



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK – NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

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

DATO: **23.11.2016**

VARIGHET: **4 timer**

TILLATTE HJELPEMIDDEL: **Godkjent kalkulator.**

OPPGAVESETTET BESTÅR AV: **4 oppgaver**

OPPGAVE 1: <i>Strømning og pumper,</i>	side 2 - 3.
OPPGAVE 2: <i>Strømning i reservoar</i>	side 4
OPPGAVE 3: <i>Brønnstrømning og produksjon</i>	side 5 - 6
OPPGAVE 4: <i>Brønnstimulering, flow styring, og gassløft</i>	side 6 - 7.

VEDLEGG 1: Tekst oppgave 2, 3 og 4 på engelsk	side i - iii
VEDLEGG 2: Likninger,	side iv - vi.
VEDLEGG 3: Spesielle enheter	side vii.
VEDLEGG 4: Universell gasskonstant, R	side viii.
VEDLEGG 5: Omregningstabeller US \leftrightarrow SI	side viii.
VEDLEGG 6: Konstanter til choke beregninger	side viii.
VEDLEGG 7: Fanning Friction factor Chart	side ix.
VEDLEGG 8: Gradientkurvediagram $D=2.875''$ rør	side x.
VEDLEGG 9: Trykk vs. flow diagram til figurplot oppgave 3	side xi.

MERKNADER: **Alle fire eksamensoppgavene har lik vektning og teller likt ved bedømming.**

Dersom du ikke behersker norsk 100 %: Gjør oppmerksom på dette i begynnelsen av besvarelsen din.

RÅD: *Les raskt gjennom alle oppgavene før du begynner, og finn ut hva som må avklares med spørsmål til faglærerne. Planlegg tidsbruken slik at hvert hovedområde får nødvendig tid!*

FAGANSVARLIG: Thor Martin Svartås

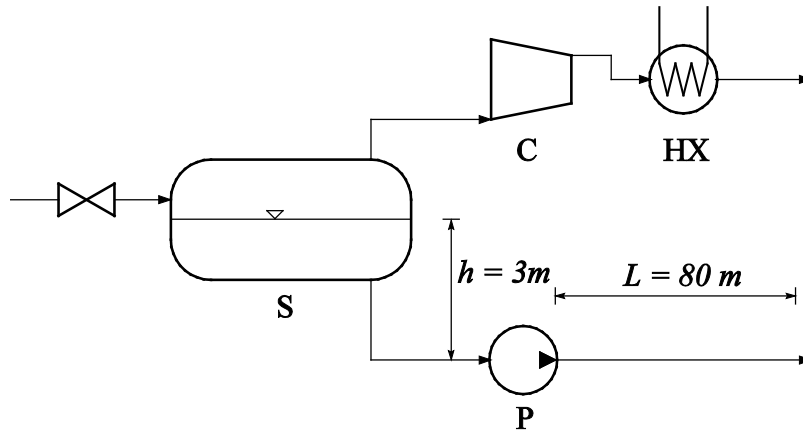
TLF.NR. : 51 83 22 85

Faglærere (Remi Meindinyo og Runar Bøe) kommer til å besøke eksamenslokalene for spørsmål knyttet til oppgavetekst rundt kl. 10 og kl. 12 på eksamensdagen.

Oppgave 1: Strømning og pumper

[Oppgave 1 teller som 1 oppgave à 1 time av 4 og gis vektning 1 (25 %) i bedømmelsen.]

(I denne oppgaven kan du velge selv hvilke enheter du vil oppgi svarene i, og om du vil regne på masse- eller molbasis. Velg det enkleste i hvert tilfelle, men pass på enhetene uansett!)



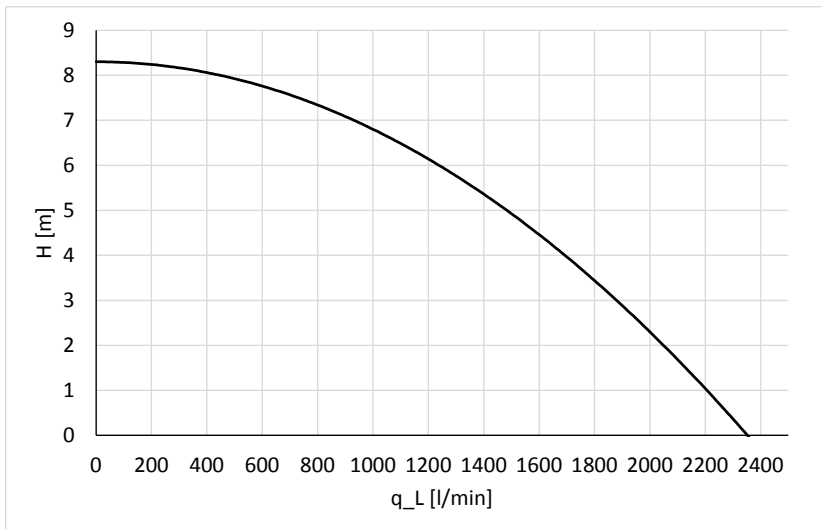
Figuren viser en olje/gass separator, hvor oljen går til en pumpe, og gassen via en kompressor til en varmeveksler. Om strømmen inn, etter ventilen vet man følgende:

