ResTek1—Løsning Øving 8

Oppgave 1

a) $R_s = \Delta V_{ogs}/\Delta V_{oos}$; $B_o = \Delta V_{or}/\Delta V_{oos}$; $B_g = \Delta V_{gr}/\Delta V_{ggs}$; $r_s = \Delta V_{gos}/\Delta V_{ggs}$.
Med ΔV_{os} definert som totalt oljevolum på overflaten, $\Delta V_{os} = \Delta V_{oos} + \Delta V_{gos}$ og ΔV_{gs} definert som totalt gassvolum på overflaten, $\Delta V_{gs} = \Delta V_{ggs} + \Delta V_{ogs}$ så er $R = \Delta V_{gs}/\Delta V_{os}$.

b) Se forelesningsnotatene.

La Q betegne volumrate ved overflateforhold og q volumrate ved reservoarforhold. Da er $R = Q_g/Q_o$, $Q_o = q_o/B_o$, $Q_g = Q_{gf} + Q_o R_s$, $Q_{gf} = q_{gf}/B_g$, hvor indeks f betyr fri slik at Q_{gf} er overflaterate av fri gassrate i reservoaret inn mot brønnen. Vi har da at $R = Q_{gf}/Q_o + R_s$, $Q_{gf}/Q_o = (q_{gf}B_o)/(B_g q_o) = (k_g\mu_o B_o)/(k_o\mu_g B_g)$ ved bruk av Darcy's lov inn mot brønnen, og dermed fås oppgitt uttrykk.

En annen måte å se det samme på er å starte med

$$R = \frac{\Delta V_{ggs} + \Delta V_{ogs}}{\Delta V_{oos} + \Delta V_{gos}} = \frac{\Delta V_{ggs}}{\Delta V_{oos}} + R_s = \frac{\Delta V_{gr}/B_g}{\Delta V_{or}/B_o} + R_s,$$

siden $\Delta V_{gos} = 0$, og videre er $\Delta V_{gr}/\Delta V_{or} = q_{gf}/q_o$ og dette forholdet er gitt av Darcy's lov igjen. Dermed fås samme svar som ovenfor. Vi merker oss også at $\alpha = \Delta V_{ggs}/\Delta V_{oos}$, se spørsmål c).

c) Vi bruker her at $q_o\Delta t = \Delta V_{or}$, $q_g\Delta t = \Delta V_{gr}$, $Q_o\Delta t = \Delta V_{os}$, $Q_g\Delta t = \Delta V_{gs}$, hvor q er reservoarrate, Q er overflaterate, Δt det lille tidssteget som Δ-volumene blir produsert over. Vi uttrykker overflatevolumene ΔV_{os} og ΔV_{gs} ved reservoarvolumene ΔV_{or} og ΔV_{gr} samt volumfaktorer og får

$$\begin{aligned}
\Delta V_{os} &= \Delta V_{gos} + \Delta V_{oos} = r_s\Delta V_{ggs} + \Delta V_{or}/B_o = r_s\Delta V_{gr}/B_g + \Delta V_{or}/B_o,\\
\Delta V_{gs} &= \Delta V_{ogs} + \Delta V_{ggs} = R_s\Delta V_{oos} + \Delta V_{gr}/B_g = R_s\Delta V_{or}/B_o + \Delta V_{gr}/B_g.
\end{aligned}$$

Dette er to ligninger med to ukjente som gir

$$\Delta V_{or} = \frac{\Delta V_{os} - r_s\Delta V_{gs}}{1 - r_s R_s} B_o,$$

og

$$\Delta V_{gr} = \frac{\Delta V_{gs} - R_s\Delta V_{os}}{1 - r_s R_s} B_g.$$

Vi deler disse to ligningene på hverandre og får

$$\frac{\Delta V_{gr} B_o}{\Delta V_{or} B_g} = \frac{\Delta V_{gs} - R_s\Delta V_{os}}{\Delta V_{os} - r_s\Delta V_{gs}},$$

og

$$\alpha = \frac{q_g B_o}{q_o B_g} = \frac{\Delta V_{gr} B_o}{\Delta V_{or} B_g} = \frac{R - R_s}{1 - r_s R}, \quad \text{eller} \quad R = \frac{\alpha + R_s}{1 + \alpha r_s}.$$

