

## 1 FORMÅL

Dette VA/Miljø-bladet viser kriterier for når en avløpsledning kan anses som selvrensende, og gir et formelverk og et beregningseksempel på beregning av skjærspenning for kontroll av selvrensing. Betydningen av en usikkerhet i parametere som inngår i beregningene er omtalt.

## 2 BEGRENSNINGER

Skjærspenningskriteriene forutsetter at de partikler som skal transporteres i ledningene ikke er vesentlig større enn det som normalt passerer gatesandfang, det vil si ca. 2 mm i diameter. Kravet til skjærspenning bør være høyere hvis sandfangene ikke får tilstrekkelig tømning. Store mengder fett i ledningene kan føre til gjentetting selv om beregninger skulle tilsa at ledningene er selvrensende. Det er flere forhold enn lav skjærspenning som kan gi problemer for selvrensingen i avløpsledninger:

- Ujevnt fall og svanker på ledningen.
- Sterkt varierende vannføring, for eksempel lengst ut på endeledninger.
- Fremmedlegemer, trerøtter, innstukne gummipakninger, etc.

Dette VA/Miljø-bladet gjelder kun sirkulære rør. Rør med tverrsnitt som er brede i toppen og innsnevret i bunnen (eggeformede rør), har betydelig gunstigere selvrenningsforhold.

## 3 FUNKSJONSKRAV

Avløpsledninger som beregnes å være selvrensende skal beholde den hydrauliske kapasiteten som ledningens alder og tilstand tilsier.

NORVARs mal for VA-norm (NORVAR 2007) sier i pkt. 3.4.5.:

”Ved fall mindre enn 10 ‰ skal det dokumenteres selvrensing via skjærkraftberegninger. Endeledninger skal vurderes spesielt i forbindelse med selvrensing. Det er viktig å ikke få motfall og svanker ved legging av ledninger. Toleransekrav til legging er derfor viktig, og finnes i NS 3420, kapittel H3”.

## 4 LØSNINGER

### 4.1 PROBLEMORIENTERING GENERELT

Fellesavløpsledninger og spillvannsledninger

som ikke er selvrensende kan få bygget opp såpass mye avleiringer at den hydrauliske kapasiteten forringes betydelig. Dette kan føre til kjelleroversvømmelser og erstatningskrav mot ledningseier.

For å sikre mot sedimenter og gjentetting av avløpsledninger stilles tre typer av krav:

1. Minimum fall.
2. Minimum vannhastighet som skal oppnås minst en gang pr dag alle dager i året.
3. Minimum skjærspenning som skal oppnås minst en gang pr dag alle dager i året.

Bruk av skjærspenning gir det sikreste og beste hydraulisk begrunnede kriteriet fordi slepekraften på partiklene, som må fraktes bort, vil variere med bl.a. rørdiameter og ikke bare vannhastigheten.

Alle sandfang skal tømmes før de blir 2/3 fulle. Dette vil i praksis ofte bety at de områder som produserer minst sand og som har små nedslagsfelt pr. sandfang, ofte kan tømmes en gang pr 2. år, mens de områder som produserer mer sand og hvor nedslagsfeltet er større, må tømmes 2 ganger pr år, for eksempel vår og høst. Sandfangene i Norge eies og vedlikeholdes av vegmyndighetene.

Det finnes nomogrammer for visse selvrennings-tilfeller i SFTs veileder TA-550. Disse kan brukes som støtte ved selvrenningsvurderinger.

### 4.2 KRAV TIL KRITISK SKJÆRSPENNING OG DIMENSJONERENDE VANNFØRING FOR SELVRENINGSBEREGNINGEN

Selvrensing for overvannsledninger representerer et annerledes problem enn det man har for spillvanns- og fellesavløpsledninger, og det er mindre vanlig å beregne disse ledningene med hensyn til selvrensing. Overvannsledninger har ikke en kontinuerlig strøm med partikler som kan avleire seg, men en sterkt varierende vannføring. Det finnes få holdepunkter for hvordan man skal velge vannføringen i overvannsledninger for beregning av selvrensing. Butler og Davies /1/ sier om overvannsledninger at for å oppnå selvrensing bør de dimensjoneres slik at vannhastigheten blir minst 1 m/s ved dimensjonerende vannføring. For overvannsledninger som har lengre enn 10 års dimensjonerende gjentakintervall, bør kravet oppnås hvert år. For overvannsledninger har

Dansk Ingeniørforening /3/ angitt at det kreves en gjennomskylling gjennomsnittlig hver 14. dag, hvilket angis å svare til  $0,1 \times Q_{\max}$  eller en delfylling  $h/D = 0,25$ .

