

# Hvordan kan avskjærende avløpsledninger med pumping bygges om for å redusere energiforbruket?

## Erfaringer fra Skien kommune

*Av Gunnar Mosevoll, Finn Jenssen og Eskild Henning Larsen*

Gunnar Mosevoll, Finn Jenssen og Eskild Henning Larsen er alle ansatt i Skien kommune, Ingeniørvesenet.

Innlegg på fagtreff i Norsk vannforening 8. juni 2009.

### Summary

In Skien the use of inverted siphons as parts of intercepting sewers started around 1990. In 2007 15 inverted siphons are in operation. Most of these inverted siphons have pumping stations connected. The length ranges from 100 m to 14 km. The corresponding elevation difference between inlet and outlet is from 3 m to 100 m.

Inverted siphons have several advantages, as reduced costs of electric energy for pumping and increased reliability. In Skien only a few operational problems are experienced.

For additional reduction of the consumption of electric energy the reconstruction of 10 - 12 intercepting sewers are planned. In most of these projects the existing pumping pipeline will be replaced with a combined pumping pipeline

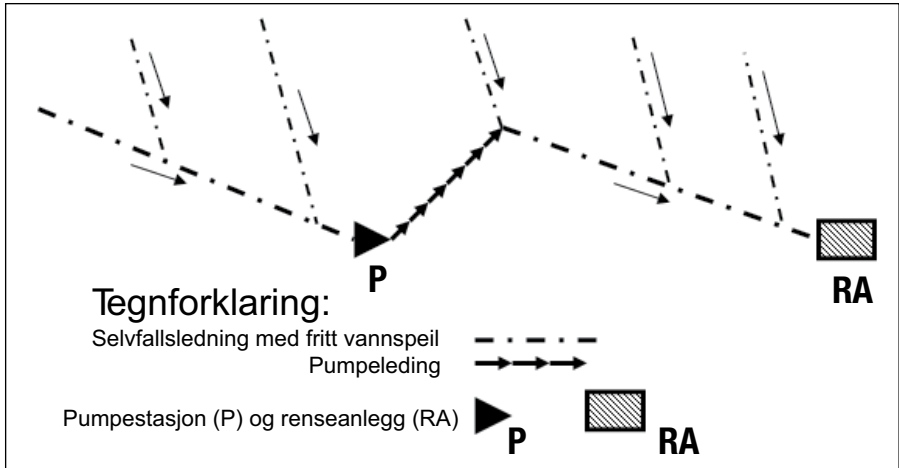
and inverted siphon. However, the reduction in energy costs only is too low to justify such a reconstruction. Therefore, the planned reconstruction of the intercepting sewers has to be coordinated with other construction works, for instance renovation of ordinary water mains and sewers.

### Bakgrunn og hovedutførelse

De fleste avskjærende avløpsledninger i Norge ble bygget i perioden 1975 – 1995. De fleste av disse er bygget opp av følgende byggeklosser:

- Selvfølgelig med fritt vannspeil
- Pumpestasjoner med pumpeledninger

Her slippes alt avløpsvannet ned til laveste punkt i en avløpsbane for så å bli pumpet videre, se figur 1.



Figur 1. Vanlig utforming av avskjærende avløpsledninger (snitt høyde / lengde). Bygget opp av selvfallsledninger og pumpeledninger. Forholdet mellom høyde og lengde er fortegnet.

Skien kommune har 63 avløpspumpe-stasjoner, og installert effekt er om lag 740 kW (reservepumper er ikke med-tatt). Forbruket av elektrisk energi for disse pumpestasjonene var i 2006 om lag 2,8 millioner kWh.

