

1 FORMÅL

Ved rask reduksjon av vannhastighet i ledninger oppstår det trykkbølger som kan føre til skadelige trykksvingninger. Det er viktig med kunnskap om aktuelle tiltak som kan forhindre slike skader. Det er stort sett rørmateriale, trykklasse, ledningsføringer og tilknyttet bebyggelse som avgjør hvor store trykksvingninger som kan aksepteres.

Formålet med dette bladet er å informere om:

- Hvordan trykksvingninger oppstår, og hvor store de kan bli.
- Hvorfor det er viktig med riktig ventilmanøvrering i trykkledninger
- Trykksvingninger ved forskjellige former for pumping.
- Enkel grafisk metode, for å se størrelser av over- og undertrykk.
- Aktuelle tiltak for å begrense trykksvingninger til akseptable verdier.
- Informasjon om data som trengs for beregning av trykksvingninger, når det benyttes dataprogram.

2 BEGRENSNINGER

Det blir ikke gitt detaljert informasjon knyttet til:

- Beregning for, og konstruksjon av svinghjul for pumper
- Beregninger av volum for trykktanker
- Oppbygging av beregningsprogram for trykksvingninger

3 FUNKSJONSKRAV

Hovedhensikten med de løsninger som velges er å begrense trykksvingninger til akseptable nivåer, for å unngå ledningsbrudd, innsuging av forurensninger og dermed reduserte driftskostnader.

4 LØSNINGER

Ved endring av vannhastigheten i trykkledninger oppstår det trykkbølger som beveges med stor hastighet. Avgjørende for størrelsen av trykkva-

riasjoner (over- og undertrykk) er avhengig av:

- Trykkbølgens forplantningshastighet i rørene
- Hvor raskt vannhastigheten i rørene endres
- Rørlengde

4.1 TRYKKBØLGENS FORPLANTNINGSHASTIGHET I RØRENE.

Trykkbølgens forplantningshastighet kan beregnes etter følgende formel :

$$a = \sqrt{\frac{E_v}{\rho \left(1 + \frac{E_v D}{E_r s} \right)}}$$

a = Trykkbølgens forplantningshastighet (m/sek)

E_v = Vannets elastisitetsmodul (N/m²)

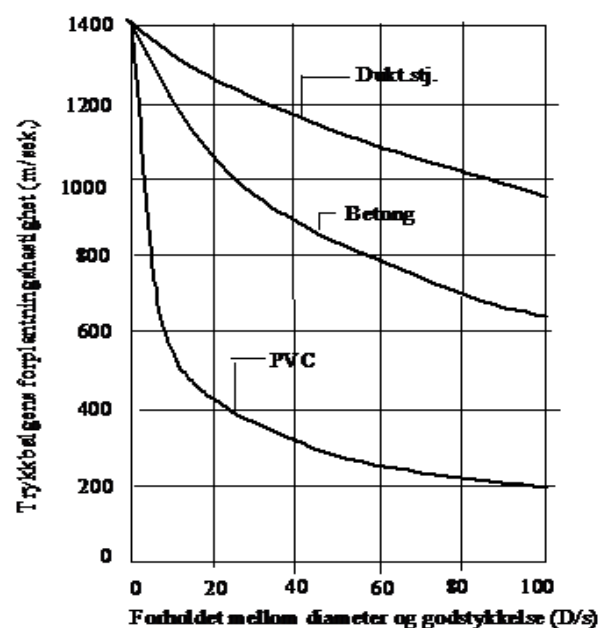
E_r = Rørmaterialets elastisitetsmodul (N/m²)

ρ = Vannets tetthet (1000 kg/m³)

D = Innvendig rørdiameter (m)

s = Rørveggenes tykkelse (m)

