. Implisitt i dette vil en i en slik utredning søke å finne den mest hensiktsmessige måten det spesifikke prosjektet kan oppnå sine mål på, samt evaluere risikoen til det *enkelte* prosjektet. Når utredningen og kvalitetssikringen(e) er ferdig er det opp til det politiske miljø å ta en beslutning om hvilke prosjekter som skal gjennomføres.

## Krav og veiledning for konseptvalgsutredning i Oslo kommune



Figur 1: Investeringsregime i Oslo kommune (Kilde: Oslo kommune [2011])

### 3 Metodiske utfordringer

Det er flere metodiske utfordringer knyttet til investering og drift av drikkevannsinfrastruktur, fra verdsettings-spørsmål og rekkefølgeproblematikk til usikkerhet og risiko.

#### 3.1 Verdsetting og beregning av konsekvens ved brudd

Ifølge Bjørkvoll et al. [2015] finnes det en del litteratur om verdsetting av vann og om bruk av vann i landbruket samt studier som ser på verdien av å ha rent vann og av god kvalitet. Imidlertid er det gjennomført få studier om evaluering av verdien av en robust vannforsyning, og da spesielt i tilfeller hvor brudd fører til at kvaliteten på vannet reduseres over lang tid eller at vannet blir borte over en lengre periode.

Problemet med manglende kunnskap om verdien på en robust vannforsyning er at det blir vanskeligere å evaluere hva som er riktig robusthetsnivå for drikkevannsinfrastrukturen. Dette kan være vanskelig på et overordnet nivå hvor en typisk vil vurdere verdien av en robust drikkevannsforsyning mot kostnaden for å øke robustheten. Tilgang på bedre informasjon om verdsetting vil også muliggjøre bedre investeringer på lavere nivå, f.eks. om en bør prioritere høyest robusthet i et boligområde eller i et område med næringsmiddelindustri.

#### 3.2 Evaluering og koordinering av flere prosjekter

Dagens investeringsregime søker å legge til rette for konsistente analyser og beslutningsprosesser på tvers av fagdisipliner. Metodikken er imidlertid veldig tett knyttet til *enkelt*prosjekter, og ikke til en *portefølje* av prosjekter. En uheldig konsekvens kan være at en bygger opp prosjekter som er gode, isolert sett, men som ikke tar hensyn til andre prosjekter, og at en ikke kan ta hensyn til at prosjekter kan påvirke hverandre.

Dersom to eller flere prosjekter analyseres hvor nytten av det enkelte prosjekt henger sammen med gjennomføring av andre prosjekter, så vil analysen måtte ta hensyn til “alle” mulige prosjektkombinasjoner for å gi en korrekt vurdering av nytteeffekten. Et eksempel innen vannsektoren er ønsket om å øke robustheten i nettverket ved å gjennomføre ett eller flere prosjekter, f.eks. prosjektene A, B og C. Disse prosjektene bidrar alle til økt robusthet i nettverket (og dermed økt forventet nytte). Når en vurderer prosjektene hver for seg så har de kostnader og effekter (f.eks. på robusthet), og en kan velge ut fra dette. Utfordringen er at dersom en velger å gjennomføre to eller tre av prosjektene så vil ikke nødvendigvis den totale effekten av prosjektene være lik

summen av effektene av de enkelte prosjektene, men også høyere eller lavere. Det kan også tenkes at det beste hadde vært å kombinere deler fra de tre prosjektene på en annen måte i et helt annet prosjekt D.

Dagens tilnærming har enkelte metodiske svakheter:

1. De foreslåtte tekniske løsningene i det enkelte prosjekt er tilpasset til hva som er hensiktsmessig for dette prosjektet, ikke nødvendigvis hva som er best dersom en ser alle mulige alternative prosjekter under ett.
2. Verdien/nytten av et prosjekt kan avhenge av beslutninger om og gjennomføring av andre prosjekter.
3. Utredning av det enkelte prosjekt vil i liten grad forholde seg til kostnadene for andre prosjekter og budsjettet for "alle" prosjektene kan legge begrensninger for hvilke prosjekter som besluttes gjennomført.
4. Usikkerhet håndteres i all hovedsak på prosjektnivå ved investeringsbeslutningen og er i liten grad aggregert over alle mulige prosjekter (for ulike fagdisipliner).

### 3.3 Prosjektrekkefølge og alternativer

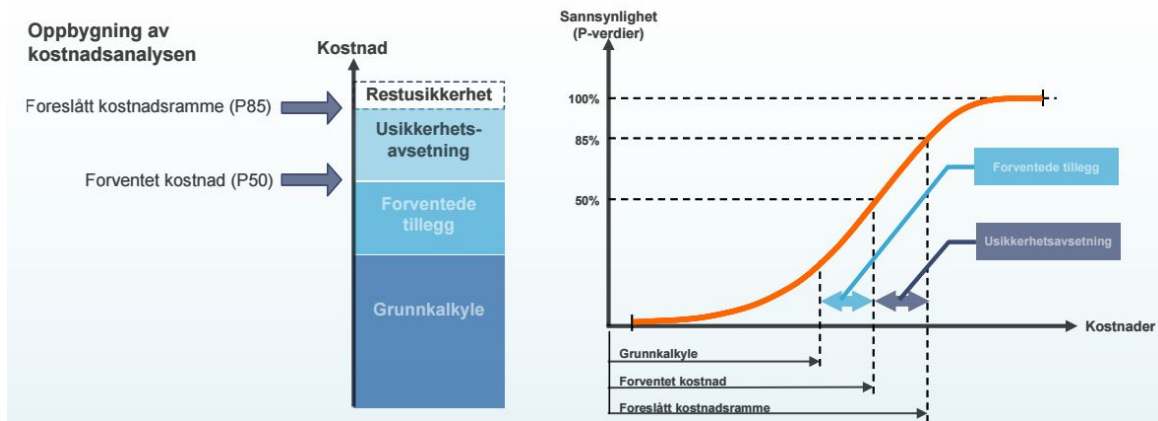
I dagens regime er fokuset på større *enkelt*prosjekter, hvor mange delbeslutninger inngår i det enkelte prosjektet. Det er ikke urimelig å anta at de ulike delbeslutningene som inngår i et *enkelt*prosjekt søker å ta utgangspunkt i hva som er best for dette prosjektet. Fra et metodisk ståsted skaper dagens tilnærming (minst) to problemer. Den ene er at prosjektevaluering ikke er fullt koblet med andre prosjekter, som gjør at en beslutning om et prosjekt kan påvirke verdien av andre prosjekter. Det andre er at den enkelte delbeslutning i et prosjekt er fokusert på hva som er best for dette prosjektet og at det blir gjennomført, ikke at delbeslutningene kan ha implikasjoner på andre prosjekter. Når beslutninger internt i det enkelte delprosjekt tas separat fra andre prosjekter kan dette resultere i løsninger som ikke er så gode som de kunne vært. Når så *enkelt*prosjekter vedtas uten å ta hensyn til hverandre kan dette resultere i ikke-optimal ressursbruk.

For at en investeringsanalyse skal gi bedre svar er en avhengig av å identifisere eventuelle avhengigheter mellom investeringene. En oversikt over samtlige avhengigheter er derfor en forutsetning for å kunne inkludere disse i analysene. Dessverre er det ikke trivielt å avsløre alle avhengigheter. For eksempel kan en se for seg et kapasitetsutvidende tiltak ved at en investerer i en gitt rørledning i en bydel i Oslo. Ved hjelp av hydrauliske modeller kan en analysere ulike effekter av denne spesifikke investeringen. En kan selvsagt evaluere effekten av flere ulike enkeltinvesteringer ved hjelp av disse modellene og andre metoder. Utfordringen er ikke knyttet til å evaluere effekten av enkelttiltak eller kombinasjonen av noen få tiltak. Problemet her er å finne den optimale *kombinasjonen* av tiltak som gir mest igjen for de ressursene som brukes. Gitt at det er mange steder i nettverket hvor tiltak kan gjennomføres kan antall kombinasjoner av tiltak lett bli ekstremt stort. Således kan det være vanskelig å finne de gode kombinasjonene.

For de ulike delene av nettet kan en gjennomføre en eller flere alternative handlinger: la være å gjøre noe, skifte ut rør, legge strømpe i eksisterende rør, osv. For hver av disse handlingene kan det være ytterligere beslutninger som må tas. For eksempel, hvis en skifter ut et rør, hvilken rørtype skal legges istedenfor og hvilken kapasitet skal den ha? Ikke overraskende øker dette problemkompleksiteten betydelig i forbindelse med analysearbeidet.

Det er også av betydning *når* et tiltak skal gjennomføres. Dette kan ha sammenheng med at en gitt del av infrastrukturen forringes og/eller at økt etterspørsel fører til at den aktuelle delen blir en flaskehals. Tidspunktet for gjennomføring av tiltak kan også henge sammen med andre tiltak. For eksempel kan det være slik at en ikke får full effekt av et tiltak før andre tiltak også har blitt gjennomført. For å utnytte samfunnets begrensede ressurser optimalt er en avhengig av å ikke bare koordinere prosjekter i en enkelt periode, men også å knytte dette til oppstart og ferdigstilling av flere prosjekter over mange perioder. Dette øker problemkompleksiteten betydelig, men kan også resultere i bedre ressursutnyttelse dersom en har verktøy som kan bidra med dette.

## Estimering av kostnader: Definisjon av begreper



Figur 2: Oppbygning av en kostnadsanalyse og kostnadsbasert s-kurve. (Kilde: Oslo kommune [2011])

### 3.4 Håndtering av risiko og usikkerhet

For små investeringer med begrenset risiko/omfang bruker Oslo kommune typisk en forenklet tilnærming til risiko. For prosjekter med større omfang, risiko, kompleksitet og/eller begrenset politisk følsomhet benyttes KVVU. Vi ser videre i rapporten bort fra mindre prosjekter og fokuserer på større investeringer med betydelig risiko eller usikkerhet.

Dagens risikohåndtering har fokus på enkeltprosjekter fremfor en portefølje av prosjekter. Risikovurdering gjøres blant annet i forbindelse med prosjektinitiering og i forprosjektfasen, slik Figur 1 viser. Det anbefales at en forsøker å gi en vurdering av særlige risikomomenter i fremdriften tidlig i prosjektet.

