



Trykktap i avløpsnett



Norsk Vann Rapport

(Tidligere NORVAR-rapporter)

Det utgis 3 typer rapporter:

Rapportserie A:

Dette er de opprinnelige hovedrapportene. Dette kan være:

- Rapportering av prosjekter som er gjennomført innenfor organisasjonens eget prosjektsystem
- Rapportering av spleiselagsprosjekter hvor to eller flere andelseiere i Norsk Vann BA samarbeider for å løse felles utfordringer
- Rapportering av prosjekter som er gjennomført av andelseiere eller andre. Rapporten vil i slike tilfeller kunne være en ren kopi av originalrapporten eller noe bearbeidet

Fortløpende nummer xx-årstall

Rapportserie B:

Dette er en serie for «enklere» rapporter, for eksempel forprosjekter, som vil være grunnlag for videre prosjektvirksomhet mm.

Fortløpende nummer Bxx-årstall

Rapportserie C:

Dette er rapporter delfinansiert av Norsk Vann, men som er utgitt av andre.

Fortløpende nummer Cxx-årstall

Prosjekresultatene fra Norsk Vann Rapport (serie A og B) kan fritt benyttes internt i egen organisasjon. Når prosjekresultatene benyttes i skriftlig materiale, må kilde oppgis. Viderealg/formidling av resultatene utover dette er kun tillatt etter skriftlig avtale med Norsk Vann BA.

Norsk Vann har ikke ansvar for feil eller ufullstendigheter som måtte forekomme i rapporten og kan ikke stilles økonomisk eller på annen måte til ansvar for problemer som måtte oppstå som følge av bruk av rapporten.



Norsk Vann BA, Vangsvegen 143, 2317 Hamar
Tlf: 62 55 30 30 E-post: post@norskvann.no
www.norskvann.no

Forsidefoto: (SINTEF) viser prøvecum med gradvis økende vannmengder.

Norsk Vann Rapport

Norsk Vann BA

Postadresse: Vangsvegen 143, 2317 Hamar
Telefon: 62 55 30 30
E-post: post@norsk vann.no
Internettadresse: norsk vann.no

Rapportnummer:
172 - 2009

ISBN 978-82-414-0309-5
ISSN 1504-9884 (trykt utgave)
ISSN 1890-8802 (elektronisk utg.)

Dato:
10.07.2009

Antall sider :
46

Tilgjengelighet:
Åpen: x
Begrenset:

Rapportens tittel:

Trykktap i avløpsnett

Forfatter(e):

Leif Sigurd Hafskjold

Ekstrakt:

Formålet med denne rapporten er å beskrive og kvantifisere faktorer som gir trykktap i avløpsnett, og hvilken ruhet som bør benyttes for avløpsledninger (spillvann-, overvann-, og fellesledninger) i ulike situasjoner. Ruhet i avløpsledninger er først og fremst aktuelt for ledninger under trykk (pumpeledninger og dykkede ledninger). For selvfallsledninger med fritt vannspeil er selvreisende skjærspenning den avgjørende fysiske størrelsen. Ruheten i avløpsledninger bestemmes av ulike forhold, bl.a.:

- Ruhet for nye ledninger (målt i laboratorium) kontra ledninger i drift i felten
- Om det er en OV, AF, eller SP-ledning
- Forfallet i ledningsnettet og kvalitet på arbeidet da ledningen ble lagt, spesielt svanker
- Fyllingsgrad, vannføring og fall

Det er derfor viktig å være klar over hva man legger i ruhet, og det kan være hensiktsmessig å dele ruhet i rørruhet, systemruhet og singulærtap, som sett under ett kan betegnes som den praktisk forekommende ruheten.

Rørets tilstand har også betydning for ruheten. Feil som observeres ved rørinspeksjon kan brukes til å tolke ruheten på en bedre måte. Et system for dette beskrives i detalj i rapporten.

Kummer er i en del sammenhenger et "undervurdert" element i avløpssystemet. Kummene er blant annet svært viktig for den hydrauliske kapasiteten til ledningsnettet. Falltap forårsaket av kummene kan være i samme størrelsesorden som falltap forårsaket av rørfriksjonen. Dette avhenger bl.a. av avstanden mellom kummene og kummenes tilstand og utforming. I rapporten gis det råd om utforming av kummer.

Emneord, norske:

VA-teknikk
Rørledningsnett
Avløp
Trykktap

Emneord, engelske:

Sanitary engineering
Sewer network
Pressure loss

Andre utgaver:

Forord

Denne rapporten er skrevet som en del av Norsk Vanns satsning på prosjekter om Materialteknologi. Bakgrunnen for prosjektet var å få belyst ulike sider ved valg av ruhet for avløpsledninger og øke forståelsen for dette.

Det er vist til en del forskningsresultater og praktisering av bestemmelse av ruhet for ulike ledningsmaterialer og driftsforhold, og med bakgrunn i dette er det gitt anbefalinger om valg av ruhet. Prosjektets ramme tillot imidlertid ikke at en kunne utføre praktiske forsøk eller ytterligere forskning. Men rapporten peker på viktigheten av riktig utførelse av ledningsnett, spesielt unngå svanker, og at en rehabiliterer eller skifter ut rør med forskjellige skjøter eller brudd ol.

Prosjektet bekrefter også antakelsen mange har hatt at for eksempel kumutforming har stor betydning for samlet trykktap i et selvfallssystem. En utbedring av kummer kan derfor i mange tilfeller øke systemets kapasitet, eller om en vil; redusere faren for tilbakestuvning. En bedre hydraulisk utforming av kummer vil kanskje også redusere risikoen for at uønskede objekter setter seg fast i kummen.

Prosjektet har vært ledet av Norsk Vann og gjennomført av SINTEF Vann og Miljø med bidrag fra avdeling Strømningsteknikk. Fagutvalg ledningsnett har vært styringsgruppe, og det har vært en egen referansegruppe. Organiseringen har vært slik:

- Prosjektleder SINTEF: Sveinung Sægrov
- Hovedforfatter: Leif Sigurd Hafskjold, (SINTEF)
- Styringsgruppe: Gunnar Mosevoll, Skien kommune, Rodney Pettersen, Oslo kommune, Bård Moen, DnP/Pipelife, Terje Reiersen, Basal

I rapporten er det dessuten presentert forskningsresultater fra litteratur, fra andre prosjekt som SINTEF har vært involvert i (for eksempel CARE-S), og fra prosjekt som er knyttet til arbeidet med denne rapporten. Det er bl.a. dratt nytte av prosjekt som er utført ved SINTEF og som er finansiert av BASAL, vedrørende trykktap i kummer. Resultater fra masteroppgavene til Yngve Løken og Stig Morten Kristensen er også delvis gjengitt i rapporten.

Leseren får et bredt spekter av informasjon på sammensatte problemstillinger. På slutten av hvert kapittel er det gitt anbefalinger som er så praktiske som mulig.

Helt til slutt i rapporten har vi også tatt opp til ettertanke/diskusjon om vi bør vurdere nye løsninger på kumarrangement for å redusere trykktapene. Spesielt er dette aktuelt i sårbare områder, og klimautviklingen med flere ekstremregn gjør også at vi må tenke mer på kumhydraulikk.

Norsk Vann vil takke alle bidragsyterne for innsatsen og gode faglige innspill!

Hamar 10.juli 2009

Trond Andersen
Prosjektleder Norsk Vann

Innholdsfortegnelse

Forord	2
Innholdsfortegnelse	3
Sammendrag	4
English summary	6
1. Dimensjonering ved selvfall og trykksituasjon	8
1.1. Selvrensing for strømming i rør med fritt vannspeil.....	8
1.2. Kapasitet for dykkede systemer	9
2. "Ledningsruhet" i ulike situasjoner	10
2.1. Kort om beregningsmetoder for friksjonstap	10
2.2. Hva er ruhet?	10
2.3. Ruhetens innvirkning på kapasitet	11
2.4. Generelt om undersøkelser og litteratur om ruhet.....	13
2.5. Betydningen av konstruksjon, utførelse og tilstand	13
2.6. Materialets betydning	14
2.6.1. Undersøkelser av nye rør.....	15
2.6.2. Feltundersøkelser – rør i drift	16
2.7. Betydningen av sedimenter og oppbygging av kloakkhud.....	16
2.8. Betydningen av fyllingsgrad.....	17
2.9. Betydningen av vannhastighet	17
2.10. Ruhetsvekst over tid	18
2.11. Bruk av ruhet i hydrauliske modeller.....	18
2.12. Oppsummering og anbefaling til valg av ruhet.....	18
3. Betydningen av forfall i ledningsnettet for bruksruhet og trykktap	20
3.1. Beskrivelse av metodikk	21
3.2. Formler for beregning av trykktap	22
3.2.1. BAA - Deformation.....	22
3.2.2. BAC - Break/collapse.....	22
3.2.3. BAF - Surface Damage	23
3.2.4. BAG - Intruding Connection	23
3.2.5. BAJ - Displaced Joint.....	23
3.2.6. BBA - Roots	23
3.2.7. BBB - Attached Deposits	24
3.2.8. BBC - Settled Deposits	24
3.2.9. BBD - Ingress of soil	24
3.2.10. BBE - Other Obstacles.....	24
3.2.11. Sammendrag av trykktap for feil – kobling til klassifisering av avløpsledninger	25
4. Trykktap i kummer	28
4.1. Undersøkelser av kummer.....	28
4.2. Manuell beregning av kumtapskoeffisienter.....	30
4.3. Modellering og forsøk med avløpskum.....	34
4.4. Oppsummering av resultater av simulering og praktiske forsøk m. avløpskum	39
5. Konklusjoner	40
5.1. Forslag til forbedring av kumløsninger.....	40
6. Litteratur	42
Vedlegg 1: Øvingsoppgave – kumtapets betydning for kapasiteten i ledninger	44
Vedlegg 2: Sammenheng mellom Darcy-Weisbachs formel og ruhet	46

Sammendrag

Når "ruhet" omtales i denne rapporten er det et samlebegrep som beskriver innvendig hydraulisk "motstand" som avløpsvann møter når det renner i rør og som gir trykktap eller energitap. Det er flere forhold som påvirker den praktisk forekommende ruheten til en avløpsledning, eksempelvis:

- Vannhastighet og fyllingsgrad: Lavere ruhet med økende vannhastighet og fyllingsgrad
- Rørmateriale: Plast har normalt litt lavere ruhet enn betong. Forskjellen er likevel ikke større enn at andre faktorer normalt har betydelig større betydning for kapasiteten enn selve materialet
- Tilstand: Dårlig anleggsutførelse kan gi svanker, ledningens tilstand reduseres med tiden, og sedimenter reduserer kapasiteten
- Type ledning: For ledninger som fører spillvann bør man generelt bruke høyere ruhet enn ledninger som fører overvann
- Utvikling over tid: Man bør ta hensyn til at forhold nevnt over vil forandre seg over tid, for eksempel vil ofte en ledning som legges i dag være i dårligere stand om 20 år

Ved dimensjonering av avløpsledninger bør det kontrolleres for to situasjoner;

1. selvfall med fritt vannspeil i rørene, og
2. når systemet er under trykk og rørene går fulle

Ved selvfall (med fritt vannspeil) er normalt selvrensende skjærspenning det avgjørende dimensjoneringskriteriet. For avløpsledninger under trykk, altså for pumpeledninger eller ledninger som går fulle for eksempel ved regnvær, er ruheten normalt viktigere. Samtidig er også ruheten relevant for selvfallsavløp, da den benyttes som en inngangsparameter i hydraulisk dimensjonering og modellering.

Størrelsen "ruhet" er mye brukt og diskutert. Det er derfor viktig å være klar over hva man legger i ruhet, og det kan være hensiktsmessig å dele ruhet i rørruhet, systemruhet og singulærtap. Som et forslag til dimensjonerende verdier for ruhet anbefales å bruke verdiene i tabellen under (Tabell 8 i rapporten), og videre å følge anbefalingene gitt i kapittel 2.12 for å justere ruheten etter forholdene for den aktuelle ledningen :

Materiale	Maks hastighet < 1 m/s	Maks hastighet > 1 m/s	
		Spillvann/fellesledninger	Overvann
Betong	1,5-6	1-2	0,5-1
Plast (PVC/PP)	1-2	0,5-1	0,5-1

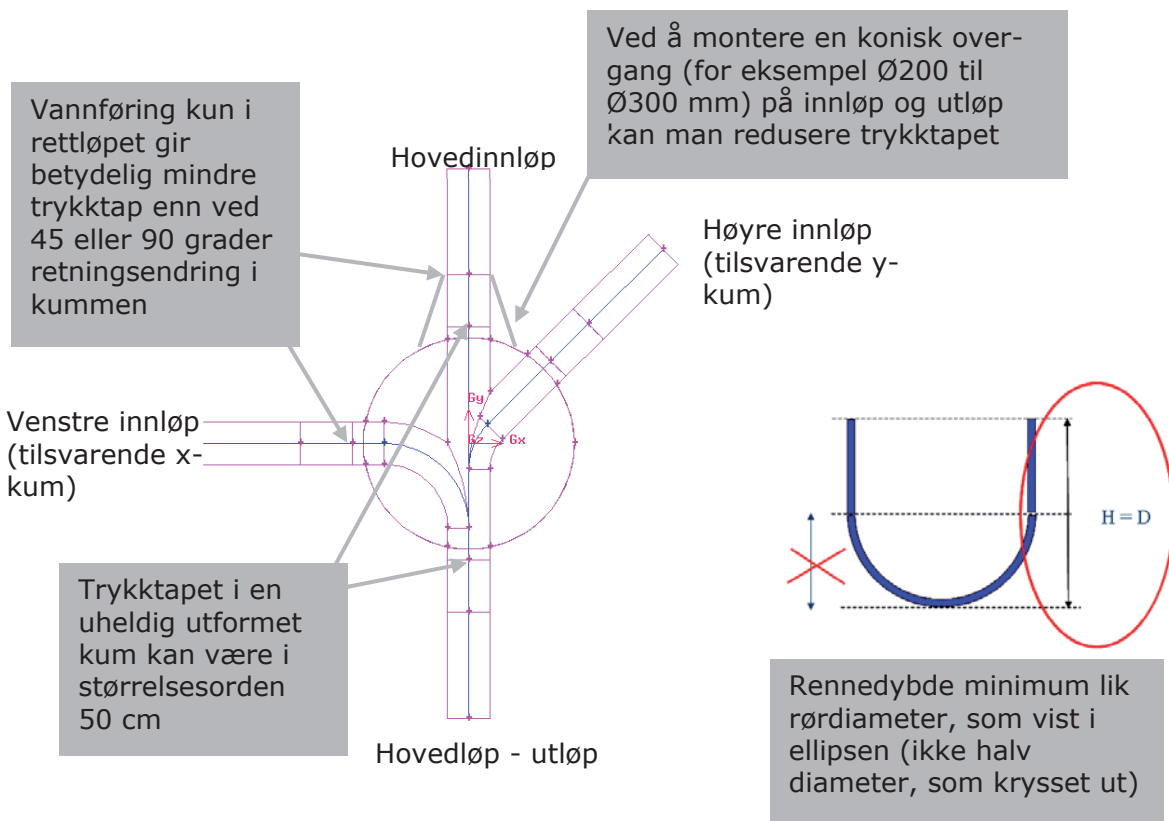
I prosjektet CARE-S ble det utviklet et system for å kvantifisere betydningen av feil som observeres med rørinspeksjon. Rørets areal eller ruhet endres på grunnlag av antall feil av ulik type og gradering. Dette kan brukes til å forbedre kalibrering av hydrauliske modeller.

Kummer er i en del sammenhenger et "undervurdert" element i avløpssystemet. Kummene er blant annet svært viktig for den hydrauliske kapasiteten til ledningsnett. Falltap forårsaket av kummene kan være i samme størrelsesorden som falltap forårsaket av rørfriksjonen. Dette avhenger bl.a. av avstanden mellom kummene og kummenes tilstand og utforming.

Oppsummering av de viktigste momenter for utforming av avløpskum:

- Kummer skal ha rennedybde minimum lik rørdiameter (dette har vært kjent lenge, men fortsatt leveres kummer med halv rennedybde – disse skal ikke aksepteres eller brukes)
- Ved å montere eksentrisk konisk dimensjonsovergang (med bunn på samme nivå) på innløp og utløp, og ha renne med større diameter enn innløps- og utløpsrør, får man økt den hydrauliske kapasiteten gjennom kummen (og dermed til systemet) ved oppstuvning. Dersom det vurderes at en innsnevring i rørdiameter etter utløp er uheldig kan rørdiameter nedstrøms kummen være den samme som rennediameteren.
- Dersom to strømmer møtes i kummen, gir selv en liten delstrøm fra den ene siden som treffer en hovedstrøm som går i rettløpet et stort energitap. I denne situasjonen spiller det liten rolle om det er Y-kum eller X-kum. Hydraulisk er det en bedre løsning at det monteres grenrør på oppstrøms side i kummen, og eventuelt kum/minikum på sideløpet for bedre tilgang for spyling og rørinspeksjon mv.
- Retningsforandring i selve kummen gir stort energitap, og noe større for X-kum enn for Y-kum. Retningsendring i selve kummen kan unngås ved å montere langbend inntil 22 grader like utenfor kummen (det er noe delte meninger om dette er en god løsning eller ikke). Her har kommunene ulike krav i sine VA-normer.

Figur 1 viser noen viktige prinsipper for god hydraulisk utforming av kum, spesielt med tanke på kum med oppstuvning.



Figur 1: De viktigste prinsippene for god hydraulisk utforming av kum

I tillegg til punktene som er nevnt i Figur 1, skal kotehøyden til bunn sideløp være høyere enn kotehøyde for hovedinnløp når det er mulig. Kummer uten fall anbefales ikke. Helst bør fallet gjennom kummen store eller være lik fallet på utløpsledningen.

English summary

This report is published in Norwegian by Norwegian Water BA (Norsk Vann BA),
www.norwegian-water.no / www.norskvann.no

Address: Vangsvegen 143, N-2317 Hamar, Norway
Phone: + 47 62 55 30 30
E-mail: post@norskvann.no
Website: www.norwegian-water.no / www.norskvann.no

Report no: 172 - 2009
Report Title: Pressure loss in sewer and stormwater pipes
Date of issue: 10. July, 2009
Number of pages: 46

Keywords: Sanitary engineering
Sewer network
Pressure loss

Author: Leif Sigurd Hafskjold, SINTEF

ISBN: 978-82-414-0309-5

Summary:

Pipe roughness for sewer and stormwater pipes is mainly relevant for pressurized pipes or for pipes running full under surcharge. For sewer pipes with gravity and free surface flow, self-cleansing is the most important design criterion. Roughness is an important input to hydraulic models, and is therefore relevant also for gravity flow sewers.

Pipe roughness is commonly used to describe the "hydraulic resistance" of pipes. Several factors determine the practical pipe roughness, e.g:

- Velocity of water and water level: Lower roughness for increasing velocity and water level.
- Material: Plastic pipes have normally slightly lower roughness than concrete. Other factors are much more significant for the capacity than the material.
- Condition: Poor construction can lead to sags or other problems, sediments cause loss of capacity, condition can change over time.
- Effluent type: Sewer pipes have higher roughness than storm water pipes.
- Temporal changes: The factors mentioned above, and other factors, may change over time (normally to the worse) causing the pipe to have lower capacity in 20 years than it has today.

When speaking about pipe roughness, it is recommended to divide it into pipe roughness, system roughness and singular loss. All three are important for hydraulics in sewer systems. It is recommended to use the most appropriate values for pipe roughness presented in the following two tables (Table 7 and Table 8 in the report), or a combination of the two:

Material	Velocity ca 0,75 m/s for pipe half full		Velocity ca 1,2 m/s for pipe half full	
	Normal condition (mm)	Poor condition (mm)	Normal condition (mm)	Poor condition (mm)
Concrete	3,0	6,0	1,5	3,0
Ceramic/clay	1,5	3,0	0,3	0,6
PVC/PP	0,6	1,5	0,2	0,3

Material	Maximum velocity < 1 m/s	Maximum velocity > 1 m/s	
		Sewer/combined sewer pipes	Storm water pipes
Concrete	1,5-6	1-2	0,5-1
Plastic (PVC/PP)	1-2	0,5-1	0,5-1

A methodology to modify to the values in these two tables and adapt them to the situation for the pipe being examined is explained in the report.