Tiltak for å redusere energiforbruket kan deles i følgende grupper:

### I. Effektivisering av pumpestasjon og pumpeledning

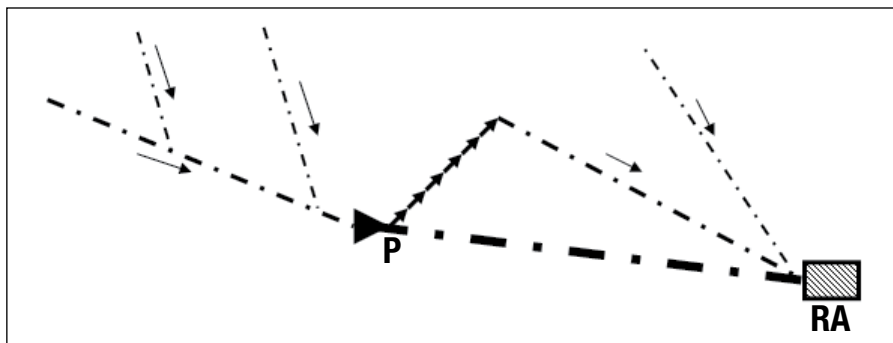
- I.a Bedre virkningsgrad (mer effektive og mer slitesterke pumper)
- I.b Bedre virkningsgrad gjennom bedre driftspunkt (på kurven for pumpe-nes løftehøyde / vannføring)
- I.b Reduksjon av sandtilførsel (mindre pumpe-slitasje og redusert friksjons-tap i pumpeledninger)
- I.c Turtallsregulering av pumper
- I.d Utjevning av tilrenningstopper

I.e Reduksjon av geodetisk løftehøyde og bedre tilpassning av rørdiameter til tilrenningen.

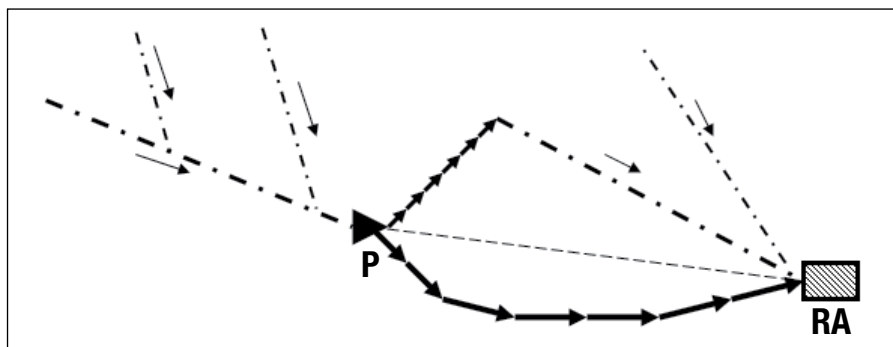
### II. Reduksjon av tilrenningen til pumpestasjoner

- II.a Reduksjon av lekkasjetapet i vannledningsnettet (noe lekkasjevann renner inn i spillvannsledninger)
- II.b Ombygging fra fellessystem til separatsystem
- II.c Ombygging av avskjærende ledninger gjennom økt bruk av selvfallsledninger (med fritt vannspeil eller ”dykkerledninger”)

Dette foredraget gjelder punkt II.c ”Ombygging av avskjærende ledninger gjennom økt bruk av selvfallsledninger” (med fritt vannspeil, figur 2 eller ”dykkerledninger” figur 3).



Figur 2. Avskjærende avløpsledning (snitt høyde /lengde). Pumpestasjon og -ledning erstattes med selvfallsledning med fritt vannspeil (særlig tykk strek). Forholdet mellom høyde og lengde er fortegnet.



Figur 3. Avskjærende avløpsledning (snitt høyde /lengde). Pumpestasjon og pumpeledning erstattes med selvfallsledning under trykk "dykkerledning". Dykkerledningen er vist med særlig tykk strek. Forholdet mellom høyde og lengde er fortegnet.

Alternativt kan avskjærende avløpsledninger bygges opp av:

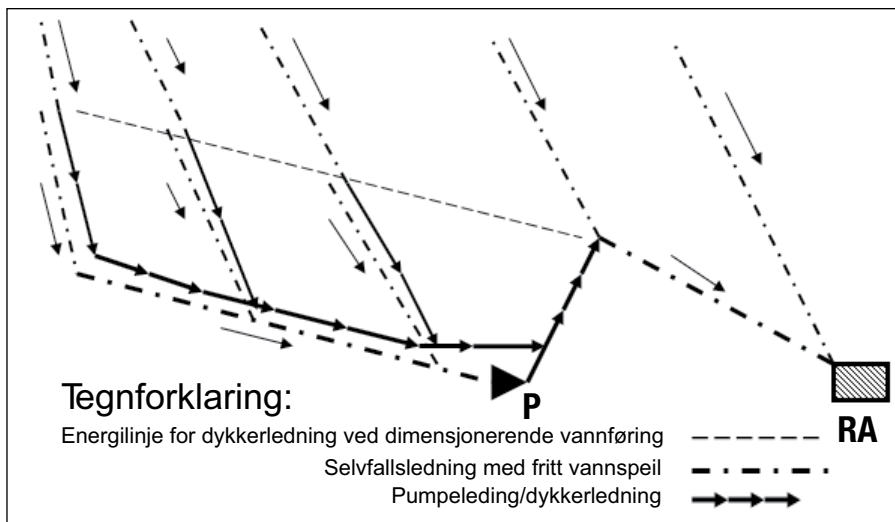
- Selvfallsledninger med fritt vannspeil
- Selvfallsledninger med trykkstrømning ("dykkerledninger")
- Pumpestasjoner med pumpeledninger

Dykkerledningen fanger opp avløpsvannet som skapes i øvre del av avløpssonen og fører dette med selvfall inn på pumpeledningen, slik at vi får en kombinert

pumpe- og dykkerledning, se figur 4.

For strekningen til venstre for (oppstrøms) pumpestasjonen i figur 4:

- Avløpsvannet som skapes høyere enn energilinjen for den kombinerte dykker- /pumpeledningen, blir ført fram til renseanlegget med selvfall.
- Avløpsvannet som skapes lavere enn energilinjen, må pumpes



Figur 4. Alternativ utforming av avskjærende avløpsledninger (snitt høyde / lengde). På strekningen til venstre for pumpestasjonen er det dobbel avløpsledning: En trykkledning ("dykkerledning") og én ledning med fritt vannspeil. Begge disse ledningene er selvfallsledninger. Forholdet mellom høyde og lengde er fortegnet.

Dykkerledninger utnytter høydeforskjeller i terrenget. Nødvendig helning på energilinj varierer fra om lag 10 promille ved 15 - 20 liter/sekund til om lag 5 promille ved 70 - 80 liter/sekund.

**Fordelene** med kombinerte pumpe- og dykkerledninger er:

- Reduserte energikostnader
- Reduserte vedlikeholdskostnader (blant annet som følge av redusert tilførsel av sand til pumpestasjonene)
- Økt driftssikkerhet (dvs. redusert utslipp av forurensning)
- I noen tilfeller jevnere tilrenning til renseanlegg

**Ulempene** er økt anleggskostnad og økt fare for utvikling av hydrogensulfid.

En rekke dykkerledninger er bygget i norske kommuner, særlig etter 1980. Det er stort sett gode erfaringer med disse anleggene.

## Strømningsteknisk dimensjonering av dykkerledninger

### Oversikt

Følgende forhold inngår i den hydrauliske dimensjoneringen:

- Kapasitet – trykktap
- Selvrensning
- Trykkstøt (kombinerte pumpe- og dykkerledninger)
- Oppholdstid og tiltak mot hydrogensulfid
- Tiltak for å hindre luftlommer i ledningen

Avsnittene nedenfor gir en oversikt over retningslinjer for dimensjonering. Detaljerte anbefalinger for utforming av dykkerledninger er gitt i /1/.

### Kapasitet – trykktap

Høydeforskjellen mellom innløp og utløp skal være større enn trykktapet ved dimensjonerende vannføring. Erfaring viser at dimensjonerende trykktap bør svare til en ekvivalent, hydraulisk sandruhet på 1 – 3 mm (3 mm gjelder felles avløpsledninger med stor tilførsel av sand).

Vanligvis er minimum rørdiameter 100 mm.

For anlegg med flere greiner og pumping kan nøyaktig beregning av trykktapet ved **stasjonære** strømningsforhold være nødvendig. Programmer som EPA-NET og tilsvarende er velegnet.

### Selvrensing

For å oppnå selvrensing trengs en daglig skjærspenning mellom vannstrøm og rørvegg på 2 – 4 N/m<sup>2</sup> (4 N/m<sup>2</sup> gjelder ledninger med stor tilførsel av avløpsvann fra fellessystemet (mye sand i avløpsvannet)).