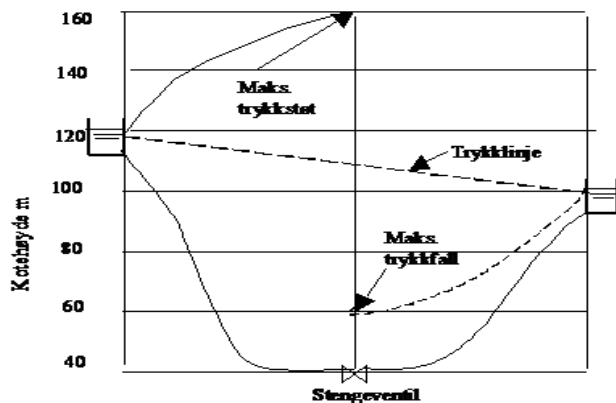
I figur 1 vises trykkbølgens forplantningshastighet i forhold til rørenes diameter og godstykkelse (D/s)



Figur 1. Trykkbølgens forplantningshastighet

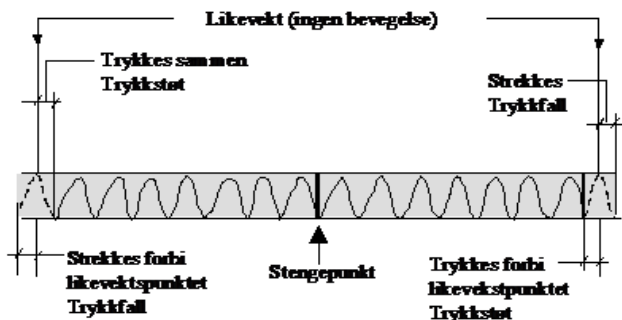
4.2 HVORDAN OPPSTÅR TRYKKSTØT OG TRYKKFALL?

Vann som transporteres i fylte rør representerer store krefter (energi). Forklaring knyttet til figur 2: Når vannstrømmen stoppes, ved stenging av ventilen, frigis krefter som må tas opp av rørveggen, og dette benevnes trykkstøt. Etter stengepunktet er vannet fortsatt i bevegelse, og det blir et trykkfall. På hver side av stengepunktet fås vekselvis trykkstøt og trykkfall til energien er brukt opp av rørfriksjonen.



Figur 2. Illustrasjon av trykkstøt og trykkfall

For lettere å skjønne hva som skjer betraktes vannet lik en spiralfjær, som kan presses sammen og strekkes. (Se figur.3)

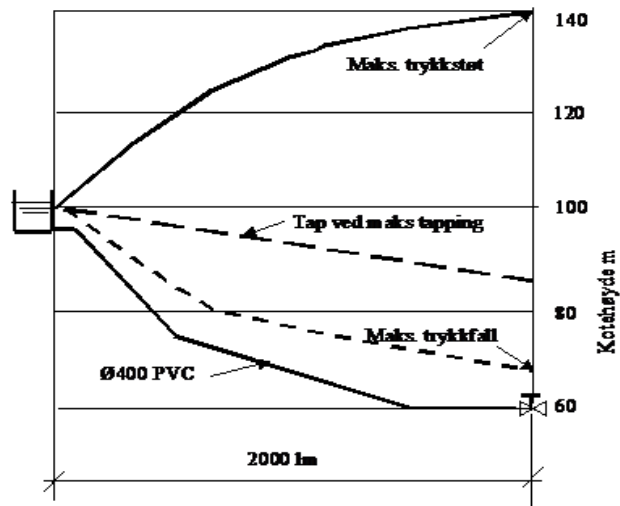


Figur 3 Vannet betraktes som en spiralfjær.

Når fjæra, som er i bevegelse, stoppes vil den på grunn av hastighetsenergien trykkes sammen foran stengepunktet, og øke trykket mot rørveggen (trykkstøt). Etter stengepunktet er fjæra fortsatt i bevegelse, og den strekkes forbi likevekts-punktet, slik at det blir et trykkfall. Både sammentrykking og strekking av fjæra går forbi likevekts-punktet, slik at det blir vekselvis trykkstøt og trykkfall. Svingningene fortsetter til energien er oppbrukt av tapet mot rørveggen.

4.3 BEREGNING AV TRYKKSTØT OG TRYKKFALL

Som eksempel benyttes figur 4, der vann fra et basseng ledes ut i det fri.



Figur 4. Vann fra et basseng ledes ut i det fri.

$$\text{Grunnformel} = \Delta H = \frac{a}{g} \cdot v$$

ΔH = Trykkstøt mvs

a = Trykkbølges forplantningshastighet i m/sek

g = Jordakselerasjonen, 9,81 m/sek².

v = Vannets hastighet før stenging i m/sek.

