

Rendkívül kis pórus átmérőjű rezervoárookban történő gáz áramlás modellezése

Investigation of gas flow models in case of
micro and nano pore size reservoirs

Pusztai Patrik

ME Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet

2017.01.10 -11.

www.afki.hu

SZÉCHENYI 2020

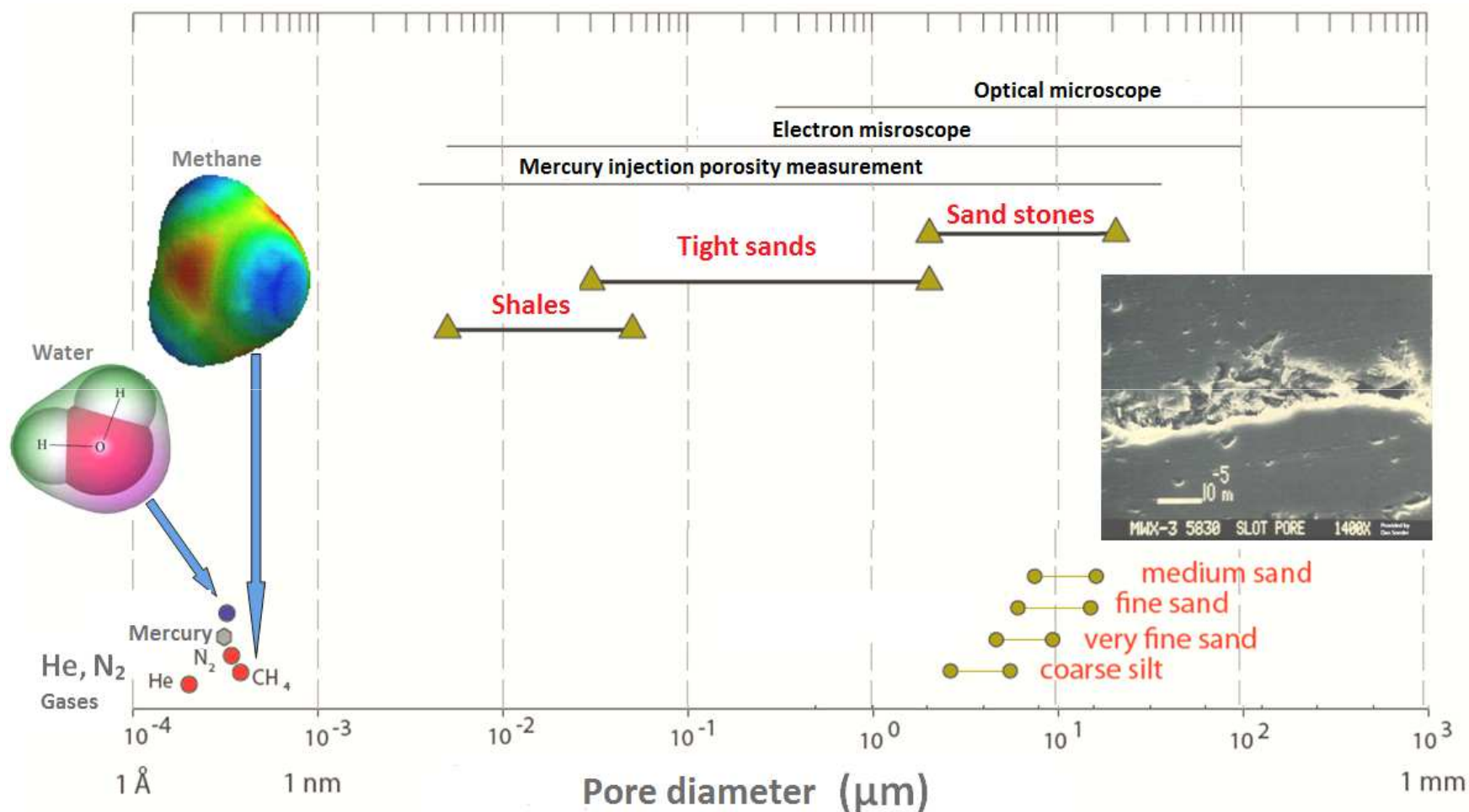


MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Regionális
Fejlesztési Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE



„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Reservoirs's size ranges
(Source: Ph. H. Nelson, 2009)

2017.01.10 -11.

www.afki.hu



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Regionális
Fejlesztési Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Multiple mechanisms (C.R. Clarkson and B. Haghshenas, 2013):

1. Adsorption upon internal surface area
2. Conventional (compressed gas) storage in natural and hydraulic (induced) fractures
3. Conventional storage in matrix porosity (organic and inorganic)
4. Solution in formation water
5. Absorption (solution) in organic matter

„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Adsorption

- Adsorption is the adhesion of atoms, ions, or molecules from a gas, liquid, or dissolved solid to a surface.
- Depends on:
 - Adsorbent material (rock matrix - TOC)
 - Adsorbate material (natural gas).
 - Pressure
 - Temperature

„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához” című szakmai tudományos konferencia

Adsorption

- Langmuir Isotherm

$$V = \frac{V_L \times p}{P_L + p}$$

p – pressure [psi]

V_L – Langmuir volume [scf/t]