Er tilgjengelig høydeforskjell stor nok, er den daglige variasjonen i tilrenningen tilstrekkelig til å oppnå selvrensing.

Andre tiltak for å oppnå selvrensing:

- En del av avløpsvannet pumpes inn på dykkerledningen
- Avløpsvannet samles opp i basseng, som tømmes raskt noen få ganger i døgnet
- Tilførsel av rent vann noen få ganger i

døgnet (f. eks. til et basseng, som tømmes raskt når det er fullt)

- Avløpsvannet må passere en slamavskiller (aktuelt der avløpsmengden er særlig liten)

Bortsett fra tilførsel av rent vann, er alle typer tiltak brukt i Skien.

Der basseng og pumper brukes for å oppnå selvrensing, kan **ikke-stasjonære** strømningsforhold simuleres ved hjelp av det norske EDB-programmet ”Dykker” /2/.

### Trykkstøt

I kombinerte dykker- og pumpeledninger kan greinledningene for selvfall fungere som svingekammer, og på denne måten kan trykkstøt ved pumpestopp dempes.

### Oppholdstid og tiltak mot hydrogensulfid

Når avløpsvannets oppholdstid overstiger 4 – 8 timer, legges det til rette for tiltak mot hydrogensulfid:

- Ledningen legges på dypt vann i fjorder og innsjøer, der avløpsvannet kjøles ned og den biologiske aktiviteten svekkes
- Tilrettelegging for kjøring av renseplugg som begrenser tykkelsen på biohuden i ledningen. I sommerhalvåret kjøres renseplugg gjerne 1 gang per måned
- Tilsetting av Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> på væskeform, som avgir oksygen til de biologiske prosessene i avløpsvannet, og som dermed reduserer faren for anaerobe forhold.

For de lengste dykkerledningene i Skien er alle disse tiltakene brukt.

## Tiltak mot luftlommer i trykkledninger

I tilløpsgreinene i dykkerledninger er det overgang fra strømning med fritt vannspeil til strømning under trykk. Er det stort fall, skapes i denne overgangen et **vannstandssprang med luftinnblanding**. Vannstandsspranget vil vandre oppover og nedover i tilløpsledningen, alt avhengig av vannføringen. Stor tilførsel av luft til trykkledninger kan føre til at sjøledningene flyter opp og til økt trykktap i ledningene med høybrekk.

Et vanlig tiltak for å unngå at luftlommer dras inn i ledningen:

- På strekningen like nedstrøms vannstandsspranget skal hastigheten **ved fylt rør** ikke overstige 0,5 m/s.
- Ved stor vannføring og høyt trykktap avleires sand og grus på denne strekningen med vannfylt rør.
- Ved lav vannføring strømmer vannet med fritt vannspeil på denne strekningen. Velges et ledningsfall på mer enn 15 promille på denne strekningen, fjernes derfor avleiringene når tilrenning er lav.

Ytterligere retningslinjer for å hindre at store luftlommer samler seg i dykkerledninger er gitt i /1/.

## Erfaringer med dykkerledninger i Skien

### Oversikt

Skien kommune har vel 50 000 innbyggere. Det spillvannsførende avløpsnett

har en lengde på 325 km, derav vel 100 km med felles avløpsledninger.

Gjennom tettbebyggelsen i Skien går Skienselva (midlere vannføring 275 m<sup>3</sup>/s) og Falkumelva (midlere vannføring 7 m<sup>3</sup>/s). I tillegg er Leirkup og Bolvikelva (midlere vannføring 1,0 m<sup>3</sup>/s og 1,5 m<sup>3</sup>/s) viktige vassdrag. Terrenget langs disse elvene stiger 10 – 100 m opp fra elva.

Avløpsvannet fra tettbebyggelsen føres til to avløpsrensaneanlegg; det ene (Elstrøm) ligger nær Skien sentrum og det andre 7 km lenger sør (Knarrdalstrand i Porsgrunn kommune, og dette siste anlegget er felles for begge kommunene). Skien kommune har 63 avløpspumpestasjoner. Installert pumpeeffekt varierer fra 2 kW til 165 kW (reservepumper er ikke medtatt). Samlet pumpeeffekt er om lag 740 kW (reservepumper er ikke medtatt).

