

Løsningsforslag

Oppgave 1: Rørstrøm, separator og pumper

Gitt en prosesstrøm bestående av olje og gass (2-fase):

Gassrate:	Q	= 5.0 MMscfd (= $5.0 \cdot 10^6$ std. ft ³ /d)
Gass, kompressibilitetsfaktor:	z	= 0.98
Gass, specific gravity:	γ	= 1.93
Oljerate:	Q _o	= 6500 bbl/MMscf gass
Olje, API gravity:	G	= 81 °API
Olje, viskositet:	μ	= 0.346 cP
Separatorbetingelser:		
Trykk:	p	= 14.7 psi
Temperatur:	T	= 134 °F

a) Vis at reell volumstrøm av gass og olje ved separatorbetingelser er ca. hhv 1.8 og 0.06 m³/s (NB! dette er avrundede størrelser)

Standardbetingelser:

p _{std}	= 14.7 psi
T _{std}	= 60 °F

b) Separatoren er horisontal, med lengde L_s = 20 ft. Beregn nødvendig strømningsverrsnitt for både gassen og oljen, når konstanten for gasskapasitetsberegning, K = 0.45 og nødvendig oppholdstid for oljen, τ_{ret} = 1 min.

Hva må indre diameter i separatoren være, dersom fasene opptar halvparten av separatorvolumet hver ved drift (i.e. 1/2-full separator)?

c) Fra separatoren går oljen i rør til en lagertank hvor trykket er atmosfærisk, dvs. 14.7 psi. Dette gir null trykkdifferanse, og oljen må derved pumpes gjennom røret. Hvor stor trykkdifferanse må en pumpe gi for å kunne ta unna oljestrømmen fra separatoren?

Data for røret:

Lengde:	L	= 100 m
Indre diameter:	D	= 122 mm
Gjennomsnittlig overflateruhet:	ϵ	= 0.2 mm
Høydeforskjell innløp - utløp	ΔH	= 0 m (samme nivå)

BIP-160 - Produksjon av olje & gass - 27.02.2012

LØSNINGSFORSLAG

Oppg. 7 a) Gass: $m = Q \cdot S_{st} = q \cdot S$

$$\frac{P}{S} = ZRT \Rightarrow S = \frac{P}{ZRT}$$

$$\Rightarrow q = Q \cdot \frac{S_{st}}{S} = Q \cdot \frac{P_{st}}{RT_{st}} \cdot \frac{ZRT}{P} = Q \cdot \frac{P_{st}}{P} \cdot \frac{T}{T_{st}} \cdot Z$$

($Z_{st} = 1$)

I dette tilfellet er $P = P_{st}$, T må regnes om til absolutt temperatur; velge K :

$$T = 134^{\circ}F = \frac{5}{9}(134 - 32) = 56.67^{\circ}C + 273.15 = \underline{329.82 K}$$

$$T_{st} = 60^{\circ}F = \frac{5}{9}(60 - 32) = 15.56^{\circ}C + 273.15 = \underline{288.71 K}$$

$$q = 5 \cdot 10^6 \frac{st \cdot ft^3}{d} \cdot \frac{329.82}{288.71} \cdot 0.98 = 5597721 \frac{ft^3}{d}$$

$$\frac{1}{24 \cdot 60 \cdot 60} = 64.77 \frac{ft^3}{s} \cdot 0.028317 = \underline{\underline{1.83 \frac{m^3}{s}}}$$

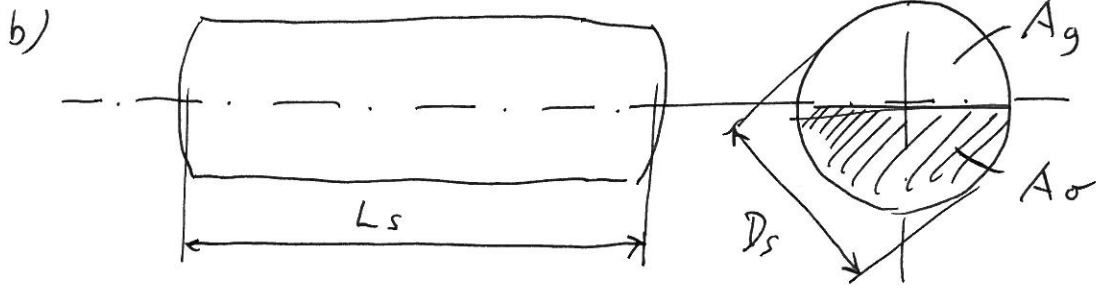
QED

Olje: $q_o = 6500 \frac{bbl}{MMscf} \cdot 5 \frac{MMscf}{d} = 32500 \frac{bbl}{d}$

$$\frac{1}{24 \cdot 60 \cdot 60} = 0.376 \frac{bbl}{s} \cdot 0.15899 = \underline{\underline{0.0598 \frac{m^3}{s}}}$$

