



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK – NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

EKSAMEN I: **PET200 Produksjon av Olje og Gass**

DATO: **23.11.2017**

VARIGHET: **4 timer**

TILLATTE HJELPEMIDDEL: **Godkjent kalkulator.**

OPPGAVESETTET BESTÅR AV: **3 oppgaver**

OPPGAVE 1: <i>Strømning og pumper,</i>	side 2-3.
OPPGAVE 2: <i>Strømning inn til og ut av brønn</i>	side 4-7.
OPPGAVE 3: <i>Diverse spørsmål fra produksjon</i>	side 8-9

VEDLEGG 1: Likninger,	side i - iii.
VEDLEGG 2: Spesielle enheter	side iv.
VEDLEGG 3: Universell gasskonstant, R	side iv.
VEDLEGG 4: Omregningstabeller US \leftrightarrow SI	side v.
VEDLEGG 5: Konstanter til choke beregninger	side v.
VEDLEGG 6: Gradientkurvedigram D=2.875" rør	side vi.
VEDLEGG 7: Gradientkurvedigram D=2.875" rør	side vii.
VEDLEGG 8: Ruteark til plot av IPR og TPR kurver	side viii.

MERKNADER: **Eksamensoppgavene har ulik vektning.** Oppgave 1 teller med 25 % og oppgave 3 med 15 % mens oppgave 2 er mer omfattende enn de to andre, er delt i to deler (oppgave 2.1 og 2.2) og tilsammen vektlegges denne med 60 av totalen ved bedømmelsen. **Informasjon om vektning står angitt på hver oppgave.**

RÅD: *Les raskt gjennom alle oppgavene før du begynner, og finn ut hva som må avklares med spørsmål til faglærerne.*

Planlegg tidsbruken slik at hver oppgave får nødvendig tid!

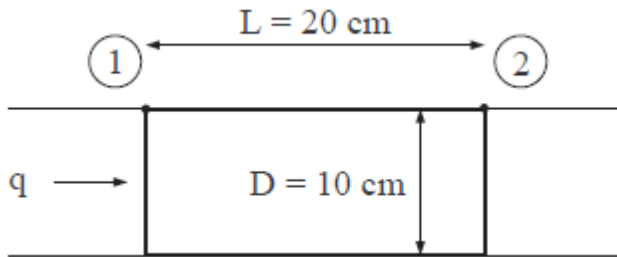
FAGANSVARLIG: Thor Martin Svartås
TLF.NR. : 51 83 22 85

Faglærere kommer til å besøke eksamenslokalene for spørsmål knyttet til oppgavetekst rundt kl. 10 og kl. 12 på eksamensdagen.

Oppgave 1

Oppgave 1 teller med 25 % på eksamenskarakteren. Hvert delspørsmål (a – f) Tilpass tiden etter dette.

a) Standardmetoder for beregning av Darcy-friksjonsfaktoren for strømningsmotstand i rør kan være unøyaktige for noen oljer, men en representativ verdi kan i prinsippet bestemmes forholdsvis enkelt vha en test som skissert i Figur 1.



Figur 1: Skjematisk testrigg for friksjonskoeffisient.

Her er en $L = 20$ cm lang seksjon av en rørsledning med indre diameter $D = 10$ cm spent inn i en testsløyfe, hvor den aktuelle oljen sirkulerer med en kontrollert volumstrømsrate, q , mens differansetrykket mellom punkt 1 og 2 leses av.

For en aktuell test har man følgende resultat:

$$\begin{aligned} q &= 53 \text{ m}^3/\text{h} \\ \Delta p &= p_1 - p_2 = 9.2 \text{ mmH}_2\text{O} \\ \text{Oil gravity, } \gamma_o &= 29.5 \text{ }^\circ\text{API} \end{aligned}$$

Gjør de nødvendige konverteringene, og vis at $f_D \approx 0.029$ for denne testen.