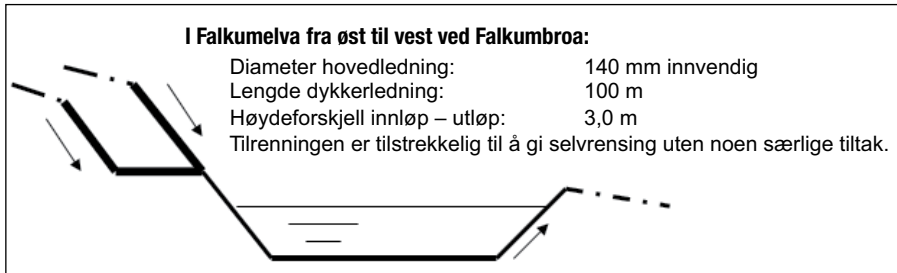
Opprinnelige ble alle avløpsledninger ført direkte til vassdragene, særlig til Skienselva og Falkumelva. Omkring 1970 startet byggingen av avskjærende avløpsledninger, og den var fullført i år 2000 (med noen få unntak).

Bygging av dykkerledninger for avløpsvann i Skien startet omkring 1990. Det er nå 15 dykkerledninger i drift, og de første ledningene inngikk på vanlig måte i de avskjærende avløpsledningene. Lengden varierer fra 100 m til 14 km. De utnytter høydeforskjeller fra 3 m til 100 m. De fleste ledningene krysser elv, innsjø eller fjord; noe som reduserer anleggskostnadene i forhold til ledninger på land.

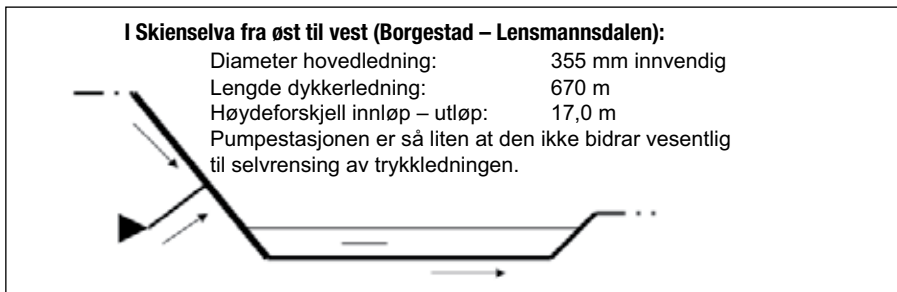
Som en følge av utbyggingen av dykkerledninger er to pumpestasjoner lagt ned. Ytterligere to stasjoner skal legges ned i løpet av noen 5 - 10 år.

## Eksempler på dykkerledninger i Skien

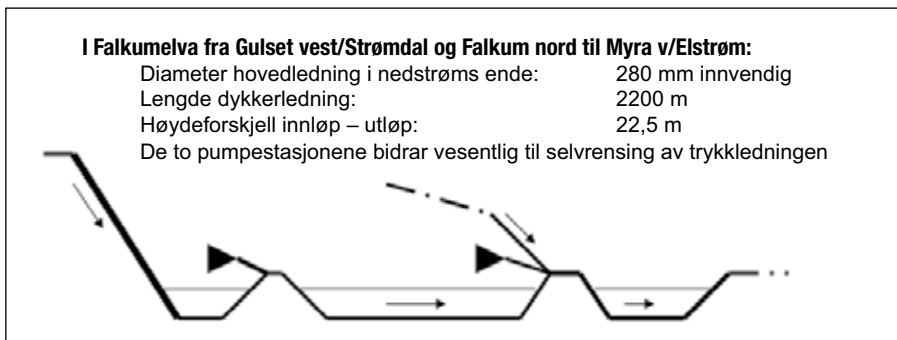
Her følger noen eksempler på dykkerledninger og kombinerte dykker- og pumpeledninger i Skien. Dette er både rene dykkerledninger og kombinerte dykker- og pumpeledninger.