QED

(2)



Gas: $v_{max} = K \cdot \sqrt{\frac{S_L - S_g}{S_g}} \quad [ft/s]$

$$S_g = \frac{P}{ZRT}, \quad R = \frac{R_o}{M}, \quad M = \gamma \cdot M_{Luft}$$

$$\left. \begin{array}{l} [R_o] = \frac{m^3 Pa}{mol K} \\ [M] = \frac{g}{mol} \end{array} \right\} [R] = \frac{m^3 Pa}{g K}; \quad \begin{array}{l} \text{M\u00e5 ha } P \text{ i Pa og} \\ T \text{ i K} \end{array}$$

$$P = 14.7 \text{ psi} \cdot 6.8948 = 101.35 \text{ kPa} = \underline{101350 \text{ Pa}}$$

$$\Rightarrow S_g = \frac{101350 \text{ Pa} \cdot (1.93 \cdot 29 \frac{g}{mol})}{0.98 \cdot 8.314 \frac{m^3 Pa}{mol K} \cdot 327.82 \text{ K}} = 2111 \frac{g}{m^3}$$

$$= \underline{2.11 \frac{kg}{m^3}}$$

$$S_L = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot \underbrace{\left(\frac{141.5}{131.5 + \text{API}} \right)}_{\delta_r} = 1000 \cdot \frac{141.5}{131.5 + 81} = 665.9 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_{max} = 0.45 \cdot \sqrt{\frac{665.9 - 2.11}{2.11}} = 7.98 \text{ ft/s} \cdot 0.3048 = \underline{2.43 \text{ m/s}}$$

$$\Rightarrow A_{g, \min} = \frac{q}{v_{max}} = \frac{1.83 \frac{m^3}{s}}{2.43 \frac{m}{s}} = \underline{0.75 \text{ m}^2}$$

Olje: $q_o = \frac{V_{s,r}}{\tau_{ret}} = \frac{A_o \cdot L_s}{\tau_{ret}}$

$$\Rightarrow A_{o,min} = \frac{q_o \tau_{ret}}{L_s} = \frac{0.0598 \frac{m^3}{s} \cdot 60 s}{20 \cdot 0.3048 m}$$

$$= \underline{\underline{0.59 m^2}}$$

Ved 1/2-full separator må nødvendigvis A_g og A_o være like store, derved blir gassarealet diameterende:

$$A_{s,tot} = 2 \cdot A_g = 1.5 m^2 = \frac{\pi}{4} D_s^2$$

$$\Rightarrow D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot 1.5 m^2}{\pi}} = \underline{\underline{1.38 m}} \quad (\approx 54 in)$$

c) Ved 0 høydeforskjell, og når innløpsstrykk for pumpen = utløps trykk for røret, så er trykkdifferansen over pumpen = friksjons trykk tapet over røret.

$$\Delta p = \Delta p_f = \frac{1}{2} S_L f v^2 \cdot \frac{L}{D}$$

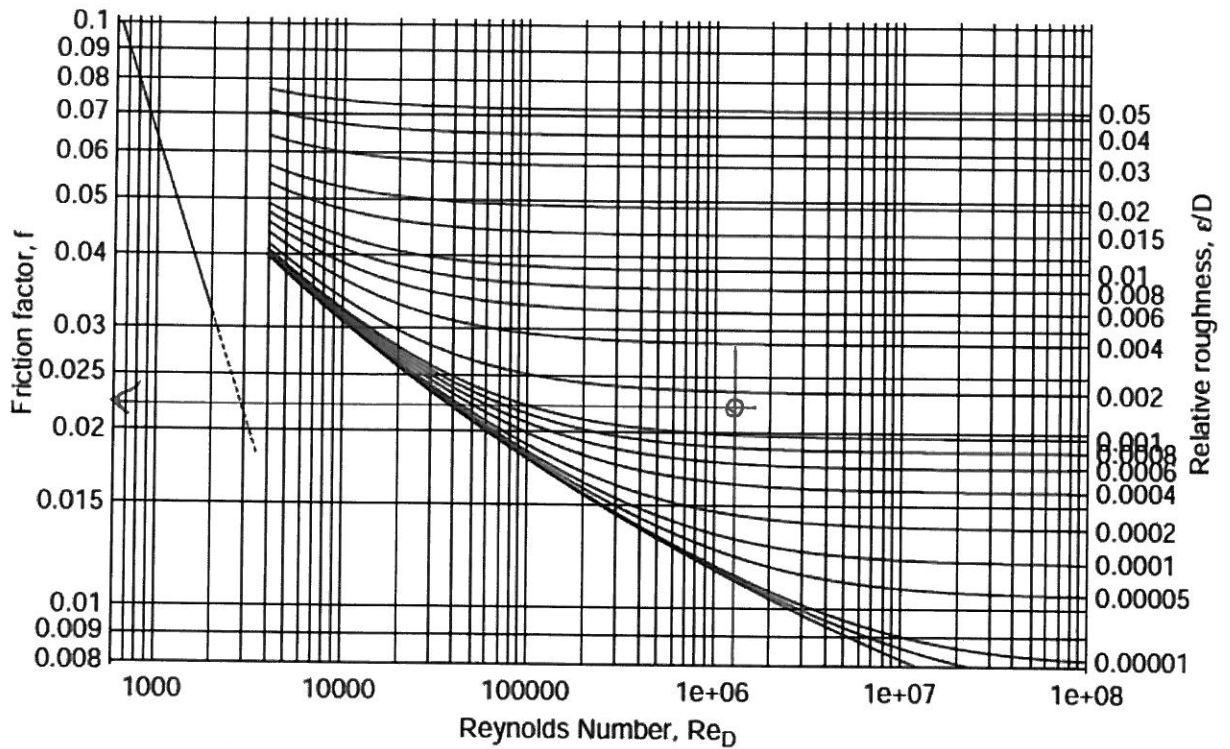
I: Strømnings hastighet i røret:

$$v = \frac{4 q_o}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0.0598 \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot (0.122 m)^2} = \underline{\underline{5.12 m/s}}$$

II: $f = f(e, Re); \quad e = \frac{\Sigma}{D} = \frac{0.2 mm}{122 mm} = \underline{\underline{0.0016}}$

$$Re = \frac{S_L v D}{\mu} = \frac{665.9 \frac{kg}{m^3} \cdot 5.11 m/s \cdot 0.122 m}{0.00346 Pa s}$$

$\Rightarrow Re = 119981 = 1.2 \cdot 10^6$



$\Rightarrow f \approx 0.022$

$$\text{III. } \Delta P_f = \frac{1}{2} \cdot 665.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.022 \cdot (5.11 \text{ m/s})^2 \cdot \frac{150 \text{ m}}{0.122 \text{ m}}$$

$$= 156777 \text{ Pa} = \underline{\underline{1.57 \text{ bar}}}$$

Løsningsforslag

Oppgavetekst oppgave 2: *Brønnstimulering*

I denne oppgaven skal vi betrakte frakturering som brønnstimuleringsmetode.

Redegjør kort for følgende:

- (i) De fins i hovedsak typer av fraktureringsmetoder; a) hydraulisk frakturering og b) syreetsning. Hva er hovedhensikten med slik behandling og i hvilke tilfeller har slik behandling størst nytte?
- (ii) Beskriv kort prinsippene og hovedforskjellen mellom disse metodene.
- (iii) Gi deretter en noe mer inngående, men kortfattet beskrivelse av metode og utstyr ved hydraulisk frakturering.

- (iv) "Fracture conductivity" (fraktursprekkens konduktivitet) kan være angitt som:

$$F_{CD} = \frac{q_f}{q_R} = \frac{k_f w}{k_R r}$$

Reservoaret som skal fraktureres har en permeabilitet, $k_R = 12$ mDarcy og en antar at en kan oppnå en strømningskapasitet ($k_f w$) i området rundt 3.6 Darcy-meter.

- a. For at en frakturering skal sies å være vellykket bør / må $q_{f,max} \geq q_{R,max}$. Dersom vi antar $q_f = q_R$ og oppsprekking kun i en retning ut fra brønn, hvor langt ut i reservoaret (r) strekker da oppsprekkingen / frakturen seg?
- b. I formelen under spørsmål iv) er det antatt rektangulær åpning mot brønn. Gitt opplysningene under delspørsmål (v) a) over; Hvor langt inn i reservoaret (dvs. hvor langt ut fra brønn) ville oppsprekkingen nå strekke seg dersom du antok elliptisk åpning og at sprekken ellers har uendret høyde (h) og uendret maksimal bredde = w ?

Løsningsforslag oppgave 2)

Se generelt hand-out fra kapittel 17 på ItsLearning. (Vedlagt til slutt i fasit.)