One of the tasks accomplished in the CARE-S project was to develop a system to calculate the real roughness in a pipe based on a CCTV inspection. This system, described in detail in this report, can be used to improve calibration of hydraulic models.

Manholes are in many senses undervalued parts of the sewer system when it comes to contribution to system roughness and flow capacity. The pressure loss in surcharged manholes can be in the same order of magnitude as the pressure loss in pipes for poorly designed manholes. Some important points concerning the design of manholes are:

- The depth of the channel must be equal to or greater than the pipe diameter
- A conical fitting outside the manhole at the inlet and outlet to increase the diameter of the channel in the manhole reduces headloss
- Whenever two flows meet in a manhole, even a relatively small flow from either side will negatively affect the main flow going straight through the manhole, increasing pressure loss
- A directional change in the manhole is better directed through the manhole in a Y manhole (with 45 degree angles) than an X manhole (with 90 degree angles)

(See Figure 1, page 5)

1. Dimensjonering ved selvfall og trykksituasjon

Når man dimensjonerer avløpsledninger som har selvfall og fritt vannspeil (dvs. ikke pumpeledninger, dykkerledninger og lignende) må man ta hensyn til to prinsipielt ulike situasjoner:

1. Normalsituasjonen med selvfall og strømning i rør med fritt vannspeil
2. Situasjoner når systemet er overbelastet, og det blir oppstuvning og dermed trykkstrømning

Mellom disse to situasjonene er det glidende overganger, siden vannføringen i et bestemt rør varierer fra minutt til minutt. For enkelte ledninger er normalsituasjonen at det er svært lav vannføring, mens andre ledninger alltid har høy vannføring. En og samme ledning kan også være både en selvfallsledning med fritt vannspeil og ha trykkstrømning avhengig av driftssituasjonen.

Det er derfor viktig å være klar over hvilken dimensjonerende situasjon som gjelder. For de to situasjonene over bør ledninger dimensjoneres etter følgende prinsipp:

1. For strømning med fritt vannspeil bør man dimensjonere slik at ledningen er selvrensende
2. For strømning i system med oppstuvning (under trykk) er det systemets hydrauliske kapasitet som er viktigst

I og med at en og samme ledning kan tilhøre begge gruppene over, bør man kontrollere dimensjoneringen for alle driftssituasjoner som kan opptre for en ledning.

1.1. Selvrensing for strømning i rør med fritt vannspeil

Formålet med denne rapporten er ikke å beskrive hvordan man skal dimensjonere for selvrensing i en avløpsledning (her henvises til NTNØ-rapporter fra 1980-tallet), men å beskrive hvilken ruhet som bør benyttes i ulike situasjoner. I dette avsnittet forklares kort hvordan ruhet og selvrensing henger sammen.

I forbindelse med det norske Program for VAR-teknikk ble det gjennomført en analyse av selvrensning i avløpsnett [1]. Bl.a. det gjort forsøk i laboratorium med spyling av emner som simulerte fekalier. Dersom man skal oppnå selvrensing, må man ha tilstrekkelig skjærspenning mellom vann og sedimenter til at partiklene rives med av vannet og transporteres gjennom avløpssystemet. I praksis vil det ofte være sedimenter på lokale parti av ledningen, slik at kritisk skjærspenning må ta utgangspunkt i kriterier for erosjon og transport av partikler over løs bunn. Dette fører til at kravene til selvrensning for plast og betong [1] blir de samme:

- Separat spillvannsledning (SP): Minimum skjærspenning 0,5 N/m²
- Fellesledning (AF) med sandfang: Minimum skjærspenning 1,0 N/m²
- Felles- og overvannsledning (OV) med stor sandtilførsel: Minimum skjærspenning 1,5 N/m²

Skjærspenningen er gitt ved:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot I$$

Hvor τ = Skjærspenning (N/m²), ρ = vannets tetthet, g = tyngdens akselerasjon, R = hydraulisk radius = A/P (vannets areal / våt periferi) og I = energilinjens fall (= rørledningens fall ved fritt vannspeil)

I [1] er det gått grundig gjennom hvordan man skal dimensjonere for selvrensing ved hjelp av skjærspenning.

Nødvendig skjærspenning avhenger av:

- avløpsvannets sammensetning (bl.a. tetthet)
- herunder hvilke partikler som skal transporteres (størrelse, vekt og form)
- vannføringen og variasjonen i denne
- ledningens helning
- vannstand/diameter
- vannhastigheten
- ledningens tilstand (spesielt variasjon i fall og svanker/svankevolum, se Figur 3)
- om sedimentene transporteres på fast bunn eller løs bunn (dvs. på andre sedimenter)
- ledningens ruhet (dersom transporten foregår på fast bunn)

Av de to siste punktene ser man at ledningens ruhet (og dermed rørmaterialets overflate) har liten eller ingen betydning dersom det er sedimenter i røret, men får større betydning dersom røroverflaten er fri for sedimenter.

Vannhastighet brukes i mange land som eneste kriterium for dimensjonering for å oppnå selvrensing. Krav om vannhastigheter på 0,5-0,75 m/s er vanlig. Det anbefales ikke å bruke dette som eneste kriterium for dimensjonering for selvrensing, da dette vil bli svært unøyaktig. Det er skjærspenningen som er avgjørende og ikke vannhastigheten.

I Tabell 1 [21] er betydningen av fall vist for hvilken vannføring som skal til for å tilfredsstille ulike krav til skjærspenning.

Tabell 1: Sammenheng mellom vannføring og skjærspenning, eksempel med en DN 200 mm ledning med ruhet $k = 1,0$

Gjennomsnittlig fall (‰)	Vannføring ved skjærspenning (liter/min)		
	1,0 N/m ²	1,5 N/m ²	2,0 N/m ²
6,6	30	72	147
8,5	19	45	92
11,7	Ca 12	Ca 24	Ca 48

Dansk betongindustriforening, Afløbsfraksjonen, skiller mellom ulike grader av selvrensing:

- Ledningen holdes helt ren, med verken kloakkkhud eller avleiringer. Dette oppnås bare i ledninger med stort fall og stor fylningsgrad.
- Normal selvrensing: ledningen har kloakkkhud, men ikke avleiringer
- Ledningen har både kloakkkhud og mindre avleiringer, men den forårsaker ikke driftsproblemer, slik som kjelleroversvømmelser, luktproblemer etc.

1.2. Kapasitet for dykkede systemer

Skjærspenningen mellom rør og avløpsvann er også viktig ved kapasitetsberegning, men det er da vanlig å inkludere skjærspenning i beregning av friksjonstap eller trykktap. Det fins ulike formler for å beregne friksjonstap/kapasitet, for eksempel Mannings formel eller Darcy-Weisbachs formel. Felles for disse er at man må mate inn i formelen en koeffisient som sier noe om ledningens ruhet. Begrepet ruhet, og retningslinjer for valg av denne størrelsen, diskuteres grundig i kapittel 2.

Ved kapasitetsberegning må man også ta hensyn til singulærtap som oppstår når vannet strømmer forbi hindringer i ledningsnett. Dette kan være feil i røret som skyldes dårlig utførelse eller generelt forfall, for eksempel svanker, et innstukket rør eller en tverrrforskjøvet skjørt. En metodikk for å beregne kapasitetsreduksjon som følge av feil som oppdages ved rørinspeksjon er forklart i kapittel 3.

Det kan også oppstå store trykktap i kummer som er uheldig utformet. I praksis kan trykktapet i kummer være like stort som trykktapet i rørene i avløpssystemet. I kapittel 4 beskrives det hvordan man kan ta hensyn til singulærtap i kummer, og hvordan kummer bør utformes for å få best mulig hydrauliske egenskaper.

2. "Ledningsruhet" i ulike situasjoner

Ruhet i ledninger er først og fremst aktuelt for avløpsledninger under trykk, altså for pumpeledninger eller dykkede ledninger (jf. kapittel 1.2). Når det gjelder selvfallsledninger med fritt vannspeil, er selvrensende skjærspenning den avgjørende fysiske størrelsen (jf. kapittel 1.1). Samtidig er også ruheten relevant for selvfallsavløp da den benyttes som en inngangsparameter i hydraulisk dimensjonering og modellering.

Formålet med dette kapittelet er å illustrere hvilken betydning ulike faktorer har for valg av ruhet. I etterfølgende delkapitler presenteres og drøftes en del forskningsresultater og informasjon om faktorene som påvirker ruheten til en ledning, delt inn i følgende punkt:

- Betydningen av konstruksjon og utførelse
- Rørmaterialets betydning - nye rør og feltundersøkelser av ruhet
- Betydningen av sedimenter og oppbygging av kloakkhud
- Betydningen av fyllingsgrad
- Betydningen av vannhastighet
- Ruhetsvekst

I kapittel 2.12 oppsummeres disse punktene og det gis anbefaling for bruk av ruhet.

2.1. Kort om beregningsmetoder for friksjonstap

Det finnes flere formler som kan brukes for å beregne friksjonstap. I Norge er de tre vanligste:

- Darcy-Weisbach, der friksjonskoeffisienten beregnes etter Colebrook-White
- Manning
- Hazen-Williams

De tre metodene har litt forskjellige bruksområder, men felles for dem er at de har en friksjonskoeffisient som avhenger av ruheten. Generelt er Mannings formel den mest unøyaktige av de tre for trykktap i rør. Når Mannings formel brukes i kapittel 2.3, er det for å illustrere hvordan ruheten påvirker kapasiteten (det er den formelen som har den enkleste sammenhengen mellom kapasitet og ruhet). I vedlegg 1 vises et eksempel på bruk av Colebrook-White, som generelt er en mer nøyaktig formel for beregning av friksjonskoeffisienten.

I Vedlegg 2 forklares sammenhengen mellom Darcy-Weisbachs formel og ruhet. Ved dimensjonering av rørstrømning anbefaler vi å bruke Darcy-Weisbachs framfor Mannings formel.

2.2. Hva er ruhet?

Parameteren "ruhet" er mye diskutert i bransjen og i litteraturen. Dette er en vanlig og viktig størrelse for å beskrive innvendig hydraulisk "motstand" i rørene. Ruheten i avløpsledninger bestemmes av ulike forhold, bl.a.:

- Ruhet for nye ledninger (i et laboratorium) kontra ledninger i drift i felten
- Vannhastigheten, og hvor ofte og lenge maks vannhastighet forekommer
- Om det er en overvannsledning (OV), fellesledning (AF), eller en spillvannsledning (SP)
- Kvalitet på arbeidet da ledningen ble lagt, og spesielt svanker
- Forfallet i ledningsnettet (se kapittel 3)
- Fyllingsgrad, vannføring og fall
- Hvordan stikk og tilkoblinger utføres
- Om ruheten er angitt i mm, som Manningstall, eller på annen måte
- Om det kun er ledningens ruhet man ser på eller systemets totale ruhet

”Hva er ruheten til en betongledning eller plastledning?” er altså et spørsmål det ikke går an å gi et nøyaktig svar på generelt, det må ses i en sammenheng.

Det er viktig å være klar over hva man legger i ”ruhet”, og det kan være hensiktsmessig å dele ruhet i rørruhet, singulærtap, systemruhet og praktisk forekommende ruhet. Siden ruheten kan variere over et kumstrek, er det derfor hensiktsmessig (og vanlig) å benytte gjennomsnittlig ruhet for et kumstrek.

- Med rørruhet menes den ruheten som kan måles i rørveggen på et nytt rør. Dette er forskjellen mellom små groper og forhøyninger i et tverrsnitt av røret.
- Singulærtap er tap over spesielle hindringer, for eksempel i et bend eller i en kum (mer om kumtap i kapittel 4).
- Systemruheten er summen av singulærtap og rørruhet. Også ruhet som forårsakes av skjøter, bend og andre hindringer som ikke skyldes utførelse eller forfall, bør være inkludert i denne.
- Praktisk forekommende ruhet (kalles også bruksruhet) er et samlebegrep for den motstanden som vannet vil møte når det strømmer i røret, og er summen av systemruhet og driftsbetingelser som avleiringer, svanker, innstukne rør og lignende (mer om slike tap i kapittel 3). Normalt er det denne ruheten som fordeles utover ledningene i nettet, slik at man ikke behøver å ta hensyn til singulærtap ved modellering og dimensjonering.

Det er den praktisk forekommende ruheten som bestemmer rørets kapasitet. Normalt har avløpsnettets fysiske tilstand mer å si for den praktisk forekommende ruheten enn selve rørmaterialet.

Det kan også være stor forskjell på ruheten i øvre og nedre del av rørtverrsnittet. Den nedre delen er ofte mer slitt, og har mer utfellinger, belegg, biofilm, løse sedimenter o.l. Den øvre delen blir kun påvirket under høy vannstand og kan ha en ruhet mer lik en ny og ren ledning selv om den nedre halvdelen er slitt og har belegg. Dette gir større ruhet for den nedre delen av røret, som er i funksjon i størsteparten av den daglige driften. I OV- og AF-ledninger som fører regnvann, kan rørveggen spyles ren ved større regnskyll, noe som gjør at ledningen vil ha redusert ruhet i den første tiden etter regnskyll og øker siden på.

Dette illustrerer at en ledning ikke nødvendigvis har en bestemt ruhet, men at ruheten kan variere avhengig av driftssituasjonen. Ved planlegging av et anlegg bør man derfor vurdere hvilke situasjoner røret vil driftes under, og legge inn en nødvendig framtidig sikkerhet for at tilstanden vil bli dårligere.

2.3. Ruhetens innvirkning på kapasitet

I Norge er det vanlig å bruke Darcy-Weisbachs formel for kapasitetsberegning. Friksjonsfaktoren, som er avhengig av relativ ruhet k/D og Reynolds tall R , beregnes ved hjelp av Colebrook-Whites formel. Ruheten angis i mm, som ofte betegnes absolutt ruhetskoeffisient k , eller bruksruhet k_b . Dette kalles også noen ganger sandruhet, og som visualisering er sandruheten størrelsen til ”tenkte sandkorn” som ligger tett i tett i et lag på rørveggen.

Dersom man skal bruke Mannings formel (Formel 1) til å beregne vannhastighet eller vannføring, må man gjøre om ruheten til Mannings tall, M :

$$\text{Formel 1: } v = M \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

v = vannhastighet (betegnes også U)

M = Mannings tall (= $1/n$ hvor n = Mannings ruhetskoeffisient)

R = hydraulisk radius

I = helningen på energilinja (helningen på ledningen hvis det er frispeilstrømning)

Begrepet "sandruhet" stammer fra forsøk på 1920-tallet, og Colebrook-Whites formel bygger på disse forsøkene. Ruheten var kornstørrelsen på sandfraksjonen som ble limt fast på innsiden av rørveggen.

En tilnærmet sammenheng mellom Mannings tall M og ruheten k er gitt i Formel 2 [4]:

$$\text{Formel 2: } M = 25,8 / k^{1/6} \text{ [m}^{1/3}\text{/s]}$$

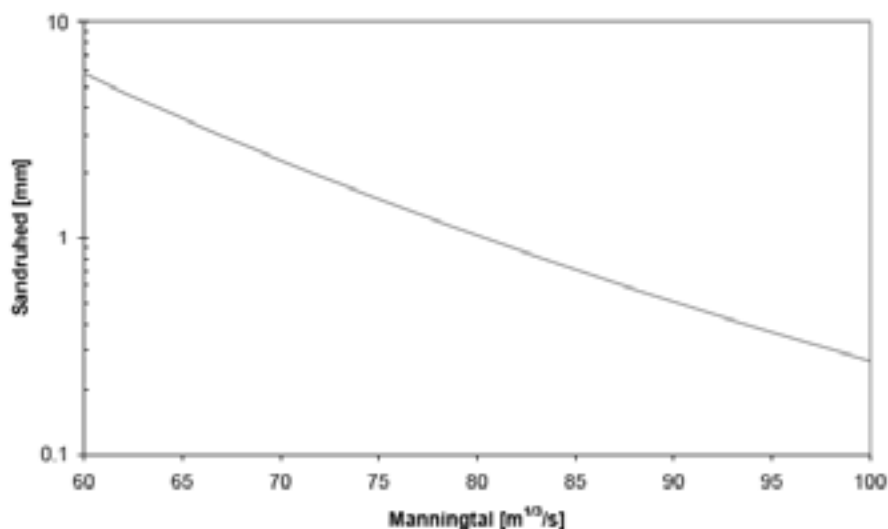
NB! i formelen må k oppgis i meter (og ikke mm)

I Tabell 2 er det vist en beregning av M for noen typiske verdier av k .

Tabell 2: Beregning av tilnærmet sammenheng mellom M og k med Formel 2

k (mm)	k (m)	M
0.2	0.0002	106.7
0.3	0.0003	99.7
0.4	0.0004	95.0
0,5	0,0005	91,6
0,6	0,0006	88,8
0,7	0,0007	86,6
0,8	0,0008	84,7
0,9	0,0009	83,0
1	0,001	81,6
1,1	0,0011	80,3
1,3	0,0013	78,1
1,5	0,0015	76,3
2	0,002	72,7
3	0,003	67,9
4	0,004	64,8
5	0,005	62,4
7	0,007	59,0
10	0,01	55,6

En grafisk sammenheng mellom M og ruheten k (i mm) er vist i Figur 2 [3]. Dersom man sammenligner verdiene i Tabell 4 med Figur 2, ser man at resultatet blir relativt likt for lave k -verdier, men noe avvikende for høyere k -verdier. Det anbefales derfor å benytte diagrammet i Figur 2 framfor Formel 2.



Figur 2: Sammenheng mellom Manningstall (M) og ruhet (kalles sandruhet på dansk) [3]

Som man ser av Mannings formel (Formel 1, side 11), er vannhastigheten proporsjonal med Manningstallet. Ved å mate inn litt forskjellige verdier for ruhet og Mannings tall i formelen vil man få forståelse for betydningen av å velge riktig ruhet ved dimensjonering. Eksempelvis vil en endring i ruhet fra 0,5 mm til 1,0 mm gi en endring i Manningstall fra 87 til 79, en reduksjon på ca 10 %. Dette medfører en tilsvarende reduksjon i vannhastighet (og dermed kapasitet) på 10 %.

Dersom man benytter programvare for simulering av rørstrømning, må man være oppmerksom på muligheten for at ruhet er oppgitt i *inch* (tomme) eller annen enhet.

NB! Mannings formel er ikke anerkjent som den mest nøyaktige for å dimensjonere ledninger. Darcy/Weisbachs formel kombinert med Colebrook/White er mer nøyaktig. I dette delavsnittet er Mannings formel brukt av pedagogiske årsaker, fordi den er den metoden som har enklest sammenheng mellom ruhet og kapasitet. I vedlegg 1 er det vist et eksempel på dimensjonering av ledninger med Darcy-Weisbachs formel.

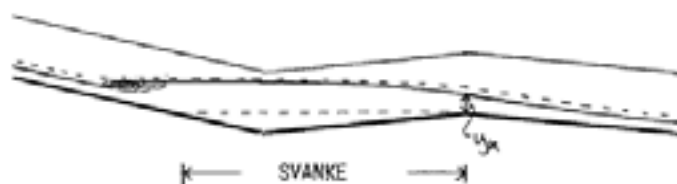
2.4. Generelt om undersøkelser og litteratur om ruhet

Undersøkelser av praktisk forekommende ruheter er vanskelige å foreta, da det er nødvendig med nøyaktige målinger av vannspeilsnivåer, vannføringer og vannhastigheter for at resultatene skal kunne tolkes korrekt. Målingene er lettest å utføre og tolke på strekninger der ledningene går fulle. Her vil sammenhengen vannføring/vannhastighet være enklere; dessuten forekommer den ruheten som er relevant å bruke for beregning av ledningens maksimale kapasitet.