Et viktig forhold, som påvirker størrelsen av trykkstøt/ trykkfall., er tiden trykkbølgen benytter fram og tilbake fra stengepunktet til bassenget (benevnes refleksjonstiden μ)

$$\mu = \frac{2 \cdot L}{a} \text{ sek}$$

L = avstanden fra stengepunktet til bassenget .i m.

Eksempel knyttet til figur 4:

Gitt:

- » Ledningslengde: 2000 m
- » PVC rør med innvendig diameter 0.4 m
- » Vannhastighet: 1.0 m/sek
- » Trykkbølges forplantningshast.: 400 m/sek
- » Refleksjonstid (2000/400) · 2 = 10 sek.
- » Trykktap er beregnet med tapskoeffisient $f = 0.0250$ (ruhet $k = 1.0$ mm)

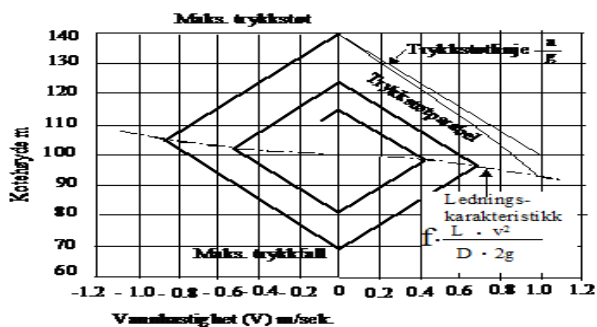
Trykkstøt hvis ventilen stenges i løpet av refleksjonstiden (< 10 sek) :

$$\Delta H = \frac{400}{9.81} \cdot 1.0 = \text{ca. } 40\text{m}$$

Første etterfølgende trykkfallet blir ca. 30 m. Svingningene fortsetter til energien er oppbrukt av rørfriksjonen. (Se fig.6)

Grafisk framstilling av trykkvariasjoner, når ventilen i figur 4 stenges i løpet av refleksjonstiden

Metode for skrittvis opptegning vises i figur 5.



Figur 5. Grafisk framstilling av trykksvingninger når ventilen i figur 4 stenges.

- Tegn rutenettet, med høyder (m) og vannhastighet (m/sek)
- Legg inn ledningskarakteristikken på hver side av 0 m/sek. ($hf = f \times (L/D) \times (v^2/2g)$)
- Legg inn trykkstøtlinjen (a/g) og trykkstøtparabelen.
 - » Trykkstøtlinjen fås ved å legge inn en rett linje i forhold til (a/g). $a = 400$ m/sek og g ca 10 m/sek², slik at forholdet a/g blir 40 m/1 m/sek.
 - » Trykkstøtparabelen fås ved å trekke friksjonstapet fra beliggenheten av trykkstøtlinjen ($(a/g) - (f \times (L/D) \times (v^2/2g))$)

Normalt er det tilstrekkelig at bare trykkstøt-linjer (a/g) benyttes ved grafisk framstilling.

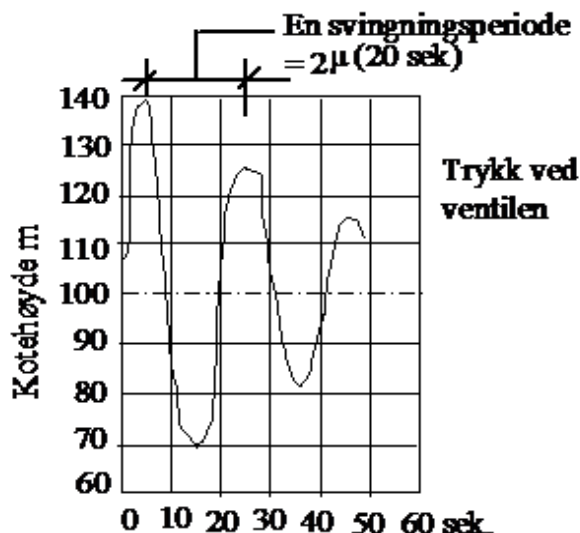
Når ventilen stenger fås først et maksimalt trykkstøt på 40 m ($(a/g) \times v$)

Når trykkbølgen har gått fram og tilbake fås trykkfallet som blir ca. 30 m

$$((a/g) - (2 \times f \times (L/D) \times (v^2/2g)))$$

Neste gang trykkstøtet kommer er det ca. 24 m, mens etterfølgende trykkfall er ca 19 m

Svingningsforløpet vises i figur 6. En svingningsperiode varer i 2 refleksjonstider ($2\mu = 2 \times 2L/a = 2 \times (2 \times 2000)/400 = 20$ sek.



