

Energieeffiziente Grundwassergewinnung

Ziele:

- Absenkung reduzieren = Energieverbrauch reduzieren
- Gut dimensionierte Brunnen altern langsamer

$$P_{\text{gros}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_p} \quad 1 \text{ m Absenkung} \equiv 4.54 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/m}^3$$

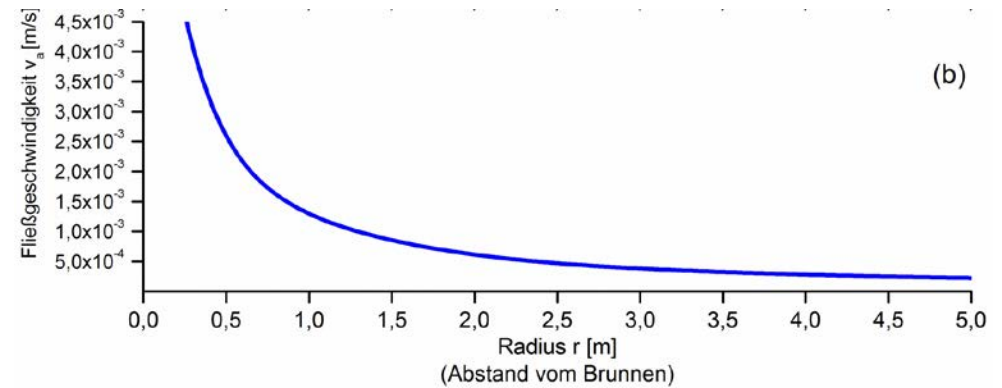
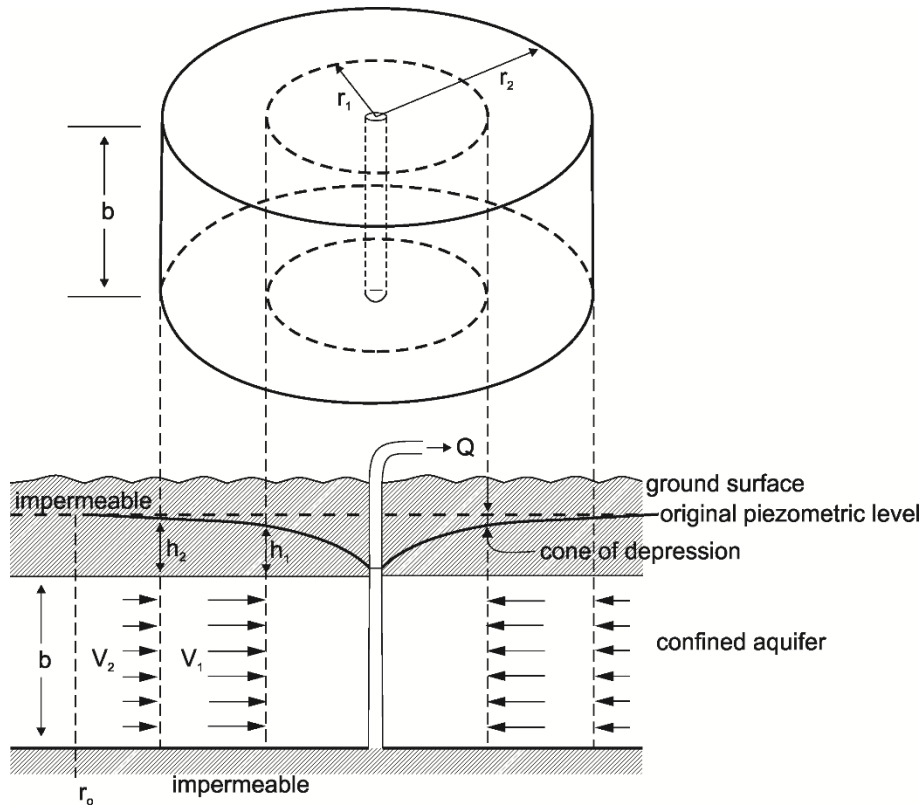
Derzeitige Bemessung von Brunnen (Basis: THIEM 1870; SICHARDT 1928...):

- Mischung aus Erfahrung mit empirischen und analytischen Modellen
- Annahme: laminare Strömung bei Einhalten kritischer Eintrittsgeschwindigkeit
- Aber: Strömung in Filterkies, Filter und Verrohrung nicht laminar bis turbulent