- (i) Frakturering er en brønnstimuleringsmetode som går ut på å lage konduktive frakturer ut fra brønn og inn i bergarten slik at hydrokarbonfluidene lettere kan produseres fra et lavpermeabelt reservoar og inn til brønnen (se slide 2 handout). Behandlingen har størst nytte ved reservoar med lav permeabilitet der tilstrekkelig strømming inn til brønn vil kreve et stort trykkfall uten behandling. I praksis er det bare lavpermeable reservoarer som egner seg for hydraulisk frakturering.
- (ii) **Hydraulisk frakturering:** Oppsprekking med støtte av **proppants** for å holde kanaler åpne etter at hydraulisk overtrykk tas av. Kan benyttes i alle typer reservoar.
Syreetsning: Etser med syre langs fraktur vegg for å skape vedvarende, konduktive kanaler etter at fraktureringstrykk skrur av. Benyttes kun ved kalksteinsreservoar.
Forskjell: Mens syrebehandling øker permeabiliteten rett rundt brønnen, øker hydraulisk frakturering (væskefrakturering) tilsynelatende permeabilitet for hele reservoaret.
- (iii) **Hydraulisk frakturering:**
 - a. Med kraftige pumper pumpes enten olje eller saltvann ned i brønnen med høy rate. Trykket i brønnen bygges opp til formasjonen rundt brønnen sprekker opp og danner konduktive kanaler i ønsket sprekke retning ut fra brønnen.
 - b. Nedpumpet væske strømmer utover i sprekke og opprettholder et trykk som er større enn mekaniske komprimeringskrefter i bergarten, slik at væsketrykket presser sprekkeveggene fra hverandre og spissen av sprekken går utover i reservoaret.
 - c. Behandlingslengden øker omtrent lineært med nedpumpet volum av fraktureringsvæske.
 - d. Hensikten med oppsprekkingen er å etablere kanaler med liten strømningsmotstand fra brønnen og utover i reservoaret. Disse sprekke må pakkes med sand (proppants) for å holde seg åpne under produksjon. **Permeabiliteten** av denne **sanden** må være **stor** i forhold til permeabiliteten i reservoarbergarten for at fraktureringen skal ha noen hensikt.
 - e. Siden sprekke er i en reservoarbergart er sprekkeveggene porøse, og fraktureringsvæsken lekker ut i bergarten. Siden fraktureringsvæsken trenger ut i reservoarbergarten må den ikke reagere på uheldig vis med væskene der eller med bergarten.
 - f. Når fraktureringen avsluttes og trykket tas av vil det horisontale stresset i bergarten klemme sprekken sammen igjen så den blir helt tett. For å holde sprekken åpen tilsettes fraktureringsvæsken grov sand (proppants) etter at oppsprekkingen har startet. Sanden som holder sprekken åpen må være av uniform størrelse og med godt avrundede sandkorn da dette gir størst permeabilitet i den pakke sanden i sprekken. Uniform sandstørrelse hindrer at små sandkorn tetter mellomrommene mellom større korn. Det er imidlertid begrenset hvilke størrelser som fraktureringsvæsken kan bære med seg. Dessuten må sandkornene lett kunne passere gjennom perforeringer og sprekkes avgrensede vidde.

- i. Sandkornene må ha tilstrekkelig mekanisk styrke til ikke at de ikke knuses eller skaller av biter når sprekken klemmes sammen. Mindre biter fra knusing eller avskalling vil redusere permeabiliteten i sprekken dramatisk.
 - g. Den mest vanlige formen for "proppants" er godt siktet kvartssand (SiO_2).
- (iv) Strømning gjennom sprekke: q_f , strømning gjennom reservoaret: q_R . k_f = permeabilitet av sand i sprekken, k_R = permeabilitet i reservoarbergarten, w = bredden på sprekken og r = inntregningslengden.
- (v) Lengde, r , ut i reservoaret:
- a. $r = k_f w / k_R = 3.6 / 0.012 \text{ m} = 300 \text{ m}$.
 - b. $r = \pi k_f w / 4 k_R = \pi \times 3.6 / 4 \times 0.012 \text{ m} = 235.5 \text{ m}$

Oppgavetekst oppgave 3: Strømning fra reservoar til brønn

- 1) Olje og gassreservoar produseres etter forskjellige strategier / metoder. Kan du kort fortelle hovedforskjell mellom produksjonsstrategiene med hensyn på (optimal) produksjonsrate for de to reservoar / fluid typene?
- 2) Et gassreservoar ligger på dybde 10 000 ft har et reservoartrykk på $p_e = 3355$ psia
 - a. En produksjonstest viste følgende data data (q_g i Mscf/d):

p_{wf}	q_g
3355	0
3314	1012×10^3
3208	2248×10^3
2992	3832×10^3
2651	5480×10^3

Benytt produksjonslikningen for gass reservoar og **bestem / beregn** de to konstantene i denne likningen.

- b. Beregn deretter $q_{g,max}$
- 3) For oljereservoar snakker en ofte om produksjon ved en platårate. Hva menes med platårate i denne sammenheng?
 - a. Er det noen sammenheng mellom valg av platårate og momenter som du har nevnt under første spørsmål ovenfor (spørsmål 1 over)?
- 4) Et oljereservoar ligger på 10 000 ft dyp og har ved oppstart et reservoartrykk på 5000 psi. Kokepunktet på fluidet er oppgitt til 3800 psi..
 - a. Det kjøres en produksjonstest som gir følgende data (q_o i stb/d):