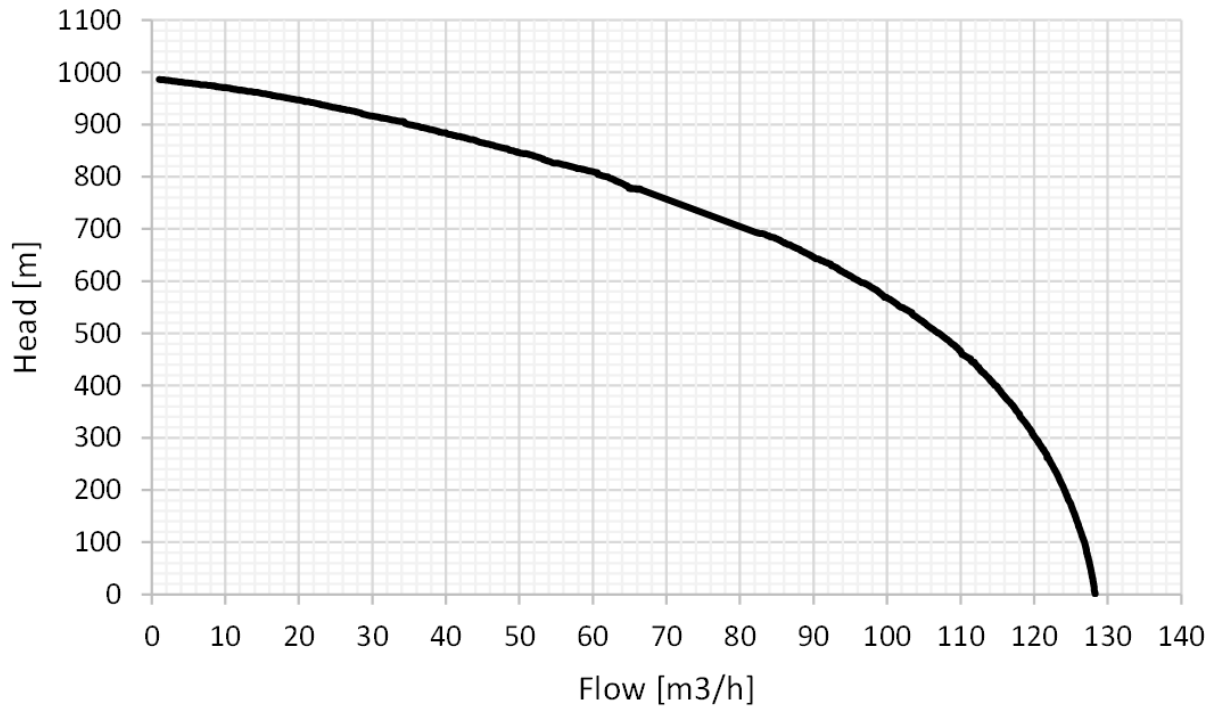
$$(1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.81 \text{ Pa})$$

b) Et transportsystem for å transportere stabilisert råolje mellom 2 plattformer med 13 km avstand skal designes. Normal produksjon er beregnet til $53 \text{ m}^3/\text{h}$, og det vurderes å installere en rørsledning med indre diameter 10 cm, tilsvarende den fra testen i a). Oljen har også de samme egenskaper som for testen i a).

Hva blir nødvendig differansetrykk over pumpen som skal besørge transporten, når man vet at mottakstrykket er likt trykket før pumpen, at rørdiameteren er den samme hele veien, og at høydeforskjellene kan sees bort fra ?

c) Karakteristisk kurve (pumpekarakteristikk) for sentrifugalpumpen som blir valgt er gitt i Figur 2.

- I. Man kan øke produksjonen ved å installere f.eks. en nedihullspumpe, men den vil fortsatt være begrenset av eksportsystemets kapasitet. Hvor mye kan man øke produksjonen til?
- II. Siden man fortsatt er i designfasen, hva kunne man ha gjort for å bygge inn ekstra kapasitet ? (gi et forslag, uten å regne)



Figur 2: Pumpekaraktistikk.

d) En horisontal separator med indre diameter $D = 52$ cm skal benyttes for å separere gass fra olje med tetthet $\rho_o = 800$ kg/m³.

Om gassen vet man følgende:

- Trykk; $p_1 = 3$ bar
- Temperatur; $T_1 = 40$ °C
- Kompressibilitetsfaktor; $z = 0.99$
- Gravity; $\gamma_g = 0.82$
- Adiabateksponent; $k = 1.23$

Velg $K = 0.45$ ft/s (for horisontal separator). Hva er gasskapasiteten ?

e) Etter separasjonen skal gassen komprimeres til $p_2 = 27$ bar.

Anta ideell gass og isentropisk kompresjon; Hva blir nødvendig teoretisk arbeid pr. masse- eller molenhet ?

(bruk den basis som du finner mest hensiktsmessig)

f) Pga. det forholdsvis høye trykkforholdet, vurderer man å dele opp kompresjonen i 2 trinn og mellomkjøle, der hvert trinn har samme trykkforhold ($p_m/p_1 = p_2/p_m$; hvor p_m er mellomtrykk), og temperaturen inn på begge trinn er den samme ($T_m = T_1$).

- I. Hva blir mellomtrykket, p_m ?
- II. Vil teoretisk energiforbruk reduseres eller øke, dersom man deler opp kompresjonen ? (begrunn svaret)

(Hint: For ideell gass: $p_1 v_1 = R T_1$)

Oppgave 2

Oppgave 2 teller med 60 % på eksamenskarakteren og er delt i to deler, 2.1 og 2.2, som hver teller med 30 %. Tilpass tiden etter dette.

Et sandsteinsreservoar inneholder produserbar olje og ligger på 8000 ft dyp. En analyse viser:

- Reservoartrykket er 6500 psia, oljas kokepunkt 3500 psia og relativ tetthet 0.82.
- Oljens viskositet er 1.2 cp, $B_o = 1.5$, reservoarets permeabilitet er 90 mD, porositeten er 0.2 og $R_s = 600$.
- Gassen har en relativ tetthet på 0.70 og gassens adiabatkonstant, κ , er 1.2.
- Det er etablert en vertikal brønn som er "caset", sementert og perforert. Brønnens produksjonssone har en høyde på 100 ft, diameteren er 4.5 tommer, produksjonssonen strekker seg 900 fot ut i reservoaret og det produseres gjennom et 2.875 tommers produksjonsrør.