I behovsanalysen utarbeides det en beskrivelse av dagens tilbud og en overordnet prognose for fremtidige behov, som så benyttes i en “gap”-analyse for å identifisere behovet over perioden. Det anbefales også å utføre en stress-test eller følsomhetsanalyse av de viktigste driverne i etterspørselen og/eller tilbudet. Før fremleggelse av KS1 foretas det en kvantitativ usikkerhetsanalyse, i tillegg legges det frem en kostnadsbasert s-kurve. Denne er vist i Figur 2 og illustrerer koblingen mellom sannsynlighet og kostnad. Videre legges det frem et tornado-diagram hvor de største usikkerhetsmomentene i investeringen presenteres med både opp- og nedsider.

I den kvantitative usikkerhetsanalysen tas det ikke hensyn til usikkerhet av binær karakter som tilgang til finansiering eller godkjenning av reguleringsplaner. Slike aspekter diskuteres heller som scenarier som kan oppstå. For investeringer hvis nytte avhenger av andre investeringer kan dette være utfordrende, spesielt dersom det er flere investeringer som bygger på hverandre. Et tenkt eksempel her kan være en rekke med prosjekter hvor nytten og/eller risikoen for det enkelte prosjekt avhenger av at andre prosjekter gjennomføres i forkant eller etterkant. Dersom en i beslutningen ikke kobler sannsynlighetene for gjennomføringen av hele eller deler av “kjeden” av mulige investeringer vil det være vanskelig å evaluere sammenhengen mellom investeringene på en god måte. Et eksempel er 20 noenlunde like investeringsobjekter som kan gjennomføres i sekvens. Dersom det er slik at de 19 første investeringene gjennomføres langt over eller under budsjett, så er det ikke urimelig å anta at dette i praksis vil påvirke sannsynligheten for at investering nummer 20 gjennomføres. I dagens metodikk tar en ikke hensyn til dette.

I Oslo kommune [2011] anbefales det ikke å kvantifisere effekten av usikkerhet hvor sannsynligheten for at noe skal skje er mindre enn 10 %, da det kan være utfordrende å anslå slike sannsynligheter. Dette kan være uproblematisk for investeringer hvor både sannsynlighet for og konsekvens av en hendelse er lav. For hendelser

med lav sannsynlighet men med stor konsekvens vil denne tilnærmingen kunne resultere beslutninger hvor risiko undervurderes. Et praktisk eksempel er investeringer i en hovedrørledning for drikkevannsforsyning. Brudd i slike rør skjer relativt sjeldent og effekten av slike brudd vil ikke nødvendigvis inngå i analysen, til tross for at konsekvensene kan være betydelige.

## 4 Målsetting for investering i drikkevannsinfrastruktur

For å utvikle et modellapparat for konsistente og samfunnsmessig gode beslutninger for investeringer i drikkevannsinfrastruktur, er det hensiktsmessig å definere og avgrense problemstillingen knyttet til strategiske investeringer i drikkevannsinfrastruktur samt å definere mål som søkes oppnådd.

### 4.1 Strategiske investeringsbeslutninger

Strategiske investeringsbeslutninger i drikkevannsinfrastruktur kan omfatte fysiske så vel som immaterielle investeringer. Denne rapporten ser på førstnevnte og da kun på infrastruktur som benyttes direkte til produksjon, lagring og transport av vann. Eksempler på slik infrastruktur er vannrenseanlegg, trykkbasseng, rørledninger. Ved investeringer er det flere beslutninger som må tas:

- Hvilken type infrastruktur skal fases inn: basseng, rør, ...?
- Hvor i nettet skal investeringen gjøres?
- Når skal infrastrukturen fases inn?
- Hvilken kapasitet skal tilbys?

Det er typisk et sammenheng mellom enkeltinvesteringer, i både tid og rom. For eksempel vil en ikke kunne utnytte effekten av en innfasing av en ny drikkevannskilde fullt ut med mindre en har tilstrekkelig kapasitet til å levere vannet. Dette betyr ikke nødvendigvis at en bør investere i rørkapasitet simultant med en ny drikkevannskilde, men at det kan bli behov for investering i andre typer infrastruktur for å senere oppnå høyere utnyttelse av drikkevannskilden.

Behovet for slike investeringer drives typisk av en kombinasjon av økt etterspørsel etter drikkevann (f.eks. ved befolkningsøkning), økt etterspørsel i nye boligfelt og industriområder, nye krav og/eller forventninger om økt kvalitet og robusthet i leveransen, samt forringing av eksisterende infrastruktur.

De enkelte investeringene vil påvirke kontantstrømmen til Oslo VAV og kan således påvirke abonnentenes kostnader og/eller muligheten til annen bruk av pengene.

### 4.2 Mål for investeringene

Analysene som gjøres i forkant av store statlige investeringer tar utgangspunkt i metodikk for samfunnsøkonomisk analyse. Formålet med samfunnsøkonomiske analyser som beslutningsunderlag er å belyse og bidra til en samfunnsøkonomisk effektiv ressursutnyttelse. Denne tilnærmingen er beskrevet i Finansdepartementets veiledere, rundskriv og NOUer og i mange tilfeller videre bearbeidet og tilpasset til den enkelte etat gjennom ulike veiledere (*Metodehåndbok. Samfunnsøkonomiske analyser for jernbanen* [Jernbaneverket, 2015], *Håndbok V712. Konsekvensanalyser* [Statens Vegvesen, 2014] o.l.).

I en samfunnsøkonomisk analyse inngår en nytte-kostnadsanalyse hvor en så langt det lar seg gjøre tallfester, i kroner, alle positive og negative effekter av et tiltak. Dersom summen av de tallfestede gevinstene er større enn kostnaden for tiltaket, anses tiltaket for å være samfunnsøkonomisk lønnsomt. En vanlig tilnærming i analyse-rammeverket er å rangere flere tiltak etter nytte-kostnadsbrøkenes verdi, hvor tiltak med høyere nytte relativt til



kostnader anbefales prioritert høyere enn de med lavere nytte. Det kan også være effekter som vanskelig lar seg verdsette i monetære termer. I slike tilfeller tilsier retningslinjene at ikke-verdsatte effekter skal beskrives og inngå som en del av beslutningsgrunnlaget. For en mer detaljert beskrivelse vises det til *NOU 2012:16* [Finansdepartementet, 2012].

Hensikten med bruk av samfunnsøkonomisk metodikk er å kunne gi en mest mulig objektiv vurdering av prissatte og ikke-prissatte effekter for de ulike investeringsalternativene for et gitt område. Videre har en (i prinsippet) mulighet til å evaluere nytten av investeringer for ulike områder. Målsettingen er best mulig ressursbruk innenfor et gitt område samtidig som det gir mulighet for å sammenligne lønnsomheten for investeringer i ulike områder.

## 5 Hva er optimering?

Å optimere innebærer å finne en løsning som gir best mulig utnyttelse av ressursene. Moderne optimeringsteknikker strekker seg tilbake til 1940-tallet, hvor matematiske metoder ble forsøkt utnyttet til militær bruk. Det kanskje viktigste faglige gjennombruddet kom i forbindelse med utviklingen av simplex-algoritmen som gjorde det mulig å finne beste løsning (kostnad, høyest profitt, osv.) for lineære og kontinuerlige matematiske problemer. Senere arbeid har gjort det mulig å også løse ikke-kontinuerlige problemer (f.eks. ja/nei beslutninger) samt ikke-lineære problemer.

En optimeringsmodell består typisk av to deler: en målfunksjon som sier hva som skal oppnås og restriksjoner som sier noe om begrensninger som foreligger. Et eksempel er vist i (1). Målfunksjonen er gitt i (1a) og søker å maksimere funksjonen  $c^T x$ . Her representerer  $x$  de beslutninger som tas, mens  $c^T$  er koeffisienten(e) og viser effekten av beslutningene (f.eks. inntekt per produsert enhet  $x$ ). (1b) sier at dersom en velger å gjøre noe (f.eks. å produsere  $x$  antall enheter) så medfører det en ressursbruk  $A$  per enhet  $x$  som ikke kan overstige de totale ressursene en har tilgjengelig, gitt ved  $b$ . (1c) sier at en ikke kan ta "negative" beslutninger (f.eks. å produsere et negativt antall produkter).

$$\max_x c^T x \quad (1a)$$

$$Ax \leq b \quad (1b)$$

$$x \geq 0 \quad (1c)$$

Optimeringsmodeller kan minimere (f.eks. kostnader, risiko) eller maksimere (f.eks. nytte, profitt) en funksjon som er tett koblet mot problemet som skal løses. Optimering benyttes i dag på strategisk, taktisk og operasjonelt nivå til planlegging og drift i en lang rekke sektorer, slik som transport (luftfart, tog, skip, buss, osv.), energi (kraft, gass, olje, osv.), finans og forsikring eller næringsmiddel. Erfaringsmessig gir bruk av optimering løsninger som er opptil ca. 30 % bedre enn det som oppnås med manuell/partiell planlegging.

Ved å formulere investeringsproblemet som et optimeringsproblem oppnår en at:

1. Planleggingsproblemet blir fremstilt på en svært presis og konsistent måte.
2. Alle inngangsdata i modellen kan tas hensyn til simultant (ikke partielt eller sekvensielt).
3. Det er mulig å finne de løsningene som utnytter ressursene optimalt (og kan bevise at ingen bedre løsninger eksisterer).
4. En kan fastsette verdien av å ha mer ressurser tilgjengelig.
5. Selv veldig store planleggingsproblemer kan løses til (nær)optimalitet svært raskt.

## 6 Kan optimering brukes ved investering i drikkevannsinfrastruktur?

Optimering benyttet i tilknytning til investeringsanalyser i drikkevannsinfrastruktur kan bidra til bedre utnyttelse av begrensede ressurser ved å identifisere nettverkseffekter og stordriftsfordeler i infrastrukturen som ellers vanskelig ville blitt funnet ved hjelp av partielle/manuelle analyser.

Per i dag finnes det avanserte modeller for å estimere degraderingsfunksjoner for infrastrukturen samt hydrauliske modeller som beskriver vannflyten i nettverket med stor nøyaktighet. I tillegg har det blitt lagt ned til dels store ressurser for å bygge opp systemer som håndterer betydelige mengder data om infrastrukturen. Dette gjør det mulig å gi en god representasjon av dagens situasjon og å simulere effekter av ulike hendelser i nettverket med eksisterende verktøy.