En annen måte å gjøre dette på er å bruke at

$$R = \frac{\Delta V_{ggs} + \Delta V_{ogs}}{\Delta V_{oos} + \Delta V_{gos}} = \frac{\dfrac{\Delta V_{ogs} + \Delta V_{ggs}}{\Delta V_{oos}}}{\dfrac{\Delta V_{oos} + \Delta V_{gos}}{\Delta V_{oos}}},$$

$$= \frac{\dfrac{\Delta V_{ogs}}{\Delta V_{oos}} + \dfrac{\Delta V_{ggs}}{\Delta V_{oos}}}{1 + \dfrac{\Delta V_{gos}}{\Delta V_{oos}}} = \frac{R_s + \alpha}{1 + \dfrac{\Delta V_{gos}}{\Delta V_{oos}} \dfrac{\Delta V_{ggs}}{\Delta V_{ggs}}} = \frac{\alpha + R_s}{1 + \alpha r_s}.$$

d) Over kokepunktstrykket er gassmetningen null og dermed er $k_{rg} = 0$ og $\alpha = 0$ slik at $R = R_s$. Under p_b, ved lavt reservoartrykk, er gassmetningen høy og α høy. Selv om både R_s og r_s minker noe med trykket vil α kunne bli meget stor (både μ_g og B_g er mye mindre enn 1) slik at $R \approx 1/r_s$.

Oppgave 2

a) Umettet oljereservoar. Materialbalanseligningen for umettet oljereservoar er gitt ved (se forelesningene),

$$N_p B_o = N B_{oi} \left(\frac{B_o - B_{oi}}{B_{oi}} + \frac{c_w S_{wc} + c_f}{1 - S_{wc}} \Delta p \right), \qquad (1)$$

og dersom vi definerer $c_o = (B_o - B_{oi})/B_{oi} \Delta p$ for olje over kokepunktstrykket, og bruker at $S_o = 1 - S_{wc}$ og definisjonen på effektive kompressibilitet, $c_e = (c_o S_o + c_w S_w + c_f)/(1 - S_{wc})$, så får vi av ligning 1 at

$$N_p B_o = N B_{oi} c_e \Delta p, \text{ og } \left.\frac{N_p}{N}\right|_{p_b} = \frac{B_{oi}}{B_{ob}} c_e \Delta p. \qquad (2)$$

Innsatt verdier får vi $c_e = [(11.3 \cdot 0.8 + 3.0 \cdot 0.2 + 8.6) \cdot 10^{-6}/0.8]\,\text{psi}^{-1} = 22.8 \cdot 10^{-6}\,\text{psi}^{-1}$. Og dermed bli utvinningsgraden når trykket har sunket fra initiell verdi og ned til kokepunktstrykket,

$$\left.\frac{N_p}{N}\right|_{p_b} = \frac{1.2417}{1.2511} \cdot 22.8 \cdot 10^{-6} \cdot (4000 - 3330) = 0.0152,$$

eller 1.52%. Trykkfallet på 670 psi representerer 17% av opprinnelig trykk, og utvinningsgraden er altså svært lav fram til kokepunktstrykket. Dette skyldes (selvfølgelig) at den effektive kompressibiliteten er liten før gassfasen utvikles fra oljefasen under kokepunktstrykket.

b) Oppløst gassdriv. Under kokepunktstrykket, når en betydelig gassmetning har utviklet seg, kan ekspansjon av vann og bergart neglisjeres. Det kan en sjekke ved direkte ved innsetting i materialbalanseligningen

$$\begin{aligned} N_p(B_o + (R_p - R_s)B_g) &= NB_{oi}[\frac{(B_o - B_{oi}) + (R_{si} - R_s)B_g}{B_{oi}} \\ &\quad + \frac{c_w S_{wc} + c_f}{1 - S_{wc}}\Delta p], \end{aligned} \qquad (3)$$

eller, med følgende begrunnelse som Dake gir i sin bok:

> Below the bubble point pressure gas will be liberated from the saturated oil and a free gas saturation will develop in the reservoir. To a first order of approximation the gas compressibility is $c_g \approx 1/p$, [...]. Therefore, using [the data in problem a)], the minimum value of the free gas phase compressibility will occur at the bubble point pressure and will be equal to $1/p_b = 1/3330 = 300 \times 10^{-6}$/psi. This is two orders of magnitude greater than the water compressibility and 35 times greater than the pore compressibility and, as a result, the latter two are usually neglected in the material balance equation.