NHL, Norges Hydrotekniske Laboratorium gjorde ulike praktiske forsøk om strømning i avløpsnett på 80-tallet (for eksempel [1]). Den undersøkelsen av nyere dato som ligger nærmest norske forhold, ble utført av danske PH-consult i 2001 [3] som et litteraturstudium, og er et godt utgangspunkt for anbefalte ruheter ved norske avløpsanlegg. I rapporten [3] påpekes det at det er foretatt få undersøkelser av praktisk forekommende ruheter i avløpssystemer. Hoveddelen av den tilgjengelige litteraturen omhandler ruheter i nye rør med rent vann.

2.5. Betydningen av konstruksjon, utførelse og tilstand

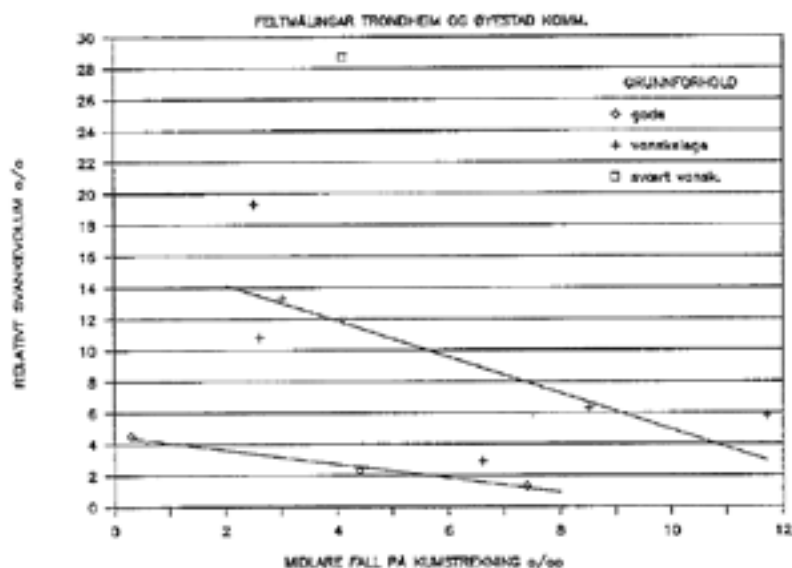
I svanker vil det legge seg sedimenter, som i praksis reduserer rørtverrsnittet som kan transportere avløpsvann, og dermed kapasiteten. Dette er vist i Figur 3 [1].



Figur 3: Reduksjon av tverrsnittsareal for ledning med svanke

Forsøk med sandfylte svanker [1] viste at disse fører til en dramatisk reduksjon i transportkapasiteten. I Figur 3 er det også vist at det dannes et vannstandssprang i forbindelse med en svanke (aktuelt ved frispelstrømning i ledningen). Dette vil kreve energi som gir falltap, og dermed reduseres kapasiteten til ledningen.

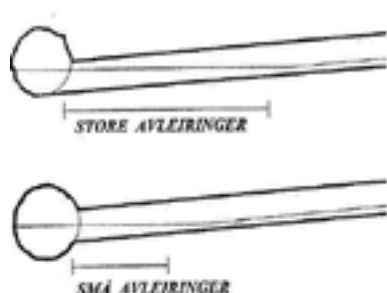
Konstruksjon og utførelse påvirker ledningens tilstand over tid. En ledning som er lagt i dårlige masser eller uten tilstrekkelig komprimering, vil lett kunne få svanker, bli deformert, og lignende. Relativt svankevolum er en viktig parameter for praktisk forekommende ruhet, og er definert som volumet av svankene i forhold til rørvolumet. Figur 4 [1] viser at relativt svankevolum øker jo dårligere grunnforholdene er.



Figur 4: Feltundersøkinger: Sammenheng mellom grunnforhold og svanker [1]

Som en ser av figur 4 vil en ved "gode grunnforhold" få relativt beskjedne svankevolum selv ved svært lave fall, og ved fall på minimum 8-10 ‰ vil det sjelden oppstå svanker (motfall). Ved "dårlige grunnforhold" må en øke fallet vesentlig for å oppnå samme sikkerhet mot svanker; i henhold til kurven må en opp i fall på minimum 12-14 ‰. Ved svært vanskelige grunnforhold må en øke fallet ytterligere.

Et eksempel på uheldig konstruksjon er vist i Figur 5, som viser hvordan feilaktige påkoblinger kan medføre større avleiringer.



Figur 5: Sammenheng mellom utførelse av påkoblinger og avleiringer [18].

Dette er en årsak til at tilkoblinger og stikk bør føres inn i toppen på ledningen.

I Tabell 7 er det vist eksempel på betydning av ledninger med "god" og "dårlig" tilstand.

2.6. Materialets betydning

I Norge finnes det generelt ikke noen lov- eller forskriftsfestede krav angående dimensjonering av avløpsledninger. Gjeldende standard for planlegging av avløpsnett, *NS-EN 752, Utvendige hovedlednings- og stikkledningssystemer* [19], gir ingen føringer på hvordan ruhet skal behandles. Imidlertid finnes det noen normer å gå ut fra. En norm som har vært mye benyttet er *Kommunenes Sentralforbunds Kommunaltekniske Norm (NKF)* [20]. Tabell 3 gjengir verdier for ruheter slik de er gitt i NKF.

Tabell 3: Bruksruhetskoeffisienter gitt i NKF (mm)

Rørmateriale	Rørstrekninger uten tilknytninger/bend	Rørstrekninger med tilknytninger/bend
Plast	0,25	0,4
Betong	1,0	1,5

En sammenligning med andre litteraturkilder viser at NKF-verdiene kun bør brukes for helt nye rør.

Tabell 4 viser en oversikt over *k*-verdier anbefales av Butler and Davies i boka *Urban Drainage* [16]:

Tabell 4: Ruheter for ledningsmaterialer, fra Butler and Davies

Materiale	Nye rør (mm)	Gamle rør (mm)
Leirrør	0,03-0,15	0,3-3,0
Plastrør	0,03-0,6	0,15-1,5
Betong	0,06-1,5	1,5-6,0
Pumpeledninger	0,03-0,6	

2.6.1. Undersøkelser av nye rør

Eksempler på laboratorieforsøk med rent vann og nye rør er to prosjekt utført ved amerikanske universiteter i 1986. Det ene prosjektet (Tullis og Utah State University Foundation i 1986) fant ruhet for betong på 0,27 mm og ruhet for PVC-U på 0,15 mm. Det andre prosjektet (Perkins og Gardiner i 1982 og -85, og HR Wallingford i 1976 og 1987) fant ruhet på 0,27 mm for betongrør. Verdiene fra begge disse forsøkene er innenfor ruhetene som er angitt i Tabell 4.

En engelsk laboratorieundersøkelse ble gjennomført i 1982 [12]. Det ble utført forsøk med betongrør, PVC-U rør og teglrør, alle med DN 225 og fall på 4 ‰ og 10 ‰. Forsøkene ble utført som kvasi-feltnmålinger ved at spillvann ble tatt ut av et felles-system. Resultatene er angitt i Tabell 5, hvor verdiene er omgjort til å gjelde for fylte rør og vannhastighet 0,7 m/s.

Tabell 5: Ruheter fra Perkins og Gardiners forsøk fra 1982 [12]

Materiale	Ruhet (mm)	
	Max	Min
Betong	3,8	1,3
Tegl	2,3	0,6
PVC-U	1,1	0,6

Resultatene fra [12] ligger noe over resultatene fra de amerikanske universitetene gjengitt tidligere, og viser betydningen av kloakkhud i ledninger. Generelt kan man dermed konkludere at ved dimensjonering og analyse av avløpsledninger bør det brukes ruheter som er større enn de som måles i nye rør og med rent vann. Avløpsvannet som ble benyttet var på forhånd rensert for sand og grus, og det er naturlig at dette bidro til mindre kloakkhud enn i en "virkelig" avløpsledning. Pga. at svanker og deformasjoner heller ikke var tatt med i betraktningen, bør resultatene derfor ikke benyttes direkte til dimensjonering.

Forsøk ved NHL i 1988 [1] viste at plastledninger har noe bedre transportevne enn betongledninger under ellers like forhold.

Som nevnt tidligere betyr imidlertid forskjeller i ruhet for ulike rørmaterialer målt i slike labforsøk lite for den virkelige kapasiteten.

2.6.2. Feltundersøkelser – rør i drift

Gerard m.fl. [13] omtaler feltstudier som ble gjort ved University of Alberta, Canada i 1986, der målet var å kartlegge verdier for praktisk forekommende ruheter i avløpssystemer. Det ble i alt gjort målinger på til sammen 33 ledningsstrekke (fra kum til kum) av betong og PVC – henholdsvis 24 av PVC og 9 av betong.

Alle ledningene var mellom 2 og 5 år gamle, med diametre fra 200 mm til 686 mm, og med fall fra 0,027 % til 3,1 %. De fleste av ledningene hadde lav fyllingsgrad under normale forhold.

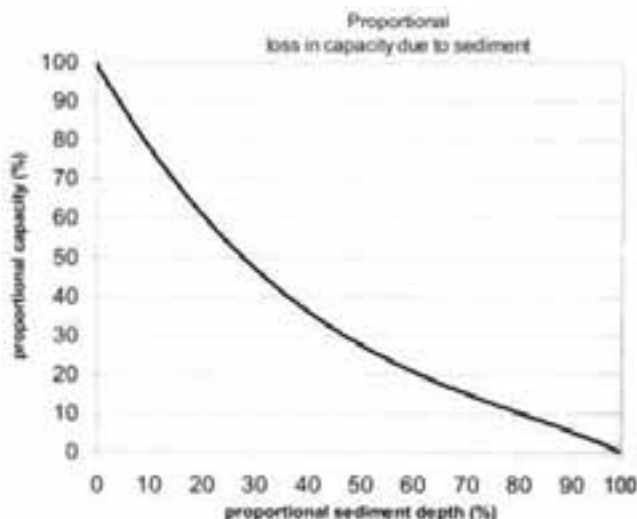
For å finne ruhetsverdier for ledningen når fyllingsgraden var større, ble det for 6 av ledningene (3 av PVC og 3 av betong) foretatt målinger ved å tilføre vann fra en brannhydrant. Colebrook-Whites formel ble brukt til å bestemme ekvivalent sandruhet i ledningen.

For å få sammenlignbare resultater ble det foretatt en sortering, som resulterte i 11 PVC-ledninger og 7 betongledninger. For disse ledningsstrekke var den praktisk forekommende ruheten så å si den samme for begge rørmaterialene, ca 7 mm (dvs at de undersøkte ledningene hadde relativt mye avleiringer). Forsøkene med utvidet fyllingsgrad (ved å tilføre vann fra brannhydrant) viste at ruhetene for henholdsvis PVC og betong ved om lag halvfullt rør var 0,6 mm og 1,7 mm. Videre konkluderes det med at det i tillegg til rørmaterialet også bør tas hensyn til fall og andel av dimensjonerende vannføring som forekommer i tørrværsituasjoner. Når tørrværsvannføringen utgjør størsteparten dimensjonerende vannføring og for ledninger med mye avleiringer, anbefaler [13] å bruke ruhetsverdiene 3 mm for PVC og 7 mm for betong. Når ledningsfallet er større enn 10 ‰ anbefales lavere verdier; 0,2 mm for PVC og 0,6 mm for betong. I tilfeller der tørrværsvannføringen utgjør en liten andel av dimensjonerende vannføring, anbefales 0,1 mm for PVC og 0,3 mm for betong.

Disse eksemplene bør i første rekke betraktes som en illustrasjon betydningen av ledningsfall, fyllingsgrad, vannhastighet og sammensetningen av avløpsvannet.

2.7. Betydningen av sedimenter og oppbygging av kloakkhud

Sedimenter og avleiringer har stor betydning for kapasitet, noe som er vist i Figur 6.



Figur 6: Forholdet mellom sedimentdybde og hydraulisk kapasitet [10]

Sedimentene i Figur 6 er faste sedimenter som ikke rives med og transporteres bort ved økt vannføring.

I Tabell 6 [3] foreslås følgende gradering av bruksruhet basert på biofilm (for danske forhold):

Tabell 6: Klassifisering av biofilm [3], Danske forhold

Beskrivelse	Bruksruhet (mm)
Biofilm i bunnen opp til 3 mm tykkelse. Ingen sedimenter. Maks. hastighet ved tørrværsavrenning > 1 m/s.	0,6
Normal biofilm, 3-5 mm. Ingen sedimenter. Hastighet ved tørrværsavrenning 0,7-1 m/s.	1,5
Som over, men med sedimenter eller biofilm tykkere enn 5 mm.	3,0
Sedimenter opp til 5 % av rørdiameteren eller store ansamlinger av sedimenter.	6,0

Norske erfaringer fra rørinspeksjon (fra Oslo) tyder på at det bygges opp mer biofilm i plastrør enn i betongrør. Dette er blant annet beskrevet i [23]. Årsaken til dette er usikker, men andre faktorer enn kun rørmaterialet kan ha betydning.

På den andre siden fins det de som hevder at det "gror" mindre i plastledninger, og mener dette skyldes at rørene er glattere og at dermed at begroingen ikke får tak.

Alt i alt bør man være forsiktig med å konkludere på et generelt grunnlag om enkelte rørmaterialer er mer utsatt for begroing enn andre.

2.8. Betydningen av fyllingsgrad

Den franske betongindustriens bransjeorganisasjon, *Cerib*, sammenlignet betong- og plastledninger på en 28 m lang strekning [14]. Det ble brukt rent vann ved forsøkene. Man fant at ledningene hadde samme ruhet (< 0,5 mm) ved fyllingsgrad på mer enn 70 %. Betongledningene hadde høyere ruhet enn plastrørene ved fyllingsgrad under 70 %. Som nevnt i kapittel 2.6.2 undersøkte [13] ledninger i felt og fant ruheter for plastrør på 0,6 mm og betongrør på 1,7 mm ved om lag halvfullt rør.

Perkins and Gardiner [12] fant at delvis fylte ledninger har høyere ruheter enn fylte ledninger og at den maksimale ruheten ble betraktelig mindre når helningen ble øket fra 4 ‰ til 10 ‰.

Det er med andre ord ikke riktig å bruke samme ruhet for en ledning som har lav fyllingsgrad og for en tilsvarende ledning med høy fyllingsgrad, eller en pumpeledning.

2.9. Betydningen av vannhastighet

HR Wallingford oppgir i [2] ruhetsverdier for "slimed sewers", spillvannsledninger med biofilm, som vist i Tabell 7 (tallene er sannsynligvis basert på den samme undersøkelsen som gjengitt i Tabell 5).

Tabell 7: Ruheter for "slimed sewers", spillvannsledninger med biofilm [2]

Materiale	Hastighet ca 0,75 m/s for halvfull ledning		Hastighet ca 1,2 m/s for halvfull ledning	
	Normal tilstand (mm)	Dårlig tilstand (mm)	Normal tilstand (mm)	Dårlig tilstand (mm)
Betongrør	3,0	6,0	1,5	3,0
Keramisk/leirrør	1,5	3,0	0,3	0,6
PVC-rør	0,6	1,5	0,2	0,3

2.10. Ruhetsvekst over tid

Perkins and Gardiner [12] viste i labforsøk at oppbygning av biofilm skjer i løpet av 3-5 måneder. Etter denne perioden er det store variasjoner i ruhet som skyldes nedsliting og gjenoppbygging av biofilmen.

Dette kan nok variere mye avhengig av forholdene i den enkelte ledning. Biofilm og sedimenter vaskes ut når vannhastigheten er høy, og bygges opp når den er lav. Dette kan foregå daglig eller med større intervaller avhengig av for eksempel nedbør.

Pumpeledninger kan være spesielt utsatt for begroing, og bør pluggkjøres med jevne mellomrom. En annen type ledninger som er spesielt utsatt for begroing er utslippsledninger, hvor det kan feste seg skjell og lignende inne i ledningen. Dette gir stor ruhetsøkning som i tillegg er vanskelig å få fjernet.

Den praktisk forekommende ruheten vil også være avhengig av tilstanden til ledningen, som diskutert tidligere.

Det anbefales derfor å ta høyde for en variasjon i den praktisk forekommende ruheten ved dimensjonering av avløpsledninger.

2.11. Bruk av ruhet i hydrauliske modeller

Resultatene i dette kapittelet kan også brukes i hydrauliske modeller. Dvs at i den grad det er mulig, bør ledninger med varierende vannhastighet og vanndybde tilordnes en varierende ruhet, og ikke en fast verdi. Det fins funksjonalitet for å legge inn varierende ruhetstall (for eksempel Manningstall) i hydrauliske modeller.

Ruhet for kummer går gjennom spesielt i senere kapittel. Man kan enten velge å inkludere kumtap i ledningens ruhet eller som separat kumtap. Det som er viktig er at man ikke ser helt bort fra kumtapet i hydrauliske modeller, for da kan man gjøre en relativt stor feil, som vi skal få se senere.

2.12. Oppsummering og anbefaling til valg av ruhet

I kapittel 2 er det gått gjennom ulike faktorer som påvirker den praktisk forekommende ruheten i avløpsledninger. Som forklart er det flere forhold som påvirker den praktisk forekommende ruheten til en avløpsledning:

- Vannhastighet: lavere ruhet med økende vannhastighet.
- Fyllingsgrad: lavere ruhet med økende fyllingsgrad, fyllingsgraden jevner også ut forskjeller i ruhet mellom ulike materialer.
- Materiale: Plastrør har i noen situasjoner lavere ruhet enn betongrør, som ved lav vannføring for spillvann og fellesledninger.
- Tilstand: Dårlig anleggsutførelse kan gi svanker, sedimenter reduserer kapasiteten.
- Type ledning: Spillvannsledninger har generelt høyere ruhet enn overvannsledninger, med mindre overvannsledningen fører mye sand.
- Utvikling over tid: Biofilm bygger seg opp i løpet av noen måneder. I et lengre perspektiv bør man ta hensyn til at ledningens tilstand og andre forhold nevnt over vil forandre seg over tid, for eksempel kan en ledning som legges i dag være i dårligere stand om 20 år.

Følgende punktvis metodikk anbefales for valg av ruhet basert på de ulike undersøkelsene som det er referert til i dette kapittelet:

1. Som et utgangspunkt for dimensjonerende verdier for ruhet anbefales å bruke verdiene i Tabell 8:

Tabell 8: Dimensjonerende ruheter (mm) [3]

Materiale	Maks hastighet < 1 m/s	Maks hastighet > 1 m/s	
		Spillvann/fellesledninger	Overvann
Betong	1,5-6	1-2	0,5-1
Plast (PVC/PP)	1-2	0,5-1	0,5-1

2. Dersom ledningen er i god tilstand, benyttes laveste verdi, dersom den er i dårlig tilstand benyttes høyeste verdi i Tabell 8 (se også Tabell 7 for spillvann – disse to tabellene er ment å komplementere hverandre).
3. For høy vannhastighet blir materialets betydning for ruhet mindre. Dersom rørene har svært høy fyllingsgrad/vannhastighet i store deler av tida, benyttes de laveste verdiene i Tabell 8 for plast uavhengig av material (dvs. samme verdier benyttes for plast og betong).
4. Dersom røret har mye svanker, bør man anta at det er sedimenter som reduserer rørtverrsnittet som kan transportere vann. Reduser kapasiteten i hht. Figur 6. Det kan være aktuelt å redusere kapasiteten med inntil 50 %. Dersom røret har stor fare for avleiringer (for eksempel ved gjentakende behov for spyling), kan ruheteten økes med ca 10 % (se også kapittel 3.2.7).