Svært mye av arbeidet som har blitt utført så langt er tett koblet mot tekniske aspekter for infrastrukturen, slik som estimert levetid, anskaffelseskostnad, sannsynlighet for hendelser, konsekvenser av hendelser. Det finnes langt mindre kunnskap om hvilken effekt en (ikke)fungerende infrastruktur har på abonnentene og samfunnet for øvrig. Rapporten *Verdien av en robust vannforsyning* [Bjørkvoll et al., 2015] viser at det er til dels mye ugjort arbeid på verdsetting (for tredjepart) relatert til drikkevann.

Det eksisterer et begrenset antall optimeringsbaserte modeller for investering i drikkevannsinfrastruktur. Et eksempel er nevnt i Willis et al. [2005] som viser til LEADA-modellen benyttet av Yorkshire Water. Ifølge artikkelen *rangerer* modellen prosjektene etter nytte relativt til kostnad. Nyttensiden tar utgangspunkt i kundenes betalingsvillighet for forbedret kvalitet på leveransene. Konsulentselskapet ICS Consulting har vært involvert i arbeidet med LEADA og tilbyr produkter knyttet til beslutningsstøtte for investeringer. Blant annet tilbys modellering av degradering av infrastruktur og evaluering av real-opsjoner for en gitt plan ved hjelp av Monte Carlo simulering av eksterne hendelser. Det finnes, så vidt vi vet, ingen verktøy som produserer forslag til investeringsplaner for drikkevannsinfrastruktur med mål om å maksimere samfunnsøkonomisk overskudd samtidig som de tar hensyn til usikkerhet i utarbeidelsen av planforslagene.

Hydrauliske modeller gjør det mulig å evaluere hvordan en gitt drikkevannsinfrastruktur fungerer i bestemte situasjoner, f.eks. ved oversvømmelser. Dette er hensiktsmessig for å evaluere et enkelttiltak. Problemet er at det ikke er klart hvilket tiltak som bør gjennomføres, når det bør gjennomføres og hvilken samfunnsmessig effekt investeringen har.

Å kombinere samfunnsøkonomisk analyse<sup>1</sup> med optimeringsverktøy gjør det mulig å gi råd om samfunnsøkonomisk optimale investeringer i drikkevannsinfrastruktur og å sammenligne med andre former for offentlige investeringer. I en slik modell kan det være naturlig å ta hensyn til

- budsjettbegrensninger per periode og over planhorisonten som helhet,
- usikkerhet om leveranseevne,
- usikkerhet om etterspørsel,
- kapasitetsbegrensninger for nettet og produksjonsanleggene,
- samfunnsøkonomiske kostnader knyttet til uforutsette hendelser,
- koordinert risikohåndtering for investeringsporteføljen innenfor og (gjærne) på tvers av sektorer.

<sup>1</sup>Vi ser bort fra ikke-prissatte effekter.

## 6.1 Investeringsportefølje og prosjektrekkefølge

Behovet for infrastrukturkapasitet avhenger av befolkningsvekst, forbruk per innbygger, utbygging og fortetting av områder osv. Dette behovet vil variere fra område til område og fra år til år over planhorisonten. Videre er det begrensninger på hvor mye ressurser (penger, mannskap, maskiner, o.l.) en har tilgjengelig fra år til år. Dette betyr at sammensetningen og rekkefølgen av de mange mindre prosjektene som kan gjennomføres er svært viktig for å få realisert en høyest mulig gevinst innenfor de føringer som foreligger.

I et porteføljeperspektiv antas det at beslutningsstøtte gis simultant for en portefølje av prosjekter fremfor en sekvensiell evaluering av enkeltprosjekter. Metodikken åpner dermed for at man på en strukturert måte kan ta inn over seg samspillet mellom ulike prosjekter, heller enn å fokusere på enkeltprosjekter, og dermed få mer igjen samtidig som mindre ressurser benyttes.

Bruk av optimering for å støtte en porteføljetilnærming fremfor dagens praksis innebærer at en går vekk fra mer tradisjonelle prinsipper om å prioritere enkeltprosjekter med høyest positiv netto nåverdi (NNV), netto nytte per budsjettkrone (NNB), politiske ønsker, eller lignende mål over prosjekter som oppnår en lavere verdi på “målingene”. En søker heller å maksimere et gitt mål (f.eks. NNV eller NNB) for alle prosjekter over planhorisonten. Dette kan innebære at enkeltprosjekter med lav eller til og med negativ NNV eller NNB vil kunne bli foreslått dersom de gjør det mulig å oppnå større “score” for investeringsporteføljen som helhet. En optimal portefølje vil innenfor et gitt budsjett gi samme eller høyere avkastning, alternativt samme eller lavere kostnad, enn en samling av rangerte enkeltprosjekter.

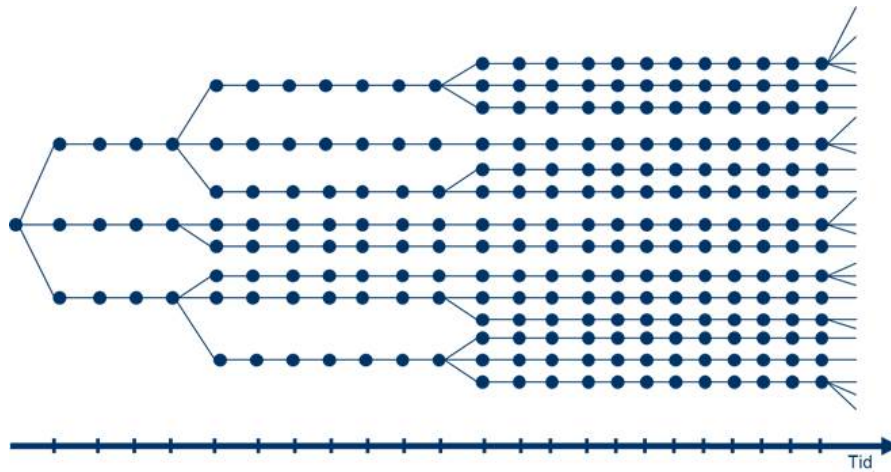
## 6.2 Håndtering av usikkerhet ved simultan evaluering av mange scenarier

Robusthet og/eller fleksibilitet i infrastrukturen er nødvendig for å kunne håndtere uforutsette hendelser på en slik måte at brukerne ikke rammes eller kun rammes i begrenset grad. Dette har en merkostnad sammenlignet med å investere litt “knap” eller så sent at innfasingen kommer akkurat i det en forventer å ha bruk for den (f.eks. som følge av økt etterspørsel på grunn av utbygging av nye boområder). For sistnevnte kan en tenke seg at en tidlig innfasing av ny infrastruktur vil gi økt robusthet for tilknyttede områder, selv om den ikke er absolutt nødvendig før på et senere tidspunkt. I en slik situasjon “veksler” en inn økte rente-, drifts- og avskrivningskostnader mot økt robusthet.

I stokastiske optimeringsmodeller er forholdet mellom beslutningstidspunkter og informasjonstilgang avgjørende, altså mellom hva man vet på tidspunktet beslutningen må tas og hvilken informasjon man får senere. Informasjon som ikke er tilgjengelig ved beslutningstidspunktet men som man vet vil bli kjent på et senere tidspunkt, bør modelleres som usikker informasjon. Dette kan uttrykkes med et *scenariotree* slik det er eksemplifisert i Figur 3. Noden lengst til venstre (rotnoden) representerer “nå”, hvor en vet alt om nåsituasjonen, mens forgreiningen ut fra denne noden viser at man er usikker på hvilken av tre alternative situasjoner som vil inntreffe i neste periode, f.eks. tre ulike kostnadsnivåer for et prosjekt. En “sti” gjennom treet fra første til siste tidsperiode representerer et *scenario*, en mulig fremtidig utvikling av verdier for den usikre parameteren, som inntreffer med en gitt sannsynlighet. Summert over alle scenarier er sannsynligheten 1. Spredningen i treet tilsvarer spredningen av mulige verdier. I tillegg har man gjerne mulighet til å ta avgjørelser i hver node, f.eks. om man skal gå i gang med prosjektet nå eller ikke. Tidsrommet mellom to forgreininger omtales som et steg, og etter hvert steg kjenner man utfallet av noe som var usikkert (man har fått ny informasjon).

Valg av struktur for scenariotreet er en sentral beslutning i forbindelse med utviklingen av en stokastisk optimeringsmodell. Man kan velge en tostegsmodell, hvor treet kun har forgreining på ett tidspunkt, eller en flerstegsmodell som vist i eksemplet. Flerstegsmodellen er fleksibel med tanke på å modellere den reelle informasjons- og beslutningsstrukturen. Den er godt egnet til å avgjøre ikke bare om et prosjekt skal gjennomføres, men på hvilket tidspunkt dette bør skje gitt scenariene i treet. Ulempen med flerstegsmodeller er at størrelsen på treet (antall noder) vokser fort, noe som virker direkte inn på løsningsstiden for optimeringsmodellen. Dessuten krever

scenarieregneringen for et flerstegstre større innsikt i hvordan usikkerheten utvikler seg over tid, f.eks. hvorvidt høy kostnad i én periode tilsier at det er sannsynlig med høyere, lik eller lavere kostnad i neste periode.



Figur 3: Eksempel på et scenarietre

Når en modell har flere usikre parametere, vil hver node i treet inneholde en kombinasjon av mulige utfall for hver usikker parameter. Dette vil kunne øke størrelsen på treet dramatisk, som igjen kan bidra til en betydelig økning i regnetid.

### 6.3 Design av robuste, fleksible og kostnadseffektive drikkevannsnettverk

Infrastrukturinvesteringene må være enten *robuste* eller *fleksible* for å kunne håndtere usikkerhet på en god måte. I denne sammenheng kan vi tenke på *robusthet* som evnen til å motstå sjokk, på samme måte som et kraftig tre evner å motstå sterk vind. *Fleksibilitet* kan sees på som evnen til å tilpasse seg sjokk, på samme måte som et strå bøyer seg i sterk vind. Overført til drikkevannsinfrastruktur kan robusthet komme i form av overdimensjonerte rør, ventiler o.l., eller rør som er av svært høy kvalitet (og kostnad) og med svært lang forventet levetid. På den måten vil enn kunne møte nær sagt alle tenkelige krav. Fleksibilitet vil kunne komme i form av at det senere blir enkelt eller billig å endre infrastrukturen for å tilpasse seg en endret situasjon.