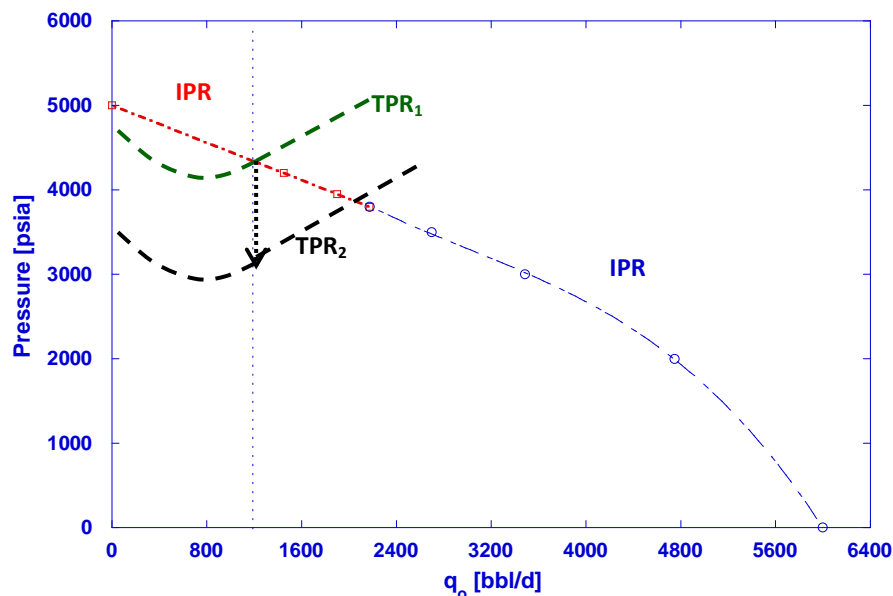
p_{wf}	q_o
5000	0
4200	1449
3950	1902
3500	2698
3000	3487
2000	4748

Bestem / beregn: i) produksjonsindeks, ii) q_{ob} ved kokepunktet og iii) q_{max} .

- b. Skisser IPR kurve fra $q_o = 0$ til q_{max} .
 - c. Legg produksjonsraten på 1200 stb/d og skisser en typisk TPR kurve som balanserer mot denne produksjonsraten.
 - d. En ønsker å produsere ved denne raten (platårate) så lenge som mulig. Hva må en gjøre for å holde denne platåraten konstant over tid og hva er det som begrenser hvor lenge platåraten kan holdes konstant ved 1200 stb/d?
 - e. Hva må en gjøre om en vil fortsette produksjon videre etter dette punktet og hva er det som begrenser hvor lenge en kan fortsette og produsere fra brønnen uten stimuli?

Løsningsforslag oppgave 3):

- 1) Hovedforskjell i produksjonsstrategier:
 - a. **Om drivmekanismer oljereservoar generelt: Liten produksjonsrate fra oljefelt øker effekten** av vanddriv og utsetter vanngjennombrudd.
 - b. **Om drivmekanismer gass reservoar generelt:** Produksjonsraten bør være så høy som mulig, spesielt for å redusere mengden vann som rekker å trenge inn. I tillegg trengs høy rate for å rive med dråper av væske som kan felles ut i brønn. En så høy produksjonsrate som mulig er motsatt av hva som er tilfelle for oljereservoar.
- 2) Se slide 29 til 31 i handouts fra kapittel 3. Velg to samhørende verdier av p_{wf} og q_g og bestem $(p_e^2 - p_{wf}^2)$ for begge verdier av p_{wf} . Sett deretter beregnede verdier inn i oppgitt uttrykk for n (gitt i vedlegg 1).
 - a. Fra oppgitte data finner dere $n = \underline{0.62}$ og deretter $C = \underline{438 \text{ scf}/(\text{psi}^{1.24} \text{d})}$.
 - b. $q_{g,max}$ finnes ved å sette $q_{wf} = 0$ i likningen $q_g = C(p_e^2 - p_{wf}^2)^n$.
En finner da $q_{g,max} = 432 \times (5000^2)^{0.62} = \underline{10.2 \text{ MMscf/d}}$
- 3) Med platåraten mener en en konstant rate som kan holdes over lengre tid ved gradvis å senke brønnehodetrykket.
 - a. Platåraten legges på et nivå som reduserer fare for tidlig vanngjennombrudd.
- 4) Følgende beregninger fra oppgitte data og formler i vedlegg 1:
 - a. Produksjonsindeks $J = 1449 / (5000 - 4200) = \underline{1.811}$, $q_{ob} = 1.811 \times (5000 - 3800) = \underline{2173.5 \text{ bbl/d}}$ og $q_{max} = q_{ob} + q_{max,tilllegg}$ der $q_{max,tilllegg} = J \times p_b / 1.8 = 3824 \text{ bbl/d}$.
En finner da at $q_{max} = 2173.5 + 3824 = \underline{5997.5 \text{ bbl/d}}$.
 - b. IPR-kurve:



- c. Se grønn TPR_1 kurve i fig.
- d. En kan produsere ved platåraten når et minimum brønnehodetrykk nås ved for eksempel TPR kurven representert av TPR_2 i figuren. Ved dette punktet er brønnehodetrykket akkurat tilstrekkelig stort til å bringe fluidet fram til første separatortrinn på prosessanlegg (plattform).