3. Betydningen av forfall i ledningsnett for bruksruhet og trykktap

Ledningsnett kan ha feil som forskjøvne skjøter, røtter, innstukne rør og lignende. Disse feilene vil redusere den hydrauliske kapasiteten til røret. Slike feil skyldes delvis konstruksjonsmessige forhold, og kan også ha andre årsaker, som slitasje eller dårlige ledningsmaterialer. Felles for feilene er imidlertid at man kan observere og kvantifisere dem visuelt med rørinspeksjon (CCTV på engelsk).

Dette kapittelet presenterer i hovedsak et forskningsarbeid gjennomført i EU-prosjektet CARE-S, Computer Aided Rehabilitation of Sewer Networks. Dette var et EU-finansiert forskningsprosjekt med en ramme på ca 20 millioner norske kroner. 5 norske kommuner deltok som sluttbrukere i prosjektet, som omhandlet planlegging av rehabilitering av ledningsnett for avløp. Det ble utviklet metodikk og programvare i 6 moduler:

- Indikatorer
- Strukturell tilstand
- Hydraulisk og miljømessig ytelse
- Teknologi for rehabilitering
- Sosiale og økonomiske forhold av rehabilitering
- Beslutningsstøtte

Innenfor modulen hydraulisk ytelse var en av oppgavene å simulere hydraulisk strømning i 3D [15]. Ulike feil tilsvarende det man observerer med rørinspeksjon ble simulert med et program som heter FLUENT. Ved hjelp av disse simuleringene ble det laget formler som beskriver hvor mye energitap som oppstår når vannstrømmen for eksempel passerer et tverrforskjøvet rør (se Figur 7). Det ble også utviklet et system som regner om dette til ekvivalent ruhetsendring for kumstrekket, denne programvaren kalles *CARE-S Degradation Tool* (degradation = nedbrytning).

Formålet med dette var bl.a. å forbedre kalibreringen av hydrauliske modeller (for eksempel Mouse, SWMM, og Infoworks) ved at man simulerer nettet slik tilstanden er, i stedet for å simulere nettet med nye rør. Men resultatene kan også være nyttige i andre sammenhenger, for eksempel for å vurdere om det er noen store kilder til trykktap i en ledning man har inspisert. Tabell 9 viser en oversikt over hvilke feil som ble simulert og kvantifisert i dette arbeidet.

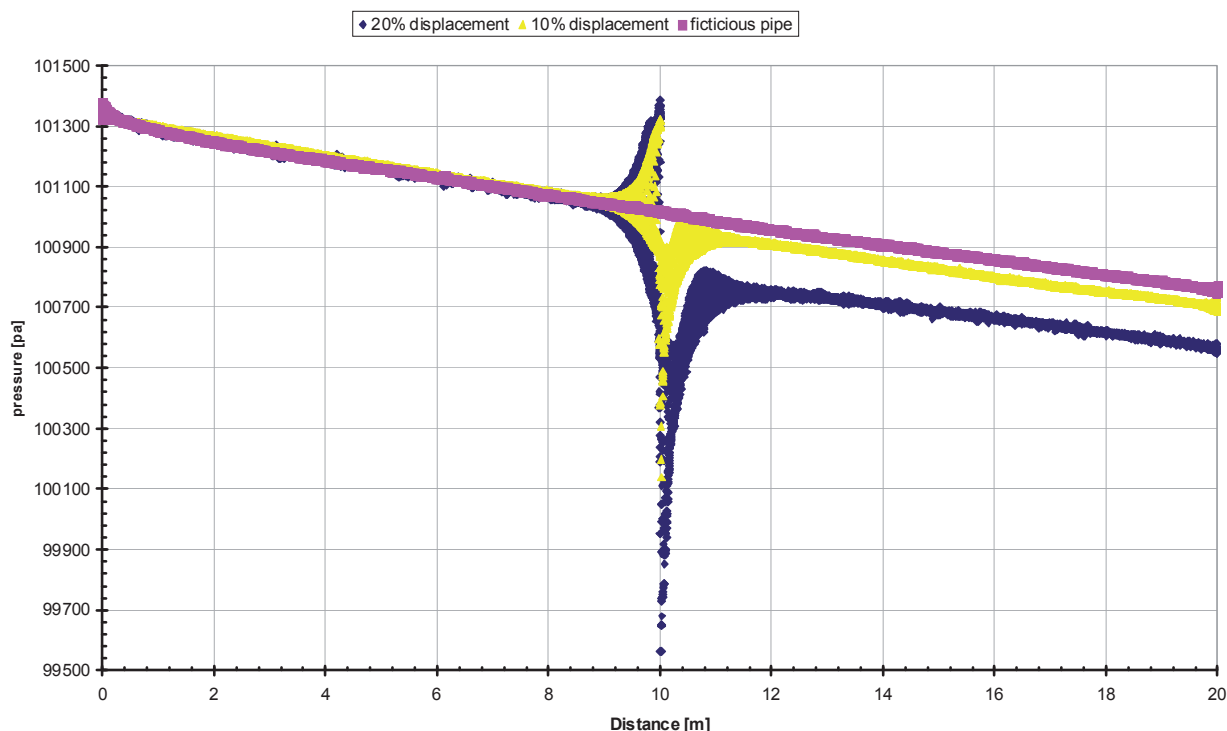
Tabell 9: Feil i ledningsnett som gir trykktap

Kode (engelsk)	Kode (norsk) ¹⁾	Feil (engelsk)	Feil (norsk)
BAA	DF	Deformation	Deformasjon
BAC	SR	Break/collapse	Sprukket rør
BAD	(fins ikke)	Defective Brickwork or Mansory	(brukes ikke)
BAE	(fins ikke)	Missing Mortar	(brukes ikke)
BAF	KO	Surface Damage	Korrosjon / Slitasje
BAG	IR	Intruding Connection	Innstukket rør
BAJ	FS	Displaced Joint	Forskjøvet skjøt
BBA	RØ	Roots	Røtter
BBB	UB	Attached Deposits	Utfelling / Belegg
BBC	SM	Settled Deposits	Sedimenter
BBD	IS	Ingress of Soil	Innsig
BBE	HI	Other Obstacles	Hindring

¹⁾ Koder i hht Norsk Vann rapport 145/2005

Simuleringene ble gjort med fylte rør (oppstuvning), da dette er den situasjonen som er relevant for ledningsnettets kapasitet. Resultatene kan derfor ikke overføres til situasjon med delfylte rør uten videre.

Figur 7 viser et eksempel på hvordan trykklinja faller når vannet strømmer med en bestemt hastighet forbi en tverrforskjøvet skjot med 10 % (gul linje) og 20 % (blå linje) forskyvning (tilsvarer omtrent grad 2 og grad 3), sammenlignet med strømning i et rør uten feil (lilla linje). Den forskjøvne skjøten er ved "Distance 10", og avlesning 4 meter nedstrøms (Distance 14) viser et trykktap (avstanden mellom linjene) på ca 50 Pa (0,5 cm) for 10 % forskyvning og 200 Pa (2 cm) for 20 % forskyvning. Dette er simulert med 3D-strømningsprogrammet FLUENT som en del av CARE-S-prosjektet.



Figur 7: Endring i trykklinja for strømning forbi en tverrforskjøvet skjot sammenlignet med feilfritt rør [15]

3.1. Beskrivelse av metodikk

Formlene i dette kapittelet er hentet fra "Manual for Degradation Tool" [22].

De observerte feilene vist i Tabell 9 bidrar til lokale trykktap, også kalt singulærtap. Slike trykktap beregnes med formelen:

$$\text{Formel 3} \quad \Delta h = K \frac{v^2}{2g}$$

Hvor:

h er trykkehøyden (meter)

K er en koeffisient for lokalt trykktap

v er hastigheten (m/s)

g er tyngdens akselerasjon 9,81 m/s²

I *CARE-S Degradation Tool* omregnes rørets hydrauliske egenskaper på en av de følgende 3 måter:

1. Rørets areal/diameter korrigeres direkte (for eksempel som vist i Formel 5)
2. Mannings ruheetskoeffisient beregnes direkte (for eksempel som vist i Formel 7)
3. Singulærtapet summeres for røret og konverteres til Mannings ruheetskoeffisient for ledningen med Formel 4:

$$n_{ny} = \sqrt{n_{org}^2 + \frac{K \cdot D^{\frac{4}{3}}}{124,5 \cdot l}}$$

Formel 4

Hvor:

n er Mannings ruheetskoeffisient (n_{ny} er ruheetskoeffisient etter korreksjon for et lokalt trykktap og n_{org} er ruheetskoeffisient før korreksjon). $n = 1/M$ hvor M = Mannings tall)

K er en koeffisient for lokalt trykktap,

D er rørdiameter

l er ledningens lengde

Kun en av de tre måtene benyttes, (for eksempel dersom rørets areal/diameter korrigeres, brukes ikke de to andre).

3.2. Formler for beregning av trykktap

I det etterfølgende beskrives hvordan feil i Tabell 9 kan oversettes til ruhet for et helt ledningsstrekk. Dette har nytte ikke bare i hydrauliske modeller, men også ved andre hydrauliske vurderinger og manuelle beregninger.

3.2.1. BAA - Deformation

Røret er deformert. Feilen kvantifiseres ved at nytt areal beregnes og at røret får ny diameter som er tilpasset det virkelige tverrsnittsarealet.

Formel 5 $D_{ny} = (1 - C1) \cdot D_{org}$

D_{ny} = Rørets virkelige diameter

D_{org} = Rørets diameter da det var nytt

$C1$ = relativ reduksjon i diameter (for eksempel 0,1 hvis diameter er redusert med 10 % i forhold til opprinnelig diameter)

3.2.2. BAC - Break/collapse

Ledningen kan ha brudd i følgende kategorier:

- A. brudd – synlige brudd i rørveggen
- B. manglende – biter av rørveggen er borte
- C. kollaps – røret har rast sammen

Formel 6 $K = C1$

Hvor verdien for $C1$ bestemmes slik i forhold til kategoriene over

A: $C1 = 0,1$

B: $C1 = 0,25$

C: $C1 = 1,0$

K inngår i Formel 4 for beregning av n_{ny} .

3.2.3. BAF - Surface Damage

Dette er korrosjon/slitasje.

Formel 7 $: n_{ny} = C1 \cdot n_{org}$

$C1 = 0,9$ (med mindre korrosjonen er svært liten, i så fall $C1 = 1,0$)

3.2.4. BAG - Intruding Connection

Dette er innstukket rør.

Formel 8 $K = 0,0384 \cdot e^{\frac{6,37 \cdot D_{innst} \cdot L_{innst}}{\pi \cdot D_{rør}^4}}$

D_{innst} = diameter for innstukket rør

L_{innst} = lengde for innstukket rør

$D_{rør}$ = diameter til røret som blir innsisert

K inngår i Formel 4 for beregning av n_{ny} .

3.2.5. BAJ - Displaced Joint

Dette er rør som er for skjøvet, enten i lengderetning, med tverrforskyvning, eller i vinkel.

For lengdeforskjøvet skjøt

Ingen endring i ruheten.

For tverrforskjøvet skjøt

Formel 9 $K = 0,0122 \cdot e^{12,3 \cdot \frac{Q1}{D}}$

$Q1$ = antall mm av røret som er tverrforskjøvet som syns

D = rørets diameter

K inngår i Formel 4 for beregning av n_{ny} .

For forskyvninger i vinkel

Formel 10 $K = C1 \cdot 3,0 \cdot 10^{-5} \cdot Q1^2 + 0,0047 \cdot Q1 + 0,092$

$\emptyset$ = diameter

$Q1$ = vinkel i grader mellom retningen på de to rørene

K inngår i Formel 4 for beregning av n_{ny} .

3.2.6. BBA - Roots

Dette er røtter.

Formel 11 $K = C1 \cdot (2,39 \cdot Q1^2 + 0,097 \cdot Q1 + 0,089)$

$C1 = 0,5$ dersom røttene er små og spredte, ellers 1,0

$Q1$ = reduksjon i tverrsnittsarealet (for eksempel 0,1 hvis arealet som dekkes av røtter utgjør 10% av opprinnelig areal av rørtverrsnittet)

K inngår i Formel 4 for beregning av n_{ny} .

3.2.7. BBB - Attached Deposits

Dette er avleiringer og fett.

- A. Avleiringer
- B. Fett
- C. Kloakkhud

Formel 12 (alt 1) $n_{ny} = C1 \cdot n_{org}$

$C1 = 0,9$ for A

$C1 = 1,0$ for B

$C1 = 0,95$ for C

Formel 13 (alt 2) $A_{reduert} = (1-Q1) \cdot A_{org}$

A = tverrsnittsarealet

$Q1$ = reduksjon i tverrsnittsarealet (for eksempel 0,1 hvis arealet som dekkes av avleiringer og fett utgjør 10% av opprinnelig areal av rørtverrsnittet)

3.2.8. BBC - Settled Deposits

Sedimenter i røret.

- A. Fine sedimenter (silt, sand)
- B. Grove sedimenter (småstein, pukk)
- C. Solide masser (f.eks. sement)

Formel 14 $D_{reduert} = (1-Q1) \cdot D_{org}$

D = rørets diameter

$Q1$ = sedimentdybden relativt til rørdiameter (for eksempel 0,1 dersom sedimentdybden utgjør 10% av rørdiameter)

3.2.9. BBD - Ingress of soil

Masser som har trengt inn i røret fra utenforliggende masser.

Formel 15 $A_{reduert} = (1-Q1) \cdot A_{org}$

A = tverrsnittsarealet

$Q1$ = reduksjon i tverrsnittsarealet (for eksempel 0,1 hvis areal som dekkes av masser utgjør 10 % av opprinnelig areal av rørtverrsnittet)

3.2.10. BBE - Other Obstacles

Dette omhandler andre hindringer som kan finnes i røret. Beskrivelsene er slik:

- A. Murstein eller murerester som ligger i røret
- B. Del av kollapset rør som ligger i røret
- C. Annet objekt som ligger i røret
- D. Objekt som trenger inn gjennom rørveggen
- E. Objekt som trenger inn gjennom en skjøt
- F. Objekt som kommer inn fra en stikkledning
- G. Kabler/ledninger som er installert i røret
- H. Kabler/ledninger som er integrert i røret (montert slik at det tar en del av rørtverrsnittet)

Disse kodene skal kun benyttes når BBA (røtter) eller BBD ikke kan benyttes.
For A (murstein 240×115×71mm)

Formel 16 $K = 0,029 \cdot e^{7,98 \cdot Q1}$

$Q1$ = reduksjon i tverrsnittsarealet (for eksempel 0,1 hvis arealet som dekkes av hindringen utgjør 10% av opprinnelig areal av rørtverrsnittet)

K inngår i Formel 4 for beregning av n_{ny} .

For B, C, H

Formel 17 $K = e^{14,7 \cdot Q1^3 - 17,5 \cdot Q1^2 + 12,3 \cdot Q1 - 3,65}$

K inngår i Formel 4 for beregning av n_{ny} .

For D - G

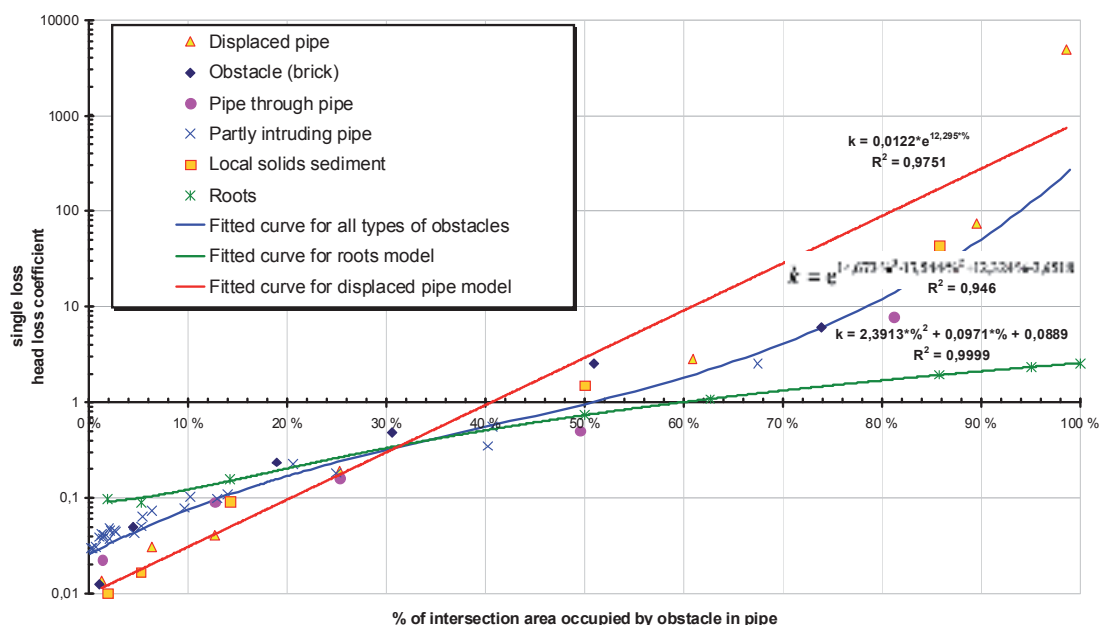
Formel 18 $K = 0,026 \cdot e^{6,82 \cdot Q1}$

K inngår i Formel 4 for beregning av n_{ny} .

3.2.11. Sammendrag av trykktap for feil – kobling til klassifisering av avløpsledninger

Som beskrevet i dette kapittelet har ledningens tilstand og ruhet stor betydning for evnen til å transportere avløpsvann.

Figur 8 viser et sammendrag av resultatene fra forskningsarbeidet i CARE-S. Kurvene brukes til å avlese singulærtapskoeffisienter for ulike feil for bruk ved strømming i fullt rør. På x-aksen angis prosentvis del av rørtverrsnittet som er påvirket av hindringen i røret (enten diameter eller areal), og på y-aksen er singulærtapskoeffisienten. Den røde kurven viser kurve for tverrforskjøvet skjøt, den grønne viser røtter, og den blå kurven viser øvrige hindringer.



Figur 8: Koeffisienter for simulerte feil [15]

For eksempel vil en forskjøvet skjøt med 20 % reduksjon i rørareal gi en singulærtapskoeffisient på 0,1, mens for 40 % er koeffisienten 1. For en vannhastighet på 1 m/s tilsvarer dette 0,5 cm trykktap for 20 % reduksjon i rørareal og 5 cm trykktap for 40 % reduksjon i rørareal. Formel 3 for beregning av singulærtap er vist på side 21.

I NORVAR-rapporten [17] Dataflyt – klassifisering av avløpsledninger (150/2007) er det beskrevet et system for klassifisering av avløpsledninger basert på ambisjonsnivåene *skadeklasser*, *funksjonsklasser* og *tiltaksklasser*. Dette står blant annet beskrevet på side 33 i rapporten. I funksjonsklassen inngår en vurdering av hvordan ledningens kapasitet påvirkes av tilstandsklassen:

Tabell 10: Norsk Vanns hydrauliske funksjonsklasser

Klasse	Kriterier
1 (meget god)	Det er dokumentert at alle krav er oppfylt
2 (god)	Alle krav er sannsynligvis oppfylt
3 (dårlig)	Ledningen har 75 – 90 % av nødvendig kapasitet
4 (meget dårlig)	Ledningen har 50 – 75 % av nødvendig kapasitet
5 (ubrukelig)	Ledningen har < 50 % av nødvendig kapasitet

I rapport 150/2007 er det ikke forklart hvordan man skal finne kapasiteten for en ledning. Basert på resultatene i Kapittel 3 i denne rapporten foreslås det derfor i Tabell 11 (neste side) en metodikk for å vurdere hvilken kapasitetsklasse en ledning tilhører basert på resultater fra rørinspeksjon.