Svært mange planleggingsregimer (og optimeringsmodeller) planlegger for *ett enkelt* fremtidsscenario eller *en* prognose. Dette vil typisk innebære at en planlegger for det en tror vil mest sannsynlig skje i fremtiden. Dette er eksemplifisert i Figur 4, som illustrerer ett enkelt scenario som representerer fremtiden.

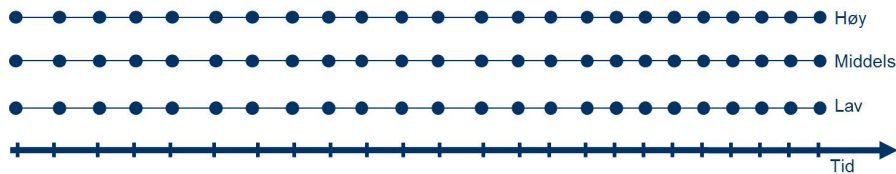


Figur 4: Eksempel på planlegging basert på ett enkelt scenario

En plan laget med utgangspunkt i Figur 4 vil typisk være spesialtilpasset dette ene scenariet og derfor svært godt i nettopp denne situasjonen. Dette betyr ofte at det planlegges litt knapt og at en ikke tar høyde for at uforutsette ting kan skje, f.eks. at etterspørselen etter drikkevann kan bli litt høyere enn forventet. I praksis vil løsninger basert på denne tilnærmingen måtte tilpasses i etterkant for å ta høyde for endringer.

En svært vanlig tilnærming for å håndtere usikkerhet i investeringsanalyser er å lage planer for flere ulike scenarier. Typisk kan dette være et høyt, et middels og et lavt scenario, slik Figur 5 illustrerer. Det kan være verdt

å merke seg at de tre scenariene i figuren ikke er koblet sammen på noen som helst måte, og representerer tre ulike bilder på hvordan fremtiden vil bli. Videre er det verdt å observere at det er ikke er forgreninger for å representere at ulike ting kan skje i fremtiden med en gitt sannsynlighet. I likhet med Figur 4 antar man i Figur 5 at planleggingen skjer ut fra at alt er kjent med 100 % sannsynlighet og at det man planlegger for i de tre ulike scenariene er det som kommer til å skje.



Figur 5: Eksempel på scenarioanalyse

Dersom en antar at hvert scenario i Figur 5 representerer etterspørsel etter drikkevann, så vil en for *Lav*-scenariet planlegge et relativt billig nettverk med lav kapasitet, for *Middels*-scenariet etter forventet etterspørsel og for *Høy*-scenariet et relativt kostbart nettverk tilpasset høy etterspørsel. Det er imidlertid vanskelig å velge én løsning ut fra disse tre som så skal realiseres.

Kanskje en bedre løsning er å planlegge ut fra treet vist i Figur 3? Kanskje en slik løsning vil innebære å bygge et nettverk med middels kapasitet, hvor kapasiteten lett kan økes til en lav kostnad senere dersom det skulle vise seg at etterspørselen blir større? Selv om løsninger funnet ved hjelp av et scenarietre ikke nødvendigvis vil være blant de allerbeste for et gitt scenario er de mer robuste og fleksible siden alle tenkelige utfall ble tatt i betraktning og løsningene lett kan tilpasses om situasjonen skulle endre seg. Hvor robust og fleksibel løsningene er i ulike situasjoner, kan testes på enkeltscenarier som de gitt i Figure 5.

Muligheten for å lett kunne oppgradere, utvide eller tilpasse infrastrukturen senere til en lav kostnad representerer en *realopsjon*. En vanlig definisjon på realopsjon er muligheten for, men ikke plikt til, å utvide, legge ned eller gjennomføre en nyinvestering i et fysisk anlegg. I motsetning til finansielle opsjoner kan realopsjoner være vanskelige å identifisere og verdifastsette. En av grunnene er at det ofte ikke finnes et velfungerende marked, for eksempel for infrastrukturinvesteringer, som kan bidra til å verdsette opsjonene. En annen grunn til at opsjoner er sjeldent å finne i realiteten er at de kun har verdi i forbindelse med usikkerhet. Dersom verktøyet som brukes for å planlegge investeringer ikke eksplisitt tar hensyn til usikkerhet, f.eks. at et rør kan gå i stykker, så vil verktøyet ikke kunne “se” at det kan ha verdi å bygge inn robusthet eller fleksibilitet for å håndtere denne usikkerheten. Erfaringsmessig kan det være vanskelig å identifisere gode opsjonsmuligheter ved manuell planlegging og det kan derfor være hensiktsmessig å benytte verktøy hvor usikkerhet tas hensyn til på en god måte.

Avsnitt 7 skisserer et eksempel på en modell som tar innover seg usikkerhet i forbindelse med feil i nettet. Denne modellen kan brukes til å identifisere beste investerings- og reinvesteringsmuligheter i lys av denne usikkerhetstypen. Usikkerheten i modellene beskrevet ved hjelp av et scenarietre, tilsvarende det som er vist i Figur 3.

## 6.4 Samfunnsøkonomisk verdsetting og investeringsanalyser

Det finnes tall for bedriftsøkonomiske kostnader ved investering og reinvestering i drikkevannsinfrastruktur. Blant annet oppgis det i Kropp [2014] kostnadstall knyttet til utskiftning og rehabilitering per meter rør, kostnad per reparasjon, osv. Videre gis det kostnadstall for ulike strategier og konsekvensen av disse i form av sviktrate og gjennomsnittlig alder av nettet. Det er interessant å merke seg at denne rapporten har lite fokus på at svikt i et rør kan ha ulik effekt på tredjepart, avhengig av hvilket rør som svikter.

Oslo VAV har gjort analyser for å finne ut hvor mange abonnenter som mister vannet i forskjellige bydeler ved ulike hendelser i nettet. Når det gjelder samfunnsøkonomiske kostnader knyttet til leveransesvikt, og da spesielt for tredjepart, er dette et lite belyst område. For en diskusjon av problemstillingen og en oversikt over noe av litteraturen på området vises det til Bjørkvoll et al. [2015].

## 6.5 Målfunksjon

For å kunne bruke en optimeringsmodell til å finne gode løsninger må det defineres hvilke(t) mål modellen skal forsøke å oppnå. I tillegg må en også spesifisere hvilke råd en ønsker å få fra modellen.

I vårt tilfelle ønsker vi å finne ut hvordan en best kan gjennomføre strategiske investeringer i drikkevannsinfrastruktur. Vi ønsker å gjøre dette med utgangspunkt i samfunnsøkonomisk teori, slik det gjøres for store statlige infrastrukturinvesteringer. Videre ønsker vi å planlegge mange prosjekter i en portefølje, samtidig som vi tar hensyn til fremtidig usikkerhet.

Målsettingen med modellen er å minimere forventede samfunnsøkonomiske kostnader knyttet til å investere, reinvestere, drifte og vedlikeholde drikkevannsinfrastruktur over en planhorisont på flere titalls år. Modellen antar at det er usikkerhet om infrastrukturens evne til å levere drikkevann og at infrastrukturen kan bli skadet. Alle kostnader antas neddiskontert til første år i planhorisonten. Beskrivelsen nedenfor har samme struktur og rekkefølge som funksjon (8) i avsnitt 7.9.

Modellen søker å minimere forventede kostnader, hvor disse er definert som den følgende summen:

- Alle forventede investeringskostnader knyttet til planlagt gjennomførte prosjekter over planhorisonten.*
- + Forventede vedlikeholdskostnader knyttet til eksisterende og ny infrastruktur over planhorisonten.*
- + Forventede kostnader av ad-hoc vedlikehold og reparasjoner som følge av brudd.*
- + Forventede kostnader for tredjepart knyttet til forurenset drikkevannsforsyning.*
- + Forventede kostnader for tredjepart knyttet til utilstrekkelig mengde vann levert.*
- + Forventede driftsøkonomiske kostnader (for Oslo VAV) knyttet til avbrudd (f.eks. nødvann, hotell).*
- + Forventede kostnader knyttet til produksjon og transport av vann.*
- + Forventet marginalkostnad for å håndtere drikkevann som blir avløpsvann.*
- Investeringenes restverdi ved slutten av planhorisonten.*

En implementert versjon av modellen beskrevet i neste avsnitt vil kunne gi råd om hvilke beslutninger som bør tas slik at kostnadene beskrevet ovenfor blir lavest mulig. Restverdi av investeringene reflekterer at levetiden på investeringene kan gå ut over planhorisonten og at investeringer som planlegges utført mot slutten av planhorisonten har verdi utover denne tiden. Uten denne vurderingen vil det ikke være lønnsomt å foreta investeringer mot slutten av planhorisonten.

Det er verdt å merke seg at en i modellen tar utgangspunkt i P50 og ikke P85 (ref. figur 2) for å unngå å “prise inn risiko dobbelt”. (At faktisk kostnad på byggeprosjekter i snitt kan bli høyere enn P50 er et kostnadsestimerings- og prosjektgjennomføringsproblem, ikke et porteføljeplanleggingsproblem.)

## 7 Matematisk modell for samfunnsøkonomisk optimal investering i drikkevannsinfrastruktur

Dette avsnittet gir en matematisk formulering av det strategiske planleggingsproblemet.

## 7.1 Infrastrukturens elementer

Drikkevanninfrastrukturen er definert som en graf  $\mathcal{G} = (N, E)$ , hvor  $N$  representerer noder (rørsplitter, trykkbasseng, drikkevannskilder, o.l.), mens  $E$  representerer ikke-rettede kanter (rør), hvor

$$E \subset \{k = (i, j) : i, j \in N \text{ og } i < j\} \quad (2)$$

Hver kant/rør er indeksert ved  $i, j$  eller  $k$ .  $\theta_k$  representerer rørets kapasitet, mens  $\theta_i$  er nodens kapasitet. Noen av nodene er forsyningsnoder og inngår i mengden  $\mathcal{O} \subset N$ , mens andre har en etterspørsel (typisk abonnenter) og inngår i mengden  $\mathcal{D} \subset N$ . Noder som ikke er forsynings- eller etterspørselsnoder og kun knytter rør sammen uten noen form for etterspørsel inngår i  $\mathcal{N} \subset N$ . Dermed er  $N = \mathcal{O} \cup \mathcal{D} \cup \mathcal{N}$ . Tid er representert ved  $t \in \mathcal{T}$ . Typisk vil varigheten på en periode  $t$  være et år.