- e. Derfra kan en fortsette produksjon ved konstant brønnehodetrykk og følge TPR_2 kurven ved gradvis å senke produksjonsraten ned mot minimumspunktet på TPR_2 kurven. I figuren ligger minimumspunktet en plass mellom 700 og 800 bbl/d. Når en har nådd dette punktet stopper produksjonen, men en kan produsere videre om en benytter seg av kunstig løft fra nå av og så langt dette er mulig. Produksjon uten stimuli begrenses av nødvendig brønnehodetrykk for å drive fluidet fram til første separatortrinn på prosessanlegg. For at produksjonen skal være lønnsom må produksjonsraten hele tiden være tilstrekkelig til å bære kostnadene med å produsere samt å gi et forsvarlig overskudd for driften.

Oppgave 4: Strømning i brønn og kunstig løft

Vi skal i spørsmål a) studere en olje-gass brønn som består av to deler; en vertikal del som er 1300 m dyp, etterfulgt av en horisontal del som er 2000 m lang. Brønnen er til å begynne med i normal produksjon, men stenges ved brønnehodet etter en viss tid. Reservoartrykket er 100 bar, og kokepunktstrykket for oljen er 20 bar. Anta at oljetettheten er 800 kg/m^3 . Gassen kan regnes som ideell. Brønnen antas å ha samme temperatur overalt. Ved brønnens temperatur og et valgt referansetrykk $P_{ref} = 1 \text{ bar}$, er gasstettheten 1.3 kg/m^3 . Se bort fra formasjonsvann.

NB! Det er ikke behov for formelark til beregningene i denne oppgaven. Meningen er å få fram dine kunnskaper (også om relevante formler) og evne til vurdering.

- a) Skisser brønnen og vis hvordan fluidene fordeler seg i brønnen;
- i) mens brønnen er i aktiv produksjon (kun kvalitativ beskrivelse av gassfraksjonen langs brønnen)
 - ii) kort tid etter nedstengning, og endelig;
 - iii) etter at likevekt er inntruffet i den innstengte brønnen. Kan det dannes en sone med fri gass i brønnen?

Forklar skissene og beskriv gass og væske fordeling i hvert tilfelle. Grunngi med dine egne relevante beregninger og antagelser.

- b) Hvilke strømningsregimer regner man med i gass-væske strømning i vertikale rør? Beskriv regimene og lag enkle skisser. Lag regimekart med gass og væske "superficial" hastigheter som akser.

- c) En avstengt gassbrønn med dybde $H=3000 \text{ m}$ inneholder en gass (ingen olje) med samme egenskaper (ideell gass) som gitt i starten av oppgaven. Brønnehodetrykket er $P_{WH} = 40 \text{ bar}$. Hva menes med en ideell gass? Skisser og forklar trykkutviklingen nedover fra brønnehodet. Hva blir trykket i bunnen av brønnen?

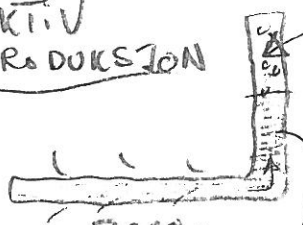
Endelig oppgavetekst ble endret etter skisse til fasit, men prinsipp for løsning er ikke endret - kunn tallverdier for trykkområde.

LØSNINGSFORSLAG

①

OPGAVE 4

a) AKTIV PRODUKTION



1300 m


2000 m

$P_r = 100 \text{ bar}$
(Reservoartrykk)

Entase i lavere del av brønnen.

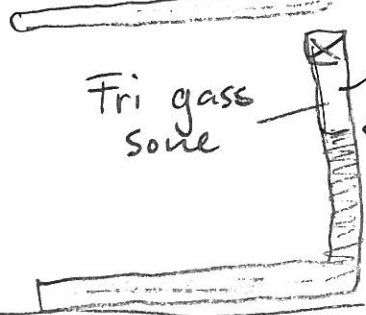
To fase der trykket har falt under 20 bar.
(Statisk ville dette vært ved høyde 1275.5 meter, ved stopning, lavere med)

ii) Stengt Wellhead



Fri gass sone av boder som stige opp.

iii) Fri gass sone



Statisk gass sone med trykk $\sim P = 20 \text{ bar}$

$P = P_b$
Her kan oljen koke, eller gass kondensere ved små varisjoner.