Tabellen brukes slik:

- Sjekk rørinspeksjonsrapporten mot kolonne 3 i Tabell 11 (Kriterier)
- Den dominerende feilen (kolonne 1, *Kode og feil*) på rapporten brukes til å bestemme Klasse (kolonne 2, *Klasse*).
- Det er den verste klassen en ledning havner i som bestemmer hvilken kapasitetsklasse ledningen skal ha. Eksempel: hvis en ledning har noe utfelling/belegg grad 1-2 (gir Klasse 2), og en deformasjon på 20-50 % (gir Klasse 3), er det deformasjonen som gir den dårligste kapasitetsklassen, ledningen havner dermed i Klasse 3.
- Dersom en ledning har svært mange feil i en klasse, kan det tenkes at kapasiteten er noe dårligere enn dette, og man må vurdere å plassere ledningen i en høyere klasse. Eksempel: For en ledning med mange feil som gir klasse 2, kan ledningen plasseres i klasse 3 totalt sett.

Vurderingene i Tabell 11 er gjort ved at ruhet er beregnet med formlene i kapittel 3.2.1-3.2.10. Denne beregnede ruheten er så benyttet til å beregne reduksjon i Manningstallet, som er proporsjonal med kapasitetsreduksjonen.

Tabell 11: Tilordning av kapasitetsklasse basert på resultater fra rørinspeksjon, ref tabell side 33 i NORVAR-rapport 150/2007

Kode og feil ¹⁾	Klasse	Kriterier
DF Deformasjon	1	Ingen deformasjon
	2	Maksimal deformasjon 0-20 %
	3	Maksimal deformasjon 20-50 %
	4	Maksimal deformasjon 50-75 %
	5	Deformasjon større enn 75 %
SR Sprukket rør	1	Ingen feil eller noen få grad 1
	2	Sprukket rør grad 1-2
	3	Sprukket rør grad 3
	4	Sprukket rør grad 4 (kollaps)
	5	Sprukket rør grad 4 (kollaps)
KO Korrosjon/ Slitasje	1	Ingen feil
	2	Noe korrosjon
	3	Veldig mye korrosjon
	4	Korrosjon kan aldri føre til så stor reduksjon i hydraulisk kapasitet
	5	Korrosjon kan aldri føre til så stor reduksjon i hydraulisk kapasitet
IR Innstukket rør	1	Få eller ingen feil
	2	Maksimalt 2 innstukne rør pr 50 meter
	3	Mange innstukning rør ulik grad
	4	Ikke mulig å oppnå unntatt i ekstreme tilfeller
	5	Ikke mulig å oppnå unntatt i ekstreme tilfeller
FSForskjøvet skjøt(tidligereTS, Tverrforskjøvet Skjøt – rapp 83)	1	Ingen feil
	2	Grad 1
	3	Grad 2-3
	4	Grad 4
	5	Ikke mulig å oppnå unntatt i ekstreme tilfeller
RØ Røtter ²⁾	1	Ingen feil
	2	Noen få røtter grad 1
	3	Røtter grad 1-2
	4	Røtter grad 3-4
	5	Røtter grad 4 som dekker mesteparten av rørsnittet
UB Utfelling / Belegg ³⁾	1	Ingen belegg
	2	Noe belegg
	3	Mye Belegg grad 1-2
	4	Mye belegg grad 2-3
	5	Mye belegg grad 4
HI Hindring	1	Ingen feil
	2	Hindring som i liten grad blokkerer rørtverrsnittet
	3	Hindring som blokkerer inntil 10 % av rørtverrsnittet
	4	Hindring som blokkerer inntil 25 % av rørtverrsnittet
	5	Hindring som blokkerer inntil 50 % av rørtverrsnittet

¹⁾ Dette er rørinspeksjonskodene, jmf. NORVAR-rapport 145/2005

²⁾ For røtter gjelder i utgangspunktet at det er arealet av tverrsnittet som blokkeres som bestemmer kapasitetsreduksjonen. Man bør ta høyde for at disse kommer raskt tilbake dersom man foretar rotkutting. Problemet løses på lengre sikt kun ved renovering eller rehabilitering.

³⁾ Utfelling/belegg er veldig generelt. Kloakkhud vil generelt ikke endre kapasiteten i vesentlig grad, men et tykt belegg som sitter godt vil gjøre det. Tabellen gjelder for utfelling som ikke vaskes bort. Sedimenter vil normalt vaskes bort, men er et tegn på at det er svanker eller andre uheldige hydrauliske forhold som reduserer kapasiteten.

4. Trykktap i kummer

Kummer er i en del sammenhenger et undervurdert element i avløpssystemet. Kummene er svært viktig for den hydrauliske kapasiteten til ledningsnett. Falltapet forårsaket av kummene er ofte i samme størrelse som falltap forårsaket av rørfriksjonen. Dette avhenger bl.a. av avstanden mellom kummene og kummenes tilstand og utforming.

Beregning av eksakt kumtap er komplisert. Dette skyldes at ulike kompliserte hydrauliske prosesser skjer i kummen. Det er innløpstap inn i kummen og utløpstap ut fra kummen. Det kan være retningsendringer i kummen, eller sidetilførsler fra grenledninger inn i hovedstrømmen. Videre vet man at når vannspeilet stiger litt over topp rør (0,5-1,5 DN over topp rør) blir det intense turbulente strømningsstrømninger i kummen som kan forårsake luftinnsug og gi store energitap [9]. Dersom vannspeilet stuver seg ytterligere opp i kummen, kan energitapet minke fordi de intense turbulente vannstrømmene demper seg.

Utformingen av kummen har stor betydning for energitapet. Det er stor forskjell på kummer med dype renner og myk strømlinjeformet utforming og kummer med grunne renner og skarpe kanter. Det beste er å ha strømlinjeformet avrundet utløp fra kummen inn i utløpsledningen, myk linjeføring på renner i bunnen med en rennedybde lik eller større enn diameter (DN) på røret. Det er også viktig å ikke ha for store endringer i fallet gjennom kummen i forhold til fallet på gjennomgående rør; fallet i kummen bør ikke være mindre enn fallet på ledningsstrekket (utløpsrøret), da dette kan føre til turbulens eller vannstandsprang.

4.1. Undersøkelser av kummer

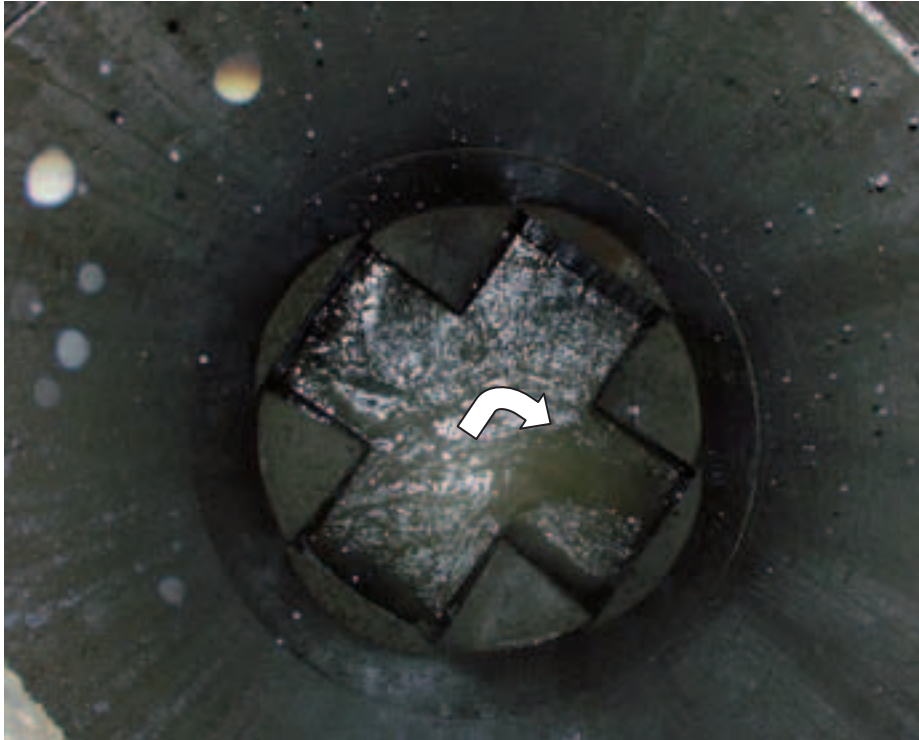
En masteroppgave på NTNU [5] gjorde en analyse og inspeksjon av avløpskummer i Trondheim. Undersøkelsen avslørte svært dårlig teknisk/strukturell tilstand og uheldig utforming av mange av kummene som ble undersøkt:

- Selv relativt nye kummer (10 år gamle) hadde elendig hydraulisk utforming hvor vannet må passere "hjørner", se Figur 9.
- Mange kummer har flere påkoblinger, som delvis kommer inn i feil retning i forhold til strømningsretningen i kummen, se Figur 11.
- Mange kummer har svært dårlig bunnseksjon, se Figur 11.
- Det er mange gamle kummer med bunn som er murt av naturstein, og det lekker ut og inn "som en sil", se Figur 10.
- Kummer har uheldig utformede retningsendringer som gjør at mye av strømningsenergien i vannet "drepes" med oppstuvning som følge.

Det er grunn til å tro at det samme er situasjonen mange andre steder i Norge.

Alle kummene som er avbildet på Figur 9 til Figur 11 på de neste sider har en utforming som har dårligere kapasitet og vil gi oppstuvning ved lavere vannføring enn en godt utformet kum. Ved en gitt vannføring vil disse kummene ha større oppstuvning enn en godt utformet kum, noe som betyr større fare for tilbakeslag i kjellere og lignende. Dette betyr også at de avbildede kummene vil ha større energitap ved tørrværsavrenning, noe som gir større fare for avleiringer og tilstopper.

I forbindelse med forskningsprosjektet CARE-S ble det gjort en analyse av tilstopper, og det ble funnet at en forholdsvis stor andel av tilstopperene skjer i kummer. Ca 20 % av de undersøkte tilstopperene var i en kum [8]. Dette må sies å være høyt når man tar kummens utstrekning i forhold til resten av ledningsnett i betraktning.



Figur 9: Kum med "hjørner", strømning fra nedre venstre innløp til nedre høyre utløp (Foto: Leif Sigurd Hafskjold)

Figur 9 viser tydelig at strømmingen (pilen) er uheldig. Man kan tydelig se at strømmingen gjør at vannet blir presset ut fra hjørnet, noe som reduserer det vannstrømmens effektive areal. Dette er en kum som er mindre enn 10 år gammel.



Figur 10: Gammel kum med bunn som er murt av naturstein (Foto: Leif Sigurd Hafskjold)



Figur 11: Kum med dårlig innløpsarrangement og manglende bunnrenne (Foto: Leif Sigurd Hafskjold)

4.2. Manuell beregning av kumtapskoeffisienter

Innholdet i dette kapittelet er delvis hentet fra kurskompendiet for NORVARs kurs i overvannshåndtering, utgitt første gang i 2004 [4].

For eksempel på praktisk bruk henvises til øvingsoppgaven i vedlegg 1.

I manuelle beregninger kan enten kumtapet i den enkelte kum beregnes som et singulærtap, eller kumtapet kan inkluderes som en del av rørfriksjonen (på samme måte som rørfriksjonen kan inkludere singulærtap som forklart i kapittel 3.1 og kapittel 3.2). Det siste er det mest vanlige, og kumtapene kommer da til uttrykk ved at rørfriksjonskoeffisienten økes med en viss verdi slik at den da representerer bruksruhetkoeffisienten.

Svenskt Vatten (tidligere VAV) har utarbeidet en veileder som heter "Dimensjonering och analys av almäna avloppsledningar" [9]. Her anbefales økninger i rørfriksjonen basert på kummens utforming og tilstand, som vist i figur Figur 12 og Figur 13. Diagrammene gjelder hhv. for betongrør (Figur 12) og for plastrør Figur 13). VAV sier om disse diagrammene følgende: "Ved mindre ledningsdimensjoner og ved vel gjennomførte renner, kan kumtapene tas hensyn til ved at rørenes hydrauliske ruhet økes. Ved større ledningsdimensjoner, ved sidetilførsler som ikke er små sammenlignet med hovedvannføringen og ved dårlig renneføring og renner, bør nøyaktigere analyser utføres." Parameteren KHU i diagrammene er definert slik.

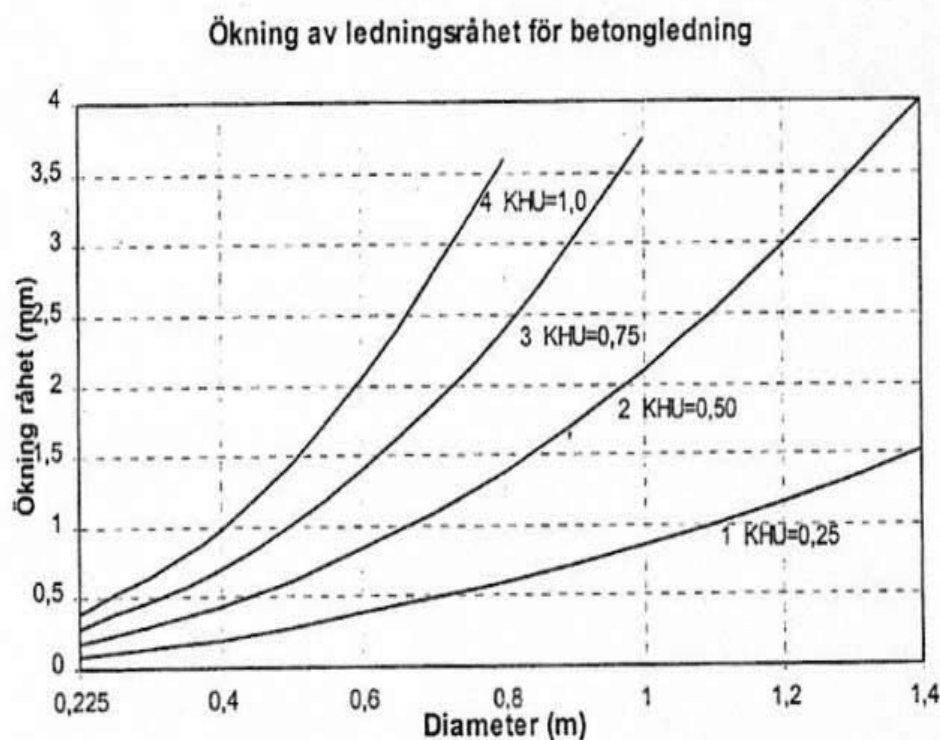
Falltapet i en kum er Δh , der:

Formel 3
$$\Delta h = K \frac{v^2}{2g}$$

$K = KHU$ = singulærtapskoeffisienten for kummens hovedrør ut, forklares i det etterfølgende
 v = vannhastigheten i utgående rør
 g = gravitasjonen = 9,81 m/s²

Verdiene i diagrammene er basert på en kumavstand på $L = 70$ m. Ved andre avstander kan man korrigere i henhold til følgende formel:

Formel 19
$$K_{\text{korrigert}} = KHU_{\text{korrigert}} = \frac{70}{L} KHU$$

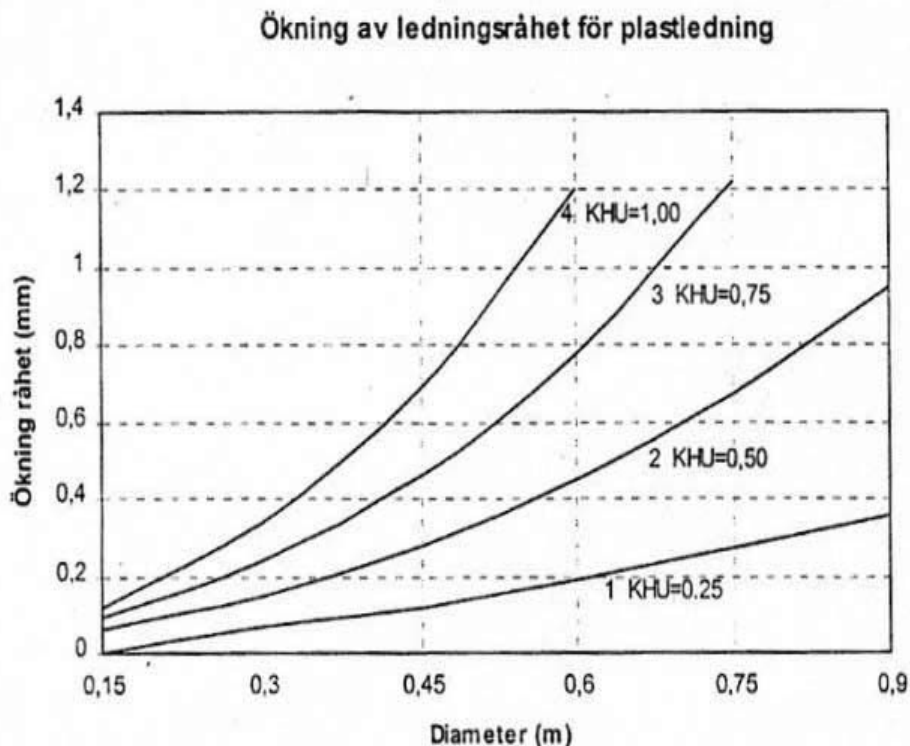


Figur 12: Økning i hydraulisk rørruhet (mm), "råhet" på svensk, for **betongrør** som kompensasjon for kumtap [9]

De fire linjene i diagrammene i Figur 12 og Figur 13 skal representere følgende forhold:

- Rett gjennomgående ledning og renner med full dybde; $KHU = 0,25$ (linje 1)
- Innkommende sideledning med liten vannføring sammenlignet med hovedvannføringen og renner med full dybde; $KHU = 0,5$ (linje 2)
- Innkommende sideledning med mer påtagelig vannføring og renner med full dybde; $KHU = 0,75$ (linje 3)
- Sidevannføring og påtagelige dårlige renner og renneføring; $KHU = 1,0$ (linje 4)

Med "full rennedybde" menes det at dybden på renna er minimum lik diameteren for utgående ledning. Dersom man har en situasjon som ligger mellom punktene listet opp over, tilpasser man dette ved å legge seg et sted mellom kurvene for å bestemme økning i ruheten.



Figur 13: Økning i hydraulisk rørruhet (mm), "råhet" på svensk, for **plastrør** som kompensasjon for kumtap [9]

For mer nøyaktige verdier for kumtapet kan man bruke Tabell 12 (neste side), som er hentet fra [9]. KHU fra tabellen benyttes da direkte i Figur 12 eller Figur 13.

I Tabell 12 introduseres "kumtype I" og "kumtype II", hvor i prinsippet kumtype I er en dårlig kum med dårlig utformet renne, og rennedybde som tilsvarer halve rørdiameteren. Kumtype II er en god kum med god hydraulisk utforming av renna, og rennedybde tilsvarende minimum rørdiameteren. Begge renner er type x-kum, hvor sideløpet står 90 grader på hovedløpet.

KHU er singulærtapskoeffisienten for kummens hovedrør ut. Singulærtapet øker proporsjonalt med KHU.

Som man ser av Tabell 12 er falltapene for kumtype I (dårlig kum) betydelig større enn for kumtype II (god kum).

Videre ser man at en stor kumdiameter i forhold til rørdiameter gir større tap enn når kummen har mindre diameter. Dette betyr ikke at kumdiameter bør reduseres til et minimum, men det er en indikasjon på at man bør tenke gjennom at kummer med stor diameter, som har lange, åpne (rette) renner, påvirker trykktapet i kummen. Dette gjelder spesielt der rennedybden er mindre enn rørdiameter. For kummer med vinkelendring i kum og relativt store rørdiameterer må også krumningsradius på rennen vurderes i forhold til trykktap.

Økende antall sidetilførsler har en dramatisk effekt på kumtapene.

Det vises for øvrig til øvingsoppgave i vedlegg 1.