Trykk:	p	= 5 bar
Temperatur:	T	= 55 °C
Specific gravity, gass:	γ_g	= 0.69
Kompressibilitetsfaktor, gass:	z	= 0.98
Tetthet, olje:	ρ_o	= 840 kg/m ³

a) Separatoren S er horisontal, med indre diameter $D_s = 96$ cm, og lengde $L_s = 4$ m. Designfaktoren $K = 0.45$ ft/s. Hva blir gasskapasiteten ?

b) Væsknivået er slik at halve volumet i separatoren er opptatt av olje. Vis at væskekapasiteten blir 0.024 m³/s = 0.85 ft³/s for en oppholdstid $\tau = 12$ min (innenfor en rimelig nøyaktighet).

c) Oljen transporteres videre gjennom sentrifugalpumpen P med en rate tilsvarende væskekapasiteten. Innløpet er plassert 3 m lavere enn nivået i separatoren og pumpekarakteristikken er gjengitt i figuren under. Hva blir *absolutt-trykket* på utløpet til pumpen ?



d) Røret som går videre fra pumpen har en indre diameter $d = 10$ cm, og det fortsetter i samme høyde over en distanse langs med røret på $L = 80$ m. Anta en Darcy friksjonsfaktor $f_D = 0.019$. Hva blir trykkdifferansen over denne distansen, og hva blir *absolutt-trykket* på enden (ved $L = 80$ m) ?

e) Man ønsker å komprimere gassen i kompressoren C, som arbeider mot et trykkforhold $p_2/p_1 = 3.1$. Anta at gassen er tilnærmet ideell ($p \cdot v = R \cdot T$), at kompresjonen foregår isentropisk, og at adiabateksponenten er $k = 1.3$. Hvor mye arbeid pr gjennomstrømmet mengde gass behøves det (J/kg eller J/mol) ?

f) Etter kompresjonen holder gassen $T_2 = 153$ °C. Varmeveksleren HX kan fjerne 1400 kJ varme pr sekund ($Q = 1400$ kW). Gassen har en varmekapasitet $cp = 2.25$ kJ/kg K. Anslå temperaturen gassen blir kjølt til.

(fant du ikke noe svar i a), regn med en gassmengde tilsvarende 0.3 kmol/s)

Oppgave 2: Strømning i reservoar

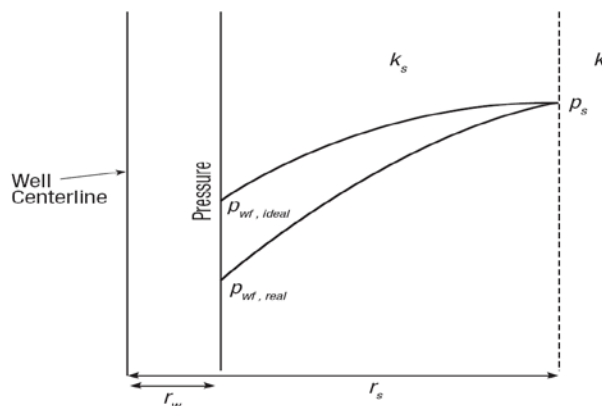
Oppgavetekst på engelsk ligger i vedlegg 1 på side i dersom du synes engelsk terminologi faller lettere enn norsk.

[Oppgave 2 teller med faktor 1 oppgave à 1 timer av 4 og gis vektning 1 (25 %) i bedømmelsen. Ved hvert delspørsmål er det angitt et antall kredittpoeng som viser hvor mye dette teller i bedømmingen.]