## 7.2 Hendelser og scenarier

Ved ordinær drift kan etterspørsel etter drikkevann påvirkes av pris for forbrukt mengde, holdningsendringer, mer effektive vaskemaskiner osv. I situasjoner med leveranseproblemer vil også etterspørselen kunne endres betydelig, f.eks. ved at befolkningen bes spare på vannet. I den videre modellen forenkler vi dette og antar at etterspørselen er statistisk i et år men kan variere fra år til år.

Et rør  $k$  kan bli utsatt for ulike hendelser som kan medføre at røret ødelegges helt eller delvis og kan kreve forskjellige typer korrektive tiltak. I praksis vil varigheten og kostnaden for slike tiltak kan avhenge av ledningens dimensjon, hvor dypt den ligger, hvor den ligger, hvor stor feilen er, osv. Vi forenkler dette noe i modellen (da vi ikke vet nøyaktig hvilken hendelse som kommer til å skje) og antar at varigheten og kostnaden av tiltak er gitt ved en flat sats for hvert enkelt rør. Varighet og kostnad knyttet til å reparere infrastrukturen vil således variere mellom ulike rør  $k$  og noder  $i$ .

Hendelser som rør eller noder utsettes for kan beskrives ved hjelp av scenarier  $s \in \mathcal{S}$  med gitt sannsynlighet  $prob^s$ . Effekten som hendelsen har på et rør  $k$  i scenario  $s$  uttrykkes som  $\xi_{kt}^s$ , målt i andel av kapasitet som er tilgjengelig i perioden. Dersom en antar at en periode har en varighet på et år, og et steinras i tunnelen som et rør  $k$  ligger i slår ut røret fullstendig i ni måneder (75 % av året), så er  $\xi_{kt}^s = 0.25$ . Tilsvarende kan en ha at en av nodene  $i$  (f.eks. et trykkbasseng) blir utsatt for en hendelse. Dette er representert ved  $\xi_{it}^s$ . Det er ingen prinsipiell forskjell på konsekvensen av hendelser på kanter  $k$  (rør) og hendelser på noder  $i$  (vannrenseanlegg, høydebasseng osv.). I virkeligheten er konsekvensen av å miste all vannforsyning i ni måneder ulik det å motta kun begrensede mengder vann over en lengre periode. En eventuell fremtidig implementering av modellen bør reflektere dette. I en normalsituasjon vil Oslo VAV være i stand til å levere tilstrekkelig mengde rent vann for å tilfredstille etterspørselen  $d_{it}$  for nodene  $i \in \mathcal{D}$  i periode  $t \in \mathcal{T}$ . For å reflektere at en ikke alltid klarer å levere tilstrekkelig med vann i scenario  $s$  bruker vi  $\hat{d}_{it}^s$  for å representere hvor mye rent vann som faktisk leveres. Manko i leveransen til node  $i \in \mathcal{D}$  er gitt ved  $e_{it}^s$ . For nodene  $i \in \mathcal{O}$  kan  $e_{it}^s$  representere utilstrekkelig eller overskuddskapasitet.

Ved forurensning vil etterspørselen  $d_{it}$  tilfredstilles av forurenset vann  $\hat{e}_{it}^s$ . En vil alltid forsøke å levere tilstrekkelige mengder vann, uavhengig av om vannet er forurenset eller ikke. Dersom en heller ikke klarer å levere tilstrekkelige mengder ikke-rent vann, så oppstår en mankosituasjon, hvor  $e_{it}^s$  beskriver underskuddet på levert vann. Forholdet mellom etterspørsel, leveranser og manglende leveranser er gitt ved  $d_{it} = \hat{d}_{it}^s + \hat{e}_{it}^s + e_{it}^s$ .

En hendelse  $\xi_{kt}^s$  kan påvirke omkringliggende infrastruktur. Dette kan beskrives ved å anta at scenariene som beskriver en hendelse  $\xi_{kt}^s$  eller  $\xi_{it}^s$  for komponent  $k$  eller  $i$  er positivt korrelert med scenarier for de delene av nettverket som kan påvirkes.

### 7.3 Forurensning og tosidig forsyning

Ikke alle hendelser er tilstrekkelig store til å bryte drikkevannsforsyningen eller forårsake forurensning av drikkevannet. For at en hendelse skal ha en direkte negativ effekt på abonnentene må den overstige en gitt grenseverdi  $\hat{\theta}_k$  for rør  $k$ ,  $\xi_{kt}^s > \hat{\theta}_k$ . Grenseverdiene angir andel av kapasiteten og ligger derfor i intervallet  $[0, 1]$ .

Dersom vanntrykket blir lavere enn trykket utenfor et rør (f.eks. dersom et lekk rør ligger på bunnen av en avløpskum fylt med vann) vil det være risiko for forurensning. Erfaringsmessig vil det ta noe tid å finne punktet hvor forurensningen kommer inn, og en vil typisk anta at vannet i en eller flere soner er forurenset. Målinger av drikkevannskvalitet kan benyttes i kombinasjon med hydrauliske modeller til å finne ut i hvilke soner det ikke kan garanteres rent drikkevann. Når forurensningskilden er identifisert vil en i en del tilfeller hvor det er tosidig forsyning ha mulighet til å omdirigere vannstrømmer slik at vannet om mulig føres frem til abonnentene en annen vei mens reparasjonsarbeidet pågår.

Hendelser som kan føre til forurensning kan altså påvirke abonnentene langt borte fra selve hendelsen. Det er vanskelig å gi en helt presis kobling mellom en hendelse og hvordan dens omfang vil påvirke den enkelte abonnent. F.eks. kan en hendelse på et rør  $k$  føre til endringer i flyten i nettverket, som igjen påvirker hvem som blir berørt av eventuelt forurenset vann.

Av løsnings- og brukstekniske grunner gjør vi forenklinger i denne strategiske modellen ved å ikke modellere flyt av forurenset vann eksplisitt. I stedet antar vi at hendelser på hvert enkelt rør kan kobles mot de ulike sonene som abonnentene  $i \in \mathcal{D}$  er lokalisert i dvs. mot abonnenter som påvirkes av denne skaden. Vi antar at det er forhåndsdefinert hvilket rør som kan påvirke hvilke abonnenter. Dette er gitt ved  $\bar{D}(k) \subseteq N$ , hvor  $\bar{D}(k)$  er en mengde som beskriver de noder som kan påvirkes av skader på rør  $k$ . Et eksempel på dette er  $\bar{D}(42) = \{1, 7, 24\}$ . Dette innebærer at dersom en skade oppstår på rør 42, så vil denne påvirke kundene i sonene 1, 7 og 24.

For å modellere at vannet enten er rent ( $\hat{d}_{it}^s$ ) eller forurenset ( $\hat{e}_{it}^s$ ) innfører vi indikatorene  $\delta_{kt}^s$  som tar verdien 1 dersom en hendelse har medført at rør  $k$  slipper inn forurensning og  $\delta_{it}^s$  som tar verdien 1 dersom vannet i node  $i$  er forurenset.  $M$  representerer et tilstrekkelig stort tall.

$$\forall s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T} :$$

$$\xi_{kt}^s - \hat{\theta}_k \leq \delta_{kt}^s \quad \forall k \in N \quad (3a)$$

$$\delta_{kt}^s \leq \delta_{it}^s \quad \forall k \in N, i \in \bar{D}(k) \quad (3b)$$

$$\hat{d}_{it}^s \leq M(1 - \delta_{it}^s) \quad \forall i \in \mathcal{D} \quad (3c)$$

$$\hat{e}_{it}^s \leq M\delta_{it}^s \quad \forall i \in \mathcal{D} \quad (3d)$$

Modellens målfunksjon knytter kostnader til levering av forurenset vann, dvs. om  $\delta_{it}^s = 1$ . En løsning av modellen vil derfor søke å unngå å levere forurenset vann om mulig. I (3a) vil  $\delta_{kt}^s$  tvinges til 1 dersom hendelsen  $\xi_{kt}^s$  er større enn grenseverdien  $\hat{\theta}_k$ . Dersom vannet blir forurenset i  $k$  ( $\delta_{kt}^s$  tar da verdien 1) vil dette spre seg til nodene  $i \in \bar{D}(k)$  som er koblet mot  $k$ . Dette er uttrykt i (3b) som tvinger  $\delta_{it}^s$  til å anta verdien 1 dersom et rør  $k$  som forsyner  $i$  lekker inn forurenset vann (indikert ved  $\delta_{kt}^s$ ).

Det er mulig på et senere tidspunkt å introdusere flere kvalitetskriterier i modellen på vannet som leveres, f.eks. farge, lukt, surhetsgrad. Dette kan imidlertid føre til økt databehov, problemkompleksitet og løsningsstid.

For en del av abonnentene som har tosidig forsyning vil en kunne omdirigere vann fra andre soner enn de normalt får vann fra. Dette kan være hensiktsmessig for å lede vannet rundt en sone hvor forurensning kan ha kommet inn i ledningsnett. Dobbelttsidig forsyning vil minimere sannsynligheten for fullstendig avbrudd og for forurensete leveranser.



Modellen gir ikke en detaljert beskrivelse av hvordan forurensning kan spre seg i nettverket, da dette vil kreve vesentlig mye mer infrastrukturdata samt øke regnetiden dramatisk. I stedet for antas det at man har kostnader knyttet til forurensning og utilstrekkelige mengder levert vann. Disse kostnadene reflekterer at tosidig vannforsyning vil medføre at akseptable leveranser kan opptas på vesentlig kortere tid (da en kan levere via alternativ vei) og at flere får tilstrekkelig mengde vann levert.

#### 7.4 Flyt, kapasitet og etterspørsel

Mengde vann (flyt) langs kant  $k$  i periode  $t \in \mathcal{T}$  i scenario  $s \in \mathcal{S}$  er gitt ved  $x_{kt}^s$  eller  $z_{kt}^s$ . Vi definerer  $x_{kt}^s = x_{ijt}^s$  på kant  $k = (i, j) \in E$  hvis vannet flyter i retning  $i \rightarrow j$ , mens  $z_{kt}^s = z_{ijt}^s$  på kant  $k = (i, j) \in E$  hvis vannet flyter i retning  $j \rightarrow i$ , i scenario  $s$ .