Det kjøres en brønntest som viser:

q_o [stb/d]	P_{wf} [psia]	P_{wh} [psia]
0	6500	
400	6167	3967
600	6000	3780
1644	5130	2852
2250	4625	2302
2760	4200	1828
3120	3900	1487

2.1 Strømning fra reservoar til brønn

Del 2.1 av oppgave 2 er inndelt i 11 delspørsmål nummerert fra a) til k) og teller med 30 % på eksamenskarakteren. Tilpass tiden etter dette.

Hvert delspørsmål teller likt på karakteren og eventuelle underspørsmål teller med like verdier til delspørsmålet de står under. For oppgave 2.1 gjelder dette delspørsmål 2.1 j) med underspørsmål 1) og 2) som hver teller 50 % inn mot delspørsmålet ($50 \times 2 = 100$).

En har mistanke om skade på brønn fra operasjoner under boring og perforering og en gjør et overslag over brønnens skinfaktor. Denne synes såpass høy at en bestemmer seg for å kjøre en syrevask før en starter produksjonen.

- Sett opp uttrykkene som viser hvordan du kan beregne produksjonsindeks og skinfaktor.
- Beregn produksjonsindeks og skinfaktor før syrevask.
- Beskriv kort hvordan en syrevask utføres for denne type brønn / reservoar og hvilke syrer som benyttes.
- Hvilke syrekonsentrasjoner er vanlig for denne type reservoar?

Etter syrevasken kjøres en ny brønntest som viser:

q_o [stb/d]	p_{wf} [psia]	p_{wh} [psia]
0	6500	
7000	4500	1145

- Beregn produksjonsindeks og skinfaktor etter syrevask.
- Nevn et par andre faktorer enn det nevnt over som kan gi opphav til skin.
- Beregn brønnens strømningseffektivitet (i %) før og etter behandling.

Når brønnen settes i produksjon må brønnehodetrykket holdes over 1500 psia som en minimumsverdi.

- Hvilke faktorer er bestemmende for minimum brønnehodetrykk?
- Hvilken påvirkning (om noen) vil syrevasken ha på en beregning av TPR-kurven ved et gitt brønnehodetrykk (f.eks. ved $p_{wh} = 1500$ psia) og hvorfor er det slik?

- j) Produksjon ved stabil rate foregår ved pseudo-steady state.
- 1) Forklar med få ord og gjerne en skisse hva som karakteriserer produksjon ved pseudo-steady-state.
 - 2) Nevn andre produksjonsregimer vi kan ha og forklar kort hva som er karakteristisk for disse.
- k) Skisser IPR-kurvene før og etter syrevask i rutearket som medfølger i vedlegg 8 sammen med TPR-kurven ved minimum brønnhodetrykk ($p_{wh} = 1500$ psia). Dersom du trenger nytt ruteark får du dette av eksamensvaktene.

2.2 Strømning ut fra brønn

Del 2.2 av oppgave 2 består av 8 delspørsmål nummerert fra l) til s) og teller med 30 % på eksamenskarakteren. Tilpass tiden etter dette.

Hvert delspørsmål teller likt på karakteren og eventuelle underspørsmål teller med like verdier til delspørsmålet de står under. For oppgave 2.2 gjelder dette delspørsmålene 2.2 p) og q). Delspørsmål 2.2 p) har til sammen 5 underspørsmål nummerert fra 1) til 5) som hver teller 20 % inn mot delspørsmålet ($20 \times 5 = 100$).

En antar at brønnen fra del 2.1 over kan produseres ved en platårate på 2000 stb/d. Feltet er forsynt med flere produksjonsbrønner og injeksjonsbrønner og under stabil produksjon ved denne raten ser en at reservoartrykket synker med 150 psi per år.

- l) Hva menes med platårate og hvordan går du fram for å produsere ved en slik rate?
- m) Hvor lang tid kan brønnen produseres ved platåraten uten stimulering via syrevask?
- n) Hvor lang tid kan brønnen produseres ved platårate når den syrevaskes før oppstart?
- o) Hvor mye ekstra olje kan du få ut av denne ene brønnen under produksjon ved platårate gjennom å syrevaske før oppstart?