Internasjonal forskning og litteratur om selvrensing viser at en skjærspenning på  $1 \text{ N/m}^2$  ikke klarer å erodere annet enn lettere sedimenter. Ved  $1,5 \text{ N/m}^2$  har man imidlertid funnet at avleiringer ikke skjer i spillvannsledninger hvis ledningene har et jevnt fall med normale variasjoner i spillvannsføringen over døgnet. For bare spillvannsførende ledning varierer anbefalingene mellom  $1, 5$  og  $3 \text{ N/m}^2$ . For avløpsrør som også fører overvann er de laveste anbefalingene  $2 \text{ N/m}^2$  og de høyeste  $4 \text{ N/m}^2$ . De aller fleste legger seg på  $3 - 4 \text{ N/m}^2$  for ledninger som fører overvann.

For avløpsledninger har verdiene fra Bøyum og Thorolfssons lærebok /2/ blitt brukt i mange år, og disse verdiene stemmer bra med internasjonale anbefalinger. Det foreslås derfor at disse verdiene blir retningsgivende i de fleste tilfeller:

Anbefalte minimumsverdier for skjærspenninger, ( $\tau_{\min}$ ):

**Fellesavløpsledninger og overvannsledninger:**

**3 - 4  $\text{N/m}^2$  både for plast og betongrør**

**Spillvannsledninger:**

**2  $\text{N/m}^2$  både for plast og betongrør**

Den høyeste verdien for fellesavløpsledninger og overvannsledninger anbefales brukt i områder hvor sandfangene ikke tømmer tilstrekkelig ofte og ved andre ugunstige forhold.

For spillvannsledninger i plast med jevnt fall og med relativt god vannføring over døgnet kan man tillate seg å gå ned til  $1,5 \text{ N/m}^2$ .

Grunnen til at de samme kravene stilles til plast og betong er at i den kritiske situasjonen vil bunnen i alle ledninger være dekket av et slamlag som har samme ruhetsforhold i alle rørtyper.

Den vannføringen man beregner selvrensingen for skal tilsvare den som man som minimum har 10 % av tiden alle dager i året. Beregningsformlene for dette er angitt i neste kapittel.

### 4.3 BEREGNINGSVEILEDNING

Følgende fremgangsmåte kan brukes:

1. Velg et krav til skjærspenning ( $\tau_{\min}$ ) for den aktuelle avløpsledningen.
2. Beregn vannføringen ( $Q_{\text{fylt}}$ ) i avløpsledningen ved fylt rør.
3. Beregn dimensjonerende vannføring for selvrensingsberegningen ( $Q_{\text{dim}}$ ).
4. Beregn delfyllingen ( $h$ ) i avløpsledningen ved dimensjonerende vannføring ( $Q_{\text{dim}}$ ).
5. Beregn skjærspenningen ( $\tau_{\text{fylt}}$ ) ved fylt ledning.
6. Beregn maksimal skjærspenning ( $\tau_{\text{maks}}$ ) i bun-

nen av ledningen ved  $Q_{\text{dim}}$ .

7. Sjekk at skjærspenningen ( $\tau_{\text{maks}}$ ) er større enn kravet ( $\tau_{\text{min}}$ ).

En detaljert gjennomgang av disse punktene er gitt i det etterfølgende.

1. **Velg en skjærspenning ( $\tau_{\min}$ ) for den aktuelle avløpsledningen**
2. **Beregn vannføringen ( $Q_{\text{fylt}}$ ) i avløpsledningen ved fylt ledning**

Det forutsettes at man vet friksjonskoeffisienten, diameter og fall på ledningen. Man bruker Darcy Weisbachs ligning for å finne vannføringen i ledningen når den er fylt:

$$h = f [L/D \cdot v^2/2g] \quad (1)$$

$h$  = falltap over hele ledningen (m)

$f$  = friksjonskoeffisienten

$L$  = lengde på ledningen (m)

$D$  = diameter (m)

$v$  = midlere vannhastighet i røret ved fylt rør (m/s)

$g$  = gravitasjonen  $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

Man kan nå beregne vannhastigheten  $v$  ved å omforme ligning (1).