Tabell 12: Utdrag fra kumtapstabell fra [9], basert på Lindvall, G. 1993. Øvre del av tabellen gjelder lik diameter for sideløp og hovedløp, mens nedre del av tabellen gjelder $D_1/D = 0,39$, dvs mindre diameter på sideløp enn på hovedløp

	Kumtype I			Kumtype II	
$D_1/D = 1,0$	$D_m/D = 4,1$	$D_m/D = 2,6$	$D_m/D = 1,7$	$D_m/D = 4,1$	$D_m/D = 2,6$
Q_i/Q	KHU	KHU	KHU	KHU	KHU
1	0,26	0,14	0,04	0,10	0,06
0,8	0,76	0,72	0,60	0,69	0,61
0,65	1,18	1,10	0,89	1,01	0,90
0,5	1,51	1,41	1,15	1,22	1,17
0,35	1,61	1,62	1,35	1,36	1,29
0,20	1,65	1,66	1,38	1,47	1,35
0	1,7	1,70	1,36	1,50	1,40
$D_1/D = 0,39$	$D_m/D = 4,1$	$D_m/D = 2,6$	$D_m/D = 1,7$	$D_m/D = 4,1$	$D_m/D = 2,6$
Q_i/Q	KHU	KHU	KHU	KHU	KHU
1	0,26	0,14	0,04	0,10	0,06
0,98	0,27	0,20	0,11	0,19	0,13
0,96	0,42	0,27	0,20	0,26	0,20
0,95	0,47	0,33	0,23	0,32	0,26
0,93	0,64	0,47	0,30	0,42	0,34
0,90	0,86	0,63	0,37	0,50	0,41
0,86	1,07	0,79	0,44	0,61	0,55
0,80	1,31	1,07	0,53	0,71	0,60
0,71	1,43	1,38	0,64	0,97	0,74
0	3	3	0,5	1,5	1

D_m = Diameter på kum

D = Diameter på gjennomgående hovedledning

D_1 = Diameter på sideledning

Q_u = Vannføring for utgående hovedledning

Q_i = Vannføring for inngående hovedledning

Q_1 = Vannføring for sideledning

KHU = singulærtapskoeffisienten for utgående ledning

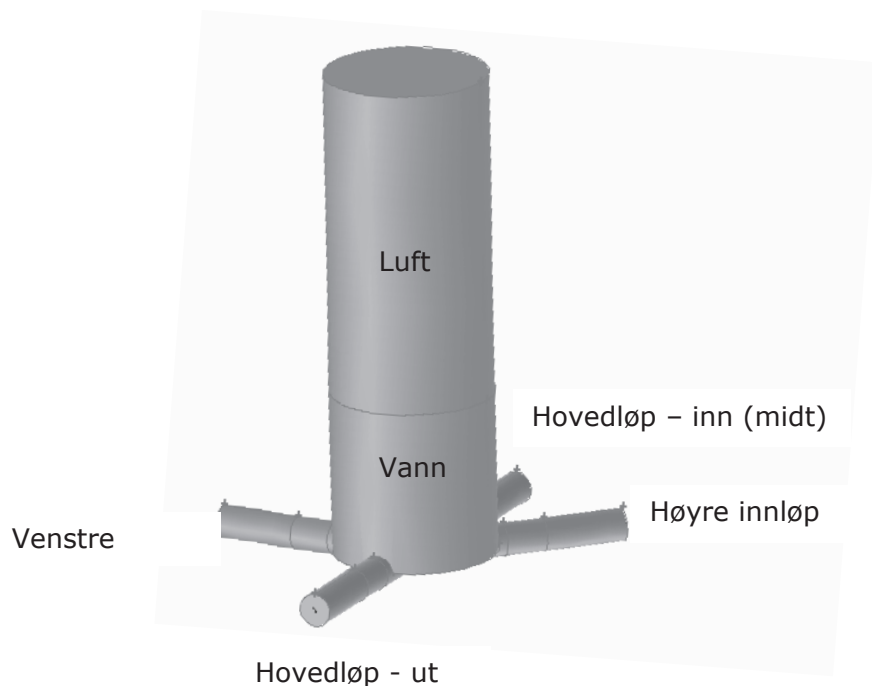
$Q = Q_1 + Q_u$

Det er gitt et praktisk eksempel på bruk av denne metoden for beregning av kumtap i Vedlegg 1.

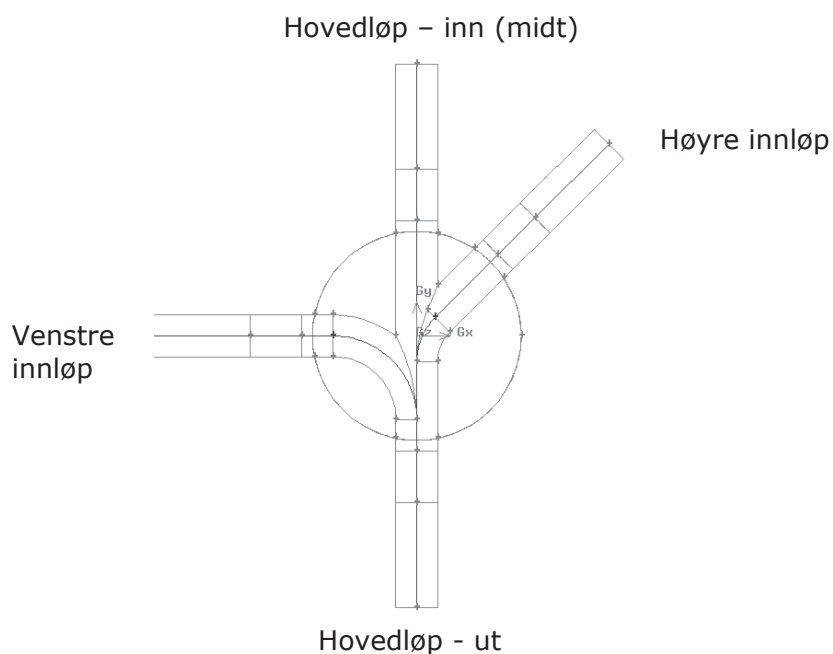
I det neste kapittelet gis det eksempler på hvordan en kum kan utformes for å få bedre hydrauliske forhold, bl.a. ved å redusere KHU.

4.3. Modellering og forsøk med avløpskum

SINTEF har utført et forskningsprosjekt for BASAL for å vurdere utformingen av avløpskummer. De praktiske forsøkene ble utført som et studentprosjekt, og med to påfølgende masteroppgaver ([5] og [6]). Parallelt ble det gjennomført et prosjekt (finansiert av BASAL) hvor ulike kumutforminger ble simulert med en modell for 3D-strøming. Figur 14 og Figur 15 viser modellen som ble laget for å simulere strømming med programmet Fluent.



Figur 14: Modelloppsett for 3D-modell

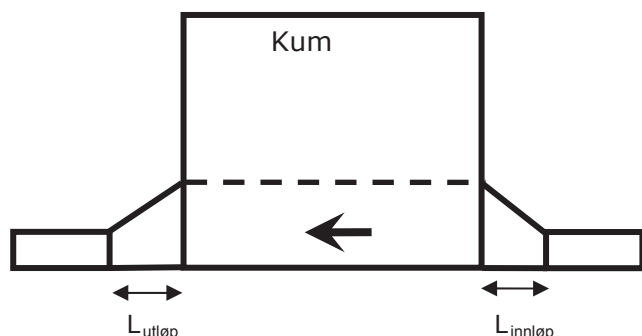


Figur 15: Modelloppsett for 3D-modell sett ovenfra

Ulike parametere ble variert for å undersøke effekten på vannstrømmen i kummen. Tre ulike inn- og utløpsgeometrier ble undersøkt. Både innløps- og utløpsrør hadde diameter 200 mm:

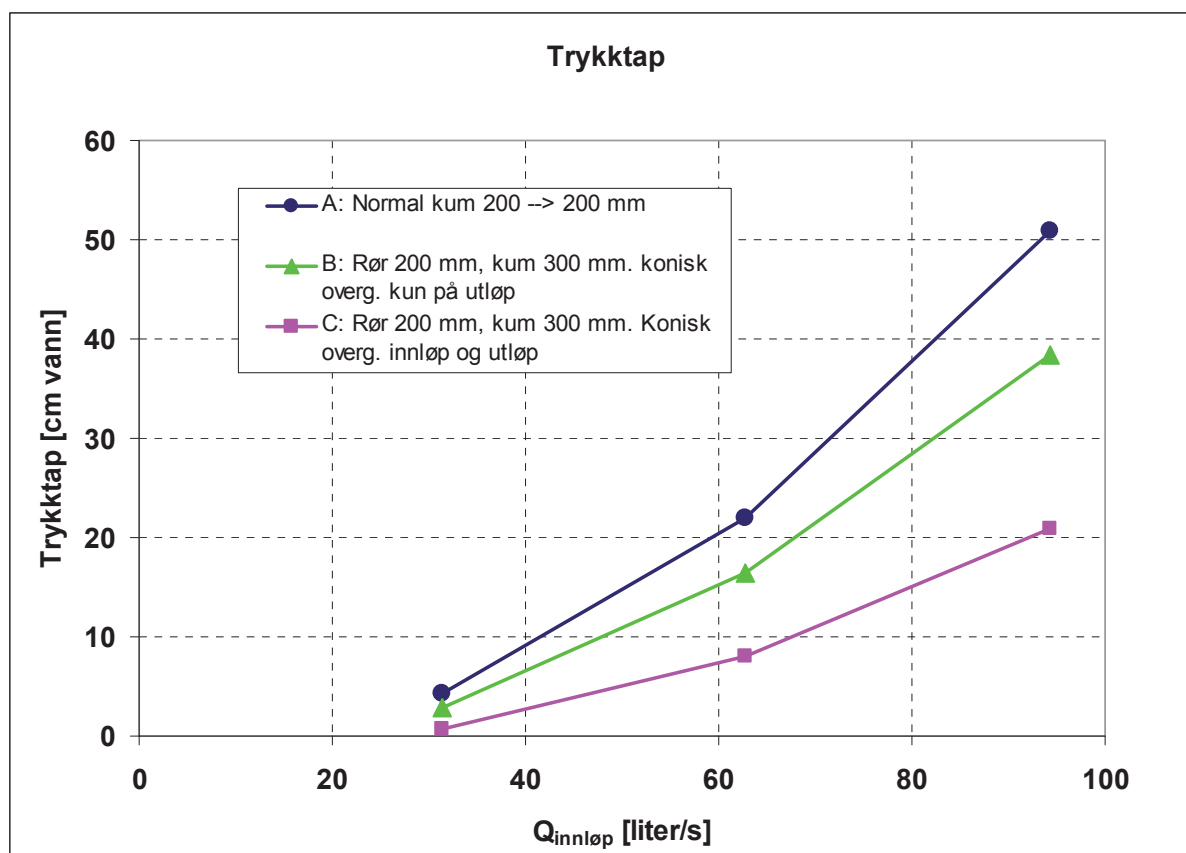
- A. vanlig kum med rennediameter 200 mm
- B. vanlig innløp, konisk (eksentrisk) utløp, rennediameter 300 mm
- C. konisk innløp, konisk (eksentrisk) utløp, rennediameter 300 mm

Prinsipp for en kum med oppsett C er vist i figur 16.



Figur 16: Prinsipp for økning av diameter i avløpskum

Resultatene i Figur 17 viser at man kan redusere trykktapet over kummen ved å bruke renner med større diameter (300 mm) enn rørdiameteren (200 mm). Det er viktig at denne endringen i diameter skjer gradvis ved bruk av koniske (eksentriske) overganger ($L = 20$ cm). Effekten ser ut til å være omtrent like stor ved bruk av konisk overgang på innløp eller utløp, og best ved bruk på både innløp og utløp.



Figur 17: Trykktap langs hovedløpet for geometri A (vanlig kum), B (vanlig innløp, konisk utløp) og C (konisk innløp, konisk utløp)

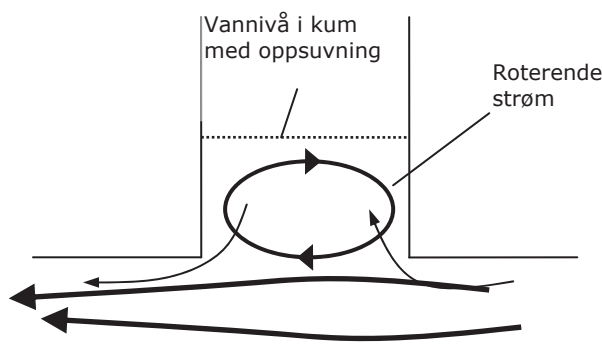
Forklaring til grafene i Figur 17:

- Graf A representerer vanlig kum uten noen konisk overgang
- Graf B representerer kum med konisk overgang kun på utløp
- Graf C representerer kum med konisk overgang på både innløp og utløp

De to viktigste årsakene til reduksjon av energitap i kummen er:

1. Den koniske overgangen fungerer som en diffusor, som reduserer vannhastigheten i kummen. Dermed reduseres også energitapet.
2. Hjørnet som vannet må passere på veien ut blir avrundet, og får dermed en lavere singulærtapskoeffisient (jmf. KHU i kapittel 4.2).

Figur 18 viser hvordan vannstrømmen i en kum med oppstuvning prinsipielt kan arte seg. I tillegg til at en hovedstrøm passerer rett gjennom kummen, vil det dannes en roterende strøm i vannet over hovedstrømmen. Denne strømmen krever energi fra vannstrømmen under. Dersom forholdene er uryddige (dårlig utformet kum), vil den roterende strømmen utvikle seg til å bli langt mer turbulent, og energitapet blir da mye høyere.

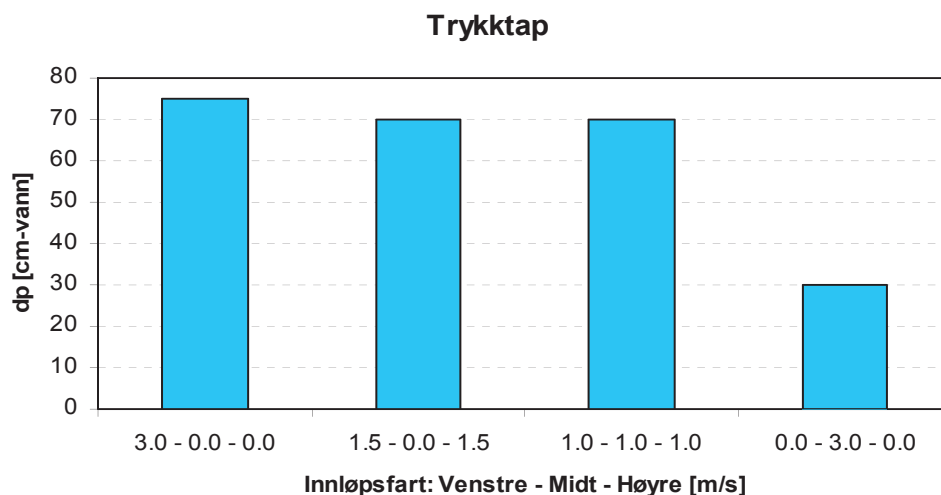


Figur 18: Vannstrøm i kum med oppstuvning

Videre ble det undersøkt om det er noen forskjell på vannstrømmen for en X-kum og en Y-kum. Resultatene for X-kum viser at bruk av sideløp (de tre søylene til venstre i

Figur 19) gir større trykktap enn om alt vannet går gjennom hovedløpet (høyre søyle i

Figur 19). Forskjellen er relativt liten mellom de tre øvrige innløpskonfigurasjonene (for forklaring av venstre, midt, høyre; se Figur



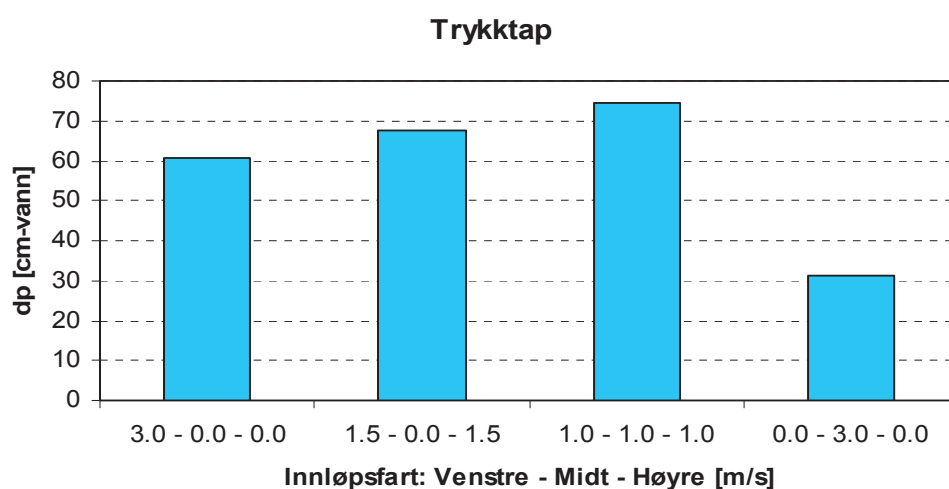
Figur 19: X-kum; Trykktap mellom innløp og utløp (differanse i forhold til hydrostatisk trykk).

Eksempel på avlesning av

Figur 19: Ved en vannhastighet på 3 m/s fra venstre (venstre søyle) blir trykktapet gjennom kummen ca 75 cm. For samme vannhastighet, men strømning rett gjennom (høyre søyle) blir trykktapet 30 cm. Det er altså 45 cm i forskjell på trykktapet for disse to strømningssituasjonene i en X-kum.

Resultatene for Y-kum (Figur 20) er svært like som for X-kummen (Figur 19) bortsett fra at trykktapet er en del mindre når det kun går vann i sideløpet ([3-0-0]) for Y-kum (venstre kolonne i Figur 20) sammenlignet med x-kum (venstre kolonne i

Figur 19). Ved retningsendring er det derfor en fordel med Y-kum sammenlignet med X-kum.



Figur 20: **Y-kum**: Trykktap mellom innløp og utløp (differanse i forhold til hydrostatisk trykk)

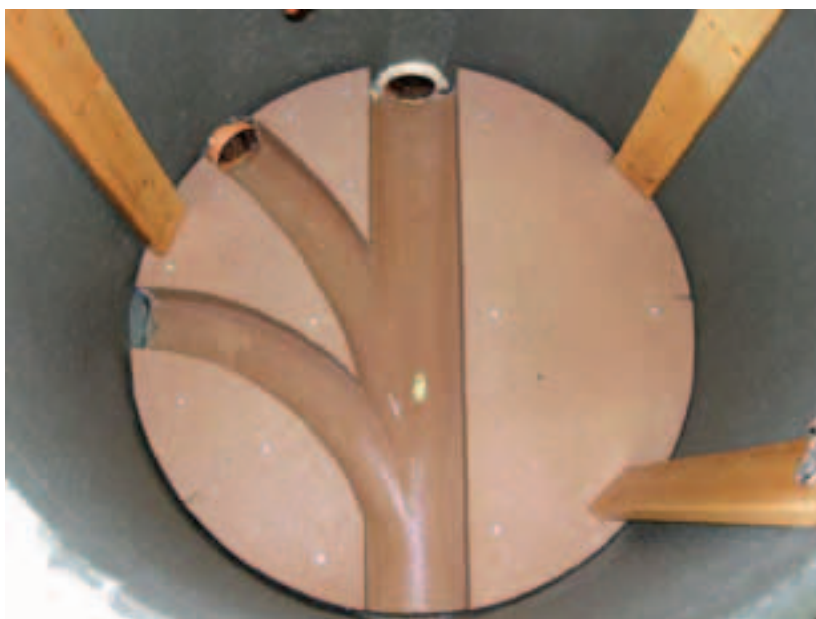
Det ble også undersøkt hvilken betydning krumningsradius for rennene har. En økning i radius fra 450 mm til 900 mm gav 3 cm redusert trykktap, dvs. at gevinsten ved å øke krumningsradius er relativt liten. Det er likevel verdt å merke seg at det er andre fordeler ved å øke krumningsradiusen, slik som bedre transport av ulike materialer (for eksempel vil større radius tillate lengre pinner å passere).