Figur 6. Trykksvingninger når ventilen i figur 4 stenges i løpet av refleksjonstiden (<10 sek)

4.3.1 VENTILMANØVRERING

Som det framgår vil trykkstøt og trykkfall være avhengig av hvor raskt vann i bevegelse stoppes. Så lenge vann passerer ventilen vil det være begrenset endring av trykksvingningene. Det kan derfor foretas relativt rask stenging til $80 - 85\%$. Tiden for den siste stengingen bør tilsvare minst $4 - 5$ refleksjonstider

4 - 5 refleksjonstider på de siste 15-20 %

Ved motorstyrte ventiler kan det benyttes pulsregulering på siste del av stengingen, slik at det er mulig å benytte motorer med jevn stengehastighet.

4.4 PUMPEANLEGG FOR VANN

En viktig oppgave ved etablering av pumpestasjoner blir å finne løsninger som hindrer skadelige trykksvingninger. Ledningsføringen vil ofte være avgjørende for hvor store svingninger (særlig trykkfall) som kan aksepteres.

4.4.1 METODER FOR BEGRENSNING AV TRYKKSvingNINGER

Ved tilgjengelig strømforsyning gir følgende løsninger kontroll med trykksvingningene:

- Frekvensstyring av pumpene som gjør det mulig å redusere hastigheter til akseptable nivåer før pumpestopp.
- Ventiler stopper vannstrømmen før pumpene stoppes. (Kontrollert ventilmanøvrering)
- Luftinnsug i høydepunkt på overføringsledninger, og kontrollert utblåsning.

For å hindre skadelige trykksvingninger, ved ukontrollerbar pumpestopp (f.eks.strømsstans), kan følgende løsninger benyttes:

- Svingmasser som hindrer rask stopp av pumpene.
- Trykktank for ettersuging av vann ved trykkfall, og demping av trykkstøt.
- Etablere nødstrøm (batterier) for ventiler der det benyttes luftinnsug i høydepunkt og kontrollert utblåsning.

4.5 AKTUELLE PUMPEPLASSERINGER

Det skal gis eksempler på følgende pumpeplussninger:

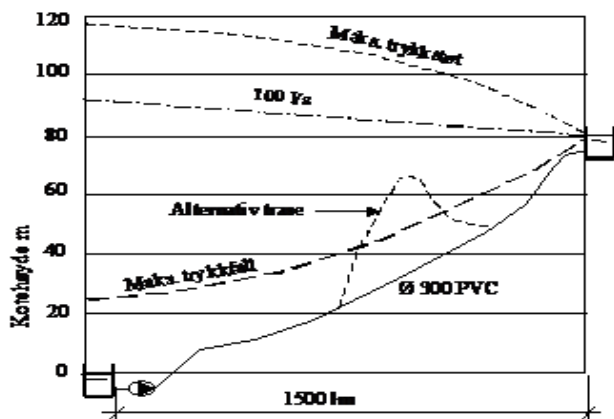
- Pumping fra lavreservoar til høydebasseng
- Trykkøkning ute på nettet.
- Kapasitetsøkning der det er selvsfall

4.5.1 Pumping fra lavreservoar til høydebasseng

I figur 7 vises prinsipløsningen der vann pumpes til et høydebasseng. Det er vist to ledningsføringer, med og uten et høydedrag.