$$v = \sqrt{hD2g / fL} \quad (2)$$

Vannføringen ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) i den fylte ledningen blir i følge kontinuitetsligningen:

$$Q_{\text{fylt}} = v A = v \pi r^2 = v 3,14 \cdot D^2/4 \quad (3)$$

$A$  = tverrsnittsarealet innvendig i røret (m)

3. **Beregn dimensjonerende vannføring for selvrensingsberegningen ( $Q_{\text{dim}}$ )**

Følgende formelverk kan brukes for å beregne dimensjonerende vannføring /7/:

$$Q_{\text{dim}} = \alpha \cdot P \cdot q \cdot f_{\min} \quad (4)$$

$Q_{\text{dim}}$  = dimensjonerende vannføring for selvrensingsberegningen

$P$  = antall personenheter

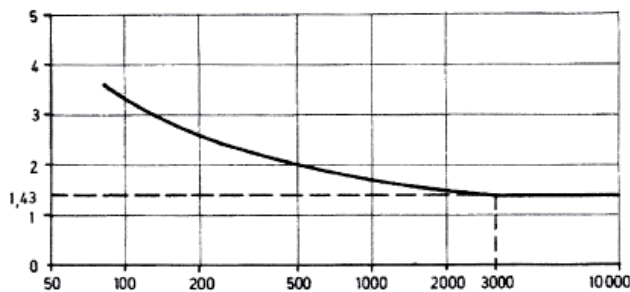
$q$  = midlere spesifikt vannforbruk per personenheter og døgn ( $\text{m}^3/\text{P d}$ )

$f_{\min}$  = minimal døgnfaktor (vannforbruk i årets minst forbrukende døgn dividert på midlere døgnforbruk)

$$\alpha = 1 + 23/\sqrt{P} \text{ for } P < 3000 \text{ personenheter} \quad (5)$$

$$\text{og } \alpha = 1,43 \text{ for } P > 3000 \text{ personenheter} \quad (6)$$

$\alpha$  verdiene fremgår av figur 1. Formel (5) er empirisk og basert på Millions /8/ arbeider. Med de viste  $\alpha$  verdier skal man være sikret en vannføring som varer minst 10 % av døgnet i alle døgn i året.



Figur 1.  $\alpha$  – verdier for dimensjonerende selvrensende vannføring. Lysne (1976)

#### 4. Beregn delfyllingen (h) i avløpsledningen ved dimensjonerende selvrenningsvannføring

Figur 2 kan brukes når man vet forholdet mellom  $Q_{dim}$  og  $Q_{fylt}$ . Dette har man nå beregnet i punkt 2 og 3. Man går inn med  $Q_{dim}/Q_{fylt}$  på horisontalaksen, opp til øvre kurve, så til venstre mot den vertikale akse og finner relativ fyllingshøyde  $h/D$ .

Kurvene for Q og V angir de empiriske/ effektive verdiene.

#### 5. Beregn skjærspenningen ( $\tau_{fylt}$ ) ved fylt ledning

Skjærspenningen ( $N/m^2$ ) langs rørveggen i en sirkulært fylt ledning er

$$\tau_{fylt} = \gamma R l \quad (7)$$

$\gamma$  = vannets spesifikke vekt som kan settes til  $10\,000\, N/m^3$ .

R = hydraulisk radius (m) = vått tverrsnittsareal/ den våte omkrets.

For et fylt rør er hydraulisk radius  
 $R = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = r/2 = D/4$ .

l = fall på energilinjens i m/m,  
 D.v.s. at 10 ‰ blir 0,01.

I et avløpsrør uten oppstuvning vil energilinjens fall være lik fall på ledningen.

#### 6. Beregn maksimal skjærspenning ( $\tau_{maks}$ ) i bunnen av ledningen ved $Q_{dim}$

Det er normalt ikke fylte ledninger i den kritiske situasjonen, men en mindre delfylling i ledningen. Skjærspenningen er da null i vannoverflaten på rørveggen og økende til en maksimal verdi ( $\tau_{maks}$ ) i bunnen av ledningen.

Lundgren and Jonsson /6/ angir for en delfylling opp til  $h/D = 0,25$  følgende formel for  $\tau_{maks}$  og som Lysne /7/ også viser til:

$$\tau_{maks} = \tau_{fylt} 4 h/D (1 - h/D) \quad (8)$$

#### 7. Sjekk om ledningen er selvrensende ved at $\tau_{maks}$ er større enn $\tau_{min}$

Sjekk av pumpeledninger

Med hensyn til sjekk av selvrensing for trykkledninger og trykkavløp, vises det til VA-miljøblad nr. 66 om Trykkavløp

## 4.4 EKSEMPEL

Vi har en fellesavløpsledning mellom to kummer, uten spesielt gunstige forhold.