- a. Et olje reservoar har noe gas på toppen av olje fasen. Reservoaret har også kontakt med grunnvann.
 - i. List opp alle naturlige drivmekanismer i reservoaret. (3 kredittpoeng)
 - ii. Hvilket strømningsregime har vi i reservoaret ved oppstart av produksjon? Bruk tydelig merket figur for å vise trykkfordelingen fra reservoar til brønnen. (3 kredittpoeng)
 - iii. Hvilket strømningsregime har vi i reservoaret etter ca. to år av produksjon? Bruk tydelig merket figur for å vise trykkfordelingen fra reservoar til brønnen. (3 kredittpoeng)

- b. En brønn er boret og komplettert med foringsrør og sement.
 - i. Hva må gjøres for å etablere en strømningsløp mellom brønnen og reservoaret? Gi en kort beskrivelse av operasjonen. (3 kredittpoeng)
 - ii. Wireline kan brukes for denne operasjonen. Nevne en annen måte som denne operasjonen kan utføres. (1 kredittpoeng)

- c. Figuren under viser trykkresponsen til en brønn ved en gitt produksjonsraten, q_o , med trykk, p_s , i reservoaret ved skin sonens «start», i avstand r_s , fra brønnens sentrum. Trykket ved brønnen uten skin er $p_{wf,ideal}$, og trykket ved brønn med skin $p_{wf,real}$.



Near-wellbore zone. Ideal and real flowing bottomhole pressures.

- i. Definer Skinn Effekt (1 kredittpoeng)
- ii. Utlede (Finn) uttrykket for trykkfallet over skin sonen, Δp_s , i nærbrønnområdet fra et reservoar, som er illustrert i figuren (4.5 kredittpoeng)
- iii. Utlede (Finn) Hawkin's uttrykket for skinn (4.5 kredittpoeng)
- iv. Beregn skadeforholdet av reservoaret, hvis skin faktor er 18. Brønnens radius er 4,5 tommer, og skinn sonen strekker seg 2 fot fra brønnen. (2 kredittpoeng)

Oppgave 3: Strømning i brønn

[Oppgave 3 teller som 1 oppgaver à 1 time av 4 og gis vektning 1 (25 %) i bedømmelsen.]

En vertikal produksjonsbrønn er plassert i reservoaret fra oppgave 2 som ligger på 8 000 ft.

Reservoar- og fluid data er:

- Reservoartrykk, $p_e = 8000$ psia, oljens kokepunkt, $p_b = 5500$ psia
- Viskositet olje, $\mu_o = 1.2$ cp, volumfaktor olje, $B_o = 1.2$, Relativ tetthet olje, $\gamma_o = 0.78$, GOR = 1000 scf/stb
- Gassen har en relativ tetthet på $\gamma_g = 0.70$ og gassens adiabatkonstant, κ , er 1.2.
- Reservoar tykkelse mot brønn, $h = 100$ ft, permeabilitet, $k = 120$ mD, porøsitet $\phi = 0.2$
- Brønnens radius, $r_w = 4.5$ in, dreneringsradius reservoar, $r_e = 1000$ ft
- Produksjonsrøret har diameter 2.875" (2.875 tommer). Relativ Roughness (ruhet), $\epsilon = 0.001$.

a.

- i. Beregn permeabilitet på skinn sonen, k_s . (1 kredittpoeng)

Anta at trykket i reservoaret begynner å falle etter 10 år med produksjon av olje fra brønnen, og at produksjonsingenjørene bestemmer seg for å senke brønnhodetrykket, P_{wh} , for å holde strømningsraten.

- ii. Hvilket strømningsregime har vi i reservoaret nå? Beskriv strømningsregimet via en figur som skisserer trykkfordelingen fra reservoar til brønnen. (3 kredittpoeng)
- iii. Beregn brønnens (reservoarets) produksjonsindeks for strømningsregimet i (ii). (2 kredittpoeng)

b. En brønnstest for brønnen har gitt følgende resultat:

$Q_{o,test}$	$p_{wf,test}$
0	8000
450	A
2500	B
C	5500
D	2500
E	0

- i. Finn verdiene av A, B, C, D, og E i tabellen. (6 kredittpoeng)
- ii. Benytt vedlagt / utlevert ruteark (nye ruteark kan fås hos eksamensvakt) til å plote IPR kurven for reservoaret. (4 kredittpoeng)
- c. En velger å produsere brønnen ved en platårate på 1000 stb/d, til vi når minimum brønnhodetrykk, $P_{wh,min}$.
- i. Sett opp et uttrykk for brønnstrømstrykket, P_{wf} , som funksjon av minimum brønnhodetrykk, $P_{wh,min}$. (1 kredittpoeng)
- ii. Forutsatt enfase væskestrømning i brønnen, sett opp et uttrykk for det totale trykkfallet i brønnen (diameter av produksjonsrøret $D =$ konstant). (1 kredittpoeng)