- p) Anta at du har produsert ved platåraten og har kommet ned til minimum brønnhodetrykk.
- 1) Hva kan du nå gjøre for å produsere brønnen videre uten "kunstig" løft (artificial lift)?
 - 2) Hva er det som setter grensen for hvor lenge du nå kan produsere og hvor ligger grensen (sånn omtrent) i vårt tilfelle?
 - 3) Skisser dette produksjonsforløpet i samme diagram som under spørsmål k) over.
 - 4) Bruk tilgjengelige data til å anslå trykk i brønnen ved punktet som setter grensen for hvor langt du kan produsere uten løft. Sett opp ligningen / uttrykket du kan benytte til dette uansett om du benytter denne eller leser verdier fra diagram.
 - 5) Hva er trykket i reservoaret når du har kommet til dette punktet? Sett opp ligningen / uttrykket du kan benytte til dette uansett om du benytter denne eller leser verdier fra diagram.
- q) I vedleggene 6 og 7 finner du to forskjellige gradientkurvediagram.
- 1) Hva er det maksimale GLR forholdet som vil gi løfteffekt ut fra disse to diagrammene?
 - 2) Hvorfor mister du løfteffekt om du øker GLR forholdet videre ut over antydte maksimal verdi for GLR?
 - 3) Hvor mye gass trengs for injeksjon per døgn ved det maksimale GLR forholdet i disse to tilfellene?
- r) Velg ett av diagrammene fra delspørsmål p) til beregninger i følgende:
- 1) Forklar kort begrunnelsen for å velge det diagrammet du gjorde? (Hipp som hupp eller en bestemt årsak?)
 - 2) Beregn brønntrykket ved maksimal GLR og brønnhodetrykk, $p_{wh} = 1500$ psia.
 - 3) Angi hvor mye du har senket brønntrykket ved maksimalt løft sammenlignet med forholdet uten løft.
 - 4) Hvor langt ned har du kommet i brønntrykk ved maksimalt løft.
 - 5) Antyd (plott inn) brønntrykket ved maksimalt løft i diagrammet fra spørsmål k) i oppgave 2.1 og underspørsmål p₃) over.
- s) Hvilken ligning vil du velge dersom du skal beregne IPR kurver eller estimere reservoartrykk når du nærmer deg grensen for maksimalt løft? Gi en kort begrunnelse for svaret.

Oppgave 3: Diverse spørsmål knyttet til

Oppgave 3 teller med 15 % på eksamenskarakteren. Hvert delspørsmål a) til d) teller likt, mens underspørsmål 1), 2), osv. teller med like deler inn mot delspørsmålet slik som beskrevet under oppgave 2. Tilpass tiden etter dette.

I et reservoar på land ligger reservoartrykket, p_e , ved oljas kokepunkt, p_b , og en brønntest viser:

q_o	p_{wf}
0	3500
3000	2500
5625	1000

a) Du skal bestemme IPR-kurven for denne brønnen.

1) Forklar kort hvilke ligninger av følgende fem alternativ du kan benytte og hvilken ligning du tror vil være mest nøyaktig til dette formålet. Begrunn svaret:

- a) $q_o = J \cdot (p_e - p_{wf})$
- b) $q_o = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e - p_{wf})}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right)}$
- c) $q_o = q_{max} \left(1 - 0.2 \left(\frac{p_{wf}}{p_e}\right) - 0.8 \left(\frac{p_{wf}}{p_e}\right)^2\right)$
- d) $q_o = C \cdot (p_e^2 - p_{wf}^2)^n$, brønntesten gir: $n = 1$ og $C = 0.0005$
- e) $q_o = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e^2 - p_{wf}^2)}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right) \cdot 2p_b}$

2) Er noen av ligningene likeverdige som grunnlag til IPR-kurve for denne brønnen (dvs. kan anvendes til samme formål og vil gi samme nøyaktighet)? I tilfelle JA:

- i. Hvilke av ligninger kan være likeverdige i denne sammenheng?
- ii. Hvilken betingelse må være oppfylt for at disse ligningene skal være likeverdige?

- b) I oppgave 2.2 anvendes gassløft etter at du kommer til minimumstrykket for "naturlig" produksjon fra brønnen.
- 1) Forklar i korte trekk prinsippene for gassløft og beskriv / skisser kort nødvendig utstyr og hvordan prosessen gjennomføres.
 - 2) Hvor i brønnen må du injisere gassen for å oppnå maksimal løfteffekt slik som du har i oppgave 2.2 q₂) til q₅)?
- c) Når brønnen produserer i tofaseområdet kan det oppstå problemer knyttet til strømningsregimet (f.eks. trykkpulser ved slugging) og som en ønsker å unngå (dempe) ved å akselerere strømningshastighet opp til sonisk område.
- 1) Hva menes med sonisk strømming?
 - 2) Hvor i systemet er sonisk strømming ønskelig og hvorfor?
 - 3) Hva forstår du med betegnelsen D_{64} ?
- d) Vi skal nå se litt på frakturering som brønnstimuleringsmetode. Redegjør kort for følgende:
- 1) Hva er hovedhensikten med frakturering?
 - 2) Beskriv prinsippene for gjennomføring av en hydraulisk frakturering gjennom en kortfattet beskrivelse av metode og utstyr.
 - 3) Beskriv kort forskjellene mellom syrefrakturering og hydraulisk frakturering.
 - 4) På hvilke typer reservoar anvendes i hovedsak hydraulisk frakturering og på hvilke typer reservoar anvendes i hovedsak syrefrakturering?