- Avstand mellom kummene = 70 meter
- Innvendig diameter = 250 mm
- Fall l = 5 ‰
- Friksjonskoeffisient  $f = 0,028$  (tilsvarer hydraulisk rørruhet  $k = ca. 1\, mm$ )
- Antall personer oppstrøms ledningen P = 2900
- Spesifikt vannforbruk  $q = 0,2\, m^3/pd$
- Døgnvariasjonsfaktoren  $f_{min} = 0,7$ .

Er ledningen selvrensende?

### Løsning

1. Vi finner nødvendig skjærspenning = 3 – 4  $N/m^2$ . Vi velger 3  $N/m^2$  fordi det ikke er ugunstige forhold av noe slag.
2. Med formel (2) beregner vi hastighet ved fylt ledning. Den blir:  $v = \sqrt{(70 \cdot 0,005) \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 9,81 / 0,028 \cdot 70} = 0,935\, m/s$

Vannføring ved fylt ledn. beregnes med formel (3)

$$Q_{fylt} = 0,935 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 / 4 = 0,046\, m^3/s$$

3. Dimensjonerende vannføring for selvrenningsberegningen fås av formel (4) som gir

$$Q_{dim} = \alpha \cdot P \cdot q \cdot f_{min} = (1 + 23\sqrt{2900}) \cdot 2900 \cdot 0,2 \cdot 0,7 = 579,4\, m^3/døgn$$

Dette er  $579,4 / (24 \cdot 60 \cdot 60) = 0,0067\, m^3/s$

4. Delfyllingen h i avløpsledningen finnes ved å først regne ut  $Q_{dim}/Q_{fylt}$

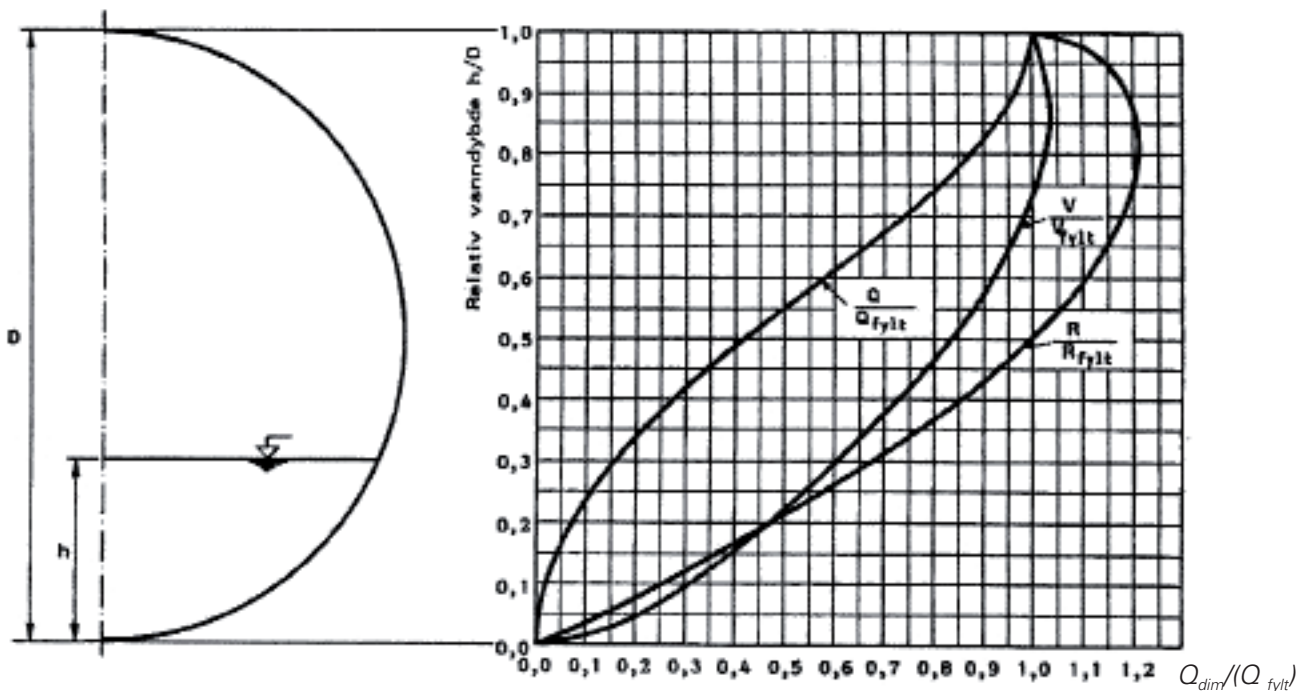
$$Q_{dim}/Q_{fylt} = 0,0067/0,046 = 0,146$$