Gitt:

- » Ledningslengde: 1500 m
- » PVC rør med innvendig diameter: 0.3 m
- » Vannhastighet: 1.4 m/sek
- » Trykkbølgens forplantningshast: 400 m/sek
- » Refleksjonstid: $(1500/400) \cdot 2 = 7.5$ sek.
- » Trykktap er beregnet med tapskoeffisient $f = 0.0270$ (ruhet $k = 1.0$ mm)

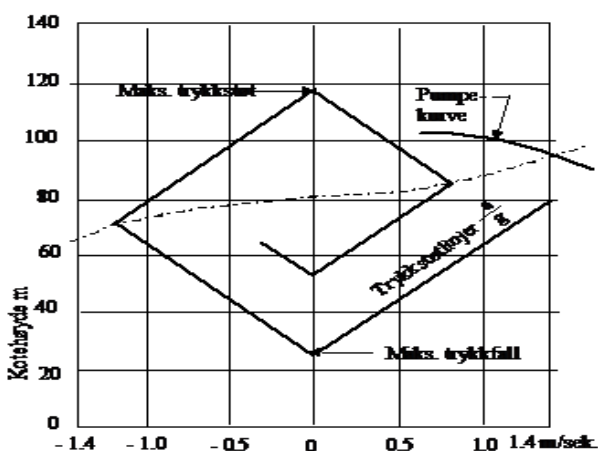


Figur 7. Pumping fra lavreservoar til høydebasseng.

Trykkfall hvis pumpa stopper i løpet av refleksjonstiden (< 7.5 sek):

$$\text{Grunnformel} = \Delta H = \frac{a}{g} \cdot v$$

Det første etterfølgende trykkstøtet blir ca. 36 mvs. Svingningene fortsetter til energien er oppbrukt av rørfriksjonen. I figur 8 vises en grafisk framstilling av trykk-forløpet når pumpa stopper i løpet av refleksjonstiden (7,5 sek)



Figur 8. Grafisk framstilling av trykkforløpet når pumpa i figur 7 stopper i løpet av refleksjonstiden (< 7.5 sek)

Som det framgår av figur 7 blir det fullt undertrykk (vakuum) i traseen med høydedrag. Det bør derfor velges frekvensdrift, slik at akseptabel

hastighet kan velges før pumpa stoppes. Det må også etableres tiltak som hindrer skade ved ukontrollerbar pumpestopp.(strømstans)

Et alternativ er å benytte luftinnsug på høyeste punkt, med kontrollert utblåsning. Traseen med høydedrag er egnet for en slik løsning. Andre løsninger kan være bruk av:

- Trykktank
- Svingmasse

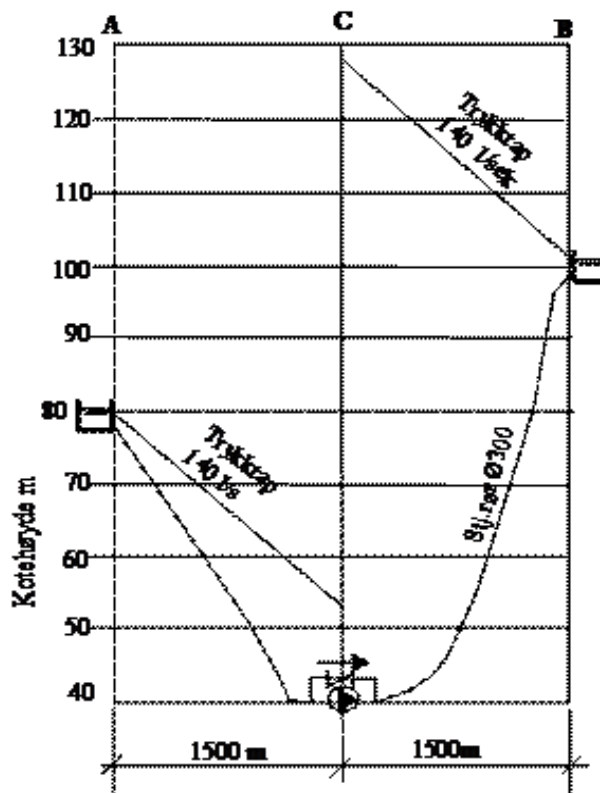
Ved traseen uten høydedrag blir det ikke undertrykk, og det er trykklassen for rørene og akseptable trykk for abonnentene som avgjør behovet for tiltak.