Vedlegg 1: Generelle likninger

På de tre neste sidene er det listet opp en del likninger relatert til innstrømning i brønn og produksjonseffektivitet. De fleste likningene er gitt på en form som benytter US feltenheter. Det forutsettes at betegnelser for størrelsene som inngår i likningene er kjent.

$$q_o = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e - p_{wf})}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right)}$$

$$q_o = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e - p_{wf})}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.5 + s\right)}$$

$$q_o = J \cdot (p_e - p_{wf})$$

$$\frac{q_{o,tillegg}}{q_{max,tillegg}} = 1 - 0.2 \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right) - 0.8 \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right)^2, \quad q_{max,tillegg} = \frac{Jp_b}{1.8}$$

$$q_o - q_{ob} = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e^2 - p_{wf}^2)}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right) \cdot 2p_b}, \quad p_e > p_b, p_{wf} < p_b$$

$$q_o = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e^2 - p_{wf}^2)}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right) \cdot 2p_b}, \quad p_e \leq p_b$$

$$q_o = \frac{0.703 \cdot hk}{T \cdot \mu_o \cdot Z} \cdot \frac{(p_b^2 - p_{wf}^2)}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right)}$$

$$q_o = C \cdot (p_b^2 - p_{wf}^2)^n, \quad q_g = C \cdot (p_e^2 - p_{wf}^2)^n, \quad n = \frac{\log \frac{q_1}{q_2}}{\log \frac{p_e^2 - p_{wf1}^2}{p_e^2 - p_{wf2}^2}}$$

$$p_{wh} = \frac{CR^m q}{S^n} \quad \text{eller} \quad p_{wh} = \frac{C \cdot (GLR)^m \cdot q}{D_{64}^n}$$

$$\left(\frac{p_{ut}}{p_{inn}}\right)_c = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

$$q_f = \frac{k_f}{\mu} \cdot A_f \frac{\partial P}{\partial r} = w \cdot h \cdot \frac{k_f}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}$$

$$q_R = 2 \frac{k_R}{\mu} \cdot A_R \frac{\partial P}{\partial r} = 2r_R \cdot h \cdot \frac{k_R}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}$$

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

$$F_{CD,e} = \frac{q_{f,e}}{q_R} = \frac{\pi}{4} \frac{k_{f,e}}{k_R} \frac{w}{r}$$

$$\Delta P = p_{wf} - p_{wh} = \rho \cdot g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta u^2 + \frac{2 \cdot f_f \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{D}$$

eller:
$$\Delta P = \frac{g}{g_c} \cdot \rho \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{g_c} \cdot \Delta u^2 + \frac{2 \cdot f_f \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{g_c \cdot D}$$

$$\Delta P_F \propto K \cdot \frac{q^2}{D^5}$$

$$N_{Re,o} = \frac{1.48 \cdot \rho \cdot q_o}{\mu \cdot D}$$

$$N_{Re,g} = \frac{20.09 \cdot \gamma_g \cdot q_g}{\mu \cdot D}$$

$$q_g = q_l \cdot (GLR_2 - GLR_1)$$

$$p_{wf} = p_{wh} + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_a \cdot H_{inj} + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_b \cdot (H - H_{inj})$$

$$p_{inj,ann} = p_{surf} \cdot e^{0.01875 \cdot \gamma_g \cdot \frac{H_{inj}}{ZT}}$$

$$p_{inj,ann} = p_{surf} \cdot \left(1 + \frac{H_{inj}}{40000}\right)$$

$$HHP = 2.23 \cdot 10^{-4} \cdot q_g \cdot \left[\left(\frac{p_{surf}}{p_{in}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right] [\text{hp}]$$

$$s = s_c + s_A + s_G + s_d + s_p + s_{dp} + s_a + s_b$$

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1\right) \cdot \ln \frac{r_s}{r_w}$$

$$E_f = \frac{q_{reell}}{q_{ideell}} = \frac{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75\right)}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right)}, \quad E_f \approx \frac{7}{7+s}$$

$$\beta = \frac{v_{\min\ eral} \cdot MW_{\min\ eral}}{v_{acid} \cdot MW_{acid}}$$

$$\chi = \beta \cdot \frac{\rho_{acid\ solution}}{\rho_{\min\ eral}}$$

$$\frac{p}{\rho} = zRT$$

$$m = Q \cdot \rho_{std} = q \cdot \rho$$

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$\gamma = \frac{M}{M_{luft}} \quad (M_{luft} = 29 \text{ g/mol})$$

$$R = \frac{R_0}{M} \quad [\text{J/g K}]$$

$$v_{max} = K \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g}} \quad [\text{ft/s}]$$

$$q_L = \frac{V_L}{\tau} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$w_s = p_1 v_1 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$Re_D = \frac{\rho u D}{\mu}$$

$$\Delta p_f = \frac{1}{2} \rho u^2 \cdot f_D \frac{L}{D}$$

$$\Delta p_f = \frac{1}{2} \rho u^2 \cdot \Sigma K$$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_o - T_i)$$

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot LMTD$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$\Delta T = \frac{K_H W}{M(100 - W)}, \quad K_H = 1297 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

