

Tetthet, relativ tetthet og API tetthetFor gass

$$\gamma_g = \rho_g / \rho_{air}$$

$\rho_g$ : tetthet av gass

$\rho_{air}$ : tetthet av luft

For olje

$$\gamma_o = \frac{\rho_{o,st}}{\rho_w}$$

$\rho_{o,st}$ : tetthet olje (stocktank)

$\rho_w$ : tettheten av vannet

API (American Petroleum Institute) gravity for olje

$$^\circ\text{API} = \frac{141,5}{\gamma_o} - 131,5 \quad [^\circ\text{API enhet}]$$

Egenskap for olje GOR

Gas oil Ratio = mengde gass (ved stb., 1 atm = 1,01325 bara og 15°C, 60°F, 14,7 psia)

$$\text{GOR} = R_{vs} = \frac{V_g}{V_o}$$

$V_g$ : gassvolum ved stb (Sm<sup>3</sup>, scf)

$V_o$ : volum stocktank olje ved stb (Sm<sup>3</sup>, stb)

Volum formasjonsfaktor for olje, B<sub>o</sub>

$$B_o = \frac{V_{o,res}}{V_{o,st}}$$

$V_{o,res}$ : volum av oljen ved reservoarbetingelser

$V_{o,st}$ : volum av olje ved stock tank betingelser (stb)

Som basis  $V_{o,st} = 1$ .

$B_o > 1$  men mindre enn 2.

$P > P_b \Rightarrow B_o \approx \text{konstant}$

$B_o \downarrow$  når  $P < P_b$ .

oljens kompressibilitet, C<sub>o</sub>

Benyttes ofte i reservoar simuleringer og modellering

av well inntlow performance:  $C_o = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$

## Gassens spesitike tetthet, $\gamma_g$ , (spesitik gravity)

$$\gamma_g = \rho_g / \rho_{air} \quad , \quad p_i = \frac{m}{V} = \frac{n_i \cdot MW_i}{V_i} \quad , \quad n = \frac{PV}{ZRT}$$

$$MW_{g,mix} = \sum_{i=1}^N y_i \cdot MW_i \quad , \quad p_i = \frac{PV}{ZRT} \cdot \frac{MW_i}{V} \quad (Z_i = Z_{air})$$

gir:

$$\gamma_g = \frac{MW_{g,mix}}{MW_{air}} = \frac{MW_{mix}}{28,97}$$

MW: molekylvekt.

## Gass pseudokritisk trykk og temp, $P_{pc}$ og $T_{pc}$

$$T_{pc} = \sum_{i=1}^N y_i T_{ci} \quad P_{pc} = \sum_{i=1}^N y_i P_{ci}$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_c} \quad T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}$$

## Viskositeten av gass $\mu_g$

for gassblandinger

$$\mu_g = \frac{\sum (\mu_{gi} y_i \sqrt{MW_i})}{\sum (y_i \sqrt{MW_i})}$$

$\mu_g$ : dynamisk viskositet

## Gass kompressibilitetsfaktor, $Z_g$

Finnes gratis ved å tørst beregne  $P_{pr}$  og  $T_{pr}$

## Formation Volume Factor of gas, $B_g$

Volumfaktoren,  $B_g$  for gass i reservoaret

$$B_g = \frac{V_{g,res}}{V_{g,sc}}$$

$V_{g,sc}$ : Volum ved standard betingelser.

$V_{g,res}$ : gass volum ved reservoar betingelser.

Tilstandslikning  $PV = ZnRT$  brukes til å finne  $V_{g,res}$  og  $V_{g,sc}$  når  $n$  er konstant.

$$B_g = \frac{P_{sc}}{P} \frac{Z}{T_{sc}} \frac{T}{Z_{sc}} = 0,0283 \frac{ZT}{P} \quad (T \text{ } ^\circ\text{F}, P \text{ i psia})$$

## Gasens kompressibilitet, $C_g$

2.

$$C_g = \frac{1}{V_g} \left( \frac{\partial V_g}{\partial P} \right)_T$$

$$V_g = \frac{ZnRT}{P} = \frac{\partial V_g}{\partial P} = nRT \left( \frac{1}{P} \frac{\partial Z}{\partial P} - \frac{Z}{P^2} \right)$$

$$C_g = \frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial P} \approx \frac{1}{P}$$

## Kap 3. IPR Kurver

### poretrykk ved vannsonen

$$P_{\text{pore}} = \rho g H = 1000 \times \gamma_{tw} \times g \times H \text{ [Pa]}$$

$$= 9,81 \gamma_{tw} \times H \text{ [Pa]} \text{ SI-enhet}$$

$$P_{\text{pore}} = 0,434 \times \gamma_{tw} \times H \text{ [Psi]} \quad H \text{ [ft]} \text{ US-enhet}$$

Antar at vannsonen har kontakt med sjøvann.

$\gamma_{tw}$  = relativ tetthet formasjonsvann

$H$  = dybde (fra overflata til oljesonen).

$\rho_{sw} = 1,02 - 1,029$  (sea water).

### Trykk ved brønnehodet

Neglesjer friksjonstap, Trykk ved brønnehodet,  $P_{wh}$  for brønn under produksjon ved brønntrykk  $P_{wf}$ .

SI:  $P_{wh} = P_{wf} - \rho_0 g H = P_{wf} - 9,81 \times \gamma_0 \times H \text{ [kPa]}$

US:  $P_{wh} = P_{wf} - 0,434 \times \gamma_0 \times H \text{ [Psi]} \quad [H \text{ i ft}]$

Nivå kokingen starter i prod. rør

$$P_b = P_{wf} - \rho_0 g (H - y)$$

$y$  = dybde under overflate/brønnehodet for start kokin.

$$y = H - \frac{P_{wf} - P_b}{9,81 \cdot \gamma_0} \text{ [m]}$$

$$y = H - \frac{P_{wf} - P_b}{0,434 \times \gamma_0} \text{ [ft]}$$

$$1 \text{ lb}_f = g \times 1 \text{ lb}_m = 32,17 \text{ ft/s}^2 \times 1 \text{ lb}_m = 32,17 (1 \text{ lb}_m \text{ ft}) / \text{s}^2$$

## Reservoir deliverability

Drivkraft - "Trykkgradient"

$$\frac{\partial P}{\partial r}, \quad \Delta P = P_e - P_{wf}$$

Transient flow (3) : Strømningsmodell olje.

For flow fra oljebrønn [stb bbl/d]

$$q_o = \frac{k \cdot h \cdot (P_i - P_{wf})}{162,6 B_o \mu_o \left( \log t + \log \frac{k}{\phi \mu_o c_t r_w^2} - 3,23 + 0,87 \cdot S \right)}$$

$P_i$  : initielt reservoir trykk

$t$  : tid [time]

$\phi$  : porositet

$c_t$  : total kompressibilitet

$S$  : skin faktor.

Transient flow (4) : strømningsmodell gass

Gassbrønn; fra transient flow inn i brønnen :

$$q_g = \frac{k \cdot h \cdot (m(P_i) - m(P_{wf}))}{1,638 \cdot T \left( \log t + \log \frac{k}{\phi \mu_g c_t \cdot r_w^2} - 3,23 + 0,87 \cdot S \right)}$$

$T$  = absolutt temperatur i  $^{\circ}R$ .

$m(P)$  = reellgassens pseudotrykk definert av :

$$m_P = \int_{P_b}^P \frac{2P}{\mu \cdot z} \cdot dP$$

Steady state flow

Trykk innenfor hver sone i reservoaret er konstant over tid

For et oljereservoar og via Darcy's lov strømningsrate inn i brønnen.

$$q_o = \frac{k \cdot h \cdot (P_e - P_{wf})}{141,2 B_o \mu_o \left( \ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)}$$

$P_e$  : reservoir trykk mot grensesjikt  $i$

avstand  $r_e$  fra brønn

### Strømning av olje ved steady state:

$$q_o = \frac{k \cdot h \cdot (p_e - p_{wf})}{141.2 \cdot B_o \cdot \mu_o \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S \right)}$$

### Strømning av olje ved pseudo steady state.

$$q_o = \frac{k \cdot h (\bar{p} - p_{wf})}{141.2 \cdot B_o \cdot \mu_o \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right)}$$

$\bar{p}$ : midlere trykk

trykket på et hvilket som helst punkt i brønnen utvikler med en konstant rate som funksjon av tid.  $\Rightarrow$  Pseudo steady state

Pseudo steady state opptrer når det ikke er tilstrekkelig trykkstøtte i reservoaret, slik at trykket synker over tid.