- iii. Forutsatt enfase væskestrømning i brønnen, hva er brønntrykket, P_{wf} , ved platåraten hvis brønnhodetrykket, $P_{wh,min} = 1200$ psia. (7 kredittpoeng)

Oppgave 4: Gassløft, Brønnstimulering, og flow kontroll

[Oppgave 4 teller som 1 oppgaver à 1 timer av 4 og gis vektning 1 (25 %) i bedømmelsen.]

Oppgavetekst på engelsk ligger i vedlegg 1 på side iii dersom du synes engelsk terminologi faller lettere enn norsk.

a. Gassløft

- i. Definer gassløft. (2 kredittpoeng)
- ii. Hva er effekten av gassløft på TPR av en brønn? Illustrer dette med TPR-kurver ved økende gassinjeksjonsrater $q_{g1} < q_{g2} < q_{g3}$. (2 kredittpoeng)
- iii. Når bør (kan) en vurdere bruk av gassløft, for brønnen i oppgave 3. (1 kredittpoeng)

En brønn med produksjonsrør på 2.875 tommer i diameter ligger på 8000 ft. Gass injiseres i brønnen for å holde produksjonen ved 600 stb / d, ved et brønnhodetrykk på $p_{wh} = 1500$ psi. Oljens naturlige GLR = 1000 scf/stb. Anta at nødvendig GLR for gassløft er 2000 scf/stb.

- iv. Beregn trykkfallet over brønnen under gassløft (bruk gradient kurve diagrammet i vedlegg 8, for å vise løsning). Beregn deretter gassinjeksjonsraten. (3 kredittpoeng)

b. Det blir besluttet til å forbedre produktiviteten av reservoaret i oppgave 3 ved syrebehandling.

- i. Gi behandlingsprosedyren dersom reservoaret er
 1. Karbonat (1.5 kredittpoeng)
 2. Sandstein (1.5 kredittpoeng)
- ii. Etter syrebehandling, synker skinfaktor fra 18 til 3. Hva er strømningseffektiviteten før behandling og etter behandling. (2 kredittpoeng)

c. Frakturering

- i. I hvilke tilfelle vil du anbefale frakturering for å oppnå økt produktivitet fra reservoar til brønn? (1 kredittpoeng)
- ii. Hvilke typer reservoar kan syre frakturering brukes for? (1 kredittpoeng)
- iii. Et reservoar med permeabilitet k_R ble frakturert. Dersom en antar elliptisk form etter oppsprekking, finner en ved beregning at sprekk lengden er 250 m. Hva vil sprekk lengden bli dersom en antar rektangulær sprekk? (1 kredittpoeng)

d. Når vann blir produsert sammen med olje og gass, kan produksjonsproblemer oppstå. En må da iverksette tiltak for å sikre problemfri produksjon og fluidstrøm (flow assurance) fra brønn og fram til prosessanlegg på land eller plattform.

- i. List opp fire produksjonsproblemer som kan oppstå og som krever tiltak (flow assurance), og angi hva som forårsaker problemene. (4 kredittpoeng)
 - ii. Gi en klassifisering av produksjonskemikalier for olje- og gassfelt. (2 kredittpoeng)
 - iii. Hva er det vanligste produksjonsproblemet (flow assurance issue) i olje- og gassindustrien. Gi to kjemikalier som brukes for å håndtere dette problemet. (2 kredittpoeng)
- e. Hvilke brønnoperasjon må utføres når en brønn når slutten av sitt liv? (1 kredittpoeng)

Vedlegg 1: Engelsk oppgavetekst oppgave 2, 3 og 4

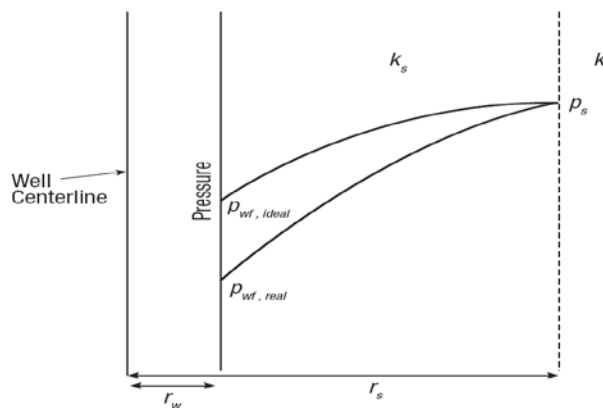
Oppgavene vektet likt ved bedømmelsen som spesifisert i oppgavetekst på norsk foran.