Vedlegg 2: Spesielle enheter

Special Units	
API GRAVITY (OF OIL)	
$\gamma(\text{water} = 1) = \frac{141.5}{131.5 + \text{°API}}$	
API BARREL	
1 API bbl = 42 U.S. gallons = 35 U. K. (Imperial) gallons = 5.61 ft ³ = 0.159 m ³ = 159 liters	
LIQUID FLOWRATE	
1 bbl/D = 1.84 × 10 ⁻⁶ m ³ /s = 0.159 m ³ /D	
GAS-OIL RATIO	
1 scf/STB = 0.178 m ³ /m ³	

The field units most frequently used are

- length: feet (ft)
- pressure: lb_f/in.² (psi)
- volume: barrels (bbl) for liquid standard cubic feet (scf) for gas
- volumetric rate: stock tank barrels per day (STB/D) for oil, standard cubic feet per day (scf/D) for gas
- viscosity: centipoise (cp)
- permeability: millidarcy (md)
- time: hours or days, according to the application
- oil density: API gravity (°API), pounds per cubic foot (lb_m/ft³)
- gas density: pounds per cubic foot (lb_m/ft³)
- temperature: degrees Fahrenheit (°F), absolute temperature (°F + 459.67) degrees Rankine (°R).

Table C.1 Mechanical Quantities in SI Units

	Quantity	Dimension	Unit	Alias	Symbol
Secondary	Length	L	meter		m
	Time	T	second		s
	Mass	M	kilogram		kg
	Velocity	L/T	m/s		
	Acceleration	L/T ²	m/s ²		
Primary	Frequency	1/T	1/s	hertz	Hz
	Force	ML/T ²	kg × m/s ²	newton	N
	Pressure	M/T ² L	kg/(s ² × m) = N/m ²	pascal	Pa
	Energy	ML ² /T ²	kg × m ² /s ² = N × m	joule	J
	Power	ML ² /T ³	kg × m ² /s ³ = J/s	watt	W

Table C.2 Mechanical Quantities in English Engineering Units

	Quantity	Dimension	Unit	Alias	Symbol
Secondary	Length	L	foot		ft
	Time	T	second		s
	Mass	M	pound-mass		lbm
	Force	F	pound-force		lbf
	Velocity	L/T	ft/s		
Primary	Acceleration	L/T ²	ft/s ²		
	Frequency	1/T	1/s	hertz	Hz
	Pressure	F/L ²	lb _f /ft ²		
	Energy	LF	ft × lb _f		
	Power	LF/T	ft × lb _f /s		

Table C.3 SPE Preferable Metric Units

Quantity	Symbol	SI	Preferred	Conversion
Flow rate	<i>q</i>	m ³ /s	dm ³ /s	1 dm ³ /s = 10 ³ m ³ /s
Permeability	<i>k</i>	m ²	μm ²	1 μm ² = 10 ⁻¹² m ²
Pressure	<i>p</i>	Pa	kPa	1 kPa = 1000 Pa
Time	<i>t</i>	s	h	1 h = 3600 s
Compressibility	<i>c</i>	1/Pa	1/kPa	1/kPa = 0.001 1/Pa

Vedlegg 3: Universell gasskonstant, R

Table A.2 Values of the universal gas constant

$$\begin{aligned}
 R &= 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 83.14 \text{ cm}^3 \text{ bar mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 8,314 \text{ cm}^3 \text{ kPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 82.06 \text{ cm}^3(\text{atm})\text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 62,356 \text{ cm}^3(\text{torr})\text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 1.987(\text{cal})\text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 1.986(\text{Btu})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} \\
 &= 0.7302(\text{ft})^3(\text{atm})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} = 10.73(\text{ft})^3(\text{psia})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} \\
 &= 1,545(\text{ft})(\text{lb}_f)(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1}
 \end{aligned}$$