### Før gassbrønn

$$q_g = \frac{k \cdot h (m(p_i) - m(p_{wf}))}{1.424 T \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S + Dq_g \right)}$$

$D$  = non-darcy flow koeffisient

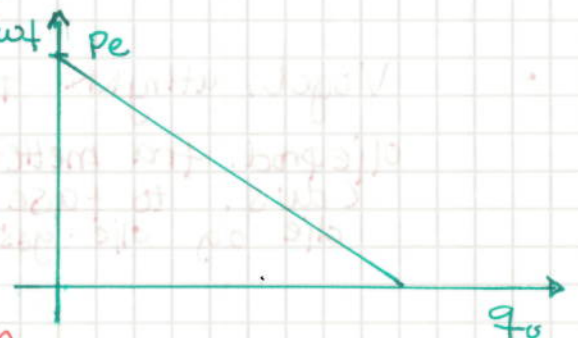
### Inflow performance relation, IPR

IPR nyttes for å evaluere leveringsevne av HC fluid.

gir grafisk representasjon av bunnhulls trykket,  $p_{wf}$  ved produksjons betingelser og prod. rate  $q_o$  av HC væske

en fase olje i reservoaret  $\rightarrow p_{wf}$

$\rightarrow$  når en synker trykket i brønnen øker produksjonen. Utstrømningsraten øker med økende trykkforskjell mellom reservoar og brønn.



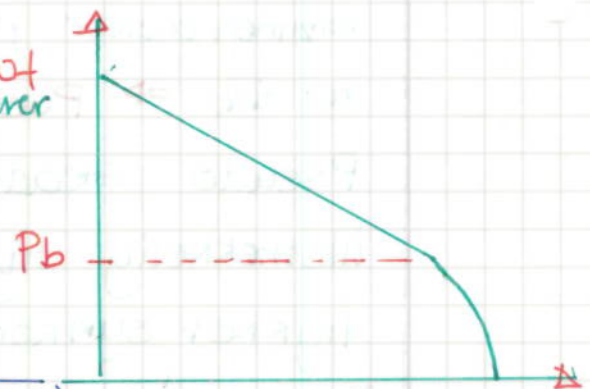
Kurvens **stigningsgradiant** angir produktivitets indeks  $PI=J$

$$q = J (P_e - P_{wf})$$

IPR utvikling over tid - en fase pseudo steady state.  
 med  $J \approx$  konstant og pseudo steady state entase olje produksjon vil IPR-kurvene parallell forskyves mot lavere nivå, etter hvert som trykket synker.

IPR kurve for oljebrønn.

Ved  $P_b$  kommer en inn i to-fase området og en produserer mer og mer gass i forhold til olje.



$$J = \frac{q}{(P_e - P_{wf})} = \frac{k \cdot h}{141.2 \cdot B_o / U_o \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - 0.75 + S \right)}$$

for pseudo steady state flow.

typisk IPR kurve for oljebrønn med prod. i entase og to-fase området.

IPR - relasjoner fra test data

- Entase olje  $P_{wf} > P_b$   $q_0 = J (P_e - P_{wf})$
- To-fase (olje og gass) Bureau of Mines (BoM)  
 Benyttes hovedsaklig for brønner med gass (entase).  
 $q_0 = C (P_e^2 - P_{wf}^2)^n$   
 empiriske konstanter  $0.5 < n < 1$ ,  $n$  og  $C$  er det. av  $q_{max}$   $P_{wf} = 0$
- Fetkovich:  $\frac{q_0}{q_{max}} = \left\{ 1 - \left( \frac{P_{wf}}{P_e} \right)^2 \right\}^n$
- Vogel, uttrykk for olje prod. fra mettet olje res. (dvs. to fase) olje og olje-gass.  
 $\frac{q_0}{q_{max}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_e} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_e} \right)^2$   
 $(P_b \approx P_e) \Rightarrow$  for å finne  $q_{max}$   
 $q_{max} = \frac{J \cdot P_e}{1.8}$  (steady state)

## IPR kurver fra reservoar data

Forutsetter homogene reservoar med uniform og veldetisert porositet og permeabilitet og idell strømming gjennom hele produksjonszonen.

↳ virkeligheten IPR anslag forbundet med usikkerhet.

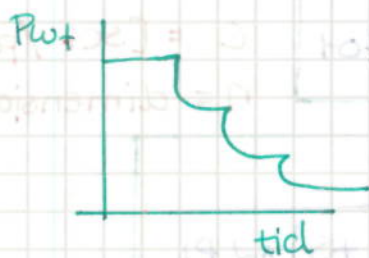
⇒ hovedfokus på IPR kurver fra brønnstest data.

## Bestemmelse av IPR kurver fra testdata.

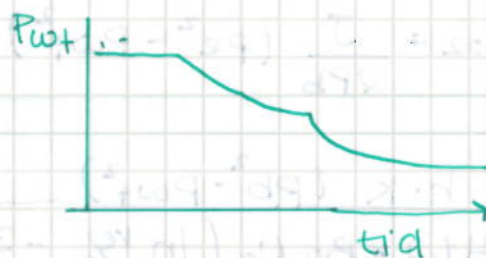
Testene bør gå over så lang tid at en kan anta tilnærmet konstant trykk innenfor testperioden (pseudo steady state).

Hvor lang tid det tar for å etablere konstant trykk er avhengig av permeabiliteten i reservoaret

↳ høy permeabilitets reservoar kan nå pseudo steady state etter kort tid og vice versa.



høy permeabel



lavpermeabel

## Konstruksjon av IPR kurver fra test data.

$$q_o = J(P_e - P_{wt}) \quad \text{entase olje}$$

$$q_{o2} = q_{max} (1 - 0,12(P_{wt}/p_b) - 0,8(P_{wt}/p_b)^2) \quad \text{totase olje gas}$$

↳ Kan J bestemmes fra test data der  $q$  måles ved  $P_{wt}$   
 Dersom entase olje  $P < P_b$ , må en betrakte strømming og produksjon i de to fase områdene hver for seg.

→ entase olie ( $P_{wt} < P_b$ )

1)  $P_{wt} = P_b$ , vil begge uttrykkene være gyldig;

$$q_o = q_{o1} = q_{o2} = q_{opb}$$

2)  $q_{max}$  i uttrykket over er sett relativ til produksjonsraten,  $q_{o2}$ , i  $P_{wt} = P_b$ .

$$q_{o,tot} = q_{o1} + q_{o2} = q_{o1} + q_{max,2} \left(1 - 0,2 \left(\frac{P_{wt}}{P_b}\right) - 0,8 \left(\frac{P_{wt}}{P_b}\right)^2\right)$$

3) For å finne produksjonsraten ved  $P_b$ , må en finne et uttrykk for produksjonsindeksen  $J$ ,

$$J = \frac{1,8 \cdot q_{max,2}}{P_b}$$

IPR relasjoner ved kokepunktet

$$q = C (P_e^2 - P_{wt}^2)^n$$

for gass og prod. av olie i 2 fase området

ved derivasjon av  $P_{wt}$

$$C = \frac{J}{2P_b} \Rightarrow q_{o2} = \frac{J}{2P_b} (P_e^2 - P_{wt}^2)$$

$$q_o = q_{o2} = \frac{J}{2P_b} (P_e^2 - P_{wt}^2) + q_{o1}$$

$$C = [scf / psi^a \cdot \text{døgn}]$$

$n = \text{dimensjonsløs.}$

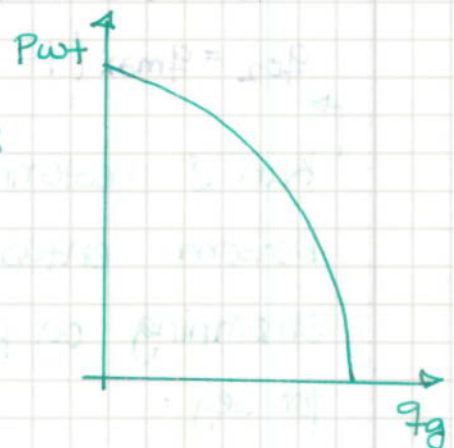
$$q_{o2} = \frac{h \cdot K (P_b^2 - P_{wt}^2)}{141,2 \times B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S\right) \times 2P_b}$$

→ gjelder for olje prod. fra reservoar i to fase området.