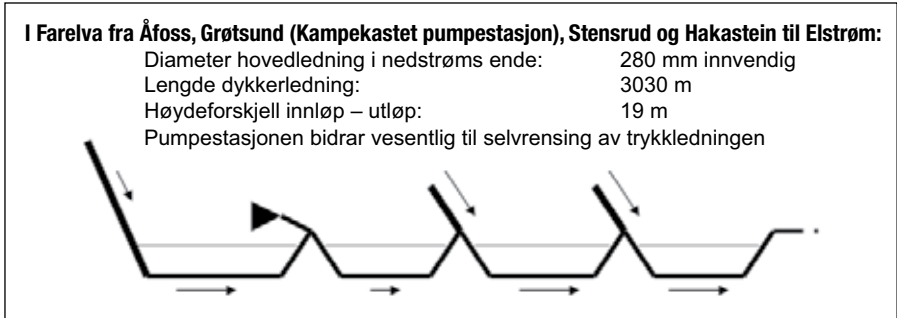
Figur 5. Falkumelva fra øst til vest ved Falkumbroa.



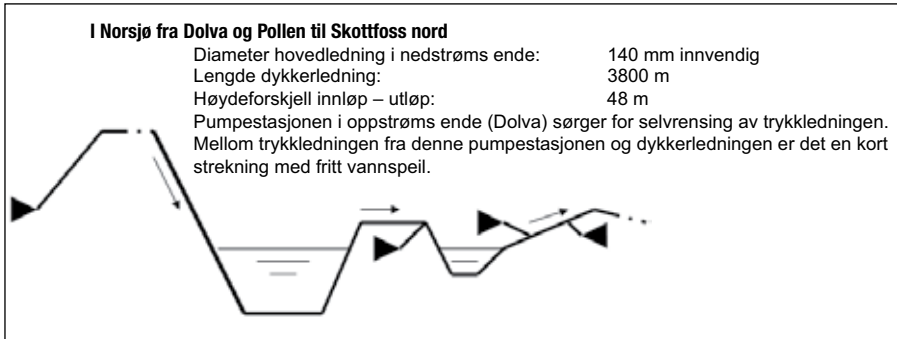
Figur 6. Skienselva fra øst til vest (Borgestad – Lensmannsdalen).



Figur 7. Falkumelva fra Gulset vest / Strømdal og Falkum nord til Myra v/ Elstrøm.



Figur 8. Farelva fra Åfoss, Grøtsund (Kampekastet pumpestasjon), Stensrud og Hakastein til Elstrøm.



Figur 9. Norsjø fra Dolva og Pollen til Skottfoss nord.

### Driftserfaringer i Skien

Erfaringene har vært gode; både med hensyn på kapasitet, selvrensing, driftssikkerhet og utvikling av hydrogensulfid. De fleste dykkerledningene har flere til-løp fordelt langs ledningene, noe som reduserer faren for utvikling av hydrogensulfid. På de lengste ledningene er det likevel nødvendig å bekjempe utvikling av hydrogensulfid (renseplugg og tilsetning av kjemisk bundet oksygen (nitrat)).

Driften av ledningene har ikke gitt noen overraskelser; noe som viser at de

norske dimensjoneringsreglene fra slutten av 1980-tallet er brukbare.

### Ombygging av avskjærende ledninger for å redusere drifts- og vedlikeholds-kostnader - kan det svare seg økonomisk?

#### Oversikt

For de 63 kommunale, avløpspumpe-stasjonene var kostnadene for elektrisk strøm i 2006 knapt 2,6 millioner NOK (eksklusive merverdiavgift), og energi-forbruket var 2,8 millioner kWh. Det



meste av dette går til pumping, men en mindre mengde energi kreves til varme og ventilasjon av pumpestasjonen.

Ved å bygge kombinerte dykker- og pumpeledninger kan energiforbruket reduseres i forhold til vanlige pumpeledninger. Dette reduserer forbruket av elektrisk energi for pumping.