På veien fra vannproduksjonsanlegget til abonnent forsvinner en del av vannet på grunn av lekkasjer. Parametere  $\alpha$  beskriver tapet i prosent. Dette tapet er uavhengig av eventuelle hendelser og antas å være uendret over tid og jevnt fordelt over nettet.

Flyten og kapasiteten i rørnettverket kan dermed beskrives som følger:

$$\forall s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T} :$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} (x_{ijt}^s - z_{ijt}^s) - \sum_{j:(j,i) \in E} (x_{jit}^s - z_{jit}^s) = \begin{cases} 0 & \forall i \in \mathcal{N} \\ d_{it}^s - e_{it}^s & \forall i \in \mathcal{O} \\ \frac{d_{it}}{(1-\alpha)} & \forall i \in \mathcal{D} \end{cases} \quad (4a)$$

$$d_{it} = \hat{d}_{it}^s + \hat{e}_{it}^s + e_{it}^s \quad \forall i \in \mathcal{D} \quad (4b)$$

$$x_{kt}^s + z_{kt}^s \leq \theta_{kt} \xi_{kt}^s \quad \forall k \in E \quad (4c)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \mathcal{O}} x_{ijt}^s \leq \theta_i \zeta_{it}^s \quad \forall i \in \mathcal{O} \quad (4d)$$

(4a) beskriver flyt gjennom rørene i nettverket. Høyresiden er lik null for et “transshipment”-rør uten etterspørsel eller forsyningsfunksjon. Linje to i høyresiden av (4a) beskriver tilbudt kapasitet  $d_{it}^s$  i forsyningsnoder  $i \in \mathcal{O}$  i scenario  $s$ , mens  $e_{it}^s$  beskriver rest-/underskuddskapasitet i noden. Linje tre sikrer at etterspørsel etter vann i en etterspørselsnode  $i \in \mathcal{D}$  skal dekkes. Restriksjonen tar også hensyn til tapet  $\alpha$  av vann underveis. Legg merke til at i en optimal løsning vil enten  $x_{ijt}^s$  eller  $z_{ijt}^s$  være null. (4b) beskriver at antatt deterministisk etterspørsel etter rent drikkevann blir tilfredstilt med levering av rent vann ( $\hat{d}_{it}^s$ ) eller forurenset vann ( $\hat{e}_{it}^s$ ). Den tredje termen ( $e_{it}^s$ ) uttrykker etterspørsel som ikke blir dekket. (4c) legger føringer på rørkapasiteten som kan reduseres ved hendelser  $\xi_{kt}^s$ . (4d) definerer kapasiteten til noder som “produserer” vann slik som vannrenseanlegg og trykkbasseng<sup>2</sup>. Også denne kapasiteten kan reduseres ved hendelser.

Vi antar at verdiene for kapasitetsreduksjonen  $\xi_{kt}^s$  er gitt ved hjelp av et scenariotre. Dersom det er sannsynlig at hendelser kan påvirke flere rør samtidig vil de aktuelle scenarioene være positivt korrelert.

#### 7.5 Investeringsalternativer

Oslo VAV kan endre kapasiteten og kvaliteten på infrastrukturen ved å gjennomføre ulike prosjekter  $p \in \mathcal{P}$ . Prosjekter som påvirker rørsplitter, ventiler eller noder  $i \in \mathcal{N}$  inngår i settet  $\mathcal{P}_i \subseteq \mathcal{P}$ , mens prosjekter som påvirker rør eller kanter  $k \in E$  inngår i settet  $\mathcal{P}_k \subseteq \mathcal{P}$ .

<sup>2</sup>Dette er teknisk sett ikke korrekt for trykkbasseng, men akseptabelt pga. den lange periodelengden i kombinasjon med at de “produserer” vann i kapasitetstoppene, som er kapasitetsdimensjonerende.

Beslutning om investering i vanninfrastruktur er gitt ved beslutningsvariabelen  $y_{pt}^s$  som tar verdien 1 dersom prosjekt  $p$  gjennomføres i periode  $t$  i scenario  $s$  og null ellers. Hvert prosjekt kan starte opp maksimalt en gang:

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} y_{pt}^s \leq 1 \quad \forall s \in \mathcal{S}, p \in \mathcal{P} \quad (5)$$

I en investeringssituasjon kan en ha flere ulike tekniske løsninger med ulike kostnader, kapasiteter, osv. for å løse et gitt utbyggingsproblem. Dette representeres ved flere alternative prosjekter som hver har sine respektive kvaliteter og kostnader. Alle slike valgsituasjoner er gitt ved  $q \in \mathcal{Q}^{Alt}$  og prosjektalternativer i hvert valg  $q$  er gitt ved  $p \in \mathcal{P}_q^{Alt}$ . (6) legger begrensninger, slik at maksimalt ett av de gjensidig utelukkende prosjektene kan gjennomføres for hvert valg:

$$\sum_{p \in \mathcal{P}_q^{Alt}} \sum_{t \in \mathcal{T}} y_{pt}^s \leq 1 \quad \forall s \in \mathcal{S}, q \in \mathcal{Q}^{Alt} \quad (6)$$

Ved å gjennomføre et prosjekt kan en endre infrastrukturen, f.eks. øke kapasiteten  $\theta_{kt}$  eller robustheten  $\hat{\theta}_{kt}$  på et rør  $k$ . Parameterne  $h_{kp}$  og  $\hat{h}_{kp}$  beskriver effekten som prosjekt  $p$  har på henholdsvis kapasitet og robusthet.

$\forall k \in E, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T} \setminus \{1\}$  :

$$\theta_{kt} \geq \max \left\{ \theta_{k,t-1} \zeta_{k,t-1}^s, \min \left\{ h_k^{max} \sum_{p \in \mathcal{P}_k} y_{pt}^s, \theta_{k,t-1} \zeta_{k,t-1}^s + \sum_{p \in \mathcal{P}_k} y_{pt}^s h_{kp} \right\} \right\} \quad (7a)$$

$$\hat{\theta}_{kt} \geq \max \left\{ \hat{\theta}_{k,t-1}, \min \left\{ \hat{h}_k^{max} \sum_{p \in \mathcal{P}_k} y_{pt}^s, \hat{\theta}_{k,t-1} + \sum_{p \in \mathcal{P}_k} y_{pt}^s \hat{h}_{kp} \right\} \right\} \quad (7b)$$

(7a) sørger for at kapasiteten til rør  $k$  er lik den i foregående periode,  $\theta_{k,t-1} \zeta_{k,t-1}^s$ , dersom ingen prosjekt gjennomføres, og endrer kapasiteten dersom et eller flere prosjekter gjennomføres. Dersom et prosjekt gjennomføres kan kapasiteten øke til det den var i forrige periode pluss den nye kapasiteten som legges til (f.eks. et nytt rør parallelt med det gamle røret), men ikke mer enn kapasiteten  $h_k^{max}$  som røret maksimalt kan oppjusteres til (som f.eks. kan være dimensjonert av tunnelens diameter). Tiltak som kan øke robustheten mot forurenset vann er beskrevet i (7b) og benytter samme tilnærming som (7a). Hendelser  $\zeta_{kt}^s$  kan påvirke kapasiteten, men ikke robustheten mot forurensning.

Effekt av tiltak på noder  $i$  kan modelleres på lignende måte. Merk at uttrykkene i (7) er ikke-lineære og en omformulering er påkrevt før en eventuell implementering av den matematiske modellen.

## 7.6 Effekt av investeringer på driftsstabilitet og kapasitet og degradering av infrastruktur

Gamle rør kan ha dårlig eller usikker driftsstabilitet. Ved å bytte ut et gammelt rør med et nytt i samme dimensjon, vil konsekvensene av at et rør kollapser ikke endres, men sannsynligheten  $prob^s$  for at dette skjer vil bli redusert. Dersom en velger å investere i et nytt rør med annen kapasitet eller bedre kvalitet så vil sannsynligheten for kollaps reduseres. I tillegg kan også røret ha større kapasitet, slik at det skal en større hendelse til for å redusere transportevnen slik at abonnentene rammes.

## 7.7 Budsjettrestriksjoner

Ved investeringer legges det ofte budsjetter over flere år for å reflektere at anleggsperioden kan være lang, mens driftsbudsjetter legges år for år. Infrastrukturen kan endres over tid ved at den forringes eller forbedres ved investeringer. Driftskostnadene kan dermed forandre seg som følge av at infrastrukturen og krav til denne endres. Budsjettet kan påvirkes av dette ved at driftskostnadene kan reduseres som følge av infrastruktur av høyere kvalitet eller økes som følge av mer infrastruktur som må vedlikeholdes. Da investerings- og vedlikeholdskostnader henger tett sammen, legges det opp til at modellen kan se disse under ett (med mindre annet spesifiseres av

brukeren).

I modellen kan det enkelt legges føringer på budsjett per år og over flere år. Dette gir modellbrukeren mulighet for å begrense hvor mye som kan brukes for det enkelte år, og hvor mye som totalt kan brukes over de fem, ti, femten, osv. neste årene. Dersom en ønsker å gjennomføre analyser uten budsjettbegrensninger er det enkelt mulig at modellbrukeren kan deaktivere disse restriksjonene. Effekten vil være like store eller lavere totale kostnader sammenlignet med bruk av jevnere/mer realistiske budsjetter, men modellen kan komme til å foreslå løsninger hvor kostnadene varierer betydelig fra år til år.

## 7.8 Nedskrivinger og restverdi

Investeringer som har en teknisk levetid på opptil 30–40 år vil typisk kunne nedskrives lineært, slik Hagenutvalget foreslår i kapittel 6.4 i NOU 2012:16 [Finansdepartementet, 2012]. Om en investering med en levetid på 35 år blir gjennomført i år 20 i en analyseperiode på 40 år, vil verdien  $\varpi$  av investeringen ved analyseperiodens slutt være  $1 - \left(\frac{40-20}{35}\right) = 0.428$  eller litt under 43 % opprinnelig investeringskostnad.

Enkelte investeringer, slik som rørledningstunneler, kan ha en vesentlig lengre levetid for selve tunnelen enn f.eks. rørledningen eller ventiler inne i tunnelen. Det er sannsynlig at investeringene med kortest levetid vil bli benyttet som opprinnelig planlagt. For investeringer med svært lang teknisk levetid kan en tenke seg at disse blir brukt til noe helt annet enn drikkevannsforsyning om 100 år.