4.5.2 TRYKKØKNING UTE PÅ NETTET

Ved trykkøkning ute på nettet kan det ofte benyttes enkle løsninger for å begrense trykksvingninger, slik det illustreres i figur 9.

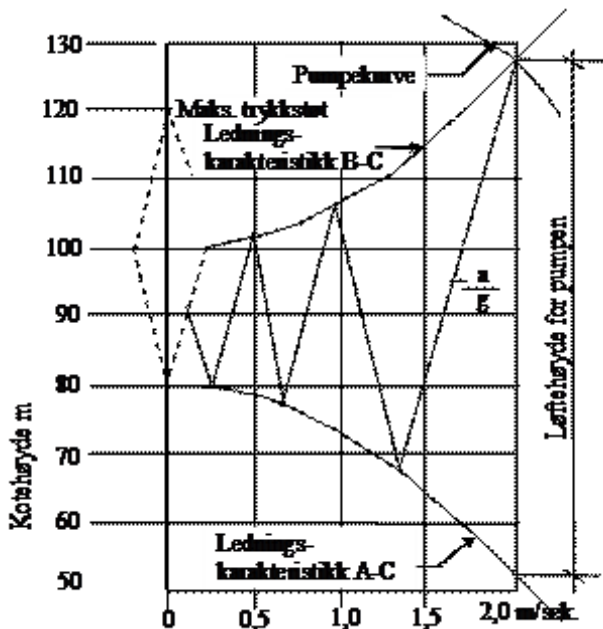
Gitt:

- » Ledningslengde: 3000 m
- » Stj.rør med innvendig diameter: 0.3 m
- » Vannhastighet: 2.0 m/sek
- » Trykkbølgens forplantningshast.: 1100m/sek
- » Refleksjonstid: $(1500/1100) \cdot 2 = 2.7$ sek.
- » Trykktap er beregnet med tapskoeffisient $f = 0.0270$ (ruhet $k = 1.0$ mm)



Figur 9 Trykkøkning ute på nettet

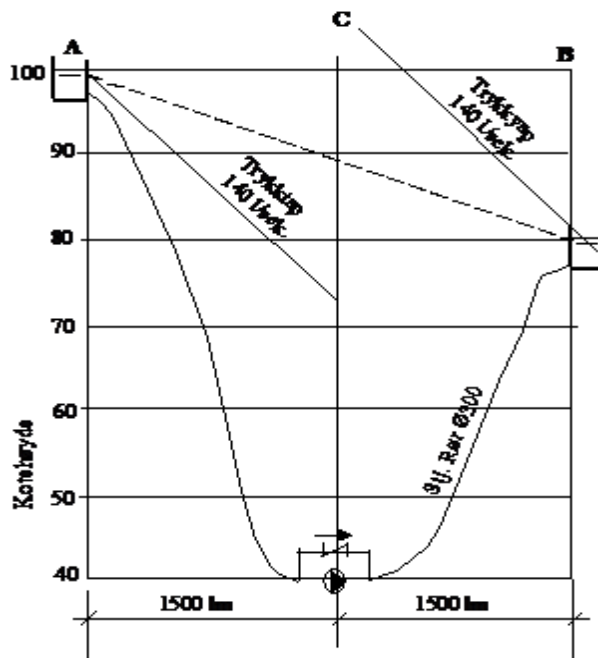
Ved å etablere forbigang, slik at vannet ikke stopper ved pumpestans, når trykkøkningen ved pumpa ca. kote 120, eller ca 20 m over nivået for det høyeste bassenget. Grafisk framstilling av trykkforløpet illustreres i figur 10



Figur 10 Grafisk framstilling av trykkforløpet ved stopp av pumpe i figur 9.