Eksempel på redusert energiforbruk:

- Antall personer tilknyttet: 1 000
- Spesifikt vannforbruk: 0,2 m<sup>3</sup>/døgn per person
- Spesifikk vannmengde (drensvann / overvann) som føres til renseanlegg: 0,1 m<sup>3</sup>/døgn per person
- Midlere løftehøyde for pumping: 20 m
- Virkningsgrad pumping: 0,5
- Redusert effektbehov hvis tilrenning fordeler seg likt over hele døgnet: 1,363 kW
- Redusert energibehov per år: ca. 12 000 kWh

Nåverdien for en slik reduksjon i energiforbruk 213 500 NOK (Forutsatt midlere energipris på 1,00 NOK per kWh (eksklusiv mv), kalkulasjonsrente (realrente) på 4 %, avskrivningstid for ledninger på 40 år og en faktor for beregning av nåverdi på 19,79).

Vurdering av følsomhet:

- Den tekniske utviklingen på avløpsledninger som utnytter tyngdekraften, blir neppe stor. Derfor kan en kalkulasjonsrente på 1 % vurderes. Dette gir en nåverdifaktor på 32,83 og en nåverdi på 394 000 NOK.
- Prisen på elektrisk energi stiger, og vi

kan ikke se bort fra at den blir doblet i løpet av noen tiår. Midlere energipris på 2,00 NOK per kWh gir en nåverdi på 417 000 NOK.

Kan kostnadsreduksjoner som dette medvirke til bygging av dykkerledninger i avskjærende avløpsanlegg?

### Noen eksempler fra Skien

For å tallfeste kostnadene ved bygging av kombinerte dykker- og pumpeledninger (se figur 1-4) presenteres her to eksempler fra Skien:

*Gulset – Falkumelva – Elstrøm renseanlegg (ny dykkerledning i Falkumelva med lengde 2070 m)*

Byggeår 1999-2000. Reduksjon av behov for pumping målt i antall personer tilknyttet pumpestasjon ble redusert fra 5 000 til 500 pe. Midlere løftehøyde ved pumping er 13 m.

Reduksjon i energiforbruk er 35 000 kWh per år. Nåverdi (med 4 % rente, 40 års avskrivningstid, energipris 1,00 NOK per kWh) er 700 000 NOK eks. mva. Anleggskostnad i 2007-priser var 4 000 000 NOK eks. mva

Annen nytte:

- Dykkerledningen øker driftssikkerheten for den avskjærende ledningen vesentlig, og det bidrar til å sikre det **politiske målet** om god badevannkvalitet langs Falkumelva og på Bakkestranda nær Skien sentrum
- Dykkerledningen gir en jevnere tilrenning til Elstrøm renseanlegg, noe som forenkler driften av anlegget

- Sandslitasjen i pumpestasjonen minsker, noe som øker levetiden til slitedeler i pumpene.

## *Snipetorp – Gampedal – Blåbærli – Tilja pumpestasjon*

*(ny dykkerledning med lengde 1200 m)*

Planlagt bygd 2010. Reduksjon av behov for pumping målt som antall personer tilknyttet Tilja pumpestasjon reduseres med 4500 pe. Midlere løftehøyde ved pumping er 20 m. Reduksjon i energiforbruk er 54 000 kWh per år. Nåverdi (med 4 % rente, 40 års avskrivningstid, energipris 1,00 NOK per kWh) er 1 000 000 NOK eks. mva. Anleggskostnad i 2007-priser er 6 000 000 NOK eks. mva. I kostnaden er separering av lokalt avløpsnett tatt med, og av den samlede kostnaden på 6 millioner NOK gjelder 2,5 millioner NOK dykkerledningen.

Annen nytte:

- Dykkerledningen øker driftssikkerheten for den avskjærende ledningen vesentlig, og det bidrar til å nå det **politiske målet** om brukbar badevannkvalitet i Skienselva mellom Skien sentrum og Porsgrunn.
- Anleggsarbeidet kombinerer med separering av lokalt avløpsnett, noe som reduserer utslippet fra regnvannsoverløp og øker driftssikkerhet for det lokale avløpsnettet. I tillegg blir avløpsnettet i en avløpssone med areal 0,15 km<sup>2</sup> gjort til virksomt separatsystem (reduserer dermed utslipp fra regnvannsoverløp)
- Sandslitasjen i Møllebroa og Tilja pumpestasjoner minsker, noe som

øker levetiden til slitedeler i pumpene.

- De to pumpestasjonene ligger så lavt at ved flom påvirkes utslippet fra overløpene av vannstanden i elva. Bygging av dykkerledningen reduserer utslippet fra de to overløpene.