IPR kurve gassproduksjon

Selv om gassen strømmer som et entase fluid, får vi ikke en rett linje. Skyldes - friksjonsbidrag, delvis laminær delvis turbulent

Bureau of Mines korrigerer for dette.





## IPR utvikling over tid - enfase pseudo steady state

$$\left. \begin{aligned} q_0 &= J (p_e - p_{wt}) \\ q_0 &= \frac{k \cdot h \cdot (p_e - p_{wt})}{141,2 \cdot B_o \mu_o \left( \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + S \right)} \end{aligned} \right\} \text{Kombinert gir}$$

$$J = \frac{k \cdot h}{141,2 \cdot B_o \mu_o \left( \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + S \right)}$$

ved produksjon fra undermettet olje der produktet  $B_o \mu_o$  kan betraktes  $J \approx$  konstant

Brønntrykk ved oppstart  $p_i = 5651$  psi

trykkstøtte  $\Rightarrow p_e$  synker med 195 psi per år

tid til å produsere ved platarate 600 stb/d

tør en når min trykki brønnen 1400 psia.

ved 600 stb/d  $p_e = 3500$  psia.

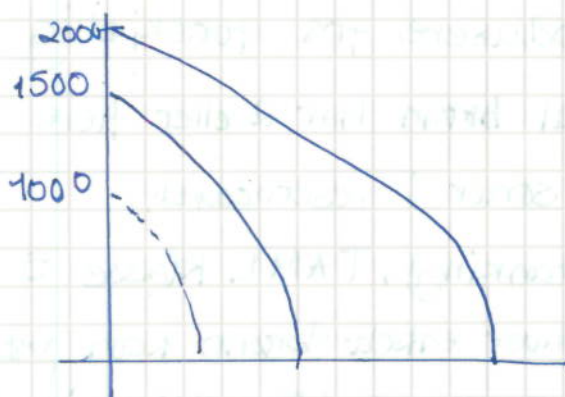
$$\Delta P = 5651 - 3500 = 2151$$

$$\Delta P / t = 2151 / 195 = 11 \text{ år}$$

## IPR utvikling over tid - tofase.

Når brønnen ikke har tilstrekkelig trykk støtte vil reservoar trykket falle over tid og prod. går ned.

- Ved lavere reservoartrykk må en ha større differential trykk for å oppnå samme produksjonsrate.



## Effekt av trykk på $\mu_0$ og $B_0$

Både  $\mu_0$  og  $B_0$  er relative konstante for trykk over kokepunktet, men endres når trykket i fluidet (res.) synker. Dersom en utfører beregninger på reservoar i metningsområdet (tofase olje-gass) må en ta hensyn til disse endringene.

→ en økning av viskositet med fallende trykk kan balansere mot en reduksjon i olje ekspansjonsfaktor  $B_0$ .

### Horisontale brønner

Brønnen har lengde  $L$  med forskjellig permeabilitet i horisontal,  $k_H$  og vertikal,  $k_V$  retning. (eliptiske isobarer)

$$q_0 = \frac{k_H \cdot h (p_e - p_{wf})}{141,2 \cdot B_0 \mu_0 \left\{ \ln \left[ \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right] + \frac{I_{ani} \cdot h}{L} \ln \left( \frac{I_{ani} \cdot h}{r_w (I_{ani} + 1)} \right) \right\}}$$

$$a = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \sqrt{\left[ \frac{1}{4} + \left( \frac{r_{eH}}{L/2} \right)^4 \right]}}$$
$$I_{ani} = \sqrt{\frac{k_H}{k_V}}$$

$I_{ani}$  betegner anisotropisk forhold mellom  $k_H$  og  $k_V$ .

$$J_H = \frac{q}{p_e - p_{wf}}$$

produktivitetsindeks for horisontal brønn.

→  $q_{max}$  mye høyere for horisontal brønn

## Multi laterale brønner

Gir muligheter for å produsere fra forskjellige lokasjoner i samme reservoar. Multilateral brønn har 2 eller flere forgreninger i kontakt med forskjellige soner i reservoaret.

Level 1 til 6 (complexity ranking), TAML Klasse 5 benyttes ofte. Reservoaregenskapene rundt hver enkelt brønn kan være forskjellige selv om de ligger i samme reservoar. (Kan deles inn i seksjoner)

# Skin faktor

6.

## mekanismer som gir opphav til skin

En sone rundt brønnen kan skades av

### - mekaniske krefter

- Knusing, kompaktering, oppspreking rundt brønnen
- Kollaps i svake lag av formasjonen
- Uheldig syrestimulering med svekking av sedimentstyrken

### - Fluid effekter

- endring i viskositet
- emulsjonsdannelse i reservoaret

### - Tetting av porer tra

- fine partikler
- utfelling på porevegg
- utfellinger av salter i porer
- Bakterie vekst

Alt over skin effekt gir

→ endring i fluid transport gjennom reservoaret.

Inntørrer korreksjon via skin faktor

effekt av skin: større trykkfall nødvendig for å gi ønsket IPR rate

Førhold som bidrar til skin

S er satt sammen av skin bidrag fra forskjellige effekter og kan uttrykkes som:

$$S = S_c + S_A + S_G + S_d + S_{dp} + S_a + S_b$$

$S_c$  = completion skin

$S_a$  = endring av permeabilitet

$S_A$  = ytre boundary layer geometri i skin

$S_G$  = skin fra grus pakke

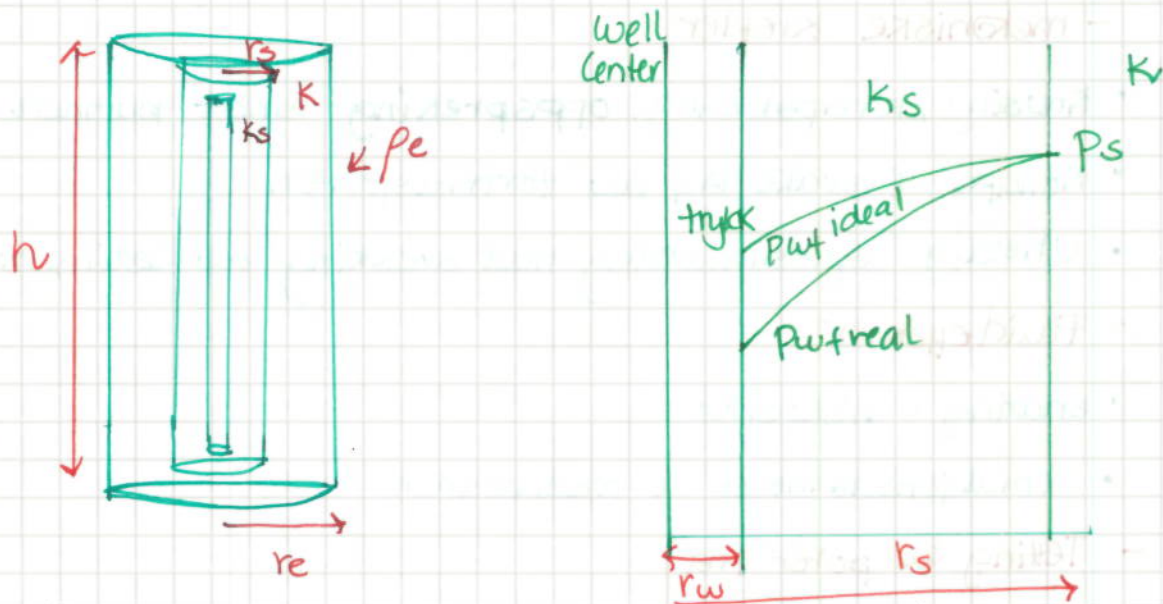
$S_b$  = blokkering av strøm.