Det er usikkerhet knyttet til teknisk levetid, økonomisk levetid, endrede myndighetskrav, hvor lenge tunneler brukes til drikkevannsforsyning og om de eventuelt kan ha andre anvendelser senere (f.eks. kabler, T-bane, tilfluktsrom). For at modellen også skal kunne anbefale investeringer mot slutten av planhorisonten, hvor disse da vil kunne brukes kun i kort tid, må disse tilordnes en verdi som reflekterer at disse har verdi i etterkant av planhorisonten. Det kan være flere tilnærminger til dette:

1. Anta at alle deler av investeringen har like lang levetid og nedskrives lineært.
2. Dele opp investeringen i to deler med ulik levetid, hvor hver del nedskrives lineært med utgangspunkt i dens tekniske levetid.
3. Dele opp investeringen i to deler med ulik levetid, hvor hver del nedskrives lineært med utgangspunkt i dens tekniske levetid, men for den delen av investeringen med lengst levetid antar man usikker levetid beskrevet av flere scenarier som håndteres simultant i modellen.

Sistnevnte tilnærming antas å være mest fleksibelt og best sett fra et investeringsfaglig ståsted, men vil føre til en rikere og mer regningskrevende modell. Rapporten går ikke ytterligere inn på hvilken tilnærming som bør benyttes.

## 7.9 Målfunksjon

Dette avsnittet presenterer en matematisk og mer presis formulering fra avsnitt 6.5 for målsettingene som investeringer i vanninfrastruktur bør utføres etter. Målfunksjonen nedenfor vil senere kunne benyttes i et optime-

ringsdrevet IT-verktøy.

$$\min \sum_{s \in \mathcal{S}} \text{prob}^s \sum_{t \in \mathcal{T}} \beta_t \left( \sum_{p \in \mathcal{P}} c_{pt}^{Inv} y_{pt}^s \right) \quad (8a)$$

$$+ c_t^{VedIP} \left( \phi + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{\tau=1}^t c_{p\tau}^{Inv} y_{p\tau}^s \right) \quad (8b)$$

$$+ \sum_{k \in E} c_{kt}^{VedIIP} (1 - \xi_{kt}^s) + \sum_{i \in N} c_{it}^{VedIIP} (1 - \xi_{it}^s) \quad (8c)$$

$$+ \sum_{i \in \mathcal{D}} c^{FOR} \hat{e}_{it}^s \delta_{it}^s \quad (8d)$$

$$+ \sum_{i \in \mathcal{D}} c^{MANKO} e_{it}^s \quad (8e)$$

$$+ \sum_{i \in \mathcal{D}} c^{VAV} e_{it}^s \quad (8f)$$

$$+ \sum_{i \in \mathcal{O}} \sum_{j \in N \setminus \mathcal{O}} c_{it}^{Prod} x_{ijt}^s \quad (8g)$$

$$+ \sum_{i \in N \setminus \mathcal{D}} \sum_{j \in \mathcal{D}} c_{it}^{Avlop} x_{ijt}^s \quad (8h)$$

–  $\varpi$

(8i)

Alle kontantstrømmer antas neddiskontert til første analyseår med diskonteringsats  $\beta_t$ . (8a) beskriver forventet kostnad knyttet til investering og re-investering i vanninfrastruktur. Kostnaden  $c_{pt}^{Inv}$  avhenger av hvilken tidsperiode  $t$  prosjekt  $p$  gjennomføres i. Ordinære vedlikeholdskostnader er gitt ved (8b), og avhenger av hvor mye infrastruktur som skal vedlikeholdes. Anleggsverdien av infrastruktur som eksisterer ved start av planleggingshorisonten er estimert ved  $\phi$ , mens en for nye investeringer tar utgangspunkt i forventede innfasingskostnader.  $c_t^{VedIP}$  representerer en prosentvis sats avsatt til vedlikehold av infrastruktur. Denne er direkte knyttet til infrastrukturens verdi. (8c) beskriver kostnadene for ad-hoc vedlikehold som følge av brudd i ledningsnett. Det antas at kostnader for ad-hoc vedlikehold som følge av brudd i ledningsnett øker proporsjonalt med skadeomfanget  $\xi_k^s$  og  $\xi_i^s$ , gitt gjennom faktorene  $c_{kt}^{VedIIP}$  for vedlikehold på rør  $k$  og  $c_{it}^{VedIIP}$  for vedlikehold på node  $i$ . Disse representerer f.eks. kostnaden av å bytte ut den aktuelle komponenten. Ad-hoc reparasjoner antas å ha en høyere kostnad enn planlagt vedlikehold. Ved hendelser vil det være hensiktsmessig å levere vann selv om det kan være forurenset, (8d) reflekterer kostnaden abonnenten har av å motta forurenset vann (f.eks. koking, stans av produksjon i næringsmiddel- og farmasøytisk industri, restauranter). Det antas at Oslo VAV ikke har vesentlige kostnader knyttet til forurenset vann bortsett fra reparasjonskostnaden gitt i (8c). (8e) beskriver kostnaden knyttet til å levere utilstrekkelige mengder vann. Det antas at kostnaden for å levere forurenset vann  $c^{FOR}$  er lavere enn kostnaden for å ikke kunne levere tilstrekkelige mengder vann  $c^{MANKO}$ , slik at modellen alltid vil forsøke å levere tilstrekkelige mengder vann, uavhengig av kvaliteten. (8f) beskriver bedriftsøkonomiske kostnader Oslo VAV har ved å levere nødvann, dekke hotellovernattinger, o.l. Modellen antar at kostnadene er lineært avhengig av antall liter vann ikke levert. Kostnaden ved å produsere vann er gitt ved (8g). Produksjonskostnaden kan reduseres ved å investere i produksjonsanlegg som produserer vann billigere. For at dette skal skje må en ny produksjonsnode  $i$  åpnes (selv om denne ligger på samme sted som et eksisterende anlegg som “stenger”). I så fall burde en optimeringsmodell også inkludere beslutninger om å stenge ned deler av infrastrukturen, på lignende måte som  $y_{pt}^s$ -variablene, og koblinger mellom disse. (8h) beskriver marginalkostnaden for å håndtere drikkevann som har blitt avløpsvann. Modellen tar ikke hensyn til kapasiteter i avløpsnett og antar at kostnadene gis som en sats per liter/tonn som påløper der vannet brukes. (8i) representerer nedskrivninger og eventuelle restverdier av investeringene. For å beskrive  $\varpi$  på en korrekt måte må denne kobles til verdievaluering av eksisterende og fremtidig infrastruktur. Dette ligger på siden av prosjektets fokusområde.

## 7.10 Avgrensninger i modellen

Modellen skissert ovenfor tar ikke innover seg ekstreme hendelser som total kollaps i store deler av eller i hele ledningsnettet, eller at kostnader kan være ikke-lineære. Det antas at vannet ikke strømmer i sirkel men direkte fra kilde til abonnent.

Den matematiske modellen er normativ og antar at beslutningstakeren er risikonøytral. Det antas å være uproblematisk å introdusere risikomål og føringer som begrenser risiko slik som “Conditional Value at Risk (CVaR)”. For en oversikt over slike risikomål vises det til Rockafellar [2007].

Modellen tar ikke innover seg problemstillinger knyttet til beslutningsavhengig (endogen) usikkerhet dvs. at en iverksetter tiltak som kan endre *sannsynlighetsfordelingen* til noen inngangsdata. Et eksempel er å foreta prøveboring for å få mer informasjon om sannsynligheten for å måtte grave i “vanskelig fjell” ved tunnelutbygging. Dette vil kunne påvirke sannsynlighetsfordelingen for kostnadsparameteren for ulike utbyggingsalternativer.

Prosjektet ser heller ikke på beslutningsavhengige effekter på *verdien* av inngangsdataene i scenarietreet. Et eksempel for dette er endring i bosettingsmønsteret som følge av utbygging av ny infrastruktur, dvs. at råd gitt av modellen bidrar til å påvirke data som er bakgrunn for rådene som gis.

Investeringskostnadene kan påvirkes av beslutninger tatt av andre etater (på samme måte som Oslo VAV kan påvirke andre etaters kostnader). Modellen antar at andre etaters investeringsplaner er kjente og at disse beslutningene allerede er tatt, slik at kostnaden for å gjennomføre et prosjekt vil avhenge av tidspunktet  $t$  det gjennomføres på og hvilken teknologisk løsning som velges. Dette er en forenkling av virkeligheten, hvor Oslo VAV kan påvirke andre etaters beslutninger. For å få med denne påvirkningsmuligheten kan en enten modellere beslutninger for alle etater, og/eller modellere optimal påvirkning av og tilpassning til andre etaters beslutninger. Førstnevnte er svært krevende og utenfor prosjektets mandat, mens sistnevnte tilnærming kan føre til at råd fra modellen søker å påvirke og sannsynligvis “snylte” på andre etater for å minimere kostnader hos Oslo VAV.

Bakgrunnen for disse avgrensningene er at dette er problemstillinger hvor fagmiljøene er kommet vesentlig kortere, både på den modellerings- og den løsningstekniske siden, enn tilfellet er for resten av problemstillingene beskrevet i modellen.

## 8 Databehov

Optimeringsmodeller gir råd basert på kvantitative data som inngår i modellen, og kvaliteten på rådene som gis er derfor avhengig av tilgangen til og kvaliteten på data. Oslo VAV har generelt gode data på kapasitetsbegrensninger for nettet og produksjonsanleggene. I tillegg har det blitt utført mye arbeid med å skaffe informasjon om den tekniske tilstanden på rørrnettverket og å utføre analyser av degradering av nettet, se f.eks. Kropp [2014].

Behovet for og strukturen til inngangsdata for den matematiske modellen skissert i denne rapporten er beskrevet i kapittel 10. Mye av det som behøves er relativt lett tilgjengelig, mens annet vil være mer utfordrende å skaffe. Spesielt gjelder dette samfunnsøkonomiske kostnader knyttet til uforutsette hendelser og verdsetting av ulempen tredjepart har ved avbrudd i drikkevannsforsyningen. Tilsvarende vil en endring av risikohåndtering fra dagens praksis til en koordinert risikohåndtering for investeringsporteføljen som helhet, enten innen samme sektor eller på tvers av sektorer, kreve en innsats, både faglig og organisatorisk.