En Masteroppgave ved NTNU [6] gjengir praktiske resultater for modellforsøk med oppstuvning i avløpskum i full skala.

Figur 21 og Figur 22 viser oppsettet for forsøkene med en Basal kum i SINTEFs forsøkshall.



Figur 21: Forsøkskum med inn- og utløpsarrangement (Foto: SINTEF)



Figur 22: Forsøkskum med bunnseksjon tilsvarende BASAL renneshandard (Foto: SINTEF)

Forsøkene viser at vannføring kun i sideløp gir større oppstuvning enn i hovedløp (for eksempel forsøk 2, 33-34 cm, sammenlignet med forsøk 10, 24-25 cm, hvor det i begge tilfeller går 20 l/s gjennom kummen). Videre ser man tydelig effekten av samtidig vannføring i side- og hovedløp sammenlignet med kun hovedløp (for eksempel forsøk 10, 24-25 cm, sammenlignet med forsøk 4, 35-36cm, hvor det i begge tilfeller går totalt 20 l/s gjennom kummen). Betydningen av en godt utformet kumrenne sammenlignet med kummen med flat bunnseksjon er også åpenbar. Det er også tydelig at relativt små endringer i vannføring kan få store utslag i økt oppstuvning dersom vannføringen allerede er stor (for eksempel forsøk 11, 50-52 sammenlignet med forsøk 12, 65-66).

For mer detaljerte resultater vises til [6].

I *Tabell 13* refereres det til Figur 22, hvor hovedløpet er løpet som går rett gjennom kummen (øverst, største synlige rørstuss), og 45° sideløp er løpet oppe til venstre, der det er en mindre, synlig rørstuss.

Forsøkene viser at vannføring kun i sideløp gir større oppstuvning enn i hovedløp (for eksempel forsøk 2, 33-34 cm, sammenlignet med forsøk 10, 24-25 cm, hvor det i begge tilfeller går 20 l/s gjennom kummen). Videre ser man tydelig effekten av samtidig vannføring i side- og hovedløp sammenlignet med kun hovedløp (for eksempel forsøk 10, 24-25 cm, sammenlignet med forsøk 4, 35-36cm, hvor det i begge tilfeller går totalt 20 l/s gjennom kummen). Betydningen av en godt utformet kumrenne sammenlignet med kummen med flat bunnseksjon er også åpenbar. Det er også tydelig at relativt små endringer i vannføring kan få store utslag i økt oppstuvning dersom vannføringen allerede er stor (for eksempel forsøk 11, 50-52 sammenlignet med forsøk 12, 65-66).

For mer detaljerte resultater henvises til [6].

Tabell 13: Vannivå (oppstuvning i cm) i kum

Forsøk nr	Vannføring i hovedløp (l/s)	Vannføring i 45° sideløp (l/s)	Oppstuvning uten bunnseksjon (cm) ¹⁾	Oppstuvning med bunnseksjon vist i Figur 22 (cm)
1	0	10	36-37	19-20
2	0	20	52-54	33-34
3	10	0	34-35	17-18
4	10	10	52-53	35-36
5	10	15	63-64	45-46
6	10	20	75-77	57-58
7	15	10	59-60	43-44
8	15	15	73-75	56-58
9	15	20	89-91	70-71
10	20	0	44-45	24-25
11	20	10	67-69	50-52
12	20	15	87-89	65-66

¹⁾ Det ble gjort forsøk med flat bunn i kummen som en referanse

4.4. Oppsummering av resultater av simulering og praktiske forsøk med avløpskum

Oppsummering av de viktige momenter for utforming av avløpskum:

- Kummer skal ha rennedybde minimum lik rørdiameter (dette har vært kjent lenge, men fortsatt leveres kummer med halv rennedybde – disse bør ikke aksepteres)
- En generell regel er at jo rettere vannstrømmen går, jo mindre trykktap oppstår. 90-graders retningsendring i kum bør unngås.
- Ved å montere konisk dimensjonsovergang på innløp og utløp, og ha renne med større diameter enn innløps- og utløpsrør, får man økt kapasiteten ved oppstuvning (for eksempel et 200 mm rør med konisk overgang til 300 mm før innløp til kum med 300 mm rennedybde, på utløpet monteres en konisk overgang fra 300 til 200 mm rør, og røret videre har 200 mm).
- Dersom det er dimensjonsøkning i kummen fordi det er nødvendig for å øke kapasiteten i nedstrøms rør, bør dimensjonen økes ved å bruke konisk overgang montert før innløpet.
- Dersom to strømmer møtes i kummen, gir selv en liten delstrøm fra den ene siden stort energitap pga at strømningsbildet blir forandret. Dette er vanskelig å unngå

(siden man gjerne vil at ledninger møtes i kum og ikke i greinrør), og man bør heller ta hensyn til dette ved dimensjonering av anlegget ved at man legger til 10 cm trykktap i oppstuvningssituasjon i en kum der to ledninger møtes.

- Også vertikale retningsendringer kan ha betydning, spesielt ved bratte anlegg. Dersom de tilknyttede ledningene har stort fall bør også kumrenna ha tilsvarende fall.

I tillegg til disse punktene, skal kotehøyden til bunn sideløp være høyere enn kotehøyde for hovedinnløp når det er mulig. Kummer uten fall anbefales ikke, bestill heller kummer med ekstra stort fall når det er mulig ut fra tilgjengelig fall på ledningsstrekken.

5. Konklusjoner

Følgende prinsipper anbefales å legges til grunn for valg av ruhet ved dimensjonering av avløpsledninger:

- Ved avløp med fritt vannspeil i røret er det selvrensing og skjærspenning som er de viktigste kriteriene, mens ved oppstuvning er det kapasiteten som er viktig å dimensjonere for.
- Bruksruhet er lavere ved fullt rør enn ved delfyllt rør.
- Bruksruhet er lavere for overvann (OV) enn for spillvann (SP) og fellesledninger (AF)
- For fullt rør vil ruhet for betong nærme seg plast, spesielt ved store vannhastigheter. I denne situasjonen vil andre faktorer, som svanker og rørets generelle tilstand, være mer avgjørende for valg av ruhet enn selve materialet.
- Oppbygning av kloakkkhud skjer relativt raskt, og ledninger bør dimensjoneres for dette. Dersom ledningen spyles naturlig vil mye av belegget bli spylt vekk.
- Dersom grunnforholdene er dårlige og ledningsfallet er lavt, er faren for svanker stor. Dette reduserer kapasiteten til røret både ved normalsituasjon med fritt vannspeil i røret og ved oppstuvning og fullt rør.
- Det er viktig å ta hensyn til rørets reelle tilstand og ikke anta at rørets tilstand er "som nytt". Rørinspeksjoner kan brukes til å beregne rørets reelle ruhet.
- Man må ta hensyn til kummer ved hydraulisk dimensjonering, da trykktapet i kummer kan være like stort som i resten av ledningsnettet (spesielt ved trykkavløp).
- Oppstuvningen og trykktapet i en kum vil øke dersom det er bend i kummen, dersom rennedybden er liten, dersom kummen har innløp fra flere retninger, eller dersom renna er uheldig utformet.

Det er beskrevet i denne rapporten hvordan man skal ta hensyn til disse punktene.

5.1. Forslag til forbedring av kumløsninger

Ut fra resultatene fra kumforsøkene, og øvrig kunnskap, kan det gis forslag til idealløsninger for å redusere trykktapene gjennom kumsystemer:

- For eksempel medfører alle retningsendringer trykktap, men trykktapet i rør eller kumrenne kan reduseres ved tilstrekkelig stor krumningsradius i forhold til rørdiameter. Det anbefales derfor generelt å benytte langbend, og som et eksempel på kumløsninger for større rørdiameterer kan det vises til tidligere praksis i Oslo kommune, der det ble bygget plassbygde kummer med god hydraulisk utforming, som også tok retningsendringer i kummen.
- Forsøkene viser at sideløp i kummer, selv ved relativt små vannmengder i forhold til hovedløpet, medfører relativt store trykktap i kummen. Y-kum gir noe mindre trykktap enn X-kum. Det ideelle er likevel å bruke grenrør utenfor kum (oppstrøms side av hovedkum), og eventuelt sette på kum/minikum på sideløpet (-ene).

- Fallet gjennom kummen bør være tilnærmet lik fallet på hovedledning (utløpsside). Dette kan være en utfordring for kumfabrikanter.
- Kumrenne bør ha en dybde på minimum kumdiameter, helst 50% mer. Dette er spesielt viktig ved avvinkling i kum.
- Kumtapet i en åpen kum kan også reduseres ved økt rennediameter gjennom kummen og samtidig bruk av koniske overganger ved inn- og utløp.

Grunnen til at trykktapene blir mindre i rørbend og grenrør enn i åpne kummer er at det i en åpen kum lettere oppstår turbulente forhold (virvler) når vannspeilet stiger ved dimensjonerende situasjoner. I et rør vil vannpartiklene tvinges til å ha en mer ensrettet strømning, og det oppstår mindre trykktap.

Dersom en i henhold til ovennevnte velger kummer uten sideløp, at alle sideledninger tilknyttes via grenrør - helst med egen kum, og at alle retningsendringer tas via langbend (helst ikke mer enn 22 - 30 grader), vil det kanskje bli et mer komplisert og uoversiktlig kumpunkt i forhold til vanlige "knutepunktskummer". Et arrangement med flere kummer vil også bli mer plasskrevende, selv om "hovedkummen" kan få redusert kumdiameter. For rettløpskummer er det imidlertid tilstrekkelig med diameter 1200 mm (for nedstigning), og minikummer kan brukes i mange tilfeller, spesielt på sideløp. Sett i forhold til koordinering mot andre infrastrukturføringer vil en "mykere" linjeføring og mindre kumdiameter kanskje oppveie for flere kummer? Kostnadmessig kan det tilsvarende også kunne stilles spørsmål om "ny" løsning vil bli så forskjellig fra "gammel" løsning. Noe å tenke på videre?..

På eksisterende ledningsanlegg kan det være mulig å øke systemets kapasitet ved å redusere kumtapene ved å bytte ut kummer, eller ved å utbedre kumrenner. Selv om en ikke får idealløsninger ved kun å utbedre kumbunn/kumrenne, er det utvilsomt potensial for vesentlig forbedring av mange eksisterende kummer med tanke på bedre rennedybde, avrundede hjørner ved grenrør, inn og utløp mv.

Tidligere var det praksis å ikke ha bend utenfor kum av ulike årsaker. Utstyr for kartlegging av ledninger, spyling, rørinspeksjon mv har imidlertid utviklet seg mye de senere år, og dette gjør at en nå bør tenke mer på å redusere kumtapene. Særlig viktig er dette i forhold til dimensjonering av overvannssystemer og fellessystemer pga klimautvikling og nedbørsøkning.

Vi siterer fra Per Kristiansen, seksjonsleder avløp i Oslo kommune, VAV, etter spørsmål om hvordan VAV ser på bend utenfor kum:

"Tradisjonelt har vi ikke godkjent bend utenfor kum. Årsaken til det er at det er en fordel å se retningen i kummen, ved trekking (gammel rensemetode) var det ugunstig og de første tv-kameraene var for store til å klare bend på 200-250 mm ledninger. Det meste av dette er nå historie så vi er mer åpne for å akseptere bend utenfor kum nå, men det er ikke justert i normene våre."

6. Litteratur

- [1] Berg A, 1988: "Sjølvreinsing og spyling av avløpsleidningar - (9/88)"
- [2] HR Wallingford: "Charts for the hydraulic design of channels and pipes"
- [3] PH-consult, 2001: "Praktisk forekommende ruheder i afløbssystemer"
- [4] Schilling W, Sægrov S, Røstum J, Jakobsen G, Hafskjold LS, 2004: NORVAR Kurskompendium i Etterutdanningskurs "Reduksjon av oversvømmelser – planlegging, dimensjonering, drift og vedlikehold av overvanns- og avløpsnett"
- [5] Løken, Y, 2006: "Energitap i avløpsnett", Diplomoppgave i Ledningsteknologi ved NTNU
- [6] Kristensen S M B, 2007: "Hydraulic performance of existing storm water and sewer networks", Masteroppgave ved NTNU
- [8] Hafskjold LS, 2004: "Improved assessment of sewer pipe condition", EJSW Workshop Process data and integrated urban water modelling
- [9] "Dimensjonering och analys av almäna avloppsledningar", Svensk Vatten (tidligere VAV)
- [10] Ashley RM, Bertrand-Krajewski J-L, Hvitved-Jacobsen T and Verbanck M, 2004: "Solids in Sewers". IWA Scientific and Technical Report No. 14. IWA Publishing, London (UK). 360 p.
- [11] Gerhart P, Gross R, Hochstein J, 1992: "Fundamentals of Fluid Mechanics" (etter Colebrook og Moody)
- [12] Perkins JA, Gardiner IM, 1982: "Measurements of the hydraulic roughness of slimed sewer pipes". Report IT 237 (HR Wallingford)
- [13] Gerard R, Bouthillier P, Beshman J, 1989: "Field measurements of the hydraulic resistance of sanitary sewers", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 16, 936-944
- [14] Duturel F, Grisot D, 1998: "Hydraulic performances of drainage pipes" Technical publication PT 119, Cerib (Frankrike)
- [15] Pollert J, Ugarelli R, et. al, 2005: "The hydraulic capacity of deteriorating sewer systems" IWA konferanse Marrakesh
- [16] Butler D, Davies J W, 2004: "Urban Drainage"
- [17] Bernhus C, Nilssen O, Mosevoll G, Hansen A: "Dataflyt – klassifisering av avløpsledninger (150/2007)", NORVAR-rapport, 2007
- [18] Mosevoll G: "Fallgruver ved bygging og drift av VA-ledninger", Forelesning i kurset Ledningsteknologi ved NTNU, 2006
- [19] *NS-EN 752, Utvendige hovedlednings- og stikkledningssystemer*
- [20] *Kommunenes Sentralforbunds Kommunaltekniske Norm (NKF)*

- [21] Berg A, 1986: "Naturleg sjølvrensing i avløpsleidningar - (47/86)"
- [22] NTNU/SINTEF: "Manual for degradation tool", 2004
- [23] Opstad T: "Fett tetter avløpsnettet", Kommunalteknikk nr 11, 2008

Vedlegg 1: Øvingsoppgave – kumtapets betydning for kapasiteten i ledninger

Oppgave

En DN 800 avløpsledning på 1000 meter har kummer for hver 70. meter. Den er av betong og har en hydraulisk ruhet (bruksruhetskoeffisient), $k = 1 \text{ mm}$ og et fall på 5 ‰.

I Norge bruker man normalt Darcy-Weisbachs formel for å beregne rørfriksjonstapet:

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

ΔH = falltapet på en rørlengde (m)

f = rørfriksjonskoeffisienten

L = Rørlengden (m)

D = Rørdiameter (m)

v = vannets midlere hastighet i tversnittet (m/s)

g = gravitasjonen 9.81 m/s^2

Colebrookes formel kan brukes for å beregne friksjonskoeffisienten f på basis av den hydrauliske rørruheten k . Denne sammenhengen kan også finnes i vedlagte diagram som kalles Moodys diagram, se Figur 23. Man kan anta fullt utviklet turbulent strømning.

Kummene har grunne renner i kumbunnen med en dybde på bare en halv diameter, og det er en påtagelig sidevannføring som kommer inn vinkelrett på hovedstrømmen. (KHU = 1,0).

Teknisk etat vil øke kapasiteten ved å utbedre kummene. Man vil lage renner med dybde lik diameter på ledningen og føre inn sidevannføringen strømlinjeformet skrått inn i hovedstrømmen. (KHU = 0,25). Bruk Moody-diagram og tillegg i rørruhet pga. kumtap som beskrevet i kapittel 4.2.

A) Hvor mye minker den praktisk forekommende ruheten for ledningsstrekningen?

B) Hvor mye øker rørkapasiteten ved fullt rør?

Moodys diagram er vist på neste side.

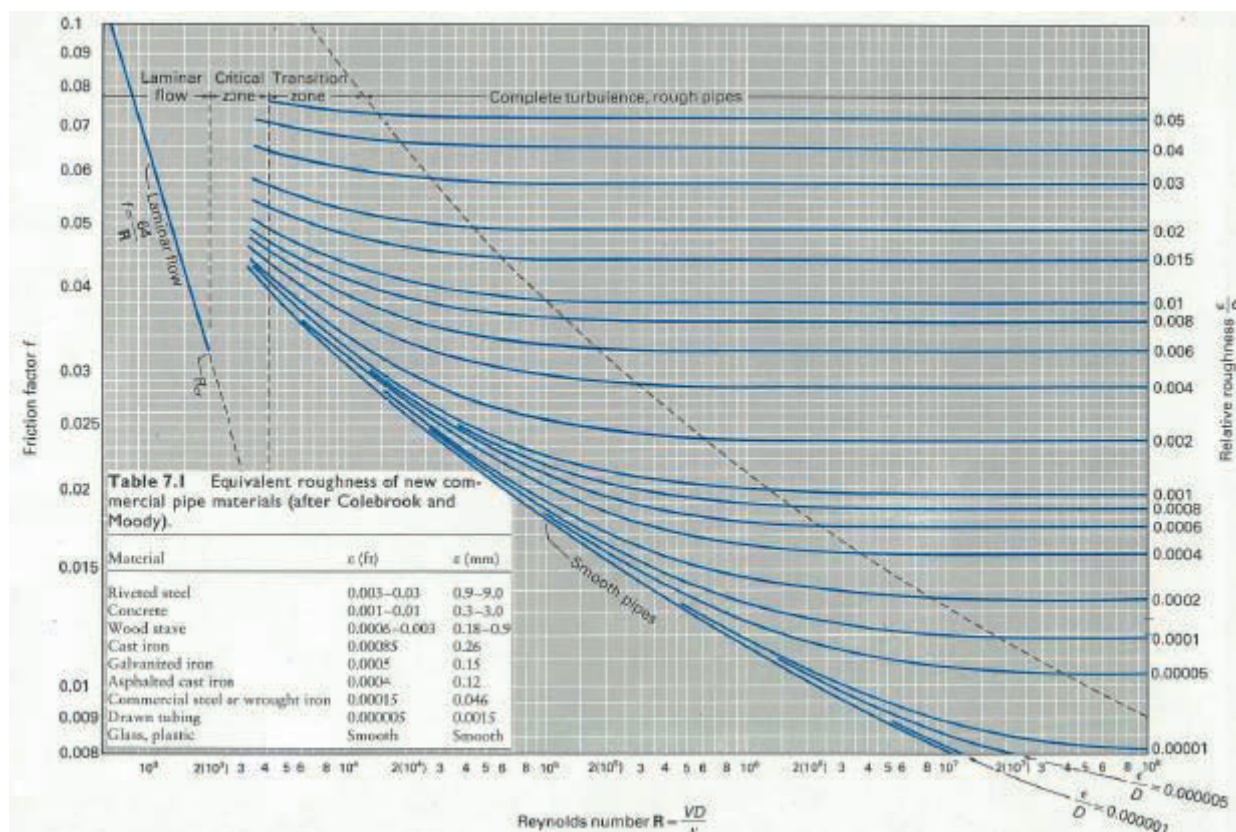
Kumtapskurver fra Svensk Vattens rapport P90 er vist Figur 12 (og

Figur 13 for plast, ikke relevant i denne oppgaven).

Forslag til oppgaveløsning

A)

Diagrammet for betongrør (Figur 12) og 0,8 meter i diameter gir en senkning i tillegget i rørruhet fra 3,6 mm til 0,6 mm. Fordi kurven er for 70 meter mellom hver kum kan diagrammet brukes direkte (ellers måtte man korrigere $k_{\text{økning}}$ med lengden L mellom kummene i forhold til 70 meter).