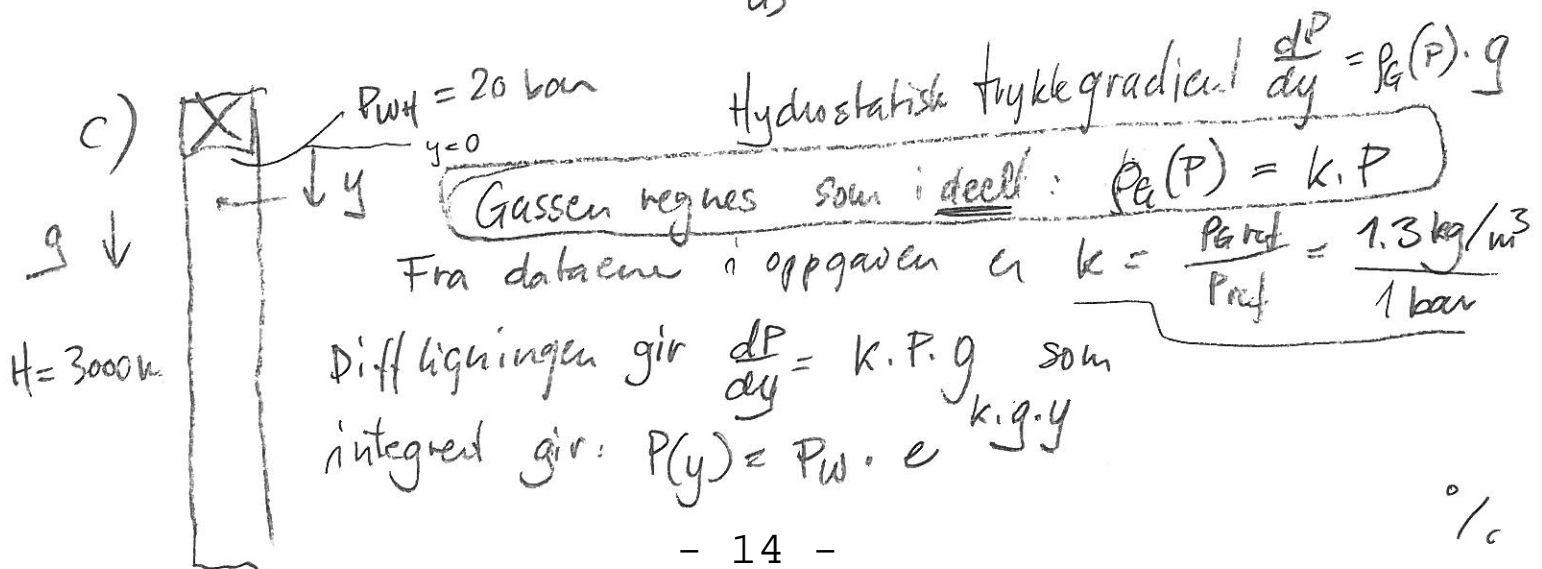
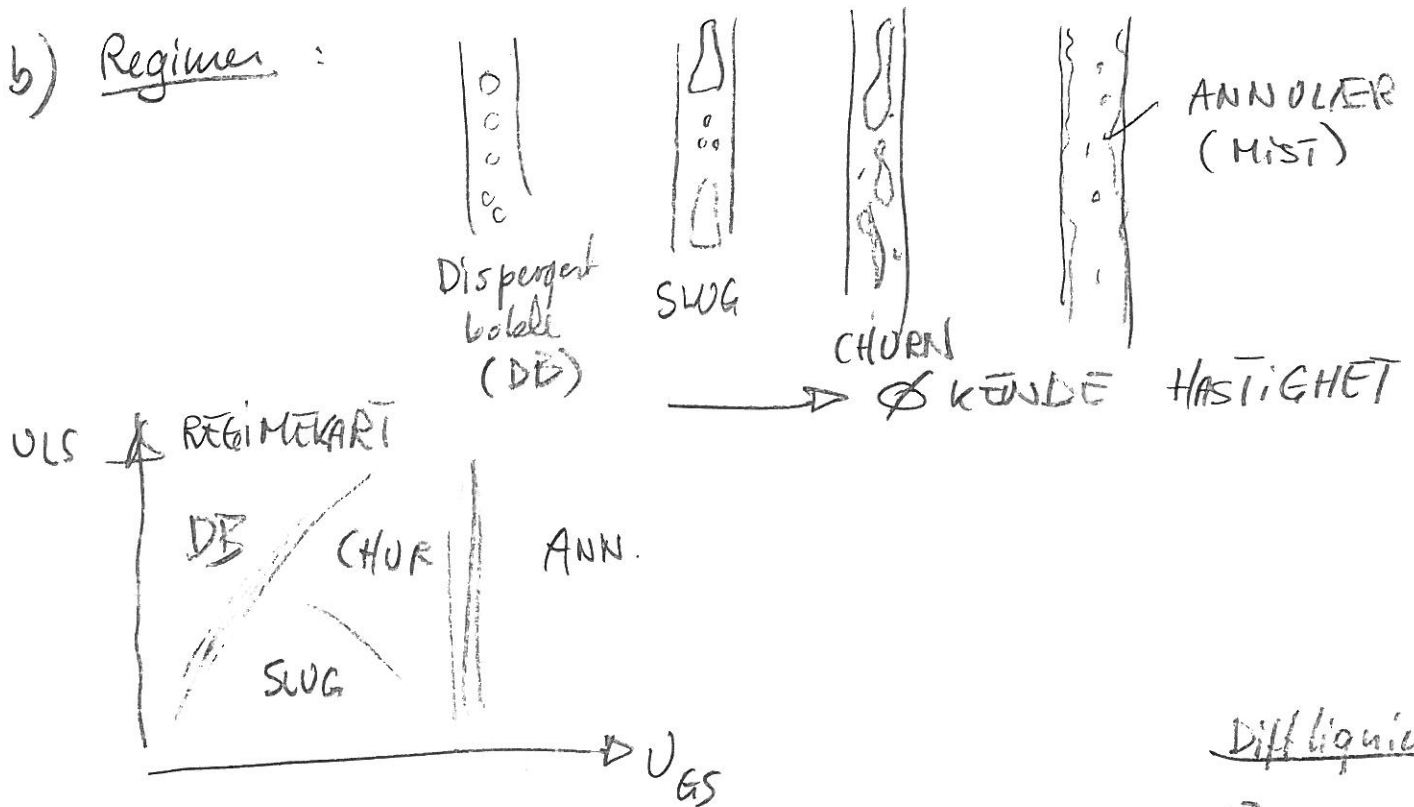
MED ÅPEN BRØNN OG