$S_d$  = formasjons skade skin

$S_p$  = perforering skin

$S_{dp}$  = høy strømningshastighet inn mot og rundt perforering

## Skin zone



skin effekt gir endring av permeabilitet i nærbrønnområdet fra  $K$  i reservoaret til  $K_s$  i nærbrønnområdet.

- ⇒ Redusert  $K$  vil tære til at vi må bruke et høyere trykktall og et lavere brønntrykk  $K_v$ . ( $P_{wf, reell}$ ) enn det idelle.
- ⇒ løsning: syrebehandling gir høyere  $K_s$ .

skin tærer til et ekstra trykktall  $\Delta P_s$ , ut over det forventede.

### Hawkins formel for skin

skin angir ekstra motstandsbarriere mot strømming fra reservoar og inn mot brønn. Om en vil oppnå en gitt strømningsrate  $q_0$ .

$$\Delta P_s = P_{wf} - P_{wf, s} = (P_{wf, idell} - P_{wf, reell})$$

$$q_0 = \frac{K \cdot h}{141,2 \cdot B_o \mu_o} (P_s - P_{wf, idell}) \quad , \quad q_0 = \frac{K_s h}{141,2 \cdot B_o \mu_o} (P_s - P_{wf, reell})$$

↑ uten skin

↑ med skin

Kombinert gir  $\rightarrow$

$$s = \left( \frac{K}{K_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w}$$

Hawkins formel.

### Permeabilitetsforringelsesfaktor $K/K_s$ .

Tilsynelatende  $K_v$  i skin sone  $K_s$ , må være mindre enn  $K$  i uskadet res. sone. Ved  $K_s = K$ ,  $s = 0$ . Ved skin effekter i nærbrønnområdet må  $K/K_s > 1$  dvs. sone har redusert  $K$ .  $s$ , maks 2 til 5 fot.

## permeabilitet forringelse vs utstrekning av skadet sone

- en dobling av  $k/k_s$  gir ca. en dobling av skin faktor.
- En 18 dobling av  $r_s$  gir ca. en dobling av skin faktor.
- ⇒  $k/k_s$  har mye større effekt på skin faktor  $S$ , enn inntregningsdybden i reservoaret. Skin faktor utøver hele sin effekt i snevert området noen få fot ut fra brønnen.

## IPR ved produksjon av olje

- $r_{aw} : 0,61 r_e$  fra brønnen.

Ved steady state.

$$\ln\left(\frac{0,61 \cdot r_e}{r_w}\right) = \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0,15$$

$$q_o = \frac{k \cdot h \cdot (\bar{p}_e - p_{wt})}{141,2 \cdot B_o \mu_o \ln\left(\frac{r_e}{r_w} - 1/2\right)}$$

Steady state.

- ved pseudo steady state

tant  $r_{aw} = 0,472 r_e$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0,75$$

$$q_o = \frac{k \cdot h \cdot (\bar{p}_e - p_{wt})}{141,2 \cdot B_o \mu_o \left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 3/4\right)}$$

pseudo steady state.

$\bar{p}_e$  steady state

høyere enn for pseudo steady state.

## Beregning av skin fra reservoar og test data

foregående likning og  $q_o = J(\bar{p}_e - p_{wt})$   
settes lik hverandre

$$S = \frac{1}{J} \cdot \frac{k \cdot h}{141,2 \cdot B_o \mu_o} - \left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0,75\right)$$

## Strømning olje med og uten skin strømningseffektivitet $E_F$

$$q_o = \frac{k \cdot h \cdot (\bar{p}_e - p_{wt})}{141,2 \cdot B_o \mu_o \ln\left(\frac{r_e}{r_w} - 0,75\right)} = J_{idell} (\bar{p}_e - p_{wt})$$

$$q_o = \frac{k \cdot h \cdot (\bar{p}_e - p_{wt})}{141,2 \cdot B_o \mu_o \ln\left(\frac{r_e}{r_w} - 0,75 + S\right)} = J_{reell} (\bar{p}_e - p_{wt})$$

$$E_F = \frac{q_{reell}}{q_{ideell}}$$

### strømnings effektivitet ved skin

Uttrykke effekt av formasjonsskade samt. stimulering ved hjelp av en strømnings effektivitet  $E_F$ .

$$E_F = \frac{q_{reell}}{q_{ideell}} = \frac{P_e - P_{wf}}{P_e - P_{wf,ideell}} = \frac{\ln(r_e/r_w) - 0,75}{\ln(r_e/r_w) - 0,75 + S}$$

$$E_F = \frac{7}{7+S} \text{ tommeltinger regel.}$$

Damage ratio,  $R_D$   $R_D = \frac{1}{E_F}$

En annen metode å inkludere effekten av skin er å innføre en tilsynelatende brønn radius  $r_{wa}$ .

$$r_{w'} = r_{wa} = r_w \cdot e^{-S}$$

for  $S=0$   $r_{w'} = r_w$   
 $S > 0$   $r_{w'} < r_w$   
 $S < 0$   $r_{w'} > r_w$

$$E_F = \frac{P_e - P_{wf,ideell}}{P_e - P_{wf,reell}}$$

### Brønn karakteristikk

	$\Delta P_s$	$S$	$E_F$	$R_D$	$r_{wa}$
Damaged	$\Delta P_s > 0$	$S > 0$	$E_F < 1$	$R_D > 1$	$r_{wa} < r_w$
Unaltered	$\Delta P_s = 0$	$S = 0$	$E_F = 1$	$R_D = 1$	$r_{wa} = r_w$
Stimulated	$\Delta P_s < 0$	$S < 0$	$E_F > 1$	$R_D < 1$	$r_{wa} > r_w$

skin effekter relateres alltid til reservoar data tra upåvirket reservoar med  $K_v$  bestemt fra kjerne prøver. Skin faktor kompensere for ikke ideell oppptøsel i den reelle verden.

trykktap grunnet skin :

$$S = \frac{k \cdot h}{141,2 \cdot B_o \mu_o q_o} \Delta P_s$$

$\Delta P_s$  uttrykkes i form av  $q_o$ . (velger deretter verdier for  $q_o$ ).

## Pertorening av brønn

- De fleste brønner i dag har produksjons casingen sementert fast mot bergarten i reservoaret. Der er derfor ingen kontakt mellom brønn og reservoar
- Casing og sementbarriere må pertores for å oppnå kontakt. Dette utføres idag med pertoreningskanoner.
  - En enkelt kanon, liner av metall (kobber) som er holdt på plass av detonerende eksplosiv.
  - Ladningen er formet slik at det dannes en penetrerende jetstråle som skytes inn gjennom casing, sement og inn i reservoaret.
  - Hastigheten på jetstrålen er over 5000 m/s og penetreeringskraften blir stor.
  - Etter pertorening kan den ubrukte kanonens kutter og slippes eller heises opp og lades på nytt.

## Pertorening av brønn - type teknikk

Forskjelle teknikker og utstyr for pertorening.

- Wireline-conveyed gun
- Wireline-conveyed through tubin gun
- tubing - conveyed gun
  - En kanonholder med stor diameter som heises ned gjennom casingen fra toppen fra en elektrisk drevet wireline. Pertoreningen utføres ved overbalansert trykk
  - liten diameter kanon som tøres inn via X-mastreet og heises ned gjennom produksjonsrøret og ned i brønnen under prod.pakningen. Fyres normalt ved underbalansert tilstand
  - Stor diameter kanon montert på et rørstykke nederst på prod.røret nede i brønn, under prod. pakningen. enten under eller overbalansert.