Vedlegg 4: Omregningstabeller US ↔ SI

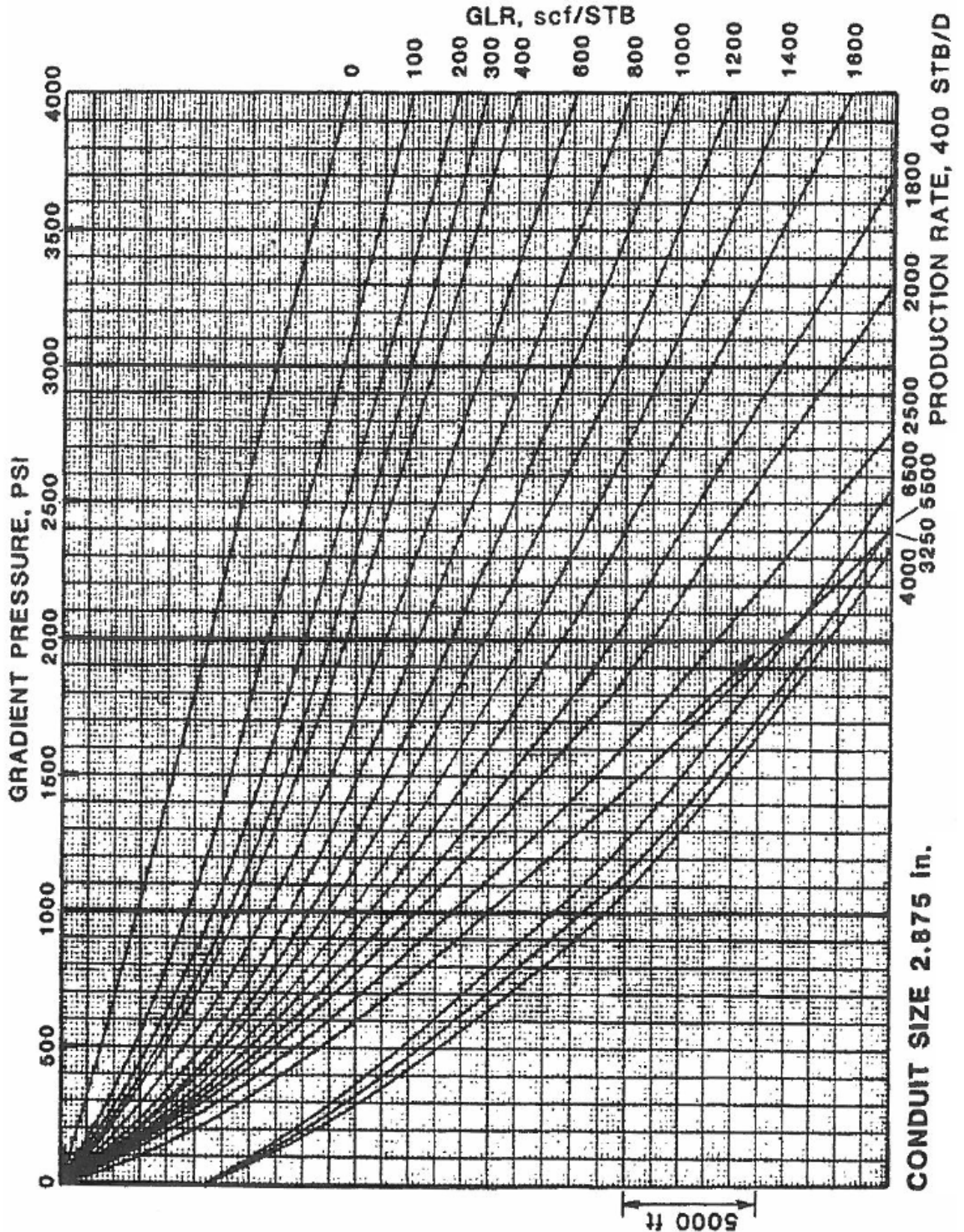
Quantity	U.S. Field Unit	To SI Unit	To U.S. Field Unit	SI Unit
Length (<i>L</i>)	feet (ft)	0.3048	3.2808	meter (m)
	mile (mi)	1.609	0.6214	kilometer (km)
	inch (in.)	25.4	0.03937	millimeter (mm)
Mass (<i>M</i>)	ounce (oz)	28.3495	0.03527	gram (g)
	pound (lb)	0.4536	2.205	kilogram (kg)
	Lbm	0.0311	32.17	slug
Volume (<i>V</i>)	gallon (gal)	0.003785	264.172	meter ³ (m ³)
	cu. ft. (ft ³)	0.028317	35.3147	meter ³ (m ³)
	barrel (bbl)	0.15899	6.2898	meter ³ (m ³)
	Mcf (1000 ft ³ , 60°F, 14.7 psia)	28.317	0.0353	Nm ³ (15°C, 101.325 kPa)
Area (<i>A</i>)	sq. ft (ft ²)	9.29×10^{-2}	10.764	meter ² (m ²)
	Acre	4.0469×10^3	2.471×10^{-4}	meter ² (m ²)
	sq. mile	2.59	0.386	(km) ²
Pressure (<i>P</i>)	lb/in. ² (psi)	6.8948	0.145	kPa (1000 Pa)
	Psi	0.0680	14.696	atm
	psi/ft	22.62	0.0442	kPa/m
	inch Hg	3.3864×10^3	0.2953×10^{-3}	Pa
Temperature (<i>t</i>)	F	0.5556(F-32)	1.8 C + 32	C
	Rankine (°R)	0.5556	1.8	Kelvin (K)
Energy/work (<i>w</i>)	Btu	252.16	3.966×10^{-3}	cal
	Btu	1.0551	0.9478	kilojoule (kJ)
	ft-lbf	1.3558	0.73766	joule (J)
	hp-hr	0.7457	1.341	kW-hr
Viscosity (μ)	Cp	0.001	1,000	Pa · s
	lb/ft-sec	1.4882	0.672	kg/(m-sec) or (Pa · s)
	lbf-s/ft ²	479	0.0021	dyne-s/cm ² (poise)
Thermal conductivity (<i>k</i>)	Btu-ft/hr-ft ² -F	1.7307	0.578	W/(m · K)
Specific heat (<i>C_p</i>)	Btu/(lbm°F)	1	1	cal/(g°C)
	Btu/(lbm°F)	4.184×10^3	2.39×10^{-4}	J. (kg · K)
Density (ρ)	lbm/ft ³	16.02	0.0624	kg/m ³
Permeability (<i>k</i>)	Md	0.9862	1.0133	mD (= 10^{-15} m ²)
	md (= 10^{-3} darcy)	9.8692×10^{-16}	1.0133×10^{15}	m ²

