

Sűrűségfüggő geotermikus modellezés tapasztalatai magyarországi esettanulmányok tükrében

Kun Éva – Székvölgyi Katalin - Gondárné Sőregi Katalin –
Gondár Károly

XXI. Konferencia a felszín alatti vizekről Siófok, 2014.04.02-03

Előadás vázlat

- ⇩ Csatolt víz és hőtranszportot meghatározó egyenletek
- ⇩ A hőmérséklettől függő paraméterek és állapotjellemzők (sűrűség, viszkozitás, hővezető képesség)
- ⇩ Esettanulmány
 - A vizsgált terület földtani, hidrogeológiai és geotermikus viszonyai
 - Modellezési eredmények bemutatása sűrűségfüggetlen és sűrűségfüggő esetben
- ⇩ Összefoglalás

Csatolt víz és hőtranszportot meghatározó egyenletek

- ↓ Tömegmegmaradáson alapuló folytonossági egyenlet változó sűrűség esetén

$$\frac{\partial(\phi\rho_f)}{\partial t} + \text{div}(\rho_f\mathbf{q}) = Q_\rho$$

- ↓ Változó sűrűségű feltételek mellett a szivárgást leíró Darcy-egyenlet általános formája

$$h_0 = z + \frac{p_f}{\rho_{0f}g} \quad \mathbf{K}_0 = \frac{\mathbf{k}\rho_{0f}g}{\mu_{0f}}$$
$$\mathbf{q} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu_f}(\text{grad}(p_f) - \rho_f\mathbf{g}) \quad \mathbf{q} = -\mathbf{K}_0 f_\mu \text{grad}\left(h_0 + \frac{\rho_f - \rho_{0f}}{\rho_{0f}}\right)$$

- ↓ Oldat tömegmegmaradás törvénye

$$\frac{\partial(\phi C)}{\partial t} + \text{div}(\rho_f\mathbf{q}C) - \text{div}(\mathbf{D}\text{grad}(C)) = Q_C$$

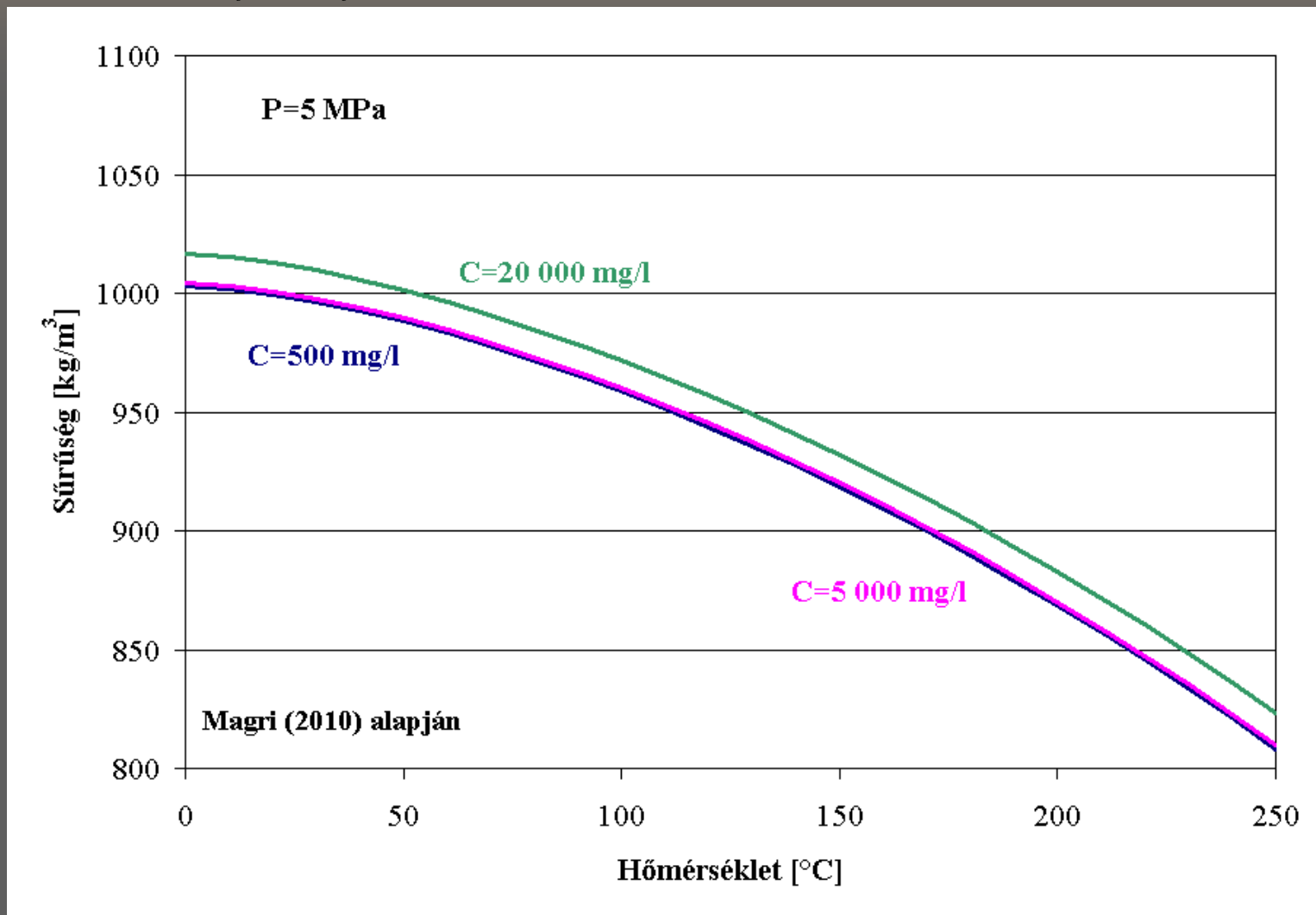
- ↓ A folyadék és a szilárd közeg energia megmaradás törvénye

$$\frac{\partial}{\partial t}((\phi\rho_f c_f + (1-\phi)\rho_s c_s)T) + \text{div}(\rho_f c_f T\mathbf{q}) - \text{div}(\lambda\text{grad}(T)) = Q^T$$

A hőmérséklettől függő paraméterek és állapotjellemzők I.

Sűrűség

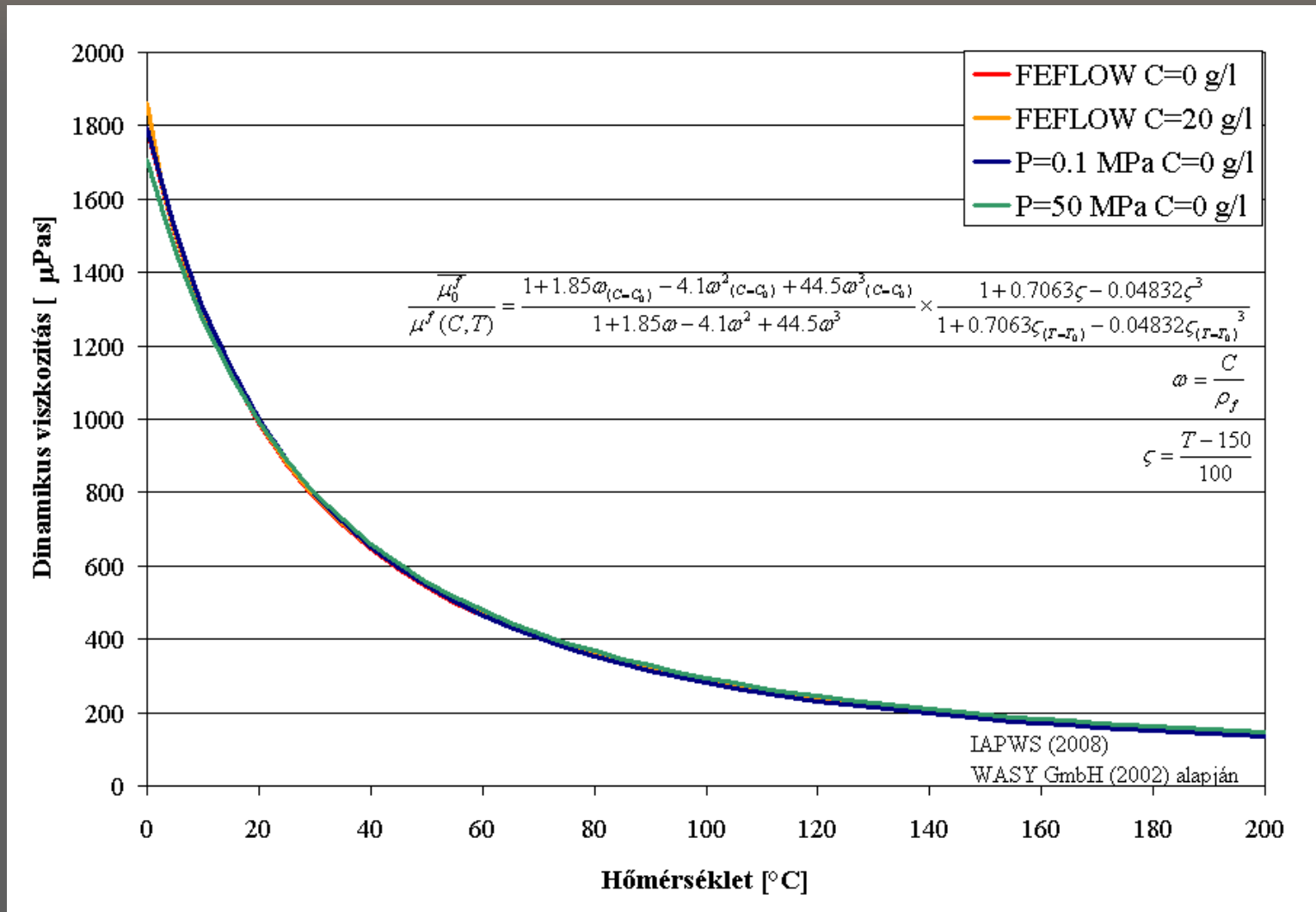
$$\rho_f = \rho_{0f} (1 + \bar{\gamma}(p - p_0) - \bar{\beta}(T - T_0) + \bar{\alpha}(C_\alpha - C_{\alpha 0}))$$



A hőmérséklettől függő paraméterek és állapotjellemzők II.

Viszkozitás

$$f_{\mu} = \frac{\mu_{0f}}{\mu_f(p, C, T)}$$

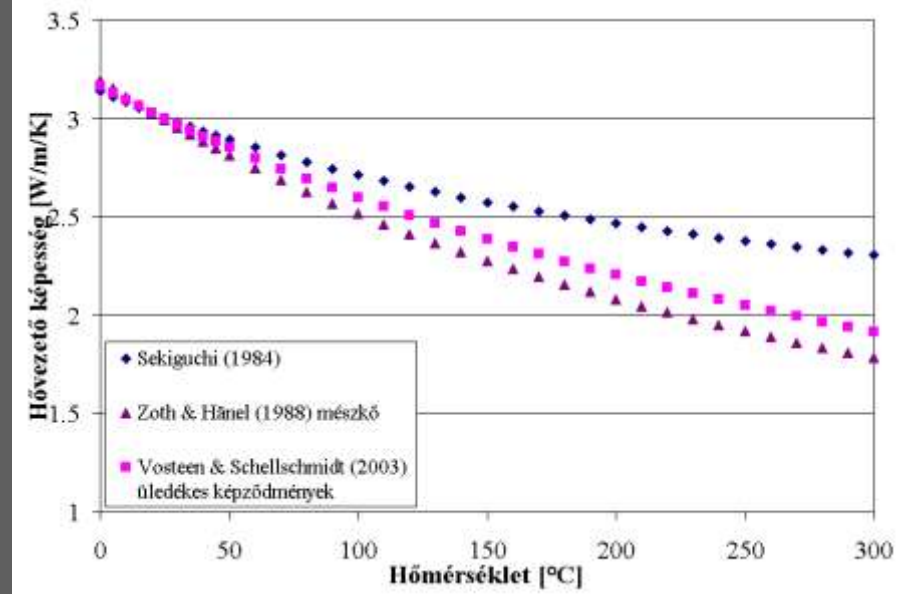
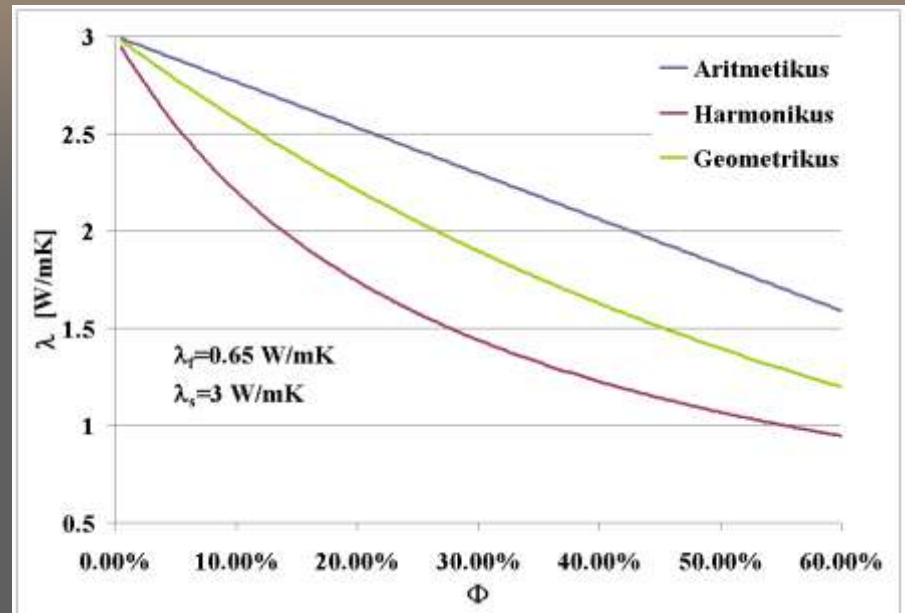
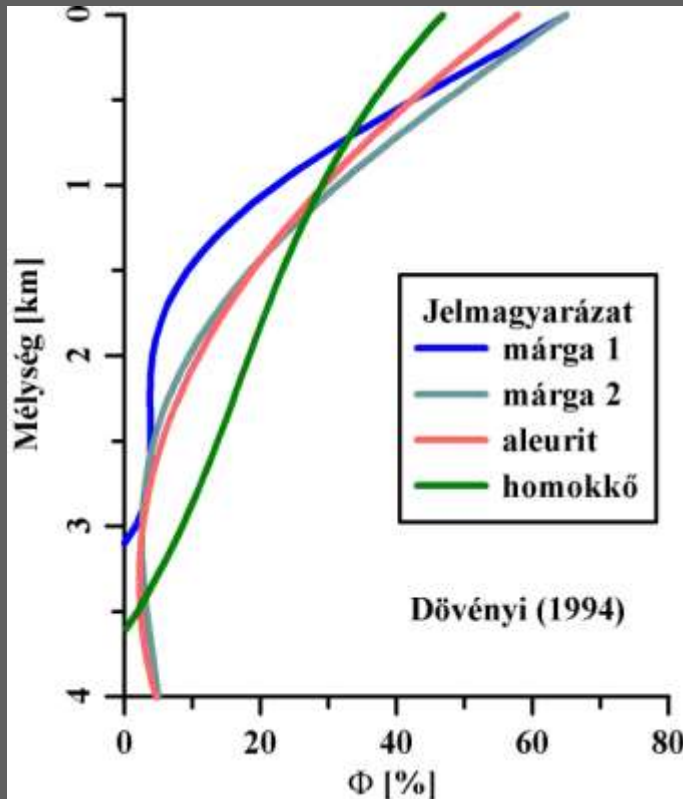


A hőmérséklettől függő paraméterek és állapotjellemzők III. Hővezető képesség

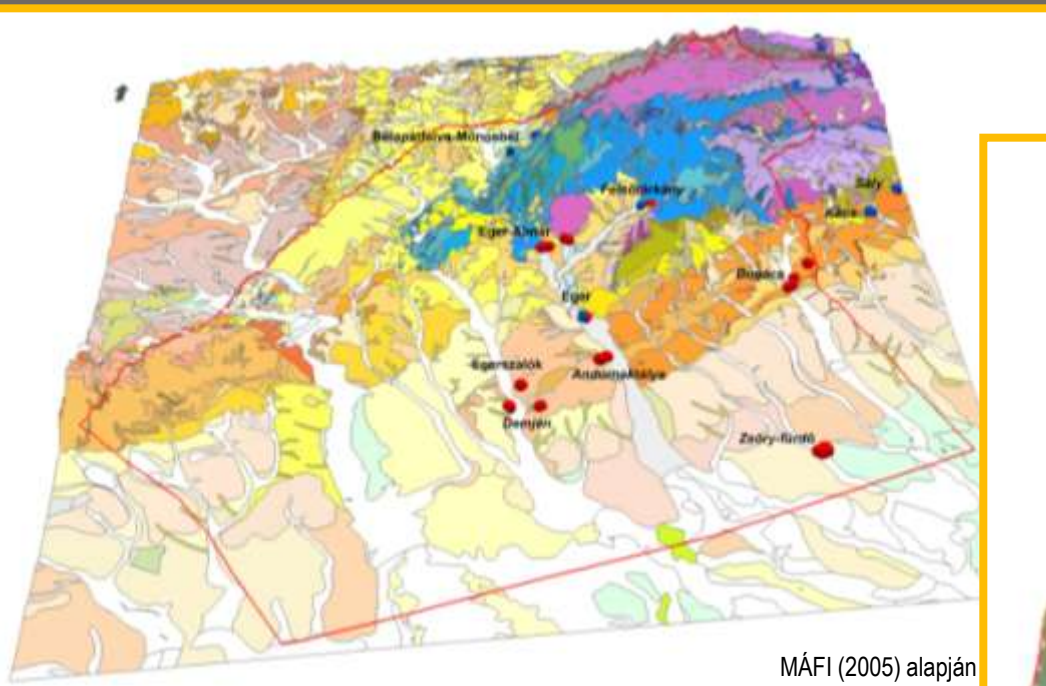
Aritmetikus: $\lambda = \phi \lambda_f + (1 - \phi) \lambda_s$

Harmonikus: $\frac{1}{\lambda} = \frac{\phi}{\lambda_f} + \frac{1 - \phi}{\lambda_s}$

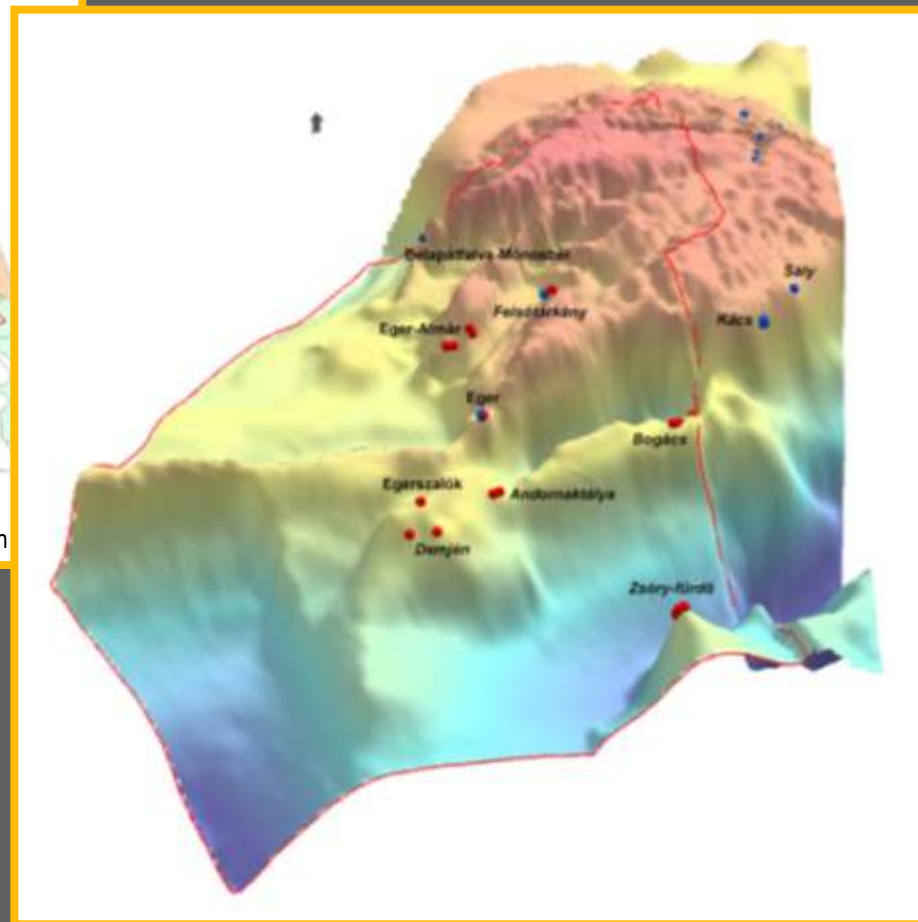
Geometriai: $\lambda = \lambda_f^\phi \times \lambda_s^{(1-\phi)}$



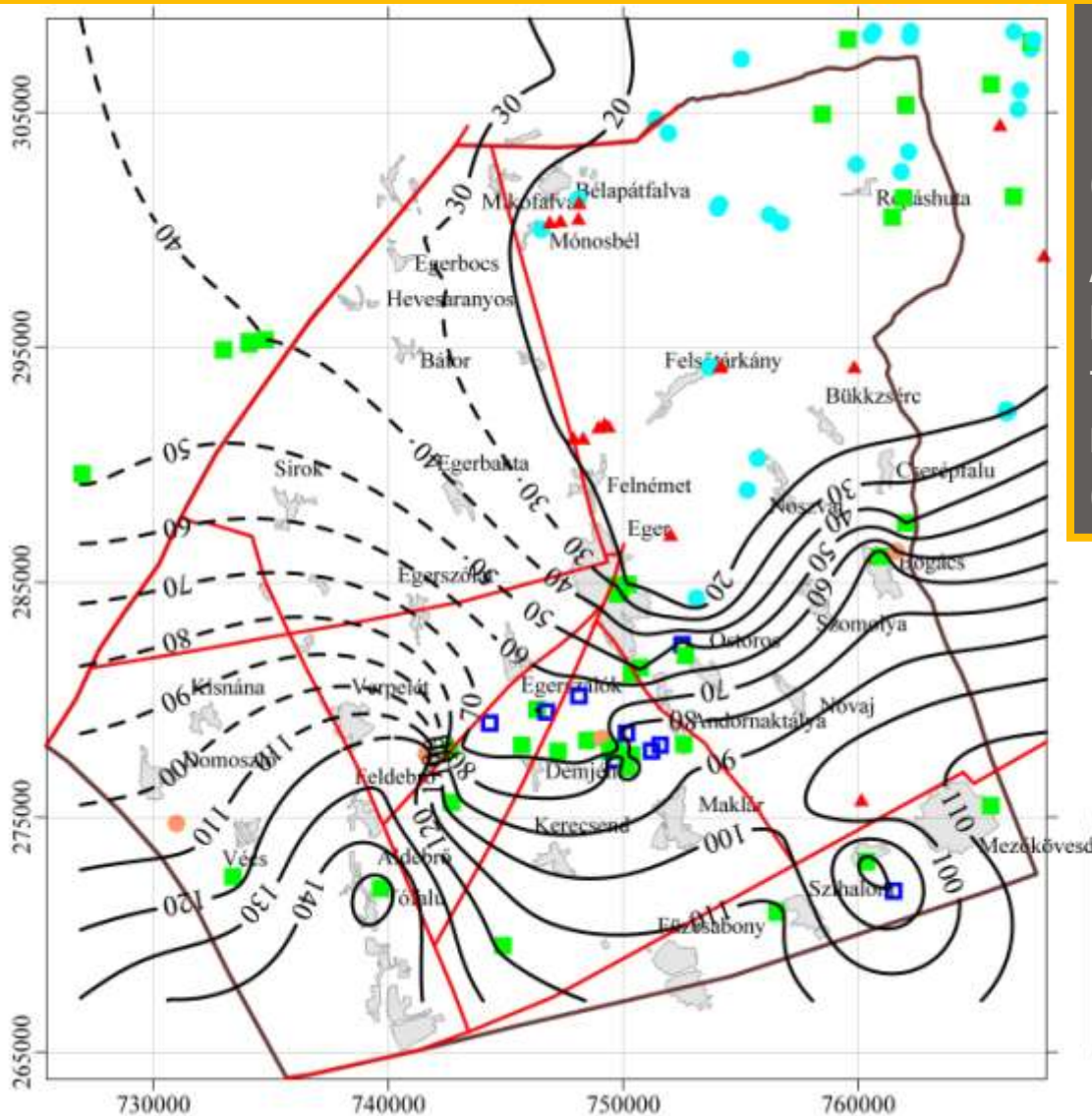
Esettanulmány Földtani felépítés



MÁFI (2005) alapján



Geotermikus viszonyok Hőmérséklet és hőáram



Hőáram

Detk-1 fúrás: $118 \text{ mW/m}^2 \pm 10\%$
(Dövényi 1994).

Átlagos hőáram: 105 mW/m^2 mért
hőáram + advektív hőáram a források
teljes hőmennyisége és a hőgyűjtő terület
nagysága alapján
(Lenkey et al. 2002).

Felhasznált hőmérsékletadatok típusa:

- Talp hőmérséklet
- Korrigált talp hőmérséklet
- ▲ Kifolyó víz hőmérséklet
- Korrigált kifolyó víz hőmérséklet
- Forrás víz hőmérséklet
- ~ Izotermák [°C]
- ~ Fő vetők

Hidrodinamikai és hőtranszport modell

- ⇓ 2 modellverziót hasonlítunk össze:
 - A modell csatolt hőtranszport;
 - B modell erősen kapcsolt hőtranszport (gravitációs és felhajtó erő által generált áramlás)

- ⇓ **Modellek jellemzői**
- ⇓ Regionális 40 km (É-D) x 30 km (K-Ny).
- ⇓ 13 réteg
- ⇓ Egyszerűsített hidrogeológiai modell felső 4 réteg fedő üledékek 5-13 réteg karsztároló
- ⇓ Porozitás értékek 45 - 0.75 % (porózus képződményekben a mélység felé csökkenő értékkel)
- ⇓ Szivárgási tényező mező heterogén, de főleg izotróp
- ⇓ Karsztos képződmények: $8.0 \cdot 10^{-5}$ - $1.0 \cdot 10^{-8}$ m/s; porózus réteg: $1-2 \cdot 10^{-8}$ m/s;
- ⇓ Referencia hőmérséklet 0 °C
- ⇓ Folyadék viszkozitását a FEFLOW-ba beépített összefüggés alapján vettük figyelembe
- ⇓ A szilárd fázis hővezető képességének hőmérséklet függését mindkét modell esetében IFM-en keresztül adtuk meg Vosteen & Schellschmidt (2003) üledékes képződményekre kidolgozott összefüggése alapján
- ⇓ Hosszú idejű futtatás $5 \cdot 10^8$ nap
- ⇓ Peremfeltételek:
 - Felszínen 10°C 1. típusú
 - A modell alján $-10'400$ J/m²/d hőáram (2. típusú)
- ⇓ Kezdeti hőmérséklet 10°C és 250°C hőmérséklet között

INTERFACE MANAGER

Sűrűség IFM:

Sűrűség függ a hőmérséklettől, nyomástól és koncentrációtól

A korábban bemutatott alacsony összdott anyagtartalom miatt a koncentrációtól való függést nem vettük figyelembe

Az Interface Manager-en keresztül mind a változó termális expanzió és a folyadék összenyomhatósága is figyelembe vehető 0.1 – 100 MPa nyomás és 0 - 350 °C hőmérséklet tartományban (Magri, 2009).

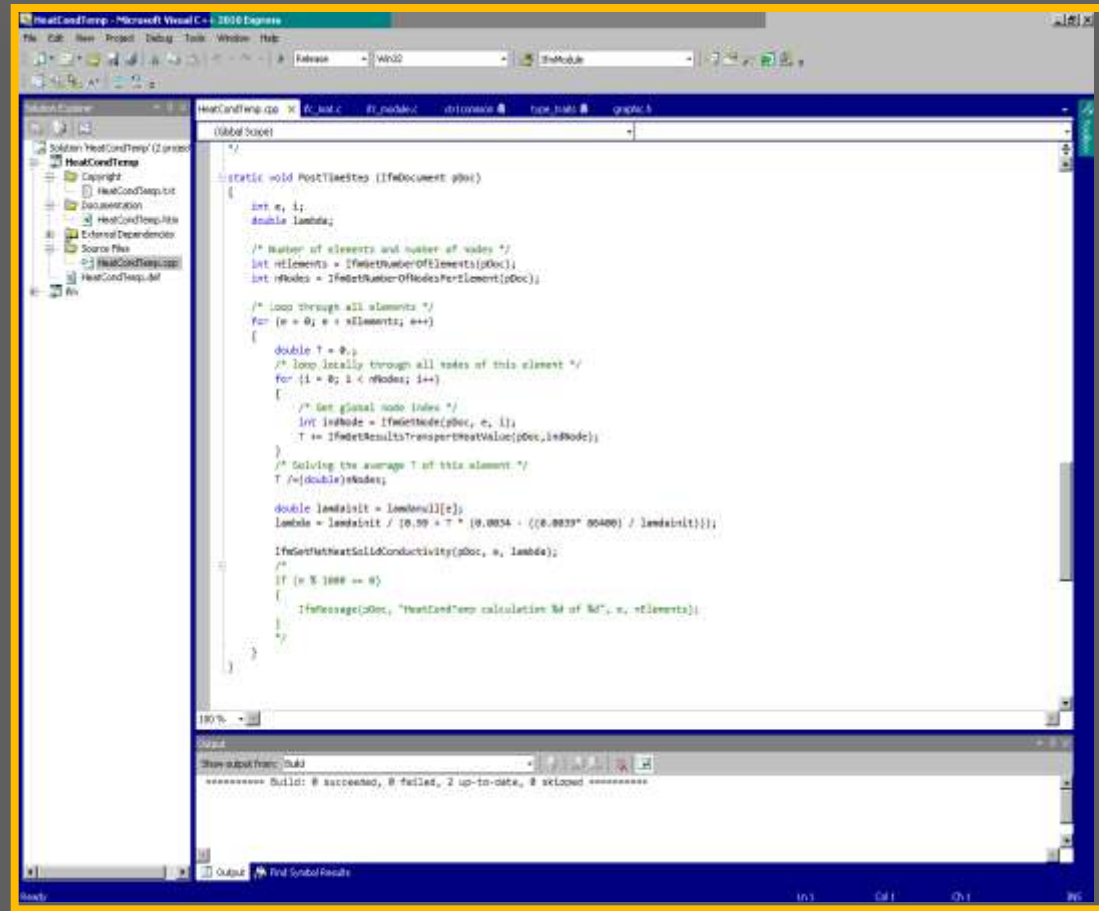
Hővezető képesség IFM:

A szilárd fázis hővezető képessége hőmérséklet függő. A hőmérséklet a hideg víz beszivárgása miatt mind vertikálisan mind horizontálisan jelentősen változik, ezért a futtatás során minden időlépcsőben az előzőleg számított hőmérséklet alapján a hővezető képességet újraszámítottuk. Vosteen and Schellscmidt (2003) által az alábbi üledékes kőzetekre kidolgozott empirikus összefüggést alkalmaztuk

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{0.99 + T(a - b/\lambda(0))}$$

a= 0.0034; b=0.0039

MICROSOFT VISUAL C++ 2010



```
HeatCondTemp.cpp
(Global Scope)

static void PostTimeStep (IfeDocument* pDoc)
{
    int n, i;
    double lambda;

    /* Number of elements and number of nodes */
    int nElements = IfeGetNumberOfElements(pDoc);
    int nNodes = IfeGetNumberOfNodesPerElement(pDoc);

    /* Loop through all elements */
    for (n = 0; n < nElements; n++)
    {
        double T = 0.;
        /* Loop initially through all nodes of this element */
        for (i = 0; i < nNodes; i++)
        {
            /* Get global node index */
            int iNode = IfeGetNode(pDoc, n, i);
            T += IfeGetResultsTransportValue(pDoc, iNode);
        }
        /* Solving the average T of this element */
        T /= (double)nNodes;

        double lambdaInit = lambda[n][i];
        lambda = lambdaInit / (0.99