## Planlegging

- bestemmer styrke på ladning
- hvor langt inn i formasjonen en kan trenge
- Perforeningsretning og tetthet må vurderes særskilt for reservoar

## G. Hekt av backflushing

- Etter perforening ligger løse slaggrester og knuste partikler igjen inne i perforeningskanalen
- Slaggrester og småpartikler blir vasket ut idet kanalen starter å produsere og HC fluid strømmer ut av kanalen.

## Perforeningskanon

Bak hver sirtel ligger en ladning, ladningene er både høydeforskjvet og faseforskjvet.

### Flow geometri rundt perforeningskanal

- Strømning av fluid gjennom perforeningskanalene påvirker produktiviteten ved å endre lokal flow geometri nær brønnhullet
- Perforening påvirker skin faktorer, sp som avhenger av perforenings geometri og perforeningskvaliteten.

## Perforeningsgeometri

Dersom kanonen har liten diameter sammenlignet med casingen kan den utstyres med en posisjonsendingsenhet som kan sørge for at den holdes sentrert i casingen eller at den plasseres eksentrisk.

### High shot - density gun

Perforeningskanon med mange ladninger pr. lengdeenhet og med små faseforskyvninger. Perforeningstetthet øker produktivitet inntil en viss øvre tetthetsgrense.



## viktige faktorer ved pertorening

- 1) Penetrasjonsdybden - jo dypere jo bedre effekt
- 2) Diameter til pertoreningskanal - større diameter, økt innstrømnings effekt.
- 3) skudd tetthet - jo flere skudd per fot jo bedre.
- 4) Fasevinkel mellom ledninger - clårligste valget er  $0^\circ$  faseforskjning.
- 5) Avstand mellom pertoreningskanalene - en optimal tetthet pr. lengdeenhet og en optimal fasevinkel.

Jetpertorening: brønnen må være balansert ved pertorening slik at det ikke strømmer røske på uheldig måte i den ene eller andre retningen.

pertorening av horisontal brønn: en kan benytte en serie med korte kanoner som er orientert med ledninger i ønsket retning

## Problemer forbundet med pertoreningen

- kan oppstå under/etter pertorening  $\Rightarrow$  plugging av kanalveggene.
  - Pertoreningskanalene må renses etter pertoreningen er utført
- Underbalansert pertorening som gir en tilbakestrøm av fluid etter at trykkbølgen fra pertoreningssalven har opphørt.

## Redusere skin

Det beste middelet for å oppnå lav skin er å pertorere med et visst undertrykk (underbalanse) i brønnen.

Undertrykk er bestemt av 2 hovedfaktorer,

1) permeabilitet  $K_r$

2) viskositet  $\mu$

høy  $K_r$  i reservoaret begrenser en undertrykket etter størrelsen på  $K_r$ . Ved høy  $\mu$  trengs større undertrykk.

## effekten av undertrykk

- Statisk undertrykk (pumper lettere væske/fluid)
  - Dynamisk undertrykk. Litte trykkforskjell mellom brønn og reservoar ved start men perforerer løbnsert
- Mest brukt dynamisk undertrykk  $\Rightarrow$  optimal trykkforskjell  $\Rightarrow$  perforeringene blir bedre rensert, resultat bedre.  
Gir også lavere skin.

## KAP 4: TPR / VFP Kurver

### Fluidstrømning og strømningsregimer

- Strømmen inn til brønn og opp gjennom produksjonsrør:
  - (a) enfase (olje eller gass)
  - (b) to-fase (olje-gass, olje-vann)
  - (c) flerefaser (olje-gass vann faststoff)

$\rightarrow$  Strømningsregime og strømningsgeometri er bestemmende for hvordan fluidet oppfører seg under transporten.

Antar Newtonsk strømning, men injeksjons væsker i forbindelse med fraktuering kan ikke ha Newtonske egenskaper.

- Fleste injeksjonsbrønner kommer injeksjonsfluidet som enfase enten gass eller ren væske.

oljen er tyngre enn gassen og olje med mindre gass får større tetthet og krever større trykk for å løfte fra bunnen til overflata.

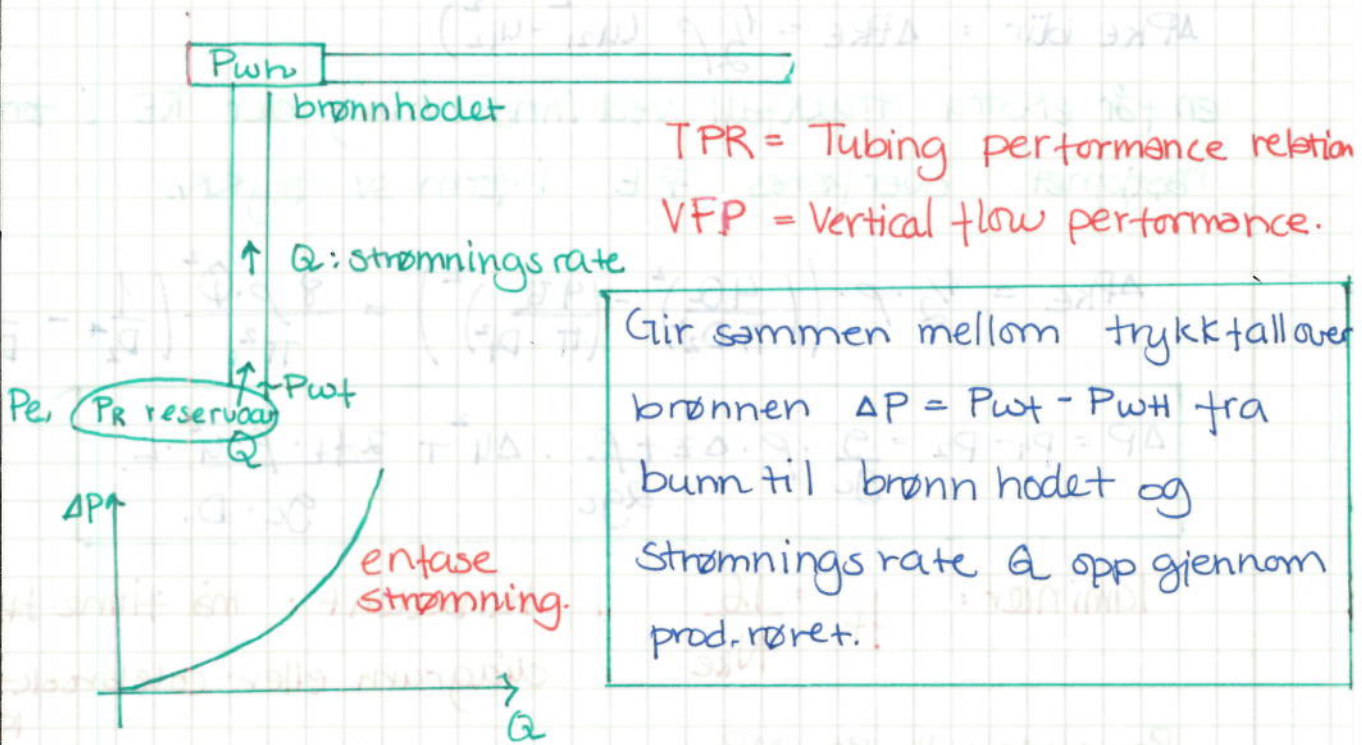
Dette gir utslag i TPR / VFP <sup>kurvens</sup> fasong.

### Trykktap over brønn og prod. rør.

Det totale trykktapet over brønn / prod. røret er bestemmende for balansen mellom trykk nede i brønn og trykk ved brønnhode.

Trykktapet over prod. røret består av et hastighetsledd, et løfte ledd og et friksjonsledd.

- En-fase strømming av væsker er lettest. Væsker er relativt inkompressible ( $\approx$  konstant tetthet og volumendring) og hastighetsendring under vertikal løft neglesjeres.
  - For horisontale brønner og enfase væske blir trykktall fra løft null og det er kun friksjonsleddet som bidrar med trykktall.
  - For enfase gass (kompressibelt fluid), er tettheten en funksjon av trykk og temperatur og disse endrer seg.
- 4.1 TPR/VFP: strømming opp gjennom brønn til overflata.