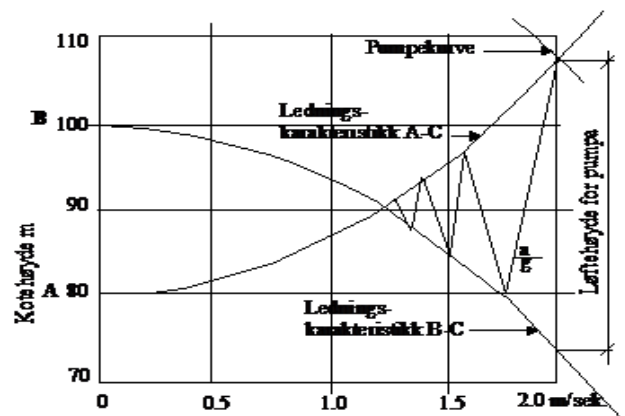
4.5.3 KAPASITETSØKNING DER DET ER SELVFALL

I figur 11 vises eksempel på løsning der det er selvføll. Ved pumpestopp vil det bli minimale trykksvingninger, i og med at vannet fortsetter å renne (omløp forbi pumpe). Ledningslengder, rørmateriale, rørdimensjonering og vannmengder er de sammesom i avsnitt 4.5.2.



Figur 11. Kapasitetsøkning der det er selvføll

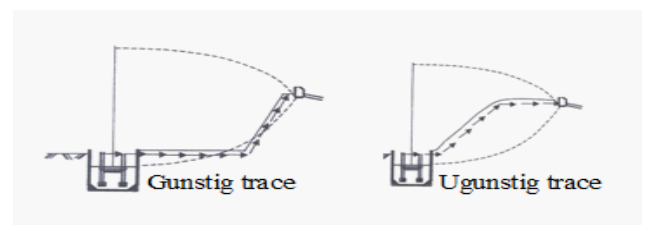
Trykkforløpet vises i figur 12., og som det framgår er det meget små trykksvingninger. Uten forbigang ville det blitt store trykksvingninger på begge sider av pumpe.



Figur 12 Trykksvingninger der det er selvføll

4.6 LEDNINGSFØRINGER

Ledningsføringen, både for vann og avløpsanlegg, er viktig med tanke på de løsninger som velges. I figur 13 vises eksempler på gunstig og ugunstig ledningsføring ved pumping av avløpsvann.



Figur 13 Gunstig og ugunstig ledningsføring med tanke på undertrykk ved pumpestopp

Ved den ugunstige ledningsføringen må det etableres ekstra tiltak for å unngå undertrykk, f.eks.

- » Frekvensdrift
- » Svingmasse.
- » Trykktank.

Ved den gunstige ledningsføringen fås akseptabelt undertrykk, hvis det etableres ettersuging av vann.

4.7 TRYKKSTØT I HUSINSTALLASJONER

Ved rask stenging, ved tapping av vann, kan det oppstå store trykk, særlig der det er hendelkraner. For å unngå skader kan det monteres trykktank, som vil dempe støt.

4.8 NØDVENDIG INFORMASJON VED BRUK AV TRYKKSTØTS-PROGRAM

Ved bruk av EDB-program, for beregning av trykksvingninger, er det viktig at riktige data blir lagt inn. Følgende pumpe- ventil- og ledningsdata må fremskaffes:

- Ledningsprofil
- Ledningsdimensjon (innvendig diameter)
- Rørmateriale

- Godstykking
- E-moduler for rørmateriale og vannet
- Ventilkarakteristikk
- Lukketider for ventiler
- Q/H kurver for pumper
- Effektkurver for pumper
- Turtall for pumper
- Tregghetsmoment for roterende deler i pumper og motorer.

4.9 GODE RÅD

- Beregn direkte trykkstøt / trykkfall ved hjelp av formelen:

$$\Delta H = \frac{\Delta v \times a}{g}$$

- Beregn ledningens refleksjonstid

$$\mu = \frac{2 \times L}{a} \text{ sek}$$

Hvis summen av det statiske trykket og det direkte trykkstøtet overskrider ledningens trykkklasse, samtidig som ventilens lukketid på siste 15 – 20 % av lukkeveien er mindre enn 5 μ (5 ganger refleksjonstiden) bør trykkstøtsberegninger utføres.

- Når det gjelder ukontrollert pumpestopp (for eksempel strømstans)bør som regel beregning utføres når 5 μ er mer enn 2 sek., som normalt er tiden pumpa gir vann etter strømstans.

Henvisninger:		Utarbeidet:	Nov 2009	JOFI AS v/ Roar Finsrud
		Revidert:		