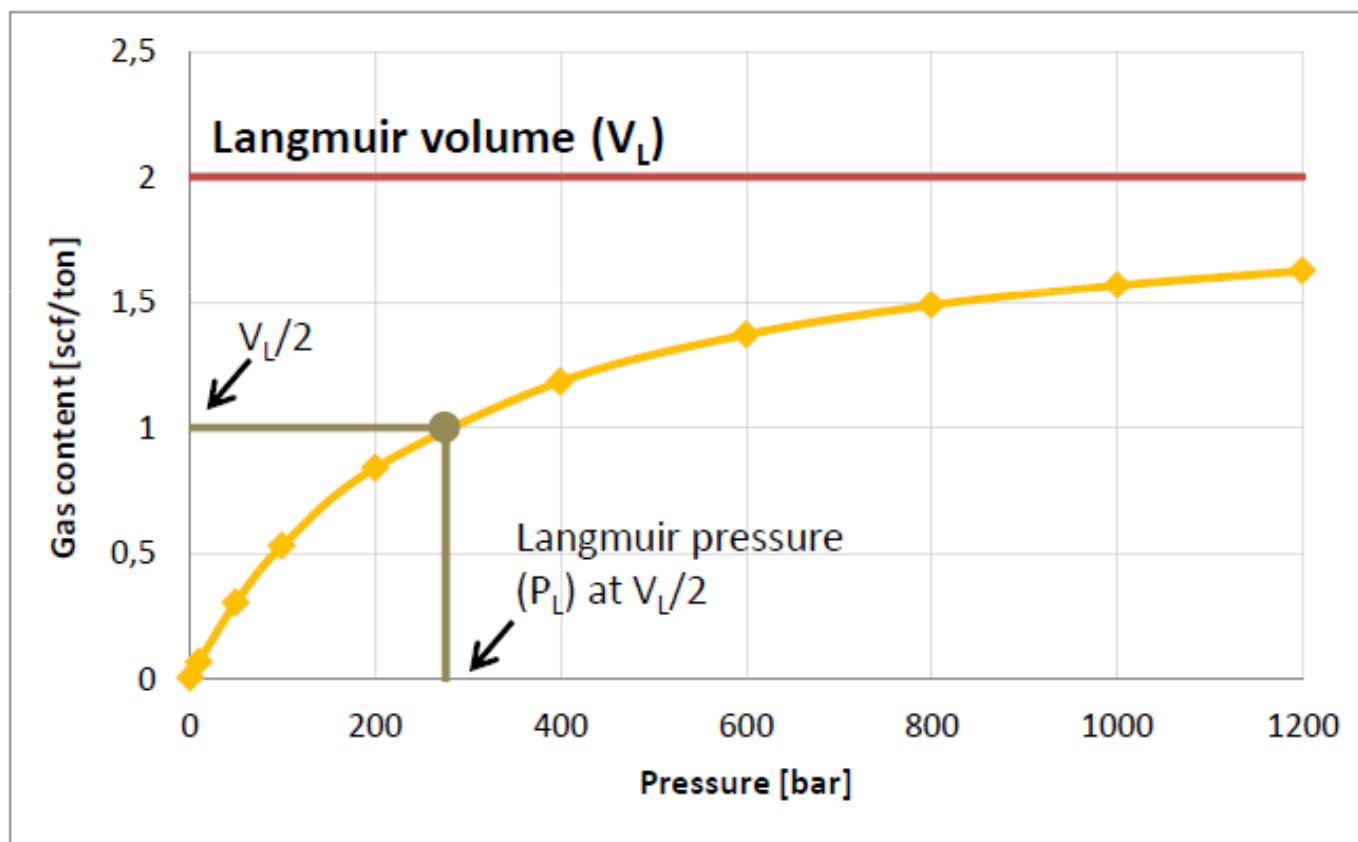
P_L – Langmuir pressure [psi]

V – adsorbed gas volume [scf]

„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Adsorption

- Langmuir Isotherm



„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Solution in connate water saturation

- Depends on:
 - Pressure [psi]
 - Temperature [°F]
 - Salinity [grams/liter]

C. W. Charles and L. C. Price, 1982

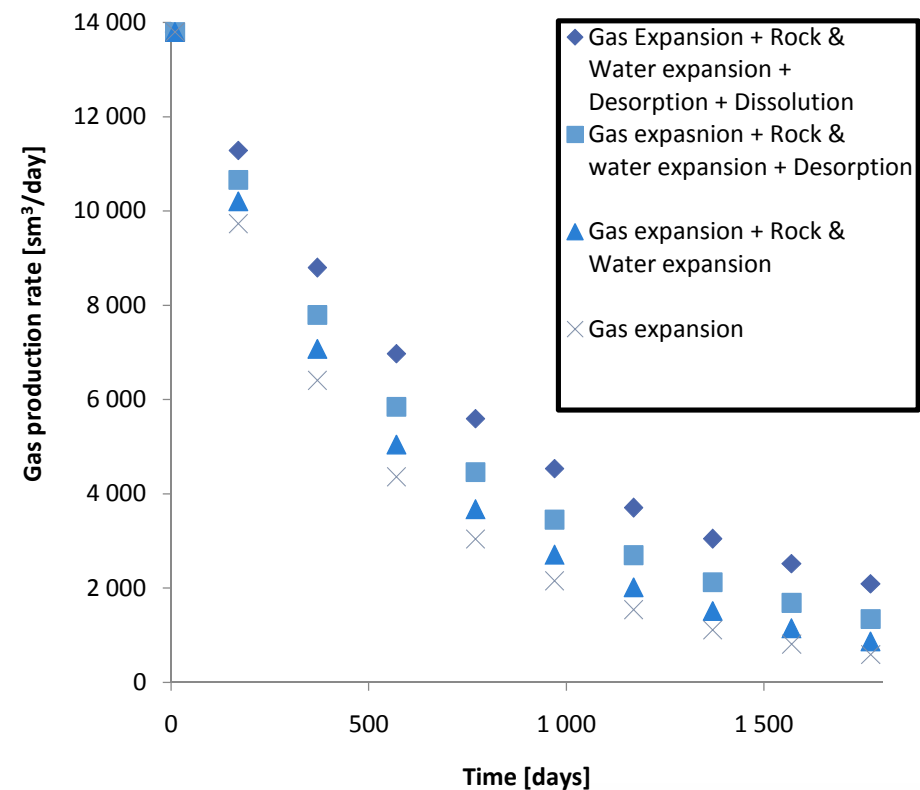
$$\log_e V_s = -1,4053 - 0,002332 * T + 6,3 * 10^{-6} * T^2 - 0,004038 * S - \\ 7,579 * 10^{-6} * P + 0,5013 * \log_e P + 3,235 * 10^{-4} * T * \log_e P$$

V_s - dissolved gas volume [scf/bbl]

Material Balance Equation

- Closed reservoir without water influx

$$\begin{aligned} \text{Cumulative gas production [m}^3\text{]} = & \\ & \text{Gas expansion [m}^3\text{]} + \\ & \text{Rock and water expansion [m}^3\text{]} + \\ & \text{Desorption [m}^3\text{]} + \\ & \text{Vaporization [m}^3\text{]} \end{aligned}$$



„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához” című szakmai tudományos konferencia

Material Balance Equation

$$\text{Cumulative gas production } [m^3] = G_p * B_g$$

$$\text{Gas expansion } [m^3] = G_f * (B_g - B_{gi}) = A * h * \Phi_{ci} * (1 - S_{wi}) * \left(\frac{B_g}{B_{gi}} - 1 \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Rock and water expansion } [m^3] &= G_f * B_{gi} * \frac{S_{wi} * c_w + c_f}{1 - S_{wi}} * (p_i - p) = \\ &= A * h * \Phi_{ci} * B_{gi} * (S_{wi} * c_w + c_f) * (p_i - p) \end{aligned}$$

$$\text{Desorption } [m^3] = G_a * \frac{1}{G_{ci}} * B_g * \left(\frac{V_L \times p_i}{P_L + p_i} - \frac{V_L \times p}{P_L + p} \right) = A * h * \rho_{bi} * B_g * \left(\frac{V_L \times p_i}{P_L + p_i} - \frac{V_L \times p}{P_L + p} \right)$$

$$\text{Vaporization } [m^3] = G_s * B_g * \frac{1}{V_{si}} * (\Delta V_s) = A * h * \Phi_{ci} * S_{wi} * B_g * \Delta V_s$$

Material Balance Equation

$$f(p) = \frac{\beta_{11}}{p} + \beta_{14} - \beta_3 * p + \frac{\beta_{13}}{p} - \frac{\beta_4}{p} * \frac{V_L * p}{P_L * p} + \frac{\beta_5}{p} * \left[\beta_6 - e^{\beta_7 - \beta_8 * (p * C_1) + \beta_9 * \ln(p * C_1) + \beta_{10} * \ln(p * C_1)} \right] - \frac{\beta_{15}}{p}$$

$$p_n = p_{n-1} - \frac{f(p)}{f'(p)}$$



Newton's method - ITERATION

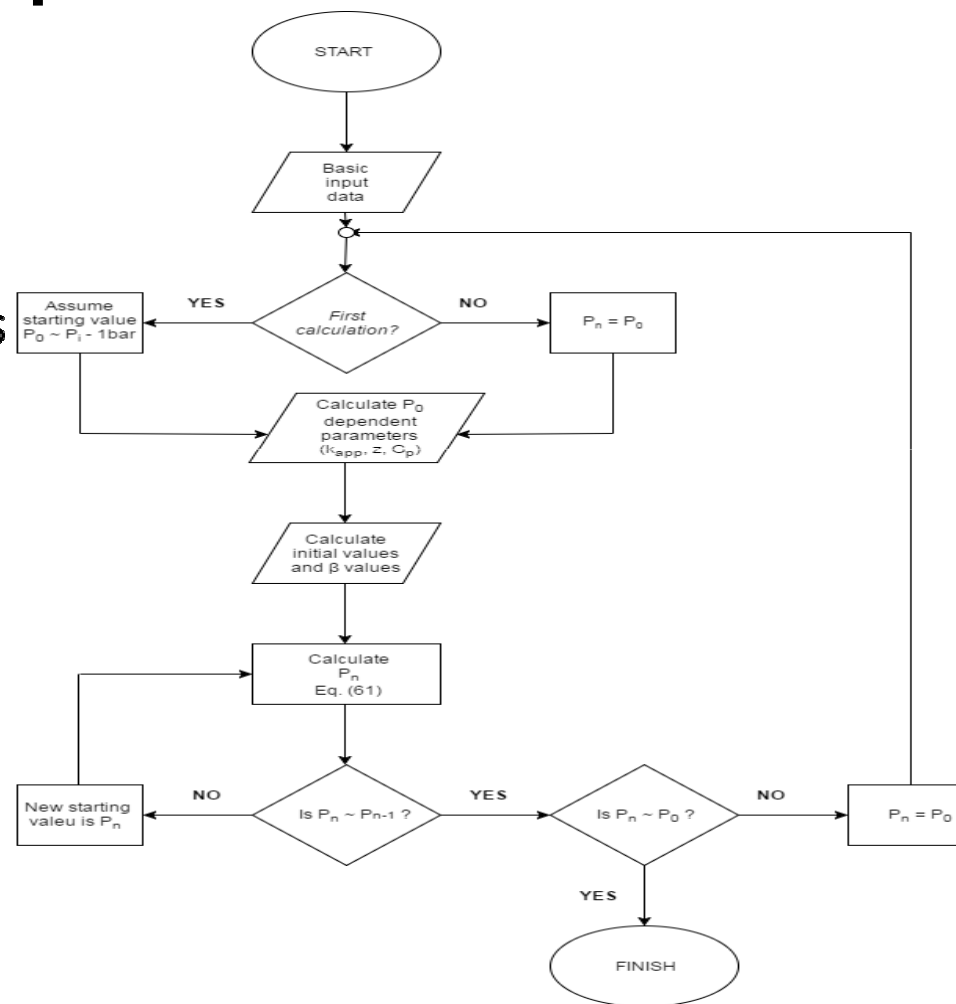
„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Material Balance Equation

BUT!

There are parameters in the equation which also depends on the pressure:

- Deviation factor – Z
- Gas viscosity – μ_g
- **Apparent permeability (different flow models) – k_a**



„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

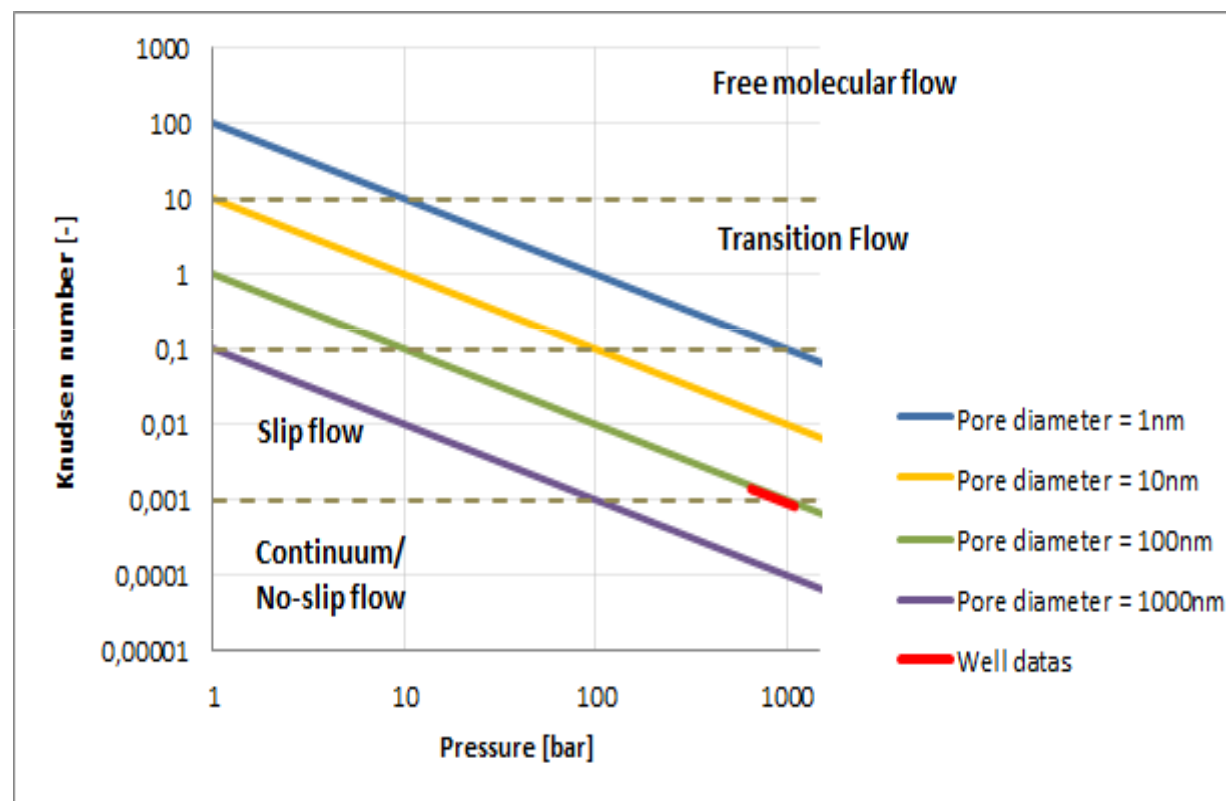
Gas flow models

- Mean free path

$$\lambda = \frac{K_B \times T}{\sqrt{2} \times d^2 \times \pi \times p}$$

- Knudsen number

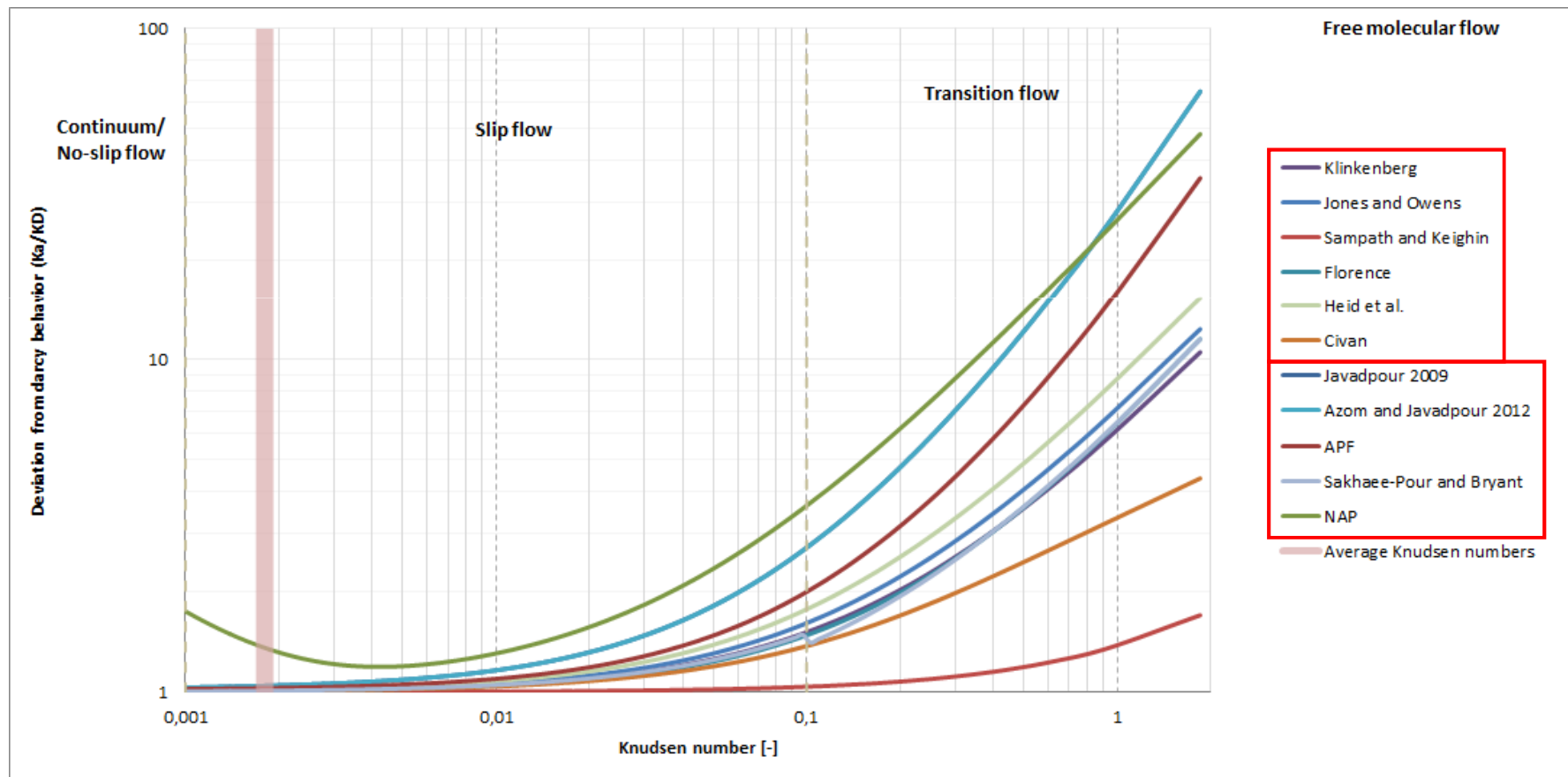
$$K_n = \frac{\lambda}{d}$$



„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Gas flow models

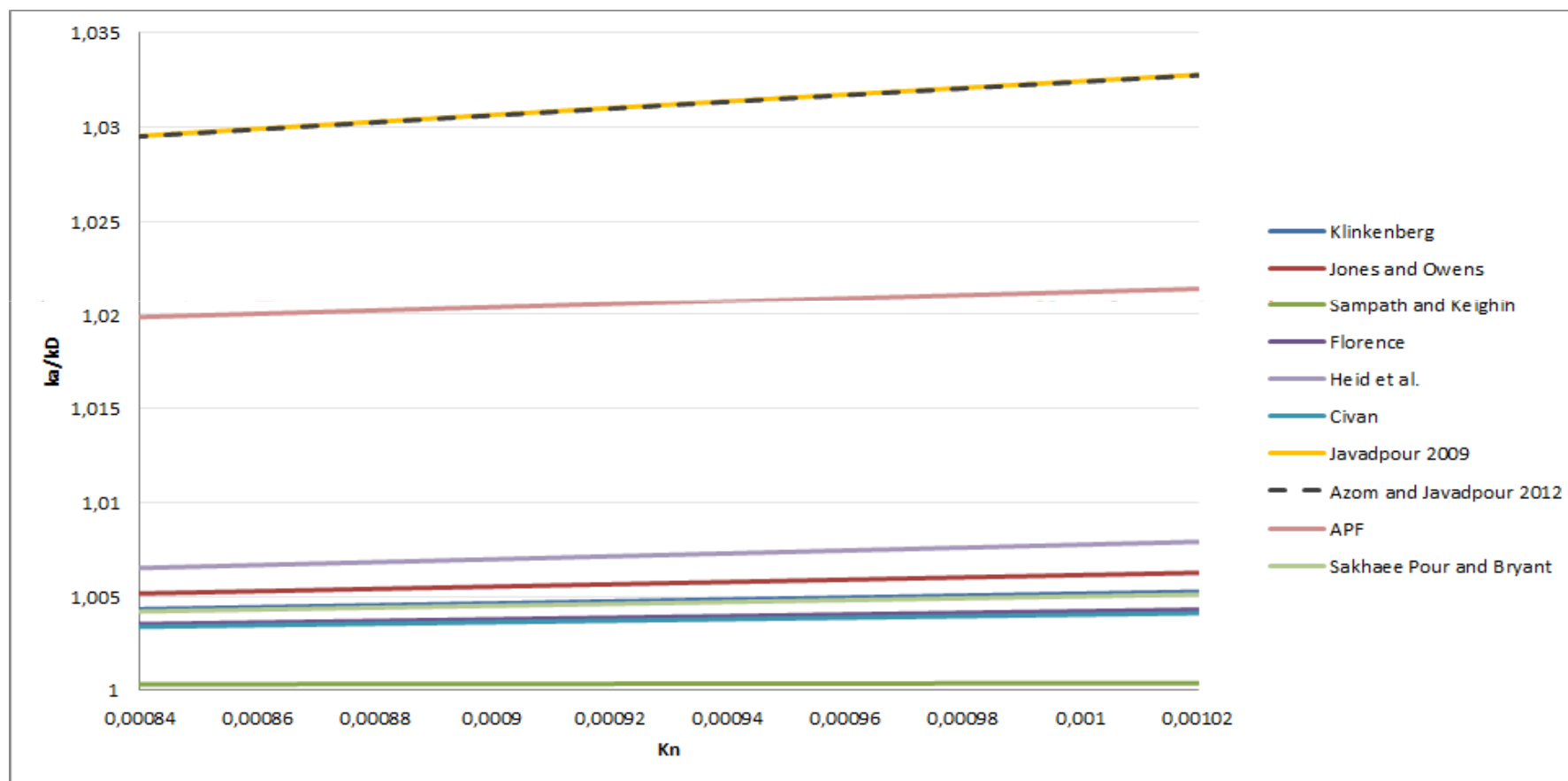
- General behavior



„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Gas flow models

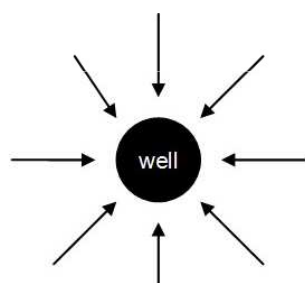
- General behavior



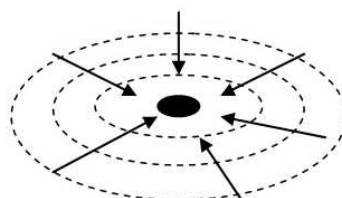
„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Results

- Open-hole production
- Radial flow



Top view



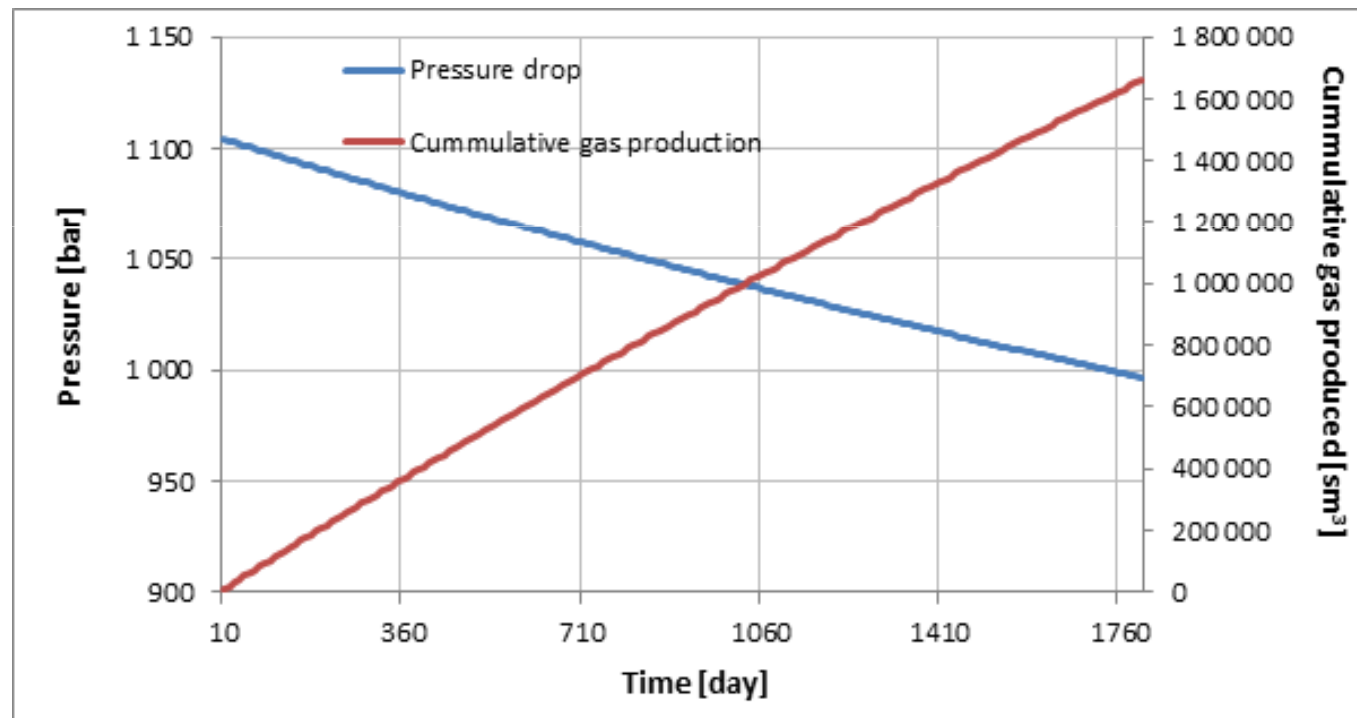
Side view

Models	Deviation from Darcy's model [%]
<i>L.J. Klinkenberg, 1941</i>	0,43
<i>F.O. Jones and W.W. Owen, 1979</i>	0,51
<i>K. Sampath and C.W. Keighin, 1981</i>	0,03
<i>J.G. Heid et al, 1950</i>	0,65
<i>F. A. Florence et al, 2009</i>	0,35
<i>F. Civan, 2010</i>	0,34
<i>F. Javadpour, 2009</i>	1,86
<i>P. Azom and F. Javadpour, 2012</i>	1,85
<i>H. Darabi et al., 2012 (APF)</i>	1,76
<i>A. Sakhaee-Pour and S.L. Bryant, 2012</i>	0,42
<i>H. Singh et al., 2014 (NAP)</i>	90,97

„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához” című szakmai tudományos konferencia

Results

- Open-hole production

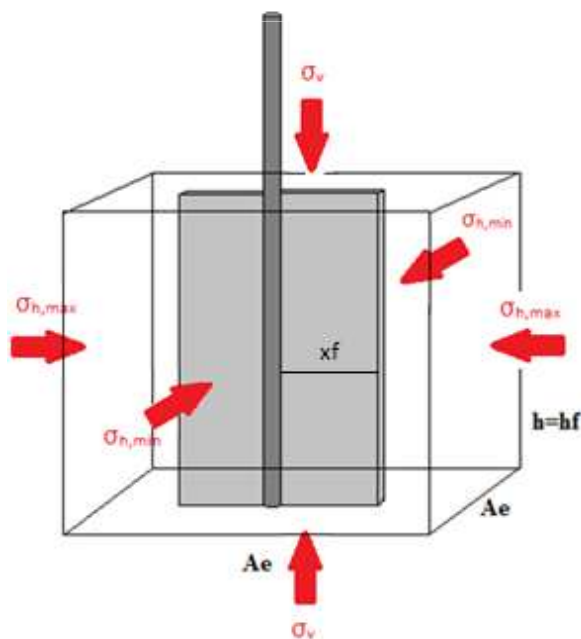


Pressure depletion and cumulative gas production during 10 years interval in case of L.J. Klinkenberg, 1941 model (Source: Own figure)

„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Results

- Vertical fracture ($X_f = 100\text{m}$)
- Near linear flow
- Generally **7,5 times higher** production rates than open-hole



2017.01.10 -11.

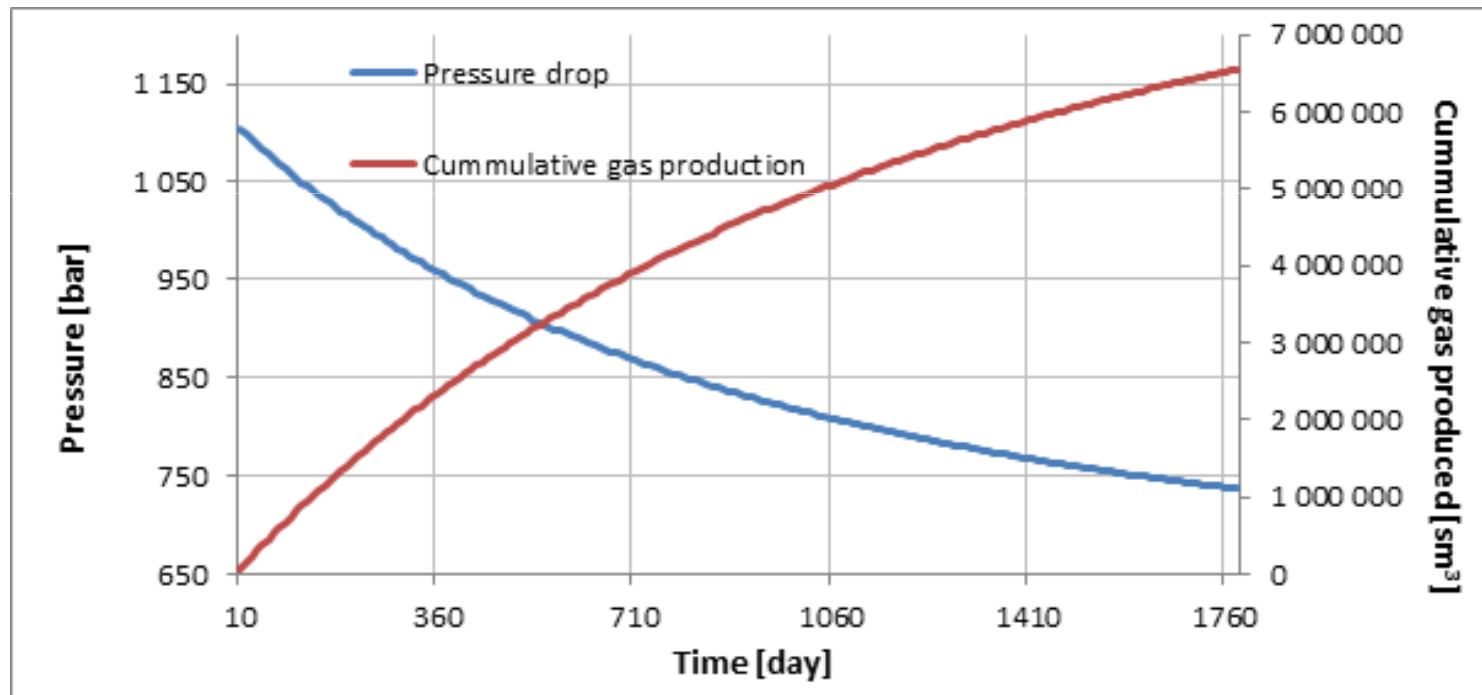
www.afki.hu

Models	Deviation from Darcy's model [%]
L.J. Klinkenberg, 1941	0,43
F.O. Jones and W.W. Owen, 1979	0,51
K. Sampath and C.W. Keighin, 1981	0,03
J.G. Heid et al, 1950	0,65
F. A. Florence et al, 2009	0,35
F. Civan, 2010	0,34
F. Javadpour, 2009	1,86
P. Azom and F. Javadpour, 2012	1,85
H. Darabi et al., 2012 (APF)	1,76
A. Sakhaee-Pour and S.L. Bryant, 2012	0,42
H. Singh et al., 2014 (NAP)	90,97

„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Results

- Vertical fracturing



Pressure drop and cumulative gas production in case of Civan model (Source: Own figure)

2017.01.10 -11.

www.afki.hu



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Regionális
Fejlesztési Alap



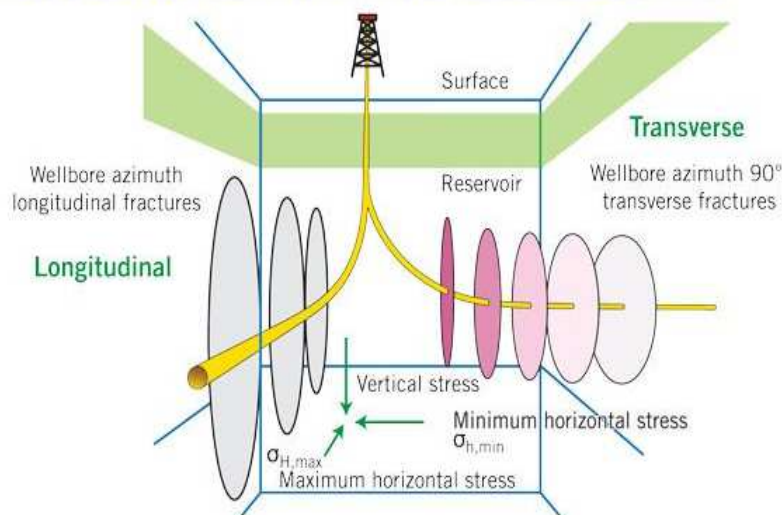
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Results

- Multiple horizontal fracture ($X_f = 40\text{m}$, 10 stages)
- Near linear flow
- Generally **30 times higher** production rates than open-hole

FRACTURE DEVELOPMENT AS FUNCTION OF WELLBORE ORIENTATION



(Source: Z. Rahim et al., 2012)

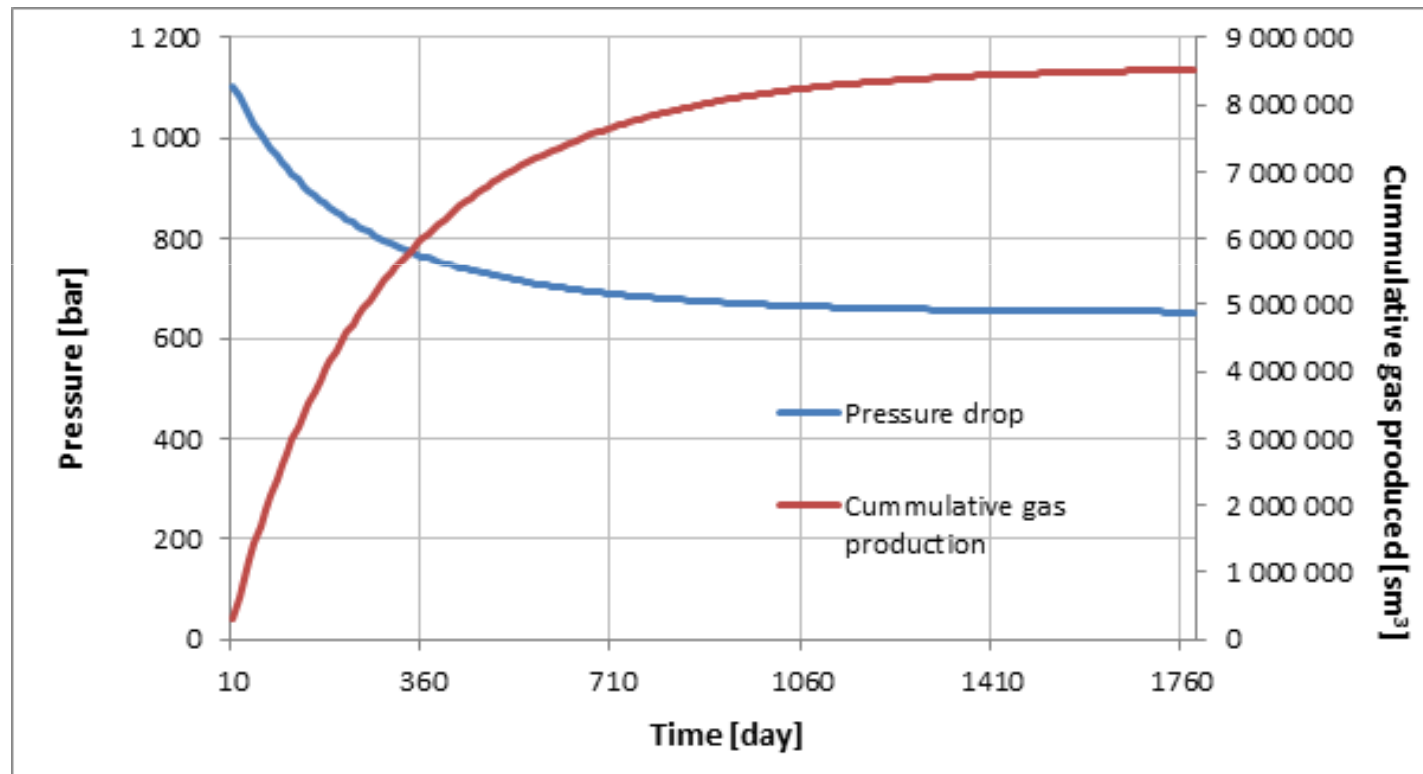
2017.01.10 -11.

Models	Deviation from Darcy's model [%]
L.J. Klinkenberg, 1941	0,43
F.O. Jones and W.W. Owen, 1979	0,51
K. Sampath and C.W. Keighin, 1981	0,03
J.G. Heid et al, 1950	0,65
F. A. Florence et al, 2009	0,35
F. Civan, 2010	0,34
F. Javadpour, 2009	1,86
P. Azom and F. Javadpour, 2012	1,86
H. Darabi et al., 2012 (APF)	1,76
A. Sakhaee-Pour and S.L. Bryant, 2012	0,42
H. Singh et al., 2014 (NAP)	90,97

„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához” című szakmai tudományos konferencia

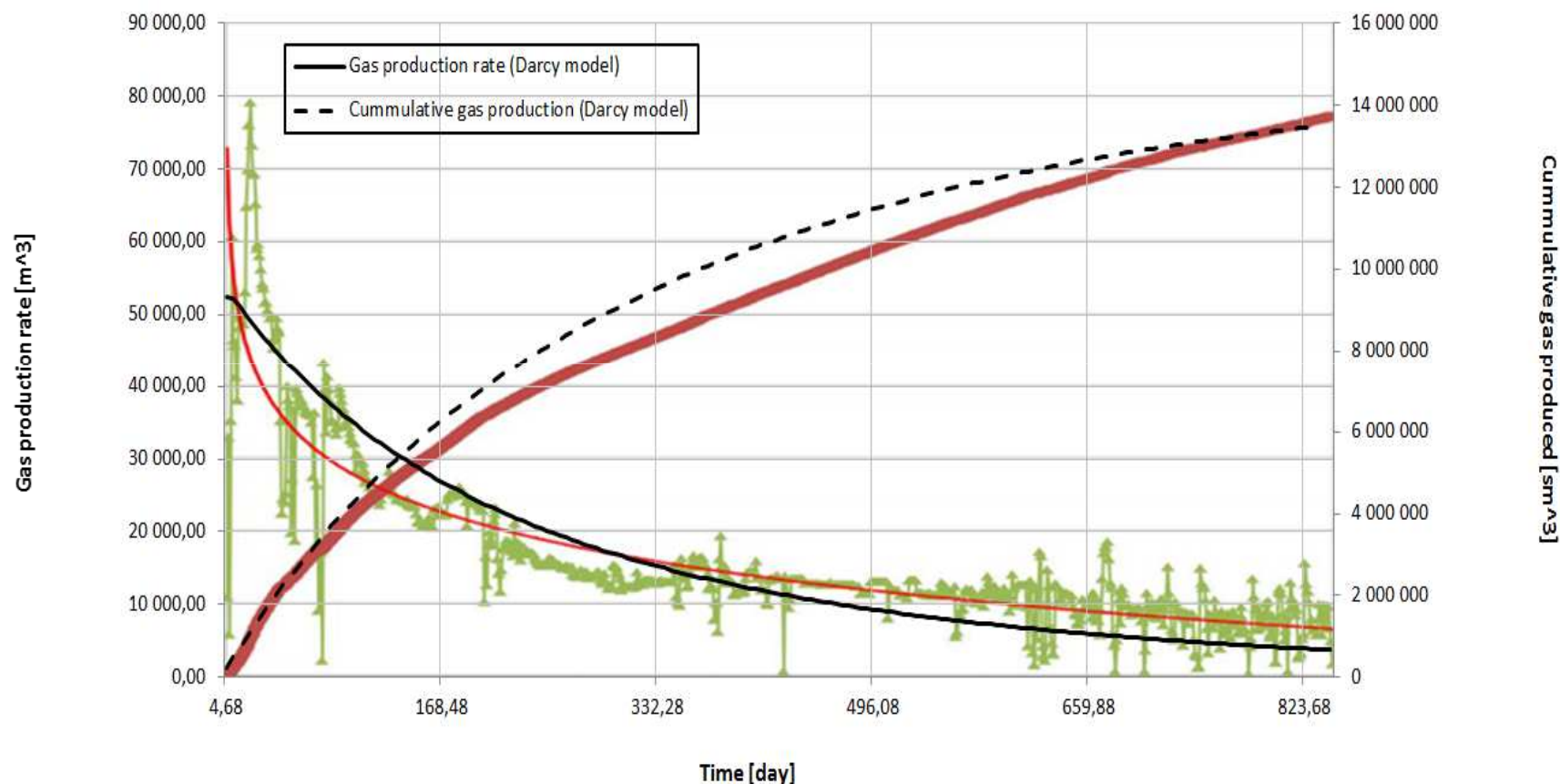
Results

- Horizontal fracturing



Pressure drop and cumulative gas production in case of Heid et al, 1950 model (Source: Own figure)

Adaptability of the model



„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Interpolating calculated data to real well data (Source of basic: K. Kiss, 2014; source of interpolated curves: Own figure)

2017.01.10 -11.

www.afki.hu



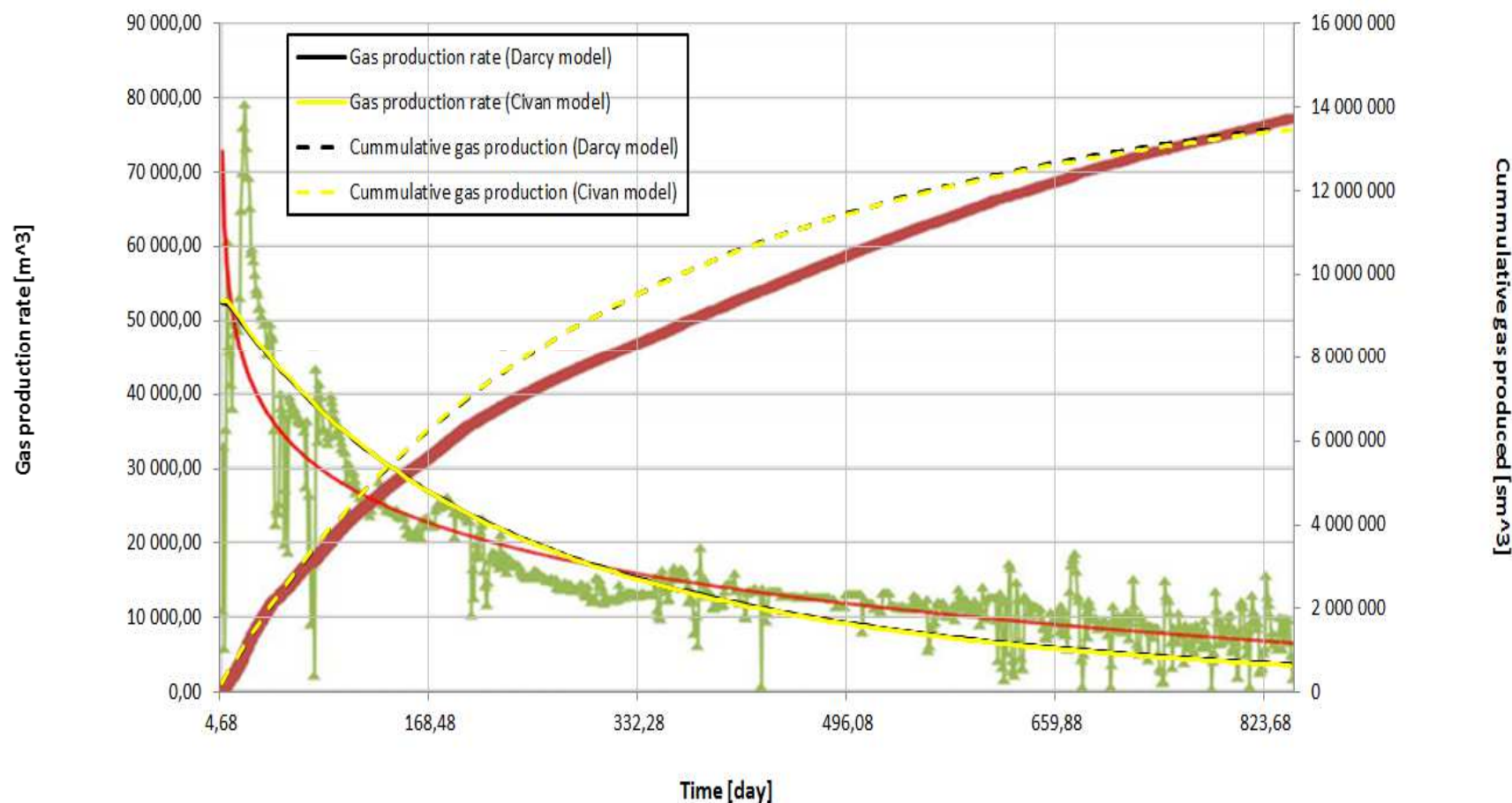
MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Regionális
Fejlesztési Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Adaptability of the model



„Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához
kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia

Interpolating calculated data to real well data (Source of basic: K. Kiss, 2014; source of interpolated curves: Own figure)

Köszönöm megtisztelő figyelmüket!