4.2 Entase væske strømming

US:

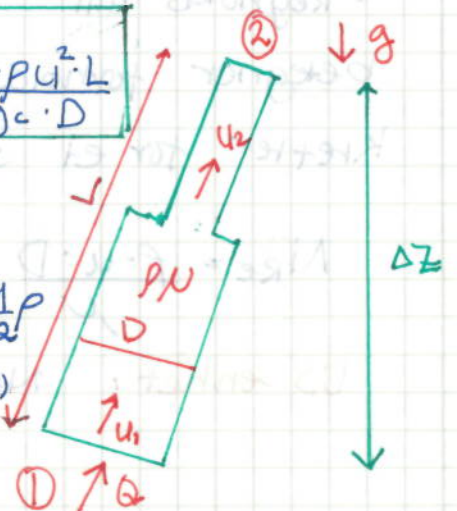
$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{g}{g_c} \cdot \rho \cdot \Delta z + \frac{\rho}{2g_c} \cdot \Delta u^2 + \frac{2f_F \cdot \rho u^2 \cdot L}{g_c \cdot D}$$

$g_c = 32,17 \text{ ft/s}^2$  lbm = pund masse  
 lb<sub>f</sub> = pund kraft

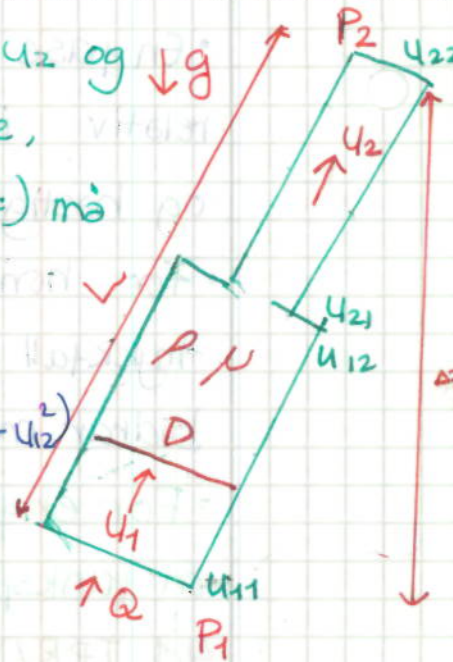
SI:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (u_2^2 - u_1^2) + \frac{4}{D} \cdot f \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 \cdot L$$

Hastighet  $u = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi/4 D^2}$



- Røret til høyre har innsvevning og  $u_1$  og  $u_2$  og ligningen 7-15 og 7-15a er ikke identiske, og treghetsledd ( $\Delta P_{KE}$ ) og friksjonsledd ( $\Delta P_F$ ) må behandles separat for hver rørseksjon og hver rørdiameter.



$$\Delta P_{KE} = \frac{1}{2} \rho (u_{12}^2 - u_{11}^2) + \frac{1}{2} \rho (u_{22}^2 - u_{21}^2) + \rho (u_{21}^2 - u_{12}^2)$$

$$\Delta P_F = \frac{4}{D_1} f_{f1} \cdot \frac{1}{2} \rho u_1^2 + \frac{4}{D_2} f_{f2} \cdot \frac{1}{2} \rho u_2^2$$

Dersom en antar inkomprissibelt fluid

$$u_{11} = u_{12} \quad \text{og} \quad u_{21} = u_{22}$$

$$\Delta P_{KE} \text{ blir: } \Delta P_{KE} = \frac{1}{2} \rho (u_{21}^2 - u_{12}^2)$$

en får ekstra trykkfall ved innsvevning der KE i form av hastighet overføres PE i form av trykk.

$$\Delta P_{KE} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left( \left( \frac{4Q}{\pi D_2^2} \right)^2 - \left( \frac{4Q}{\pi D_1^2} \right)^2 \right) = \frac{8 \rho Q^2}{\pi^2} \left( \frac{1}{D_2^4} - \frac{1}{D_1^4} \right)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho}{g_c} \cdot \Delta z + \frac{f}{2g_c} \cdot \Delta u^2 + \frac{2f_t \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{g_c \cdot D}$$

laminær:  $f_t = \frac{16}{N_{Re}}$ , turbulent: må finne  $f_t$  fra diagram eller Colebrook-White korrelasjon

### Reynolds tall, $Re$ , $N_{Re}$

• Reynolds tall er en dimensjonsløs størrelse som betegner forholdet mellom treghets krefter og viskøse krefter for et strømmende fluid.

$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} = \frac{4 \cdot \rho \cdot q}{\pi \cdot \mu \cdot D} \quad \text{(kan nyttes direkte i SI-system)}$$

US-enhet:  $N_{Re} = \frac{1488 \cdot \rho \cdot q}{\mu D}$   $q$ : bbl/d  $\mu = cP$   
 $D$ : inch

- Veggtykkelse og styrke øker som funksjon av vekt når ytre diameter er gitt.

- Drift diameter er en betegnelse på minste toleranse for oppgitt diameter

$$1 \text{ barrel} = 5,6147 \text{ m}^3$$

$\epsilon$  = ruhet (relative roughness)

fra eksemplet : Friksjonsleddet utgjør bare 1,2% av det totale trykkfallet

⇒ Friksjonen i vertikal brønn synes å spille en mindre rolle enn opprinnelig antatt. [ved entase væske].

⇒ Hydrostatisk trykkgradient  $\left[ \frac{g}{g_c} \rho \cdot \Delta z \right]$  er derfor viktigst ved vertikal løft av væsker med tetthet av betydning.

- Friksjonsleddet øker med hastigheten kvadrert, så den har større betydning ved store hastigheter.

[maks 5 m/s]

- Større diameter gir redusert hastighet ved gitt volumrate.

- I horisontale brønner vil trykkfall grunnet friksjon være viktigere enn det hydrostatiske leddet som er 0 over hele horisontale lengden.

Faktorer av betydning for friksjonstap,  $\Delta P_f$

$$\Delta P_f = \frac{2 \cdot f \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{g_c \cdot D} \quad \text{friksjonstapet øker } \propto \text{ med hastigheten kvadrert.}$$

- Friksjonstapet endres  $\propto$  med faktor  $\frac{q^2}{D^5}$  utvidelse av rør diameter vil ha stor reduksjons effekt enn redusert volumflow. For lav  $q$  væske kan en to fasestrøm føre til separasjon mellom væske og gass,  $\rho$  øker av oliefasen og dermed økning av H.S trykk

## Faktorer av betydning for det totale trykktap, $\Delta P$

- Kinetiske leddet i trykktapslikningen kan neglisjeres hvis det ikke er innsnevringar som medfører hastighetsendring over en seksjon og  $\Delta P$  forenkles til

$$\Delta P = \frac{\rho}{g_c} \cdot \frac{g \cdot \Delta z + 2 f \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{g_c \cdot D}$$

- Dersom hastigheten er lav kan friksjonsleddet neglisjeres og trykkløstet topp-bunn er da kun relatert til hydrostatisk trykk.
- Forenklet trykktapslikning  $\Delta P = \Delta P_G + \Delta P_f$  for å estimere punkter på en TPR kurve.

## En fase strøm gass

- Starter med  $\Delta P_{pe}$  og  $\Delta P_f$ . På differensialform kan lig. 4-1 med  $\Delta P_{pk}$  leddet ekskludert omskrives:

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{g}{g_c} \cdot dz + \frac{f m u^2 \cdot dL}{2 \cdot g_c \cdot D} = 0$$

$$dz = dL \cdot \sin \theta$$

## en fase strøm gass, forenklet

Ser på endring i potensiell energi,  $\Delta P_{pe}$  og friksjon,  $\Delta P_f$  for seg.

$$\Delta P = \Delta P_{pe} + \Delta P_f = \frac{\rho}{g_c} \cdot g \cdot \Delta z + \frac{f m \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{2 g_c \cdot D} \quad [US]$$

$$\Delta P = \rho g \Delta z + \frac{f m \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{2 D} \quad [SI]$$

Gassen har temperatur  $T_2$ , trykk  $P_2$ , tetthet  $\rho_2$  og  $Z_2$  i brønn temp.  $T_1$  trykk  $P_1$ ,  $\rho_1$  og  $Z_1$  ved brønnhodet.