Disse eksemplene viser at reduksjon av energikostnadene kan ikke forsvare ombygging av avskjærende avløpsledninger til kombinertepumpe- og dykkerledninger. Dykkerledningene har imidlertid en rekke fordeler, og **samlet sett kan bygging av nye dykkerledninger likevel forsvares.**

## **Plan for videre utbygging av dykkerledninger i Skien**

Prisen på elektrisk energi har steget sterkt i de siste ti årene, og det er sannsynlig at den vil fortsette å stige. Som illustrert i kapittel 4.2, har stigningen i energiprisen alene ikke vært stor nok til å forsvare ombygging av avskjærende avløpsledninger. Ombygging til kombinerte dykker- og pumpeledninger kan imidlertid en rekke tilleggsvirkninger som bidrar til å forsvare byggingen.

For de neste ti årene planlegger Skien kommune å bygge 10 - 12 dykkerledninger som reduserer tilrenningen til avløpspumpestasjoner.

Eksempler på årsaker til bygging av disse dykkerledningene *utover* redusert energiforbruk, redusert slitasje i pumper og bedre driftssikkerhet:

- Telemark sjukehus – Elstrøm renseanlegg:
  - ▶ Reduserer smittefaren ved arbeid i Faret pumpestasjon

- ▶ Jevnere tilrenning til Elstrømrenseanlegg
- Borgestad kirke – Borgestad:
  - ▶ Separering av avløpsnett og redusert utslipp fra regnvanns-overløp
- Einaren – Vaddrette:
  - ▶ Bygging av gang- og sykkelveg langs Skotfossvegen
  - ▶ 1 pumpestasjon legges ned
- Løveid sluser – Pollen:
  - ▶ Bebyggelsen langs øvre del av slusene tilkoples avløpsnett uten at det må bygges en avløps-pumpestasjon nær det vernede kanalanlegget (Telemarkskanalen bygd 1854 - 1861).

Ingeniørvesenet i Skien kommune har god oversikt over all utbygging av veger, boligområder, VA-anlegg, fjernvarme o. l. i kommunen. Dette gjør det lett å utnytte mulighetene for samordning og effektivisering av avløpsnettet med andre tiltak.

### Konklusjoner

- Skien kommune har gode driftserfaringer med rene dykkerledninger og kombinerte dykker-/pumpeledninger.
- De fleste av ledningene i Skien ble bygget under den omfattende utbyggingen av avskjærende avløpsledninger. Som et ”første-generasjons-tiltak” er rene dykkerledninger og kombinerte dykker-/pumpeledninger driftsikre og kostnadseffektive.
- Skien kommune er inne i en fase med ombygging av avskjærende ledninger, der rene dykkerledninger og kombi-

nerte dykker-/pumpeledninger er viktige byggeklosser. Slik ombygging reduserer energikostnadene (mindre elektrisk energi til drift av pumper). Kostnadsreduksjonen er imidlertid sjelden så stor at slike ”annen-generasjons-tiltak” kan forsvares rent økonomisk. Ombyggingen gir imidlertid en rekke andre fordeler, der forbedret driftssikkerhet og reduserte utslipp er den viktigste. Det kan også være en rekke andre fordeler.

- Gjennom samordning med andre tiltak (bygging av nye veger, fornyelse av vann- og avløpsnettet osv.) kan tiltak som reduserer energiforbruket, være kostnadseffektive. For lett å kunne utnytte mulighetene for samordning, er det viktig at kommunen har en plan for effektivisering av sine avskjærende avløpsledninger.

### Referanser

/1/ Mosevoll, G. **Dykkerledninger for avløpsvann**. Rapport 26/85 fra Program for VAR-teknikk, Norges naturvitenskapelige forskningsråd. Rapporten er utarbeidet ved Norsk hydroteknisk laboratorium, SINTEF, Trondheim 1985.

/2/ ”**Dykker**” - **et EDB-program for simulering av ikke-stasjonære strømningsforhold i dykkerledninger**. Programmet er en del av programpakken ”VARBIB”, utarbeidet ved SINTEF, Avdeling for vann- og miljø, Trondheim