Med tetthet $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ ville væska kunne stå i en høyde $h = \frac{P_r}{\rho \cdot g} = 1275.5 \text{ m}$ for å balansere reservoartrykket.

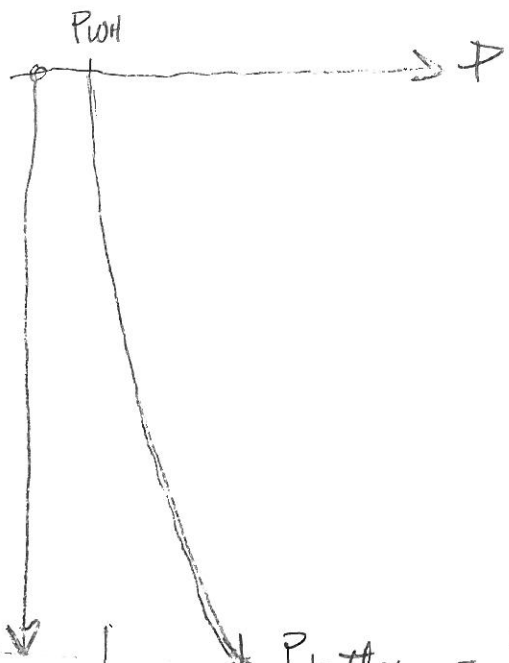
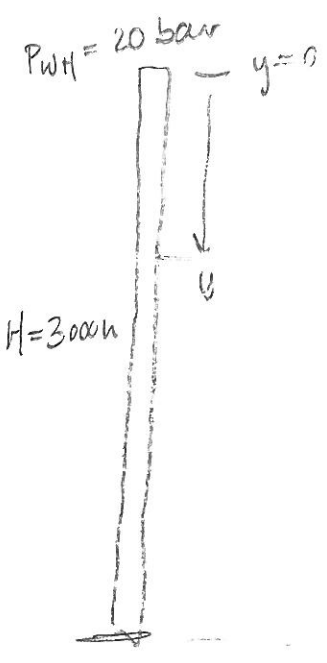
MEN siden kokepunktstrykket er 20 bar vil oljen koke et godt stykke ned i oljen ~ 26 meter. Avhengig av gass egenskaper vil dette gi lavere tetthet i øverste del av oljen og kokingen flyttes nedover til et sted der trykket blir større enn kokepunktstrykket. Dette gir nok "egen" drivgass til at brønnen produserer av seg selv hvis det ikke chokes ved brønnehodet.

MFN når brønnen stenges øker trykket i gassen øverst, og den får gass som den kan stille seg på kokepunktstrykket ved væskeoverflaten. Høyere oppe i gass-sønnen er trykket litt lavere (avtar med hydrostatisk trykkgradient $\sim \rho_g(P) \cdot g = 254 \text{ Pa/m.}$)

Til slutt (iii) vil likevekt oppnås i den høyden der gassstrykket over væske (20 bar) + hydrostatisk trykk bidrag fra oljen svarer til reservoartrykket. Da er det balanse: $P_r = 20 \text{ bar} + \rho_l \cdot g \cdot h_{olie}$
 $\Rightarrow h_{olie} = \underline{1020,4 \text{ meter}}$



(3)



$$k = 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg/m}^3}{\text{Pa} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2}$$

($\rho = \rho_0 \cdot h$)

$$98^{1/2} \cdot 3000 \text{ m}$$

$$P_{\text{bottom}} = P_w \cdot e^{k \cdot g \cdot y} = \underline{\underline{29.3 \text{ bar}}}$$

20 29.3