Question 2 Flow in the reservoir

- a. An oil reservoir has some gas trapped above the oil phase. The reservoir is also in contact with some ground water around its edge.
 - i. List all natural drive mechanisms of this reservoir. (3 points)
 - ii. What flow regime will we have in the reservoir at the start of production? Define this flow regime using a figure to show the pressure wave propagation from the reservoir boundaries to the well. (3 points)
 - iii. What flow regime will we have in the reservoir after two years of production? Define this flow regime using a figure to show the pressure wave propagation from the reservoir boundaries to the well. (3 points)

- b. A well is drilled into the reservoir and completed with casing and cement.
 - i. What must be done to establish a flow path between the well and the reservoir? Give a short description of this operation. (3 points)
 - ii. This operation can be performed via wireline. Name another way this operation may be performed. (1 point)

- c. The figure shows the pressure response to a well at a given production rate, q_o , with pressure p_s at the near-wellbore area radius, r_s . Pressure at the well without skin is $p_{wf,ideal}$, and pressure at the well with skin is $p_{wf,real}$.



Near-wellbore zone. Ideal and real flowing bottomhole pressures.

- i. Define skin effect. (1 point)
- ii. Derive the expression for pressure drop due to skin, Δp_s , in the near-wellbore area of a reservoir as illustrated in the figure. (4.5 points)
- iii. Derive Hawkins' formula for skin factor. (4.5 points)
- iv. Calculate the damage ratio of the reservoir, if the skin factor is 18. The well radius is 4.5 inches, and the skin zone extends 2 feet from the well. (2 points)

Question 3: Well deliverability and flow from the reservoir to the well

A vertical well that lies at a depth of 8000 ft produces from the reservoir in **Question 2**.

Reservoir data, and fluid data are:

- Reservoir pressure, $p_e = 8000$ psia, oil bubble point pressure, $p_b = 5500$ psia
- Oil viscosity, $\mu_o = 1.2$ cp, oil volume factor, $B_o = 1.2$, Relative density of oil $\gamma_o = 0.78$, $GOR = 1000$ scf/stb
- The gas has a relative density of $\gamma_g = 0.70$ and the gas adiabatic constant, κ , is 1.2
- The reservoir thickness, $h = 100$ ft, permeability, $k = 120$ mD, porosity $\phi = 0.2$
- The well radius, $r_w = 4.5$ in, reservoir drainage radius, $r_e = 1000$ ft
- Diameter of the production tubing is 2.875 inches. Relative Roughness, $\varepsilon = 0.001$.

a.

- i. Estimate the permeability of the skin zone of the reservoir, k_s . (1 point)

Assume that after 10 years of production, the reservoir pressure starts to drop. However, the production engineers decide to decrease the wellhead pressure, P_{wh} , to keep the flowrate constant.

- ii. What flow regime do we have in the reservoir now? Define this flow regime using a figure to show the pressure wave propagation from the reservoir boundaries to the well. (3 points)
- iii. Calculate the productivity index of the reservoir for the flow regime in (ii) above. (2 points)

b. A well test for the reservoir gave the following data:

$Q_{o,test}$	$p_{wf,test}$
0	8000
450	A
2500	B
C	5500
D	2500
E	0

- i. Find the values of A, B, C, D, and E in the table. (6 points)
 - ii. Plot the IPR for the reservoir using the attached graph-sheet. (4 points)
- c.** The well is produced at a plateau rate of 1000 stb/d, until we reach the minimum wellhead pressure, $P_{wh,min}$.
- i. Write the expression for the flowing well pressure, P_{wf} , as a function of the minimum wellhead pressure, $P_{wh,min}$. (1 point)
 - ii. Assuming single phase liquid flow in the well, write the expression for the total pressured drop across the well (the diameter of the production tubing $D =$ constant). (1 point)
 - iii. Assuming single phase liquid flow in the well, what is the flowing well pressure, P_{wf} , at the plateau rate if the minimum wellhead pressure, $P_{wh,min} = 1200$ psia. (7 points)

Question 4 Gaslift, Production enhancement, and flow control:

- a. Gas Lift
- i. Define gas lift. (2 points)
 - ii. What is the effect of gaslift on the TPR of a well? Illustrate this with TPR-curves at increasing gas injection rates $q_{g1} < q_{g2} < q_{g3}$. (2 points)
 - iii. Considering the well in problem 3, when may we decide to use gaslift? (1 points)
 - iv. Gas is injected into a well with tubing diameter of 2.875 inches that lies at a depth of 8000 ft, to maintain production at 600 stb/d, at a wellhead pressure of $P_{wh} = 1500$ psi. The natural flowing GLR = 1000 scf/stb. If the GLR required for gaslift is 2000 scf/stb; calculate the pressure drop across the well during gaslift (use the gradient curve diagram in vedlegg 8, to show your solution). Calculate the gas injection rate. (3 points)
- b. It is decided to improve the productivity of the reservoir in **Question 3** with acid treatment
- i. Outline the treatment procedure if the reservoir is
 1. Carbonate (1.5 points)
 2. Sandstone (1.5 points)
 - ii. Skin factor was reduced from 18 to 3 after treatment. What is the flow effectivity before and after treatment (2 points)
- c. Well fracturing
- i. Give an example of a reservoir for which hydraulic fracturing may be used to improve the productivity. (1 points)
 - ii. What type of reservoirs may acid fracturing be used for? (1 points)
 - iii. A reservoir with permeability k_R , was fractured. The resulting fracture length for an elliptical fracture is 250 m. What will be the fracture length for a rectangular fracture? (1 point)
- d. When water is produced along with oil and gas, some flow assurance issues may occur.
- i. List four (4) flow assurance issues that may occur and what causes them. (4 points)
 - ii. Give the classification of oil and gas field production chemicals. (2 points)
 - iii. What flow assurance issue is the most common? Give two chemicals used for its management. (2 points)
- e. What well operation must be performed when a well reaches the end of its life? (1 point)

Vedlegg 2: 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.

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

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

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

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

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

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

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

$$q_o = C \cdot (p_b^2 - p_{wf}^2)^n$$

$$q_g = C \cdot (p_e^2 - p_{wf}^2)^n, \quad n = \frac{\log \frac{q_{g1}}{q_{g2}}}{\log \frac{p_e^2 - p_{wf1}^2}{p_e^2 - p_{wf2}^2}}$$

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

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

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

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

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

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

$$g = 32.17 \text{ ft/s}^2$$

$$g_c = 32.17 \text{ (lb}_m \text{ ft)/(lb}_f \text{ s}^2)$$

$$\rho_{\text{vann}} = 62.4 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

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

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

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

$$p_{inj,ann} = p_{surf} \cdot \left(1 + \frac{H_{inj}}{40\,000} \right)$$

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

$$s = \frac{k \cdot h}{141.2 \cdot B_o \cdot \mu_o \cdot J} - \left[\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} \right]$$

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

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

$$\Delta p_s = \frac{q_o \cdot 141.2 \cdot B_o \cdot \mu_o}{k \cdot h}$$

$$\beta = \frac{v_{\text{mineral}} \cdot MW_{\text{mineral}}}{v_{\text{acid}} \cdot MW_{\text{acid}}}$$

$$\chi = \beta \cdot \frac{\rho_{\text{acid solution}}}{\rho_{\text{mineral}}}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vedlegg 3: Spesielle enheter

Special Units

API GRAVITY (OF OIL)

$$\gamma(\text{water} = 1) = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ\text{API}}$$

API BARREL

$$1 \text{ API bbl} = 42 \text{ U.S. gallons} = 35 \text{ U. K. (Imperial) gallons} \\ = 5.61 \text{ ft}^3 = 0.159 \text{ m}^3 = 159 \text{ liters}$$

LIQUID FLOWRATE

$$1 \text{ bbl/D} = 1.84 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 0.159 \text{ m}^3/\text{D}$$

GAS-OIL RATIO

$$1 \text{ scf/STB} = 0.178 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

The field units most frequently used are

- length: feet (ft)
- pressure: lb/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 ($^\circ\text{API}$), pounds per cubic foot (lb_m/ft^3)
- gas density: pounds per cubic foot (lb_m/ft^3)
- temperature: degrees Fahrenheit ($^\circ\text{F}$), absolute temperature ($^\circ\text{F} + 459.67$) degrees Rankine ($^\circ\text{R}$).