Figur 23: Moodys diagram.

I Moodys diagram går man inn med k/D . Denne blir da h.h.v.:

$$(3,6 + 1) / 800 = 0,00575$$

$$(0,6 + 1) / 800 = 0,002$$

Ved å se i det såkalte Moodys diagram ser man at friksjonskoeffisienten synker fra ca. 0,032 til ca. 0,023.

B)

Tips for en rask beregning av rørkapasiteten er å først beregne vannhastigheten i det fulle røret. Omforming av Darcy Weisbachs formel gir for hastigheten v :

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot D \cdot \Delta h}{L \cdot f}}$$

$$v \text{ eksisterende ledning blir: } [(2 \times 9,81 \times 0,8 \times 5) / (1000 \times 0,032)]^{0,5} = 1,57 \text{ m/s}$$

$$v \text{ utbedret ledning blir: } [(2 \times 9,81 \times 0,8 \times 5) / (1000 \times 0,023)]^{0,5} = 1,85 \text{ m/s}$$

$$\text{Kapasiteten på eksisterende ledning} = 0,4 \times 0,4 \times 3,14 \times 1,57 = 0,79 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\text{Kapasiteten på utbedret ledning} = 0,4 \times 0,4 \times 3,14 \times 1,85 = 0,93 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Økningen er på ca 18 %. Dette kan m.a.o. være en billig måte å skaffe en moderat økning av kapasiteten på.

Vedlegg 2: Sammenheng mellom Darcy-Weisbachs formel og ruhet

Darcy-Weisbachs formel er vist i (1):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (1)$$

hvor:

h_f = friksjonstapet (m vs (meter vannsøyle))

f = friksjonskoeffisienten

L = rørlengde (m)

D = rørdiameter (m)

U = Q/A = vannhastighet (m/s)

g = tyngdens akselerasjon (9,8 m/s²)

Q = vannføring (m³/s)

A = tverrsnittsareal (m²)

Friksjonsfaktoren f beregnes på grunnlag av følgende ligninger:

Laminær strømming: ($Re < 2100$):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

Turbulent strømming ($Re > 2100$).

$$f = \frac{1}{(-1,8 \log (6,9/Re + (k/3,7D)^{1,11}))^2} \quad (3)$$

hvor:

$Re = UD/\nu$ (Reynolds tall)

ν = vannets kinematiske viskositet (m²/s)

k = absolutt, ekvivalent sandruhet (m)

Grunnlaget for ligning (3) er nærmere angitt i /3-1/.

Ligning (3) er en tilnærmet ligning. Den er god nok for beregning av friksjonsfaktor. Ved beregning av ruhet på grunnlag av målt friksjonstap brukes Colbrook-Whites fullstendige ligning:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{k}{3,72D} \right) \quad (4)$$

Utgitte Norsk Vann Rapporter

(Tidligere kalt NORVAR-rapporter)

20. Slambehandling og -disponering ved større kloakkrenseanlegg. Sluttrapport
- 20a. Slambehandling og -disponering ved større kloakkrenseanlegg. Aerob og anaerob behandling
- 20b. Slambehandling og -disponering ved større kloakkrenseanlegg. Kalking. Kompostering
- 20c. Slambehandling og -disponering ved større kloakkrenseanlegg. Slamavvanning
- 20d. Slambehandling og -disponering ved større kloakkrenseanlegg. Termisk behandling av kloakkslam
21. NORVAR's årsberetning 1991
22. EDB i VAR-teknikken. Fase 1 - kravspesifikasjoner m.m. Status-beskrivelse og forslag til videre arbeid (*Utgått*)
- 23a. Internkontroll for VA-anlegg. Mal for internkontroll-håndbok for VA-anlegg.
- 23b. Internkontroll for VA-anlegg. Internkontrollhåndbok for avløpsanlegg. Eksempel fra Fredrikstad og omegn avløpsanlegg
- 23c. Internkontroll for VA-anlegg. Internkontrollhåndbok for vannverk. Eksempel fra Vansjø vannverk
- 23d. Aktivitetsstyrende håndbok for VA-anlegg. Informasjon, avvik og tiltak, verne- og sikkerhetsarbeid, opplæring
- 23e. Aktivitetsstyrende håndbok for VA-anlegg. HMS ved vannbehandlingsanlegg
- 23f. Aktivitetsstyrende håndbok for VA-anlegg. HMS ved avløpsrenseanlegg
- 23g. Interkontroll for VA-anlegg. Eksempel på driftsinstruks Oltedalen kloakkrenseanlegg
- 23h. Internkontroll for VA-anlegg. Eksempel på driftsinstruks Smøla vannverk
- 23i. Internkontroll for VA-anlegg. Internkontroll for VA-transportsystemet. Eksempel fra Nedre Eiker kommune
24. NRV-prosjekt. Korrosjonskontroll ved vannbehandling med mikronisert marmor
25. Mal for prosessoppfølging av anlegg for stabilisering og hygienisering av slam
26. Installering av gassmotor for strømproduksjon ved rensanlegg
27. Mottak og behandling av avvannet råslam ved rensanlegg som hygieniserer og stabiliserer slam i væskeform
28. Slam på grøntarealer. Erfaringer fra et demonstrasjonsprosjekt
29. Regnvannsoverløp
30. Utvikling og uttesting av datasystem for informasjonsflyt i VA-sektoren (*Utgått*)
31. PRO-VA, Brukerklubb for prosess-styresystemer, drift- og fjernkontroll for VA-anlegg. Oversikt pr.1993. Leverandører, produkter, konsulenter (*Utgått*)
32. Bruk av statiske metoder (kjemometri) for å finne sammenhenger i analyseresultater for avløpsvann
33. Evaluering av enkle rensemetoder. Slamavskillere
34. Evaluering av enkle rensemetoder. Siler/finnister
35. Kravspesifikasjon og kontrollprogram for VA-kjemikalier (*Utgått*)
36. Filter som hygienisk barriere
37. EU/EØS, konsekvenser for Norges vannforsyning
38. NORVAR-prosjekter 1992/93 (*Utgått*)
39. Implementering av EDB-basert vedlikeholdssystem. Erfaringer fra referanseprosjekt knyttet til pilot-prosjekt ved Bekkelaget rensanlegg (*Utgått*)
40. Driftsassistanter for avløp. Utredning om rolle og funksjon fremover
41. Metri-tel. Kommunikasjonsmedium for VA-installasjoner. Erfaringer fra prøveprosjekt i Sandefjord kommune (*Utgått*)
42. Industriavløp til kommunalt nett. Evaluering av utførte industrikartleggingsprosjekt.
43. Korrosjonskontroll ved Hamar vannverk
44. Slam på grøntarealer. Erfaringer fra et demonstrasjonsprosjekt. Vekstsesongen 1994
45. Forsøk med forfelling og felling i 2 trinn med polyaluminium-klorid høsten 1993 Kartlegging av slam- slamvannsstrømmer med og uten forfelling 1993-94
46. Renovering av avløpsledninger. Retningslinjer for dokumentasjon og kvalitetskontroll
47. Strategidokument for industrikontroll
48. NORVAR og miljøteknologi. Forprosjekt
49. Grunnundersøkelser for infiltrasjon - små avløpsanlegg. Forundersøkelse, områdebefaring og detaljundersøkelse ved planlegging og separate avløpsanlegg
50. Rørinspeksjon i avløpsledninger. Rapporteringshåndbok (*Erstattet av 145/05*)
51. Slambehandling
52. Bruk av slam i jordbruket
53. Bruk av slam på grøntarealer
54. Rørinspeksjon av avløpsledninger. Veileder (*Erstattet av 145/05*)
55. Vannbehandling og innvendig korrosjonskontroll i vannledninger
56. Vannforsyning til næringsmiddelindustrien. Krav til kvalitet. Vannverkenes erstatningsansvar ved svikt i vannleveransen
57. Trykkreduksjon. Håndbok og veileder
58. Karbonatisering på alkaliske filter
59. Veileder ved utarbeidelse av prosessgarantier
60. Avløp fra bilvaskeanlegg til kommunalt rensanlegg
61. Veileder i planlegging av fornyelse av vannledningsnett
62. Veileder i planlegging av spyling og pluggkjøring av vannledningsnett
63. Mal for godkjenning av vannverk
64. Driftserfaringer fra anlegg for stabilisering og hygienisering av slam i Norge
65. Forslag til veileder for fettavskillere til kommunalt avløpsnett
66. EØS-regelverket brukt på anskaffelser i VA-sektoren
67. Filter som hygienisk barriere - fase 3
68. Korrosjonskontroll ved Stange vannverk
69. Evaluering av enkle rensemetoder, fase 2. Siler/finnister
70. Evaluering av enkle rensemetoder, fase 2. Store slamavskillere samt underlag for veileder
71. Evaluering av enkle rensemetoder, fase 3. Veileder for valg av rensemetode ved utslipp til gode sjøresipienter
72. Utviklingstrekk og utfordringer innen VA-teknikken. Sammenstilling av resultatet fra arbeidet i NORVARs gruppe for langtidsplanlegging i VA-sektoren
73. Etablering av NORVARs VA-infotorg. Bruk av internett som kommunikasjonsverktøy (*Utgått*)
74. Informasjon fra NORVARs faggruppe for EDB og IT. Spesialrapport - 5. Utgave Beskrivelse av 34 EDB-programmer/Moduler for bruk i VA-teknikken (*Erstattet av 133/03*)
75. NORVARs faggruppe for EDB og IT. IT-strategi i VA-sektoren. (*Erstattet av 133/03*)
76. Dataflyt-klassifisering av avløpsledninger. (*Erstattet av 150/07*)
77. Alternative områder for bruk av slam utenom jordbruket. Forprosjekt
78. Alternative behandlingsmetoder for fettslam fra fettavskillere
79. Informasjonssystem fordrikkevann, forprosjekt
80. Sjekkliste/veiledninger for prosjektering og utførelse av VA-hoved og stikkledninger - sanitærinstallasjoner
81. Veileder. Kontrahering av VA-tekniske prosessanlegg i totalentreprise
82. Veileder for prøvetaking av avløpsvann
83. Rørinspeksjon med videokamera. Veiledning/rapportering (*Erstattet av 145/05*)
84. Forfall og fornyelse av ledningsnett
85. Effektiv partikkelseparasjon innen avløpsteknikken
86. Behandling og disponering av vannverksslam. Forprosjekt
87. Kalsiumkarbonatfiltre for korrosjonskontroll. Utprøving av forskjellige marmormasser
88. Vannglass som korrosjonsinhibitor. Resultater fra pilotforsøk i Orkdal kommune
89. VA-ledningsanlegg etter revidert plan- og bygningslov
90. Actiflo-prosjektet ved Flesland ra

91. Vurdering av slamfabrikk for Østfold
92. Informasjon om VA-sektoren - forprosjekt
93. Videreutvikling av NORVAR. Resultatet av strategisk prosess 1997/98
94. Nettverksamarbeid mellom NORVAR, driftsassistanter og kommuner
95. Veileder for valg av riktige sensorer og måleutstyr i VA-teknikken
96. Rist- og silgods - karakterisering, behandlings- og disponeringsløsninger
97. Slamforbranning (VA-forsk 1999-11). (Samarbeidsprosjekt med VAV)
98. Kvalitetssystemer for VA-ledninger. Mal for prosessen for å komme fram til kvalitetssystem som tilfredsstiller kravene i revidert plan- og bygningslov
99. Veiledning i dokumentasjon av utslipp
100. Kvalitet, service og pris på kommunale vann- og avløpstjenester
101. Status og strategi for VA-opplæringen
102. Oppsummering av resultater og erfaringer fra forsøk og drift av nitrogenfjerning ved norske avløpsrenseanlegg
103. Returstrømmer i renseanlegg. Karakterisering og håndtering
104. Nordisk konferanse om nitrogenfjerning og biologisk fosforfjerning 1999
105. Sjekkliste plan- og byggeprosess for silanlegg
106. Effektiv bruk av driftsinformasjon på renseanlegg/mal for rapportering
107. Utslipp fra mindre avløpsanlegg. Teknisk veiledning. Foreløpig utgave
108. Data for dokumentasjon av VA-sektorens infrastruktur og resultater
109. Resultatindikatorer som styringsverktøy for VA-ledelsen
110. Veileder i konkurranseutsetting. Avtaler for drift og vedlikehold av VA-anlegg
111. Eksempel på driftsinstruks for silanlegg. Cap Clara i Molde kommune
112. Erfaringer med nye renseløsninger for mindre utslipp
113. Nødvendig kompetanse for drift av avløpsrenseanlegg. Læreplan for driftsoperatør avløp
114. Nødvendig kompetanse for drift av vannbehandlingsanlegg. Læreplan for driftsoperatør vann
115. Pumping av avløpsslam. Pumpetyper, erfaringer og tikk
116. Scenarier for VA-sektoren år 2010
117. VA-juss. Etablering og drift av vann- og avløpsverk sett fra juridisk synsvinkel (*Erstattet av 134/03*)
118. Veiledning for kontrahering av rådgivnings- og prosjekteringstjenester innen VAR- teknikk (*Erstattet av 138/04*)
119. Omstruktureringer i VA-sektoren i Norge En kartlegging og sammenstilling
120. Strategi for norske vann- og avløpsverk. Rapport fra strategiprosess 2000/2001
121. Kjøkkenavfallskverner for håndtering av matavfall. Erfaringer og vurderinger
122. Prosessen ved utarbeidelse av miljømål for vannforekomster. Erfaringer og råd fra noen kommuner
123. Utslipp fra mindre avløpsanlegg. Veiledning for utarbeidelse av lokale forskrifter
124. Nødvendig kompetanse for legging av VA-ledninger. Læreplan for ADK 1
125. Mal for forenklet VA-norm
126. Organisering og effektivisering av VA-sektoren. En mulighetsstudie
127. Vassdragsforbund for Mjøsa og tilløpselvene - en samarbeidsmodell
128. Bruk av resultatindikatorer og benchmarking i effektivitetsmåling av kommunale VA-virksomheter. Erfaringer og anbefalinger fra et prøveprosjekt
129. Rørinspeksjon med videokamera. Veiledning/rapportering hovedledninger
130. Gjenanskaffelseskostnadene for norske VA-anlegg
131. Effektivisering av avløpssektoren
132. Forslag til nytt system for prosjektvirksomheten i NORVAR
133. IT-strategi for VA-sektoren. Veiledning
134. VA-JUS. Etablering og drift av vann- og avløpsverk sett fra juridisk synsvinkel (*Oppdateres årlig på www.norskvann.no*)
135. Vannledningsrør i Norge. Historisk utvikling. 26 dimensjonstabeller
136. Hygienisk barrierer og kritiske punkter i vannforsyningen: Hva har gått galt?
137. Veiledning i bygging og drift av drikkevannsbasseng
138. Veiledning for kontrahering av rådgivnings- og prosjekteringstjenester innen VAR-teknikk. Revidert utgave
139. Erfaringer med kloring og UV-stråling av drikkevann
140. NORVARs videre arbeid med slam. Strategisk plan for prosjektvirksomhet, informasjon og kommunikasjon. Forprosjekt
141. Trenger Norge en VA-lov? Drøfting av behovet for en egen sektorlov for vann og avløp
142. NORVARs benchmarkingsprosjekt 2004 Presentasjon av målesystem og resultater for 2003 ed analyse av datamaterialet
143. Kartlegging av mulig helserisiko for abonnenter berørt av trykløs vannledning ved arbeid på ledningsnett
144. Veiledning i overvannshåndtering (*Erstattet av 162/08*)
145. Inspeksjonsmanual for avløpssystemer. Del 1 – Ledninger
146. Bærekraftig vedlikehold. Betrakninger av utvalgte problemstillinger knyttet til langsiktig forvaltning av vannledningsnett
147. Optimal desinfeksjonspraksis for drikkevann
148. Veiledning i utarbeidelse av prøvetakingsprogrammer for drikkevann
149. Tilførsel av industrielt avløpsvann til kommunalt nett. Veiledning
150. Dataflyt – Klassifisering av avløpsledninger
151. Veiledning for vedlikeholdssystemer (FDV)
152. Veiledning for anskaffelse av driftskontrollsystemer i VA-sektoren
153. Norm for symboler i driftskontrollsystemer for VA-sektoren
154. Norm for tagkoding i VA-anlegg
155. Norm for merking og FDV-dokumentasjon i VA-sektoren
156. Veiledning for oljeutskilleranlegg
157. Organiske miljøgifter i norsk avløpsslam. Resultater fra undersøkelsen i 2006/07
158. Termoplastrør i Norge – før og nå
159. Håndbok i kildeprosporing i avløpssystemet
160. Driftserfaringer med membranfiltrering
161. Helsemessig sikkert vannledningsnett
162. Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering
163. Veiledning for innhenting og evaluering av tilbud på analyseoppdrag
164. Veiledning for UV-desinfeksjon av drikkevann
165. Innsamlingsverktøy for vedlikeholdsdata
166. Tiltak for å bedre fosforfjerningen på kjemiske renseanlegg
167. Veiledning for kjøp av VA-kjemikalier
168. Veiledning for dimensjonering av avløpsrenseanlegg
169. Optimal desinfeksjonspraksis fase 2
170. Veileder til god desinfeksjonspraksis
171. Erfaringer med lekkasjekontroll
172. Trykktap i avløpsnett

Rapportserie B:

- B1: Effektive VA-organisasjoner og tilfredse brukere. Forprosjekt
- B2: PressurePuls for deteksjon av lekkasje på vannledninger.
- B3: Kvalitetsheving av nye VA-ledningsanlegg. Kartlegging og tiltaksforslag
- B4: Vannkvalitet i ledningsnett – Problemoversikt og status. Forprosjekt.
- B5: Utslipp fra bilvaskehaller
- B6: Kommunikasjonsstrategi for NORVAR og norske vann og avløpsverk
- B7: Sandnesmodellen. Eksempel på system for kommunikasjon og virksomhetsstyring
- B8: Forprosjekt energinettverk i VA-sektoren
- B9: Utvikling av et system for spørreundersøkelser blant VA-kundene
- B10: Vannkilden som hygienisk barriere
- B11: Økonomiske forhold i interkommunalt VA-samarbeid – praksis og kjøreregler
- B12: Drikkevann i media

Rapportserie C:

- C1: Sårbarhet i vannforsyningen
- C2: Stoff for stoff – kilde for kilde. Kvikksølv i avløpsnett
- C3: Samarbeid om økt bruk av avløpsslam på grøntarealer
- C4: Effekter av bruk av matavfallskverner på ledningsnett, renseanlegg og avfallsbehandling
- C5: Økt sikkerhet og beredskap i vannforsyningen - veiledning

De mest aktuelle rapportene ligger som PDF-filer på www.norskvann.no



- 💧 Norsk Vann er en ikke-kommersiell interesseorganisasjon for vann- og avløpssektoren (VA-sektoren). Organisasjonen skal bidra til å oppfylle visjonen om rent vann ved å sikre VA-sektoren funksjonelle rammevilkår og legge til rette for kunnskapsutvikling og kunnskapsdeling.
- 💧 Norsk Vann eies av norske kommuner, kommunalt eide VA-selskaper, kommunenes driftsassistanser for VA og noen private andelsvannverk. Norsk Vann representerer ca 340 kommuner med over 90 % av landets innbyggere. Virksomheten finansieres i hovedsak gjennom kontingenter fra medlemmene.
- 💧 Norsk Vann styres av eierne gjennom årsmøtet og av et styre sammensatt av representanter fra eierne.

- 💧 I Norsk Vanns prosjektsystem gjennomføres hvert år FoU-prosjekter for ca. 6 mill. kroner
- 💧 Det er praktiske og aktuelle spørsmål innenfor vann- og avløp som utredes
- 💧 Deltakerne foreslår prosjekter, styrer gjennomføringen og får full tilgang til alle resultater