Temperatur: $K = 273.15 + ^\circ C$, $R = 459.67 + ^\circ F$ ($\approx 460 + ^\circ F$)

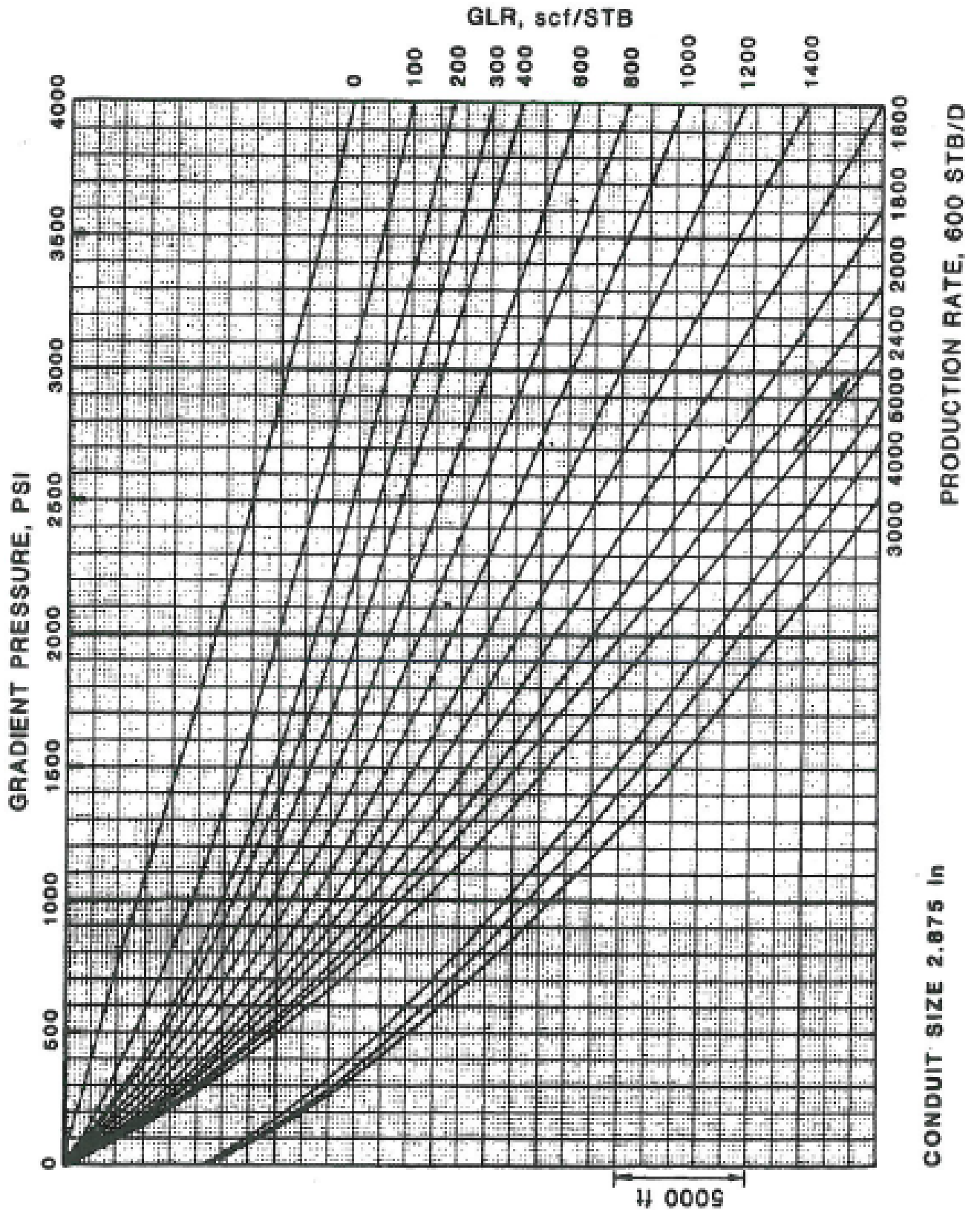
Vedlegg 5: Konstanter til choke beregninger

Correlation	<i>C</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
Gilbert	10	0.546	1.89
Ros	17.4	0.5	2
Baxendell	9.56	0.546	1.93

Vedlegg 6: Gradientkurvediagram 2.875" produksjonsrør



Vedlegg 7: Gradientkurvediagram 2.875" produksjonsrør



Vedlegg 8: Trykk vs. flow diagram til figurplot oppgave 2