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	lbf/ft ²		
	Energy	LF	ft × lbf		
	Power	LF/T	ft × lbf/s		

Table C.3 SPE Preferable Metric Units

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

Vedlegg 4: 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 5: Omregningstabeller US ↔ SI

282 APPENDICES

Appendix A: Unit Conversion Factors

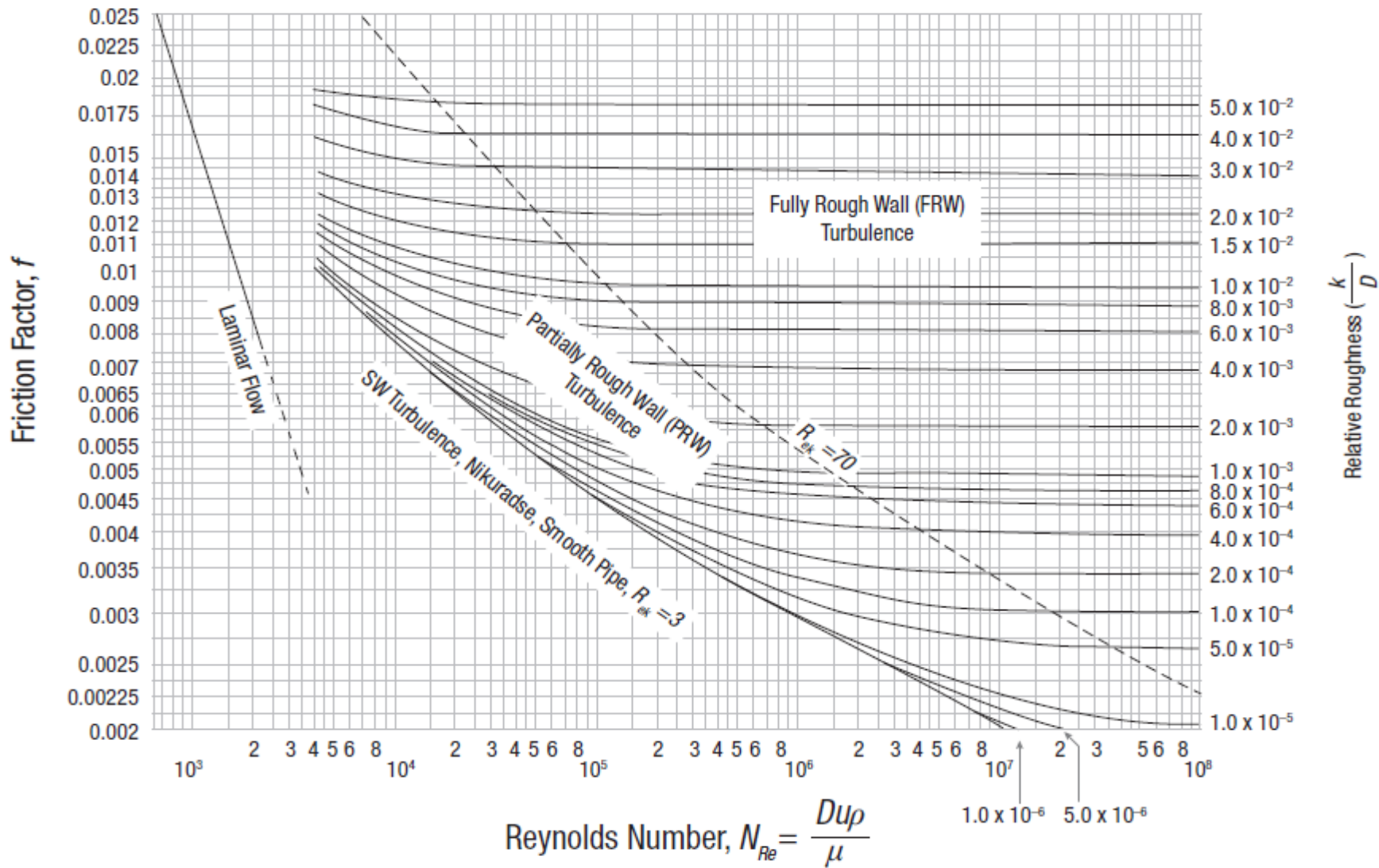
Quantity	U.S. Field unit	To SI unit	To U.S. Field unit	SI unit
Length (<i>L</i>)	feet (ft)	0.3048 0.3048	3.2808	meter (m)
	mile (mi)	1.609	0.6214	kilometer (km)
	inch (in.)	25.4	0.03937	millimeter (mm)
Mass (<i>M</i>)	ounce (oz)	28.3495	0.03527	gram (g)
	pound (lb)	0.4536	2.205	kilogram (kg)
	lbm	0.0311	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 (1,000 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)	1.8C+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 (<i>μ</i>)	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 (<i>P</i>)	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: $K = 273.15 + ^\circ C$, $R = 459.67 + ^\circ F$ ($\approx 460 + ^\circ F$)

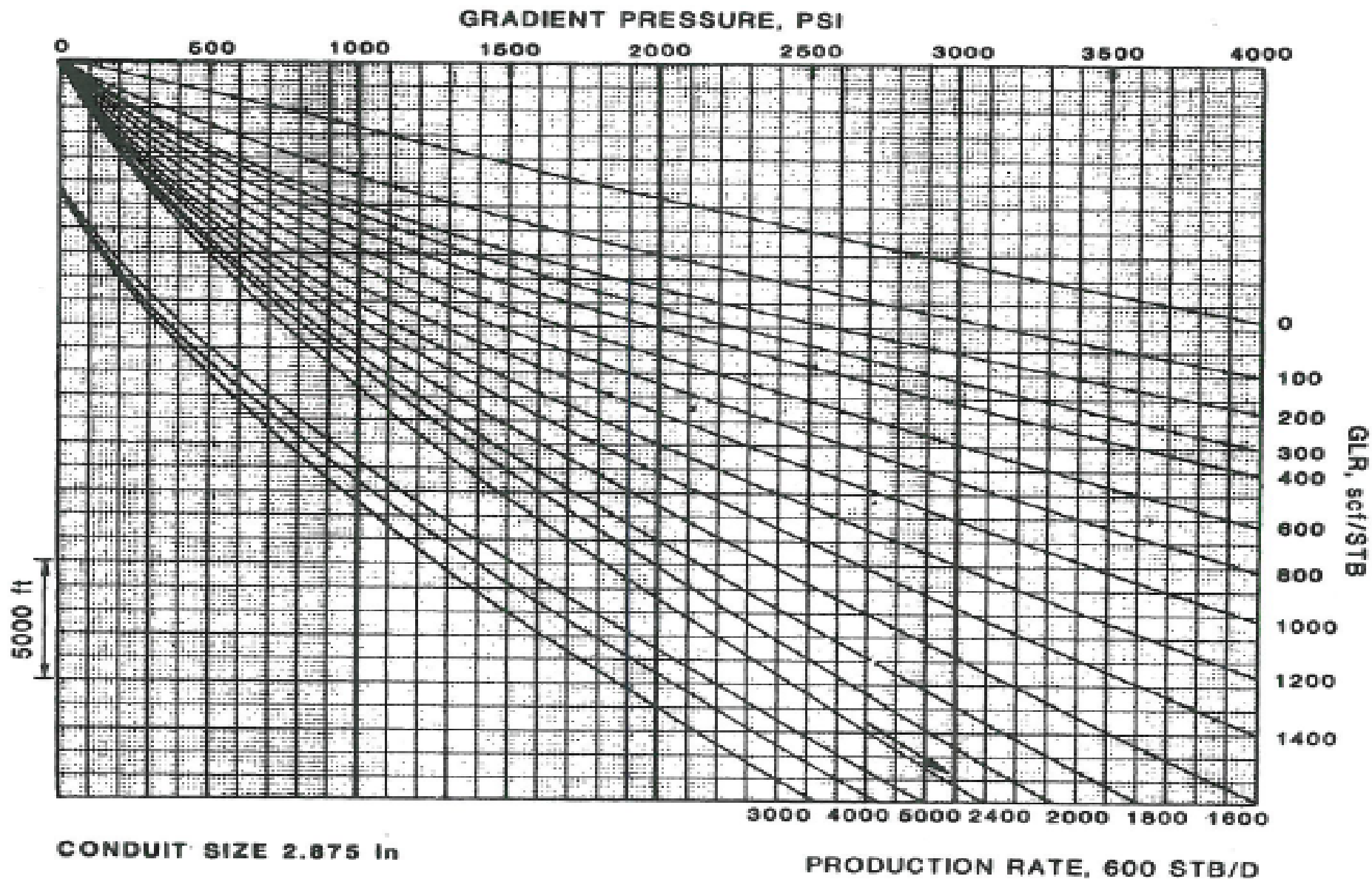
Vedlegg 6: Konstanter til choke beregninger

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 7: Fanning Friction Factor Chart



Vedlegg 8: Gradientkurvediagram 2.875" produksjonsrør



Vedlegg 9: Trykk vs. flow diagram til figurplot oppgave 3