Fra figur 2 finner vi da  $h/D = ca. 0,28$

Det vil si at  $h = 0,25 \times 0,28 = 0,07\, m$

5. Skjærspenningen i fylt ledning finnes med formel (7),  $\tau_{fylt} = 10\,000 \cdot 0,25/4 \cdot 0,005 = 3,125\, N/m^2$ .
6. Maksimal skjærspenning langs bunnen finner vi av formel (8)  $\tau_{maks} = 3,125 \cdot 4 \cdot 0,28 (1 - 0,28) = 2,5\, N/m^2$
7. I følge anbefalte minimumsverdier for skjærspenninger er avløpsledningen ikke selvrensende. ( $2,5 < 3$ )

I tabell 1 er det gjort en følsomhetsanalyse på virkningen av en usikkerhet i fallet, dimensjonerende vannføring og friksjonskoeffisienten.



Kurvene er tegnet opp etter formelen  $Q/Q_{fyllt} = 0,46 - 0,5 \cos(\hat{E} h/D) + 0,04 (2\hat{E} h/D)$  og  $R/R_{fyllt} = D/4$ .

Figur 2. Delfyllingsgraden for avløpsrør /2/

Tabell 1. Følsomhetsanalyse for skjærspenningsberegninger

Diameter = 250 mm

$l = 5 \text{ ‰}$  (70 meter mellom kummene)

$P = 2900$

Ulikt fall, dvs. avvik i høyden			
Avvik i høyden (cm)	Avvik i ‰	Fall i ‰	$\tau$ [N/m <sup>2</sup> ]
0	0	5	2,54
7	1	4	2,12
14	2	3	1,66

Ulik vannføring, $q_{selvrens}$		
$l/p \text{ d}$	% mindre vannføring	$\tau$ [N/m <sup>2</sup> ]
200	0	2,54
190	5	2,52
180	10	2,49
170	15	2,46

Ulik friksjonskoeffisient f		
Friksjonskoeffisient f	Tilsvarende ruhet i mm	$\tau$ [N/m <sup>2</sup> ]
0,023	0,5	2,49
0,028	1	2,54
0,035	2	2,67

Det er ikke uvanlig med et avvik i fallet på 2 ‰, noe som tilsvarer en dybdefeil på 0,14 m i grøfta hvis ledningen er 70 meter som i vårt eksempel. Dette slår sterkt ut i skjærspenningen som går fra 2,54 til 1,66 N/m<sup>2</sup>.

Et avvik i beregning av dimensjonerende vannføring på 15 ‰ gjør at skjærspenningen går fra 2,54 til 2,46 N/m<sup>2</sup>. Dette er av liten betydning.

Et avvik i valg av friksjonskoeffisienten fra  $f = 0,023$  til  $f = 0,035$  (tilsvarende et avvik fra 0,5 mm til 2 mm i rørruheten) gjør at skjærspenningen går fra 2,49 til 2,67 N/m<sup>2</sup>. Dette er også av liten betydning.

**Konklusjonen på følsomhetsanalysen er dermed at av de parametrene man ikke alltid kjenner så godt, men som man trenger for å beregne selvrensingen, er fallet på ledningen det mest kritiske.**

Henvisninger:		Utarbeidet:	november 2007	Oddvar Lindholm, UMB
/1/	Butler, D. and Davies, J., W. 2000. "Urban Drainage." E & FN SPON. London.	Revidert:	Mai 2015	Oddvar Lindholm
/2/	Bøyum, Å. og Thorolfsson, S. 1999. "VA-teknikk del 2" Tapir forlag. Trondheim.	/4/	Lundgren, H. and Jonsson, G. 1966. "Shear and velocity distribution in shallow channels." Proceedings, ASCE, Journal of the Hydraulics Division, March 1966.	
/3/	NORVARs mal for VA-norm, www.va-norm.no	/5/	SFT 1979. "Veiledning ved dimensjonering av avløpsledninger. TA-550.	