Forenkler ved å betrakte et gjennomsnitt  $T_{av}$ ,  $P_{av}$

$$P_{av}, Z_{av}, \quad X_{mean} = \frac{X_1 + X_2}{2}, \quad X_{logmean} = \frac{X_2 - X_1}{\ln(X_2/X_1)}$$

Entase strøm gass.

Ser først på metode med gjennomsnittsverdier for  $T$ ,  $p$  og  $Z$ .

$$N_{re} = \frac{20,09 \cdot \gamma_g \cdot q}{\mu \cdot D} \quad \begin{array}{l} [q = M \text{ scf/d}] \\ [D = \text{tommer}] \end{array}$$

Fra gass loven  $\rho_g = \frac{28,97 \cdot \gamma_g \cdot P}{ZRT}$

Gasshastigheten relateres til volum ved standard bet.

$$\frac{ZRT}{PV} = \frac{Z_{sc} \cdot R \cdot T_{sc}}{P_{sc} \cdot V_{sc}} \quad [Z_{sc} = 1]$$

$$V = \frac{V_{sc} \cdot P_{sc} \cdot ZRT}{P \cdot Z_{sc} \cdot R \cdot T_{sc}} = V_{sc} \cdot Z \left( \frac{T}{T_{sc}} \right) \left( \frac{P_{sc}}{P} \right)$$

$$q_{sc} = \frac{\partial V_{sc}}{\partial t} \Rightarrow q = q_{sc} \cdot Z \left( \frac{T}{T_{sc}} \right) \left( \frac{P_{sc}}{P} \right)$$

$$u = \frac{4}{\pi \cdot D^2} \cdot q = \frac{4}{\pi D^2} \cdot q_{sc} \cdot Z \left( \frac{T}{T_{sc}} \right) \left( \frac{P_{sc}}{P} \right) \quad [q_{sc} \text{ måles i brønntester}]$$

$$\Delta P_f = \frac{f_m \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{2 g_c D} \quad \text{som innsatt for } u \text{ gir:}$$

$$\Delta P_f = \frac{8 \cdot f_m \cdot \rho_{mean}}{\pi^2 \cdot g_c \cdot D^5} \left( q_{sc} \cdot Z_{mean} \left( \frac{T_{mean}}{T_{sc}} \right) \left( \frac{P_{sc}}{P_{mean}} \right) \right)^2 \cdot L$$

moody's friksjonsfaktor  $[f_m = 4 \cdot f]$  → fanning's friksjonsfaktor.

$$\Delta P_{PE} = \frac{\rho_{mean} \cdot g}{g_c} \cdot L \sin \theta$$

$Z_{mean}$  kan bestemmes gratis (handout 2)

- 1) For entase gass bidrar endring i potensiell energi med største del av trykkallet.  $\Delta P_{PE}$  gjennom prod. røret tilsvarende som for entase olje.

- 2) For en fase gass kan ikke bidraget fra  $\Delta P_f$ , neglesjeres som for en fase olje.
- 3) Endring i kinetisk energi  $\Delta P_{KE}$ , kan neglesjeres i begge tilfelle og det er i all hovedsak ved innsnevninger trykktall fra endring i kinetisk energi vil være av betydning (over dysse ventiler, blendeplater).

### Oppsummering: trykktall i en fase strømning

Total trykk gradient:

$$\frac{dP}{dz} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_{pe} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{KE} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_f$$

Friksjon - Reynoldstall

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad \text{Kinematisk viskositet } \nu = \mu/\rho$$

$Re < 2000$  : Laminær strømning  $\longrightarrow$

$2000 < Re < 4000$  : overgang  $\rightsquigarrow$

$Re > 4000$  : Turbulent strømning  $\rightsquigarrow$

$$f = 16/Re$$

### Oppsummering: friksjonsfaktor

Turbulent strømning  $f = C \cdot Re^{-n}$  (for glatte rør)

2 ulike former for friksjonsfaktor  $\downarrow$  oppgitt i tabell

Fanning friksjonsfaktor:  $\frac{dP}{dx} = \frac{4}{D} \underbrace{\frac{16}{Re}}_{f_f} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2$

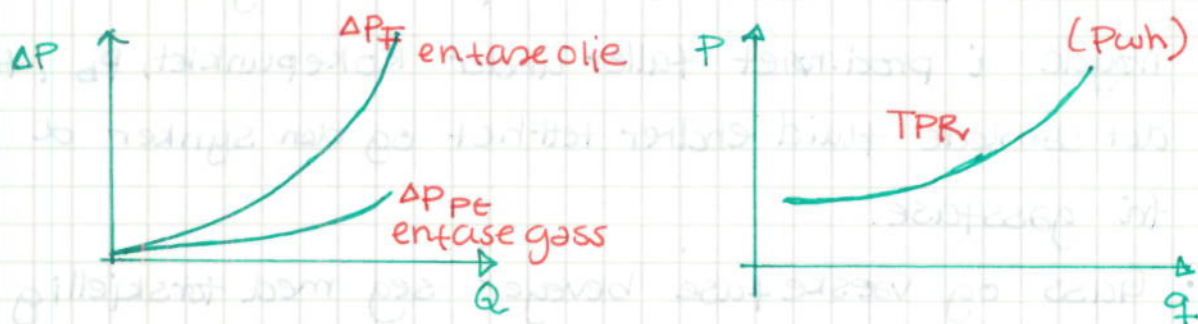
moody friksjonsfaktor,  $f_M$  :  $\frac{dP}{dx} = \frac{1}{D} \underbrace{\frac{64}{Re}}_{f_M} \cdot \frac{1}{2} \rho u^2$

$f_M$  også kalt Darcy

Weisbach friksjonsfaktor.