Når det gjelder kvantifisering av risiko, f.eks. knyttet til degradering av infrastruktur, så er litteraturen til dels svært stor og en kan antageligvis bygge på dette arbeidet. Den matematiske modellen tar utgangspunkt i bruk av scenariotrær. Rent praktisk betyr det at en enten må lage disse manuelt eller at en diskretiserer sannsynlighetsfordelinger som beskriver statistiske egenskaper av den usikkerheten som skal betraktes. Det er gjort en god

del arbeid for hvordan en kan gjennomføre dette på en god og automatisert måte, for eksempel Høyland et al. [2003], Pflug [2001] eller Römisch and Heitsch [2003].

Bedriftsøkonomiske kostnader definert i tabell 3 vil antageligvis kunne skaffes ved å se på historiske kostnadsdata. Når det gjelder samfunnsøkonomiske kostnader knyttet til uforutsette hendelser, da spesielt med fokus på tredjepart, er tallmaterialet begrenset og ytterligere forskning nødvendig.

Selv om en per i dag ikke har samtlige inngangsdata tilgjengelig viser erfaringer at det som regel er mulig å bygge optimeringsbaserte beslutningsstøtteverktøy som tar utgangspunkt i de data en har og benytte estimeringer der en mangler data. Fordelen med en slik pragmatisk tilnærming er at en kan oppnå en effektiviserings-/forbedringsgevinst overfor manuell/partiell planlegging tidligere enn om en skulle vente til alle data er tilgjengelige. Et slikt verktøy vil gradvis kunne utvides og forbedres etter hvert som nye data blir tilgjengelig og datakvaliteten øker.

## 9 Oppsummering

Utgangspunktet for denne rapporten er å gi en konkret beskrivelse av en optimeringsmodell som kan finne optimal vannforsyningsinfrastruktur som balanserer samfunnsøkonomiske kostnader knyttet til svikt eller avbrudd i deler av nettverket med investerings- og driftskostnader.

Rapporten går også inn på investeringsregimet som i dag benyttes av Oslo kommune og beskriver forbedringspunkter, blant annet:

- Effekter knyttet til å ta hensyn til tredjepart ved utredning av investeringsalternativene.
- Effekten av at prosjekter/alternativer kan påvirke hverandre og analysene i forkant av en investering bør ta hensyn til dette.
- Bedre koordinering av mange prosjektalternativer i tid og rom for bedre ressursutnyttelse.
- Håndtering av usikkerhet.

I tillegg til å beskrive hvilke råd en optimeringsmodell bør gi, hvilke føringer den må ta hensyn til, og hvilke data som modellen krever, presenterer rapporten en skisse til en slik optimeringsmodell. Modellen er beskrevet matematisk og kan danne grunnlaget for en senere implementering. Med utgangspunkt i erfaring fra andre bransjer er det forventet at operativ bruk av en slik modell vil gi (samfunns)økonomiske forbedringer og redusere risikoen for svikt i drikkevannsforsyningen. Den vil gjøre det mulig å evaluere et ekstremt høyt antall alternativer raskt, å finne de beste av disse og å dokumentere konsekvenser av foreslåtte beslutninger. Modellen vil også kunne brukes til å evaluere manuelt lagde investeringsplaner, synliggjøre konsekvensene av gitte beslutninger og føringer, og planlegge "rundt" foreslåtte/vedtatte investeringsbeslutninger.

## 10 Matematisk notasjon

Tabell 1: Mengder og indekser

Navn	Beskrivelse
$k \in E$	Sett med ikke-rettede kanter (rør).
$i, j \in N$	Alle nodene i nettet.
$\mathcal{D} \subseteq N$	Sett med etterspørselsnoder.
$\mathcal{N} \subseteq N$	Alle noder som ikke har etterspørsel eller er forsyningsnoder.
$\mathcal{O} \subseteq N$	Sett med forsyningsnoder.
$\bar{D}(k) \subseteq N$	Mengde som beskriver noder som kan påvirkes av skader på rør $k$ .
$p \in \mathcal{P}$	Mulige prosjekter som kan gjennomføres.
$\mathcal{P}_i \subseteq \mathcal{P}$	Sett av prosjekter som påvirker noder $i$ .
$\mathcal{P}_k \subseteq \mathcal{P}$	Sett av prosjekter som påvirker rør $k$ .
$p \in \mathcal{P}_q^{Alt}$	Sett med alternative (gjensidig utelukkende) prosjekter i valgsituasjon $q$ .
$q \in \mathcal{Q}^{Alt}$	Sett med valgsituasjoner for å løse et gitt utbyggingsproblem.
$s \in \mathcal{S}$	Scenarier.
$t \in \mathcal{T}$	Tidsperioder.

Tabell 2: Variabler

Navn	Beskrivelse
$\delta_{it}^s \in \{0, 1\}$	Indikator som tar verdi 1 dersom vannet er forurenset og 0 dersom det er rent.
$\delta_{kt}^s \in \{0, 1\}$	Indikator som tar verdi 1 dersom rør $k$ er såpass skadet at det slipper inn forurenset vann og 0 ellers.
$\hat{d}_{it}^s$	Leveranse av rent vann i node $i$ i periode $t$ .
$e_{it}^s$	Differanse mellom etterspørsel og leveranse. Typisk manko i etterspørselsnode og manko eller restkapasitet i forsyningsnode.
$\hat{e}_{it}^s$	Mengde forurenset vann levert.
$x_{kt}^s, z_{kt}^s$	Flyt av vann langs kant $k$ i scenario $s$ . $x_{kt}^s$ og $z_{kt}^s$ går i motsatt retning.
$y_{pt}^s \in \{0, 1\}$	Beslutningsvariabel som tar verdi 1 dersom en investerer i prosjekt $p$ i periode $t$ i scenario $s$ og 0 ellers.

Tabell 3: Koeffisienter og parametere

Navn	Beskrivelse
$\alpha$	Tap av vann under transport i ledningsnettet.
$\beta_t$	Diskonteringsats i periode $t$
$\theta_k$	Rørets kapasitet.
$\theta_i$	Nodens kapasitet.
$\hat{\theta}_k$	Grenseverdi for hendelse på rør.
$\xi_k^s$	Prosentvis kapasitet for rør $k$ etter hendelse i scenario $s$ .
$\xi_i^s$	Prosentvis kapasitet for node $i$ etter hendelse i scenario $s$ .
$\varpi$	Nedskrivinger og eventuelle restverdier av investeringene mot slutten av planhorisonten.
$\phi$	Estimert bokført verdi av eksisterende infrastruktur.
$c_{it}^{Avlop}$	Kostnad for å håndtere avløpsvann.
$c^{FOR}$	Kostnad for tredjepart som følge av forurenset drikkevann.
$c_{pt}^{Inv}$	Kostnad for å investere i prosjekt $p$ .
$c^{MANKO}$	Kostnad for tredjepart som følge av manglende vannleveranse.
$c_{it}^{Prod}$	Kostnad for å produsere en enhet drikkevann.
$c^{VAV}$	Bedriftsøkonomiske kostnader Oslo VAV har ved å håndtere utilstrekkelig mengde levert vann (hotell, nødvann, etc.).
$c_t^{VedIP}$	Årlige vedlikeholdskostnader.
$c_{kt}^{VedIP}$	Kostnader for ad-hoc vedlikehold/reparasjoner på rør.
$c_{it}^{VedIP}$	Kostnader for ad-hoc vedlikehold/reparasjoner på noder.
$d_{it}$	Etterspørsel etter rent vann i node $i$ i periode $t$ .
$h_{kp}$	Effekt av prosjekt $p$ på kapasitet for rør $k$ .
$\hat{h}_{kp}$	Effekt av prosjekt $p$ på robusthet for rør $k$ .
$h_k^{max}$	Maksimumskapasitet for rørledning $k$ .
$\hat{h}_k^{max}$	Maksimal robusthet mot forurenset vann, må være mellom 0 og 1.
$M$	Stort tall.
$prob^s$	Sannsynlighet for scenario $s$ .



## Referanser

- T. Bjørkvoll, T. Halvorsen, and A.-G. Lium. Verdien av en robust vannforsyning. Technical Report A27279, SINTEF, 2015.
- Finansdepartementet. NOU 2012:16. Samfunnsøkonomiske analyser, 2012. URL <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2012-16/id700821/>.
- K. Høyland, M. Kaut, and S. W. Wallace. A heuristic for moment-matching scenario generation. *Computational Optimization and Applications*, 24(2–3):169—185, 2003.
- Jernbaneverket. Metodehåndbok. Samfunnsøkonomiske analyser for jernbanen, 2015. URL <http://www.jernbaneverket.no/contentassets/a3e2c5d145d04eaa95c04e6ebe036e44/metodehandbok-2015.pdf>.
- I. Kropp. Update of LTP strategy for the new master plan 2015–2030 for the water system of the City of Oslo. Technical report, 3S Consult, Garbsen, Germany, 2014.
- Oslo kommune. Konseptvalgutredning (KVU) i Oslo kommune. Krav og veiledning, November 2011. URL <https://kgv.doffin.no/app/docmgmt/downloadPublicDocument.asp?DVID=379886&FMT=1&AT=15&ID=116462>.
- G. C. Pflug. Scenario tree generation for multiperiod financial optimization by optimal discretization. *Mathematical Programming*, 89(2):251—271, 2001.
- W. Römisich and H. Heitsch. Scenario reduction algorithms in stochastic programming. *Computational Optimization and Applications*, 24(2–3):187—206, 2003.
- R. T. Rockafellar. Coherent approaches to risk in optimization under uncertainty. In *INFORMS Tutorials in Operations Research*, chapter 4, pages 38–61. 2007. URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/educ.1073.0032>.
- Statens Vegvesen. Konsekvensanalyser. Håndbok V712, 2014. URL [http://www.vegvesen.no/\\_attachment/704540/binary/1056993?fast\\_title=Håndbok+V712+Konsekvensanalyser.pdf](http://www.vegvesen.no/_attachment/704540/binary/1056993?fast_title=Håndbok+V712+Konsekvensanalyser.pdf).
- K. G. Willis, R. Scarpa, and M. Acutt. Assessing water company customer preferences and willingness to pay for service improvements: A stated choice analysis. *Water Resources Research*, 41(2), 2005. doi: 10.1029/2004WR003277. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2004WR003277>.