Vi står altså igjen med ligningen

$$N_p(B_o + (R_p - R_s)B_g) = N((B_o - B_{oi}) + (R_{si} - R_s)B_g), \qquad (4)$$

som gir følgende utvinningsgrad (Recovery Factor) ved 900 psia:

$$(\mathrm{RF})_{900} = \left.\frac{N_p}{N}\right|_{900} = \left.\frac{(B_o - B_{oi}) + (R_{si} - R_s)B_g}{B_o + (R_p - R_s)B_g}\right|_{900}. \qquad (5)$$

Innsatt får vi at

$$\left.\frac{N_p}{N}\right|_{900} = \frac{(1.0940 - 1.2417) + (510 - 122)0.00339}{1.0949 + (R_p - 122)0.00339} = \frac{344}{R_p + 201}. \qquad (6)$$

Av dette kan en se at utvinningsgraden for olje øker dersom R_p er liten, det vil si at gassproduksjonen har vært liten og at mye gass er blitt værende igjen i reservoaret. Årsaken til dette er at reservoarets totale kompressibilitet da vil være høy. Skjematisk kan materialbalanseligningen framstilles ved $\Delta V = cV\Delta p$, hvor ΔV er produksjonen når trykket faller med Δp. En ser at når total kompressibilitet c øker ved at gass beholdes i reservoaret, så vil produksjonen øke for samme trykkfall.

Oljemetningen er gitt ved $S_o = V_o/V_p$, hvor V_o er volum olje og V_p er porevolumet. Vi regner at ekspansjonen av vann og bergart kan neglisjeres og da er porevolumet uendret fra initiell verdi som er gitt ved oljevolum initielt, V_{oi} delt på oljemetningen initielt, $S_{oi} = 1 - S_{wc}$, $V_p = NB_{oi}/(1 - S_{wc})$. Dermed har vi ved 900 psia at

$$S_o = \frac{(N - N_p)B_o}{\frac{NB_{oi}}{1 - S_{wc}}} = \frac{(1 - \frac{N_p}{N})B_o}{\frac{B_{oi}}{1 - S_{wc}}} = \frac{(1 - 0.286)1.0940}{\frac{1.2417}{0.8}} = 0.50,$$

siden $N_p/N = 344/(1000+201) = 0.286$. Dermed blir $S_g = 1-0.20-0.50 = 0.30$. Vi ser også, som rimelig kan være, at S_g vil bli høyere om R_p hadde vært lavere.

c) Vanninjeksjon. Ved trykk 2700 psia strømmer det både olje og fri gass inn mot brønnene siden reservoartrykket er under kokepunktstrykket. La oljeraten på overflaten være Q_o og den total gassrate være Q_g. Det produserende gass-olje forholdet R (som også kalles GOR) er definert ved $R = Q_g/Q_o$. Gassraten Q_g er sammensatt av (1) det som i reservoaret er fri gass rate, Q_{gf}, og (2) det som i reservoaret er rate av oppløst gass, gass som i reservoaret strømmer som del av oljefasen og som er gitt ved $Q_o R_s$. Det vil si at $Q_g = RQ_o = Q_{gf} + Q_o R_s$. Dette gir at $Q_{gf} = (R - R_s)Q_o$. En oljerate på Q_o stb/d på overflaten krever da altså en reservoarrate på $Q_o B_o$ rb/d olje og $Q_{gf} B_g = (R - R_s)Q_o B_g$ rb/d fri gass.

Eller, dersom vi tar utgangspunkt i 1 stb olje på overflaten, så må det fjernes $B_o + (R - R_s)B_g$ rb fra reservoaret. Og, som ovenfor, så vil gassvolumet $R_s B_g$ være del av oljefasen og $(R - R_s)B_g$ vil være fri gass. Siden volumfaktoren til vann kan antas å være lik 1 rb/stb, så vil en overflateproduksjon på 10.000 stb/d kreve at det injiseres 40.000 stb/d med vann for at trykket skal holdes konstant på 2700 psia.