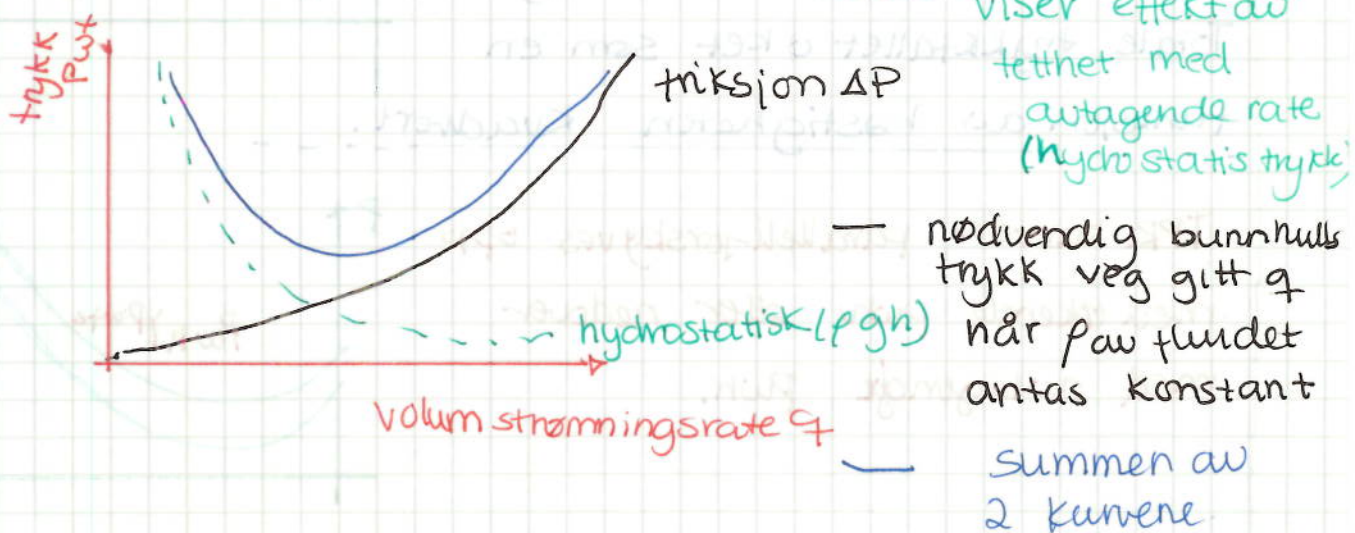
## Relasjon mellom trykktall og TPR



- Satt sammen av trykktall over prod. røret, trykk ved brønnhodet og trykk i brønn som funksjon av strømningshastighet.
- ved  $Q=0$ , trykk i brønn,  $P_w = \Delta P_{Pe} + P_{wh}$
- Økt + low betinges av økt trykk ved rørets innløp tilsvare trykket nederst i brønnhullet.
- TPR: Angir nødvendig innløpsstrykk ved gitt utløpsstrykk  $P_{wh}$  for alle verdier av  $Q$ .
- Økt utløpsstrykk,  $P_{wh}$ , gir økning i  $P_{wh}$  og TPR kurven forskyves oppover, motsatt ved redusert  $P_{wh}$ .

### TPR kurve: hydrostatisk vs. friksjonstap.

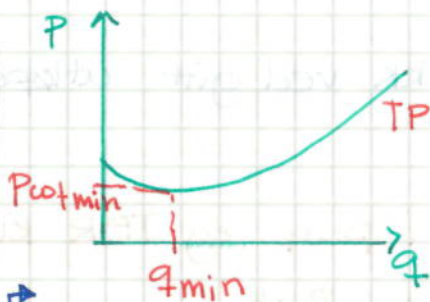
- Ved svært lave rater vil det hovedsaklig være gass som produseres mens oljen akkumuleres. På grunn av synkende trykk mot toppen og oljen vil koke slik at oljen i røret får økende tetthet.



## Flerfase strøm i brønn

- Gassen som løses ut av oljen når trykket ved en gitt høyde i prod.nøret faller under kokepunktet,  $P_b$ , fører til at det samlede fluid endrer tetthet og den synker  $\propto$  med mengde fri gassfase.
- Gass og væske fase beveger seg med forskjellig hastighet.
  - Ved høye produktionsrater kan gass og væske følge hverandre i balansert forhold.
  - Ved lave prod.rater vil gassen stige raskere enn væsken. Dette gir økning i hydrostatisk trykk.

## TPR/VFP ved totase væske-gass



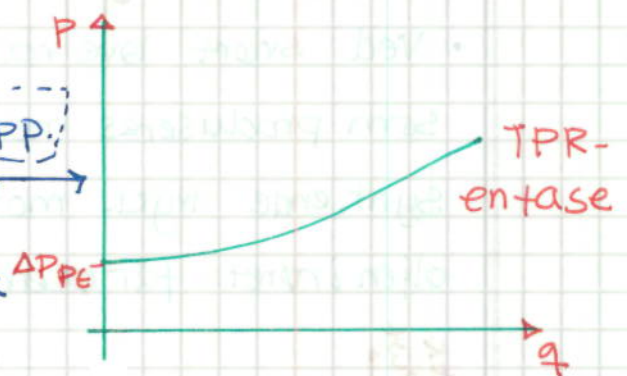
← - ved  $q_{min}$  blir prod.raten så lav at væsketåsen ikke greier å følge gassåsen,

→ gjennomsnittlig  $\rho$  øke og det statiske trykket i væskekolonnen øke

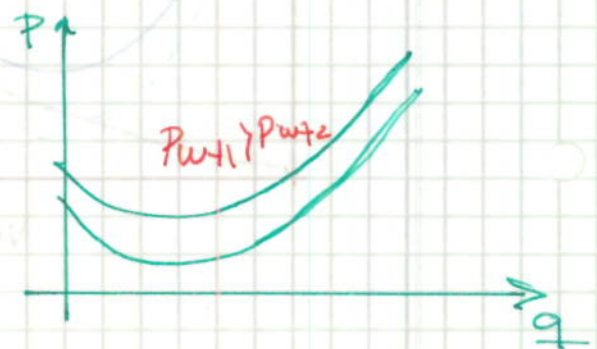
→ statisk trykk øker mer og mer, krever stadig høyere innløpsstrykk for å løfte oljetåsen opp.

- ved  $q=0$  er trykk forskjell mellom top og bunn lik hydrostatisk trykk

Totale trykketallet øket som en funksjon av hastigheten kvadrert.

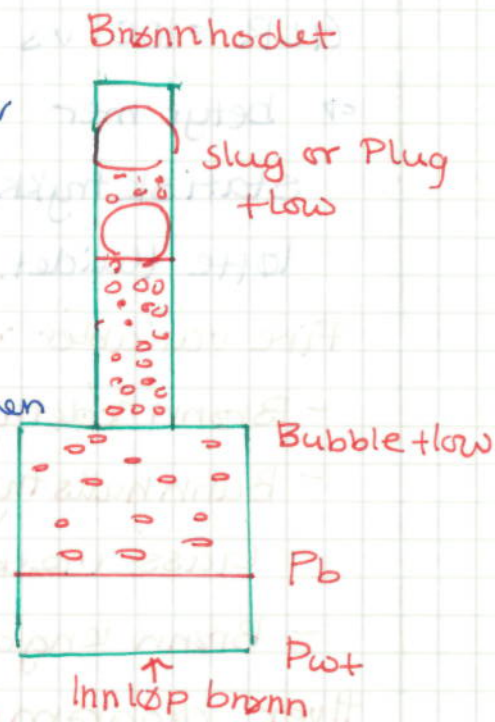


TPR kurven parallell-forskyves opp med økende  $P_{wh}$  eller nedover med avtagende  $P_{wh}$ .



## Flerfasestrøm i olje brønn

- Strømningsregimet er avhengig av mengdeforhold væske-gass og flowrateforhold væske-gass.
- Gass koker ut av olja, ved Pb og mengde gass øker oppover fluidkolonnen etterhvert som trykket synker og mer gass koker av.



- Det hydrostatiske trykket  $\Delta P_{pe}$  som kreves for å løfte olja øker og TPR kurven buer mer og mer opp etter som fluidhastigheten avtar.

- Annulær strømming og mist her vi ved høye gasserater i system der gassfasens volum er dominerende.

## To-fase trykk gradient

- Fasene (gass og væske) mikses til en homogen blanding, med  $\mu$  og  $\rho$  gitt ved fraksjon.
- Trykk gradient beregnes som for enfase strømming men med nye effektive fluidegenskaper ( $\rho$  og  $\mu$ )

## Bruk av trykk gradientkurver

- Ut fra disse kurvene kan man lett beregne trykk tallet i brønner under produksjon.
- Ved hjelp av slike kurver kan vi lett forstå effekten av rørdiameter, GOR, bruk av gassløst

GK er mindre brukt i dag (svart bok simulatorresultat)  
 Kurven gir trykket i et vertikalt prod. rør. som funksjon av dybden for forskjellige verdier av GLR.  
 (Gas Liquid Relationship)

GLR = 100 vs GLR = 200

⇒ betyr mer gass og lettere fluid og mindre hydrostatisk trykk. Dvs mindre brønntrykk kreves for å løfte fluidet.

Fire variabler:

- Brønnhodetrykk  $P_{wh}$
  - Bunnhullstrykk  $P_{wt}$
  - Gass væske forhold GLR
  - Brønn lengde (dybde)  $L$
- hvis tre er kjent  
kan man finne den  
fjerde

Hver diagram gjelder for kun en gitt strømningsrate  $q$ .

→ Bruk av gradient kurve for å bestemme TPR

- ved gitt  $P_{wh}$  og dybde  $h$ , bestemmes trykk i brønn ved forskjellige rater, og TPR finnes ved å plote  $q$  mot  $P_{wt}$  (tunnet verdi).