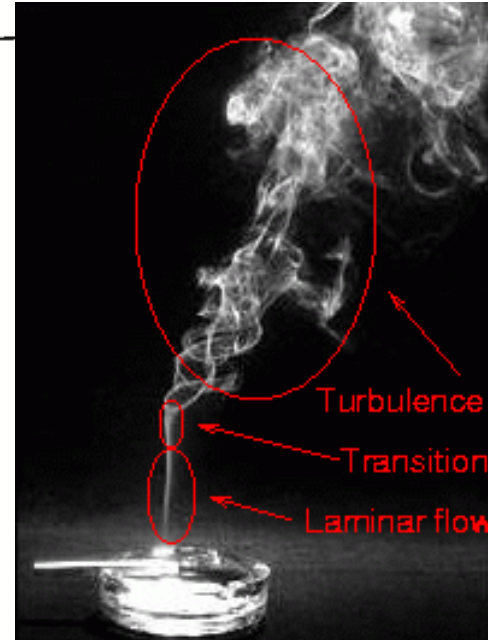
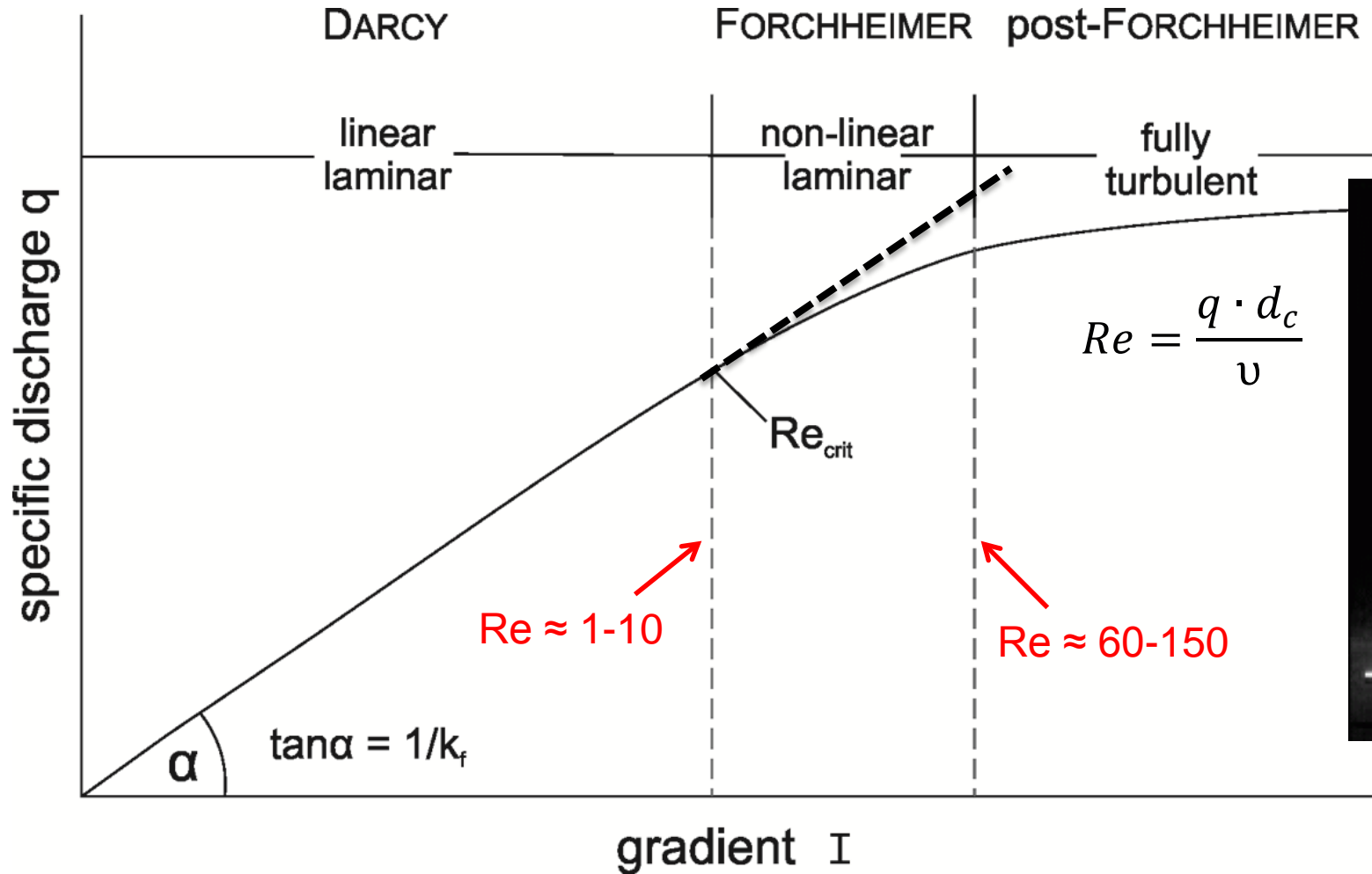
Radiale Strömung zum Brunnen

Geschwindigkeitszunahme zum Brunnen

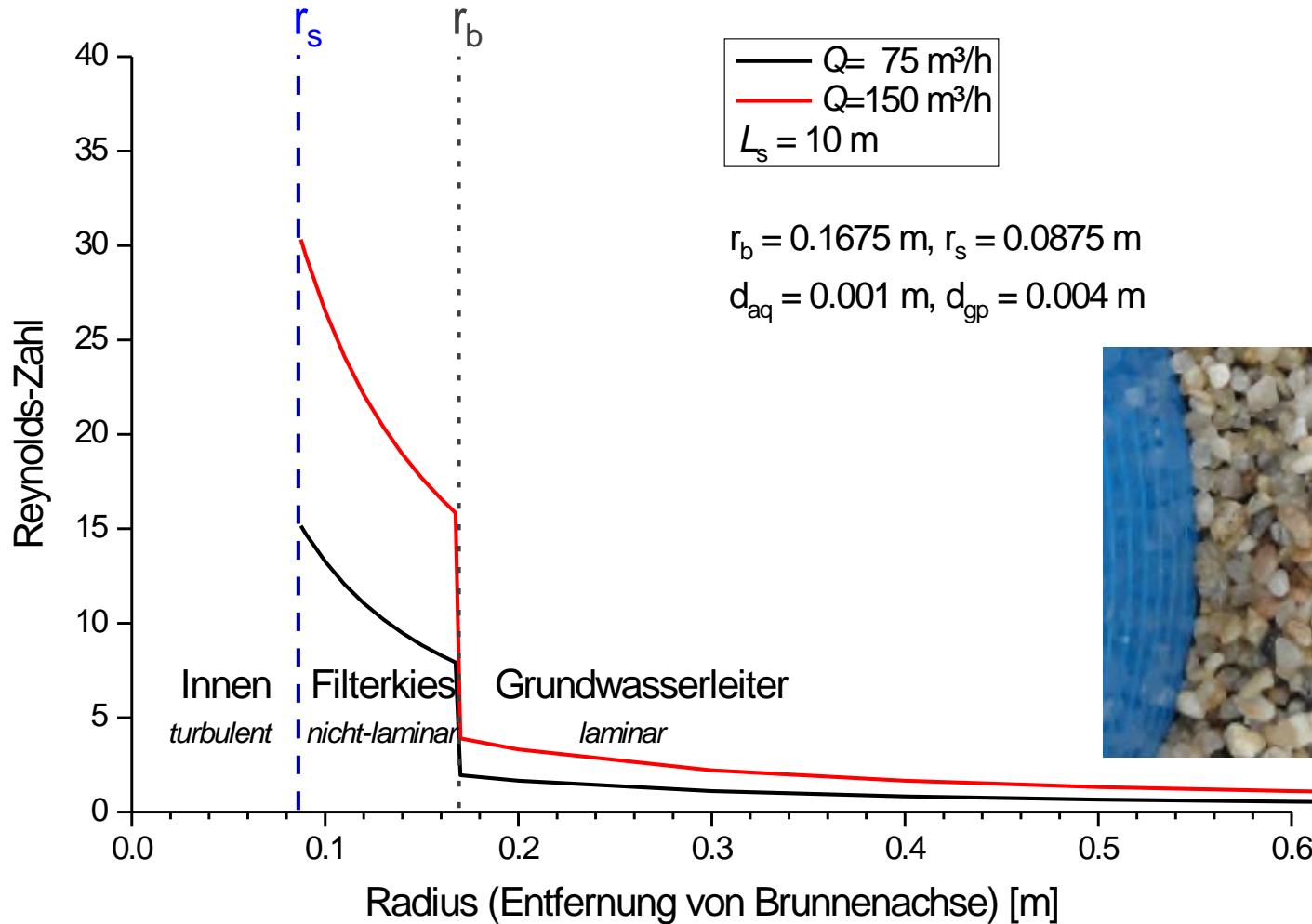
$$q = v_e = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot b \cdot A_p}$$



Geltungsbereich des Darcy-Gesetzes



Reynolds-Zahlen am Brunnen



Aquifer: linear laminare Strömung: Darcy & Thiem



Henry Darcy

$$\frac{dh}{dx} = \alpha \cdot q = \frac{\mu}{k \cdot g \cdot \rho} \cdot q$$

$$s = h_2 - h_1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$



Adolf Thiem

Analytisches Modell für radiale Brunnenanströmung von A. THIEM (1870)

Randbedingungen

1. Radiale Symmetrie
2. Horizontale Strömung
3. Keine Neubildung
4. Aquifer eben & Mächtigkeit = const.

h = Wasserspiegelhöhe, $q = Q/A$, s = Absenkung,
 Q = Förderrate, b = Mächtigkeit, r = Radius, K = Durchlässigkeitsbeiwert, μ = Viskosität, ρ = Dichte Fluid, k = intrins. Permeabilität, g = Erdbeschleunigung

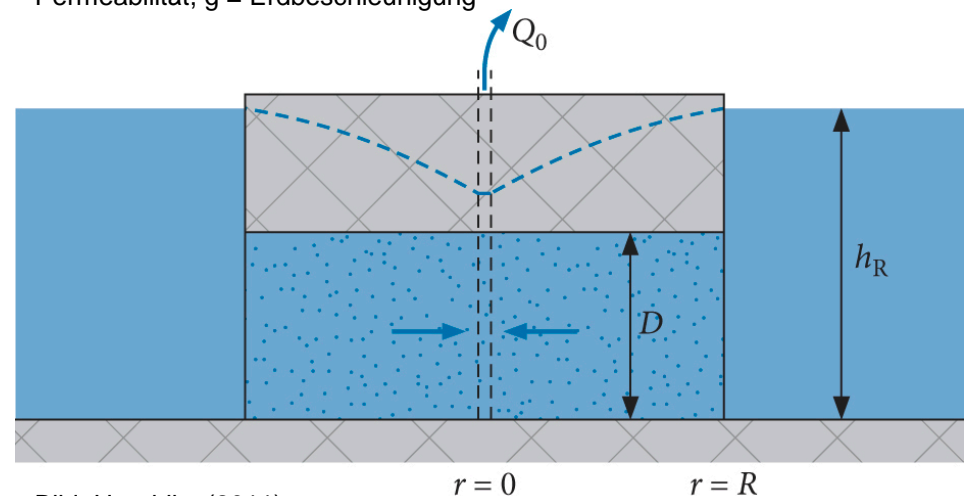


Bild: Hendriks (2011)

Filterkies: nicht-linear laminare Strömung Forchheimer & Engelund



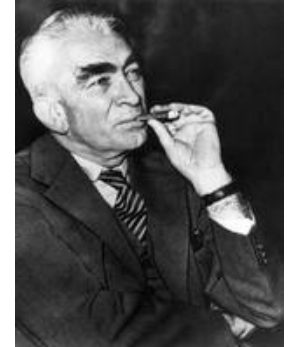
Philipp Forchheimer 1852-1933

$$\frac{dh}{dx} = \alpha \cdot q + \beta \cdot q^2 = \frac{\mu}{k \cdot g \cdot \rho} \cdot q + \frac{\beta'}{g} \cdot q^2$$

$$h_2 - h_1 = \underbrace{\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}_{\text{Viskos (Thiem)}} + \underbrace{\beta \cdot \left(\frac{Q}{2\pi \cdot K \cdot b} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}_{\text{Trägheitskräfte}}$$

Viskos (Thiem)

Trägheitskräfte



Anker Engelund

Analytisches Modell für radiale Brunnenanströmung von A. ENGELUND (1952)

Randbedingungen

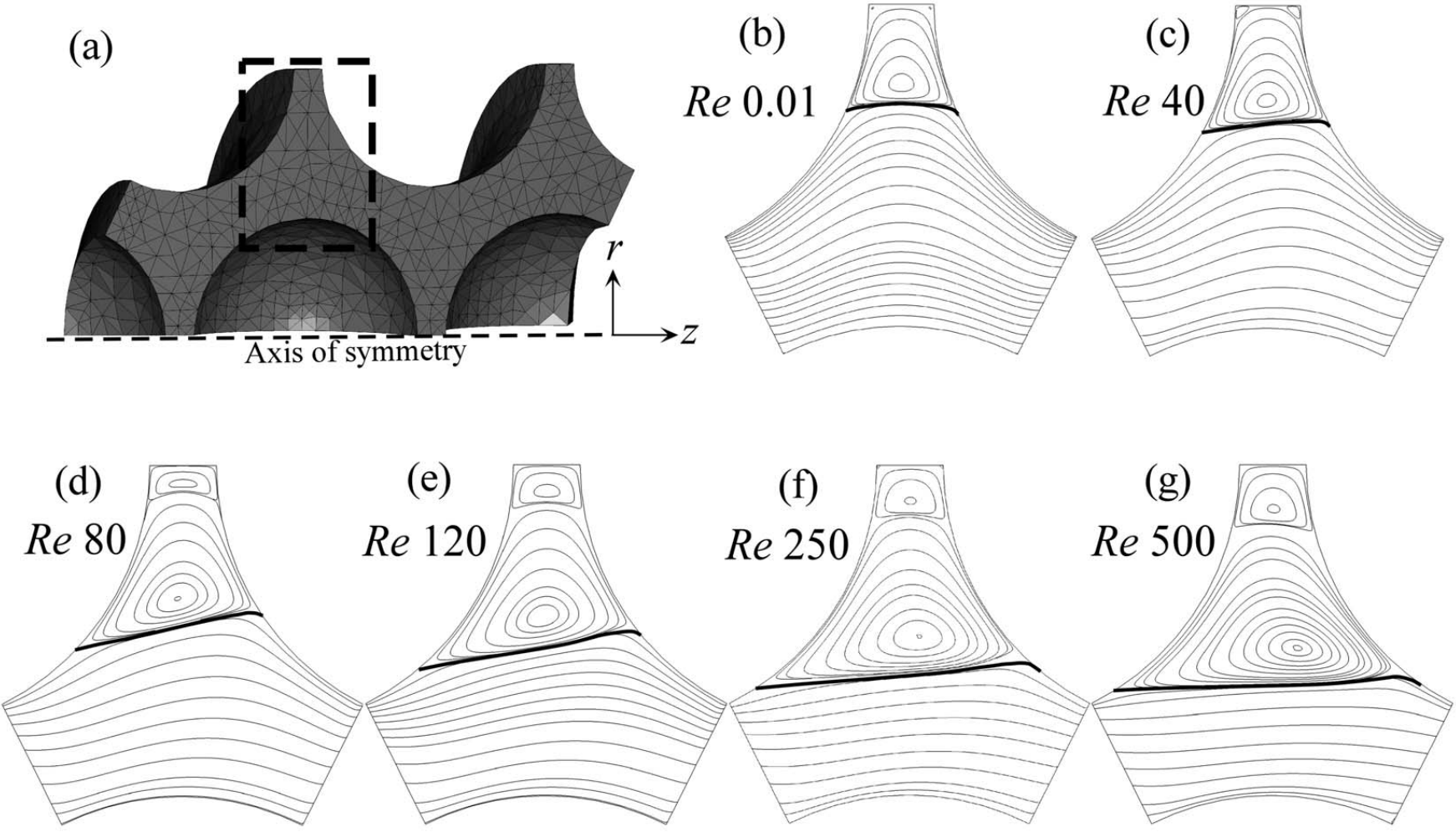
1. Radiale Symmetrie
2. Horizontale Strömung
3. Keine Neubildung
4. Aquifer eben & Mächtigkeit = const.

Empirische Bestimmung von β

$$\beta = C \cdot k^x \cdot \phi^y \cdot \tau^z$$

μ = Viskosität, $q = Q/A$, ρ = Dichte Fluid, g = Erdbeschleunigung
 k = intrins. Permeabilität, Φ = Porosität, τ = Tortuosität

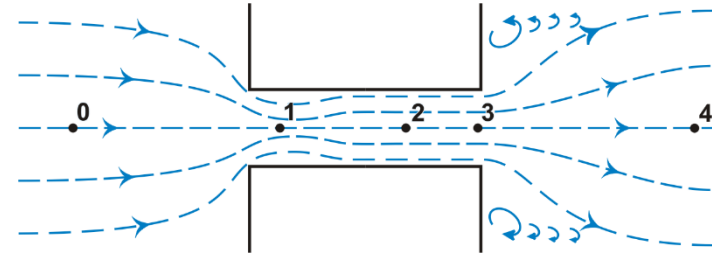
Strömungswirbel im Porenraum



Filterrohr: turbulente Strömung

Orifice Equation

- Kontraktion/Expansion
- Größenordnung: mm bis cm



$$h_{SC} = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{2\pi r_s L_s C_v C_c A_p} \right)^2$$

Geschwindigkeitskoeffizient $C_v = 0.98$

Kontraktionskoeffizient $C_c = 0.62$

r_s = Radius Filter

L_s = Länge Filter

A_p = offene Filterfläche

Q = Förderrate

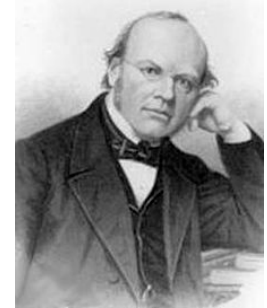
g = Erdbeschleunigung

Brunneninneres: turbulente Strömung

Darcy-Weisbach



Henry Darcy

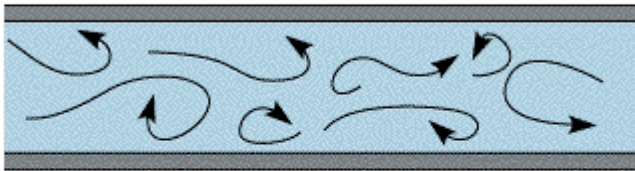


Julius Weisbach

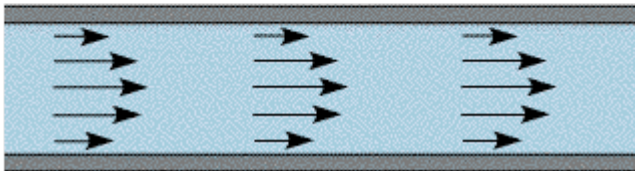
$$h_f = f_D \cdot \frac{L_p}{d_p} \cdot \frac{v^2}{2g} = f_D \cdot \frac{L_p}{d_p} \cdot \frac{(Q/A)^2}{2g}$$

Separat für Filterrohr und Casing

Turbulent



Laminar



Moody-Gleichung

$$f_D = 0.0055 \cdot \left(1 + \left(20000 \cdot \frac{\kappa}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$$

r_s = Radius Rohr, d_p = Durchmesser Rohr, L_p = Länge Rohr, v = Fließgeschwindigkeit,
 f_D = Rauigkeitsfaktor, κ = Rauigkeit, Re = Reynolds-Zahl

Gesamtverlust – die Mutter aller Formeln

$$\begin{aligned}
 s_{tot} &= s_{aq} + s_{sk} + (s_{gp} + s_{cv}) + s_s + s_{up} = \\
 &= \left(\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K_{aq} \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{r_0}{r_b} \right) \right) + \left(\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K_{sk} \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{r_{sk-o}}{r_{sk-i}} \right) \right) \\
 &\quad \text{Grundwasserleiter} \qquad \qquad \qquad \text{Skin-Schicht} \\
 &+ \left(\left(\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K_{gp} \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{r_b}{r_s} \right) + \beta' \cdot \left(\frac{Q}{2 \pi \cdot K_{gp} \cdot B} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_b} \right) \right) \right) \\
 &\quad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{Filterkies} \\
 &+ \left(\frac{1}{2g} \cdot \left(\frac{Q}{2 \pi \cdot r_s \cdot B \cdot C_v \cdot C_c \cdot A_p} \right)^2 \right) + \left(f_D \cdot \frac{L_p}{d_p} \cdot \frac{\left(Q / \left(\frac{\pi \cdot d_p}{4} \right) \right)^2}{2g} \right) \\
 &\quad \text{Filterrohr} \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{Brunneninneres}
 \end{aligned}$$

Software tool:

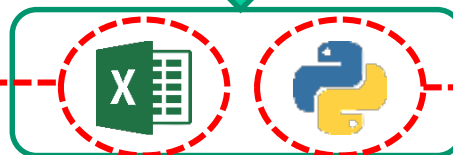


- Gilt für:
- ✓ Gespannter Aquifer
 - ✓ Stationärer Zustand

Was kann man mit Well Designer berechnen?
Verluste von Komponenten im System Brunnen - Aquifer
in Abhängigkeit von Q , K , n , r



Online verfügbar ©
(Houben 2015)



Roll-out 2018

Software tools: WELL DESIGNER

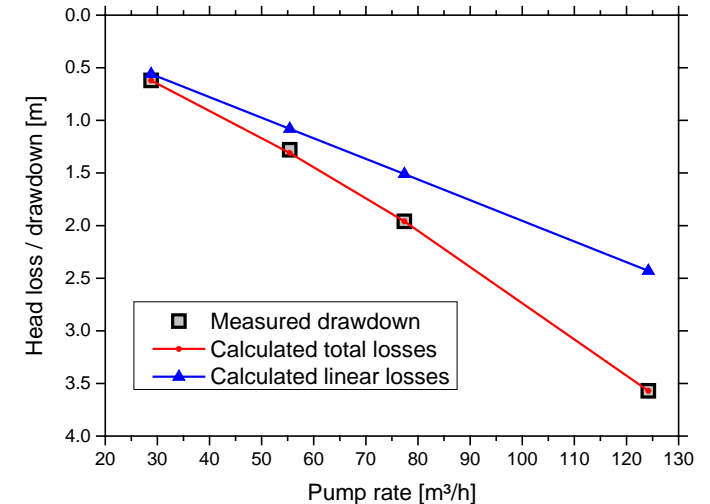
Funktionalitäten



- Brunnen Anzahl: bis zu 4
- Qualitätskontrollanzeigen
- virtueller Leistungspumpversuch
- Energieverbrauch



- Brunnen Anzahl: „∞“
- Komponenten an/aus-schaltbar
- virtueller Leistungspumpversuch
- Bild- und Datenbearbeitung
- Verfügbar als *.exe



Software tool:



The screenshot displays the 'Well Designer beta version' software interface. The main window shows a cross-section of a well with a discharge rate Q of 120.0 m^3/h . The well diameter is 50.0 m, and the radius is 0.2 m. The diagram includes a gravel pack section with a length L and a radius r_b . The current scenario is labeled as `_line0`.

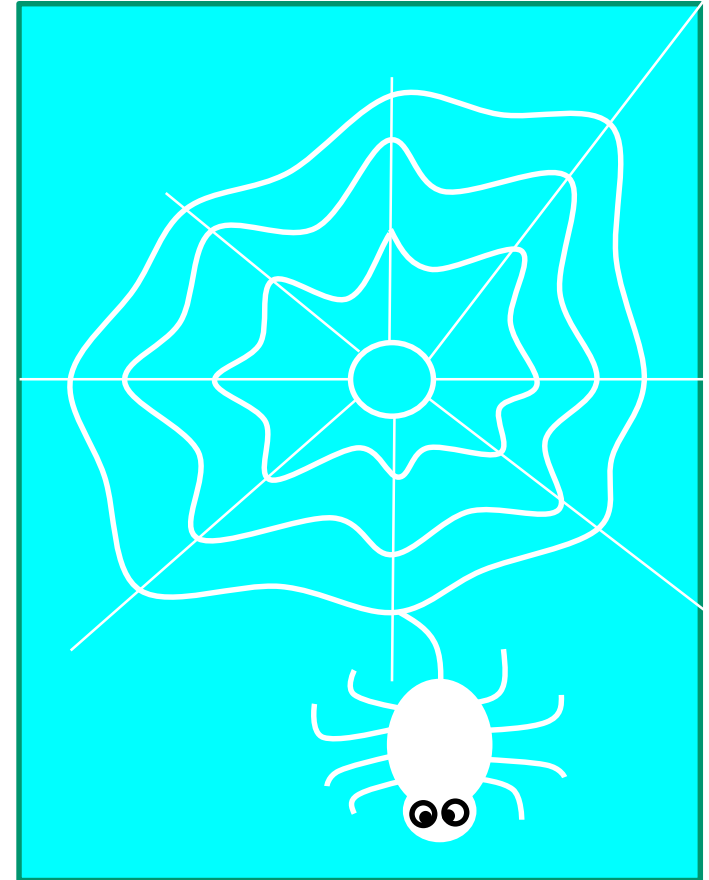
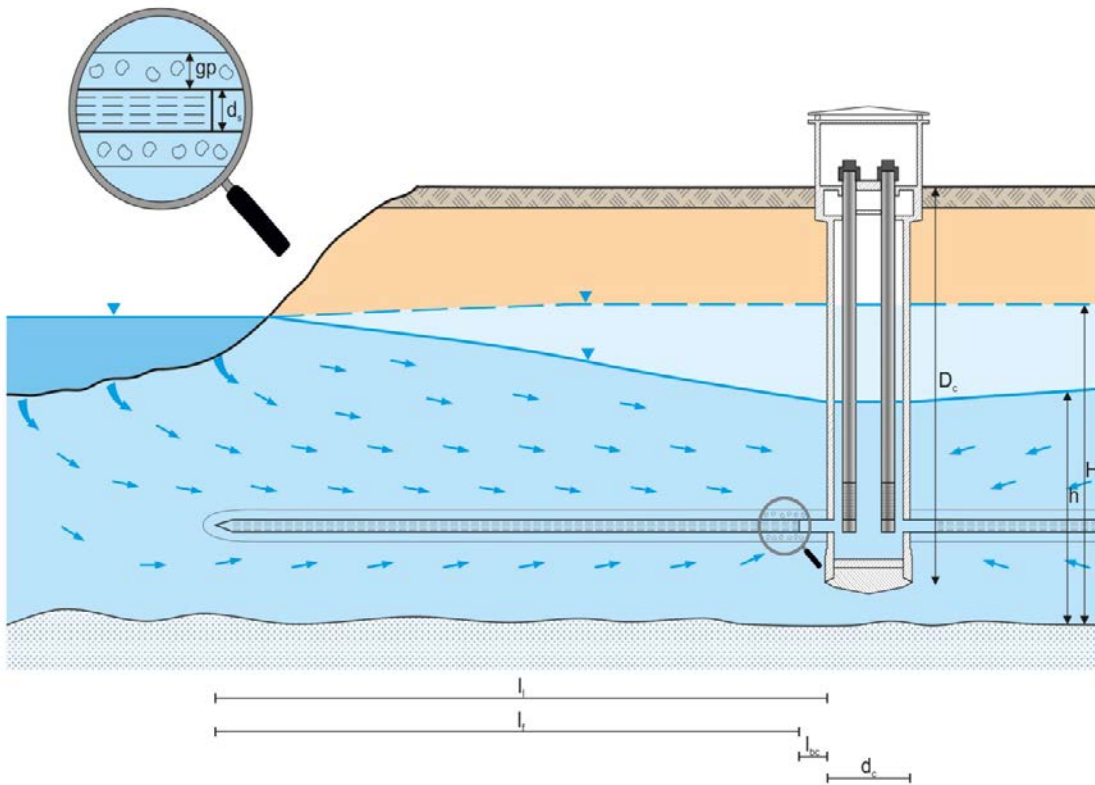
An 'Input parameters' dialog box is open for the 'Gravel Pack' component. The 'Options' section includes:

- Activate component
- Estimate hydraulic conductivity using Kozeny-Carman
- Assign Beta Inertial coefficient
- Loss type: linear, non-linear, sum

The 'beta coefficient β^* [-]' is set to 2.31466451178. The 'porosity n [-]' is 0.24, and the 'hydraulic conductivity K_{gp} [m/s]' is 0.00293484764. A diagram of a gravel pack cross-section shows a 'mean grain size d_{50} [m]' of 0.0015.

A graph on the right shows the discharge rate Q (m³/h) versus the radial distance r (m). The x-axis ranges from 0 to 200 m, and the y-axis ranges from 0 to 120.0 m³/h. The curve shows a decreasing discharge rate as the radial distance increases.

Horizontalfilterbrunnen



Sarah Collins & Georg Houben

Analytisches Modell Hantush & Papadopoulos (1962)

s_i

$$= \frac{Q_i/L_i}{4 \cdot \pi \cdot K \cdot b}$$

$$\cdot \left\{ \begin{aligned} & \alpha \cdot W\left(\frac{\alpha^2 + \beta^2}{4 \cdot v' \cdot t}\right) - \delta \cdot W\left(\frac{\delta^2 + \beta^2}{4 \cdot v' \cdot t}\right) + 2L_i - 2\beta \left(\tan^{-1} \frac{\alpha}{\beta} - \tan^{-1} \frac{\delta}{\beta}\right) \\ & + \frac{4 \cdot b}{\pi} \cdot \int_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \left[L\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \alpha}{b}\right), \left(\frac{n \cdot \pi \cdot \beta}{b}\right) - L\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \delta}{b}\right), \left(\frac{n \cdot \pi \cdot \beta}{b}\right) \right] \cdot \cos \frac{n \cdot \pi \cdot z}{b} \cdot \cos \frac{n \cdot \pi \cdot z_i}{b} \end{aligned} \right\}$$

- K = hydraulic conductivity [L/T]
- Q_i = pumping rate of ith lateral [L³/T]
- L_i = length of ith lateral [L]
- b = thickness of confined aquifer or initial water-saturated thickness of water-table aquifer [L]
- S = specific yield, effective porosity
- r_c = radius of caisson [L]
- N = number of laterals
- n = 1, 2, 3, 4, ... ∞ (integer counter)
- r, z, θ = cylindrical coordinates as shown in Fig. X (z positive downwards)
- r_i, z_i, θ_i = cylindrical coordinates of ith lateral (Fig. X)
- x, y, z = rectangular coordinates
- t = time since start of pumping [T]
- K₀(u) = zero-order modified Bessel function of the second kind
- W(u) = well function (Theis 1935), which can be approximated by

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

$$\alpha = r \cdot \cos(\theta - \theta_i) - r_c$$

$$\beta = r \cdot \sin(\theta - \theta_i)$$

$$\delta = r \cdot \cos(\theta - \theta_i) - l'$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$l' = r_c + L_i$$

$$v' = \frac{K \cdot b}{S_y}$$

$$L(u, \pm w) = -L(-u, \pm w) = \int_0^u K_0 \cdot \left(\sqrt{w^2 + y^2} \right) dy$$

$$w = 2 \cdot n \cdot b + z_i - z$$

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot K \cdot b \cdot t}$$

Analytisches Modell Williams (2013)

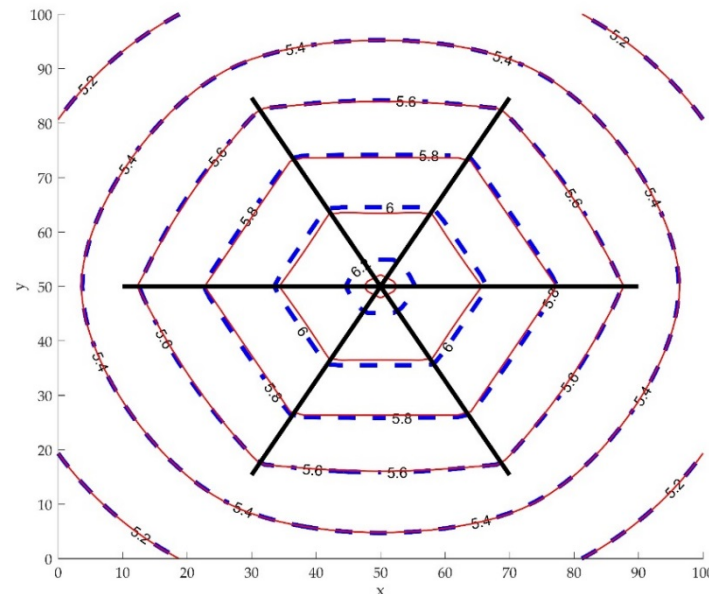
$$s = \frac{2.3 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot K \cdot b} \cdot \log\left(\frac{2.25 \cdot K \cdot b \cdot t}{S}\right) - (2/n_s) \cdot \log(RP_1 * RP_2 * RP_3 * \dots * RP_{n_s})$$

with

n_s = number of point sinks along the vertical projection of the well screen

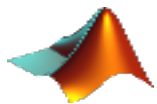
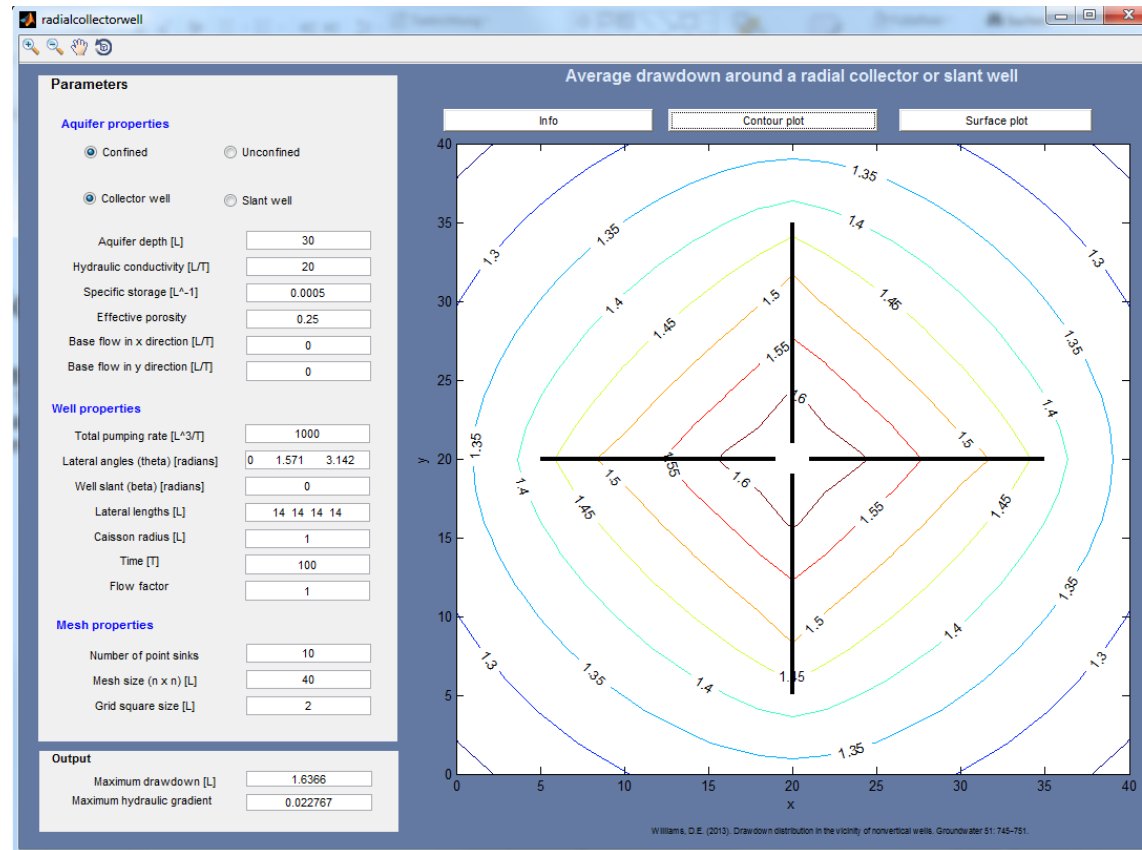
RP_x = distance from (arbitrary) observation point to point sink x [L]

Hantush and Papadopoulos (1962)
vs. Williams (2013)



Softwaretools HORI

Software-Tools zur Berechnung der Absenkung um Horizontalfilterbrunnen: analytische Modelle nach Hantush & Papadopoulos (1962) sowie Williams (2013)



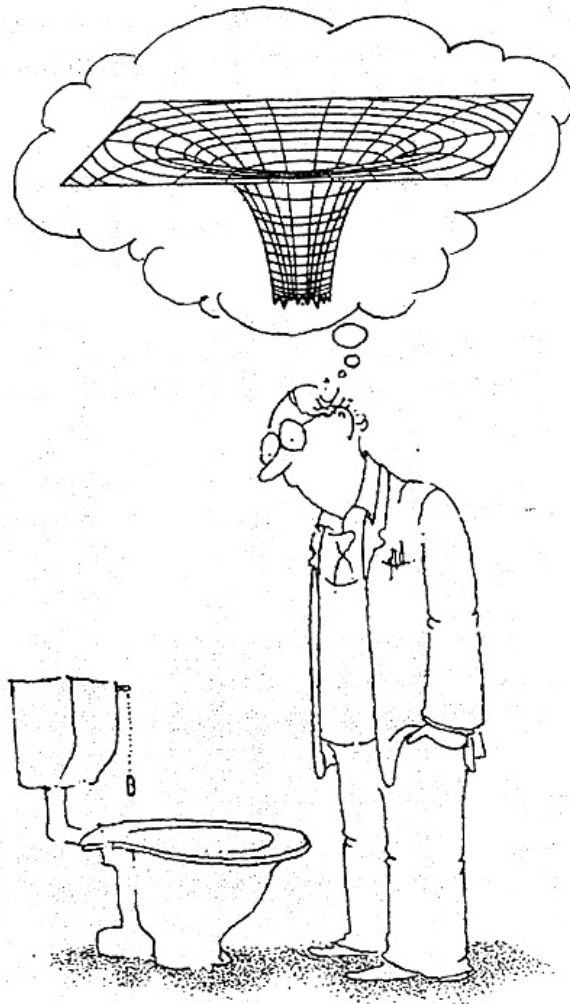
Verfügbar als MATLAB executable (Collins 2016), erfordert MATLAB
Alternativ: ohne MATLAB mit Matlab-runtime, derzeit nur unter Windows 7

Zusammenfassung

- Ziel der Brunnenbemessung: Absenkung reduzieren
= Energieverbrauch & Alterung reduzieren
- Jenseits von SICHARDT: Bemessung im 21. Jahrhundert sollte nicht-laminare und turbulente Strömung berücksichtigen
- Modellsoftware WellDesigner & HORI stehen zur Verfügung
- Noch keine automatische Optimierung, aber Prüfung von Optionen und virtuelle Leistungspumpversuche möglich
- Fernziele: auch freie Aquifere, instationäre Strömung ...

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen sind willkommen



Vladimir Renčín

$$f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) = v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_x}{\partial t}$$
$$f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) = v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_y}{\partial t}$$
$$f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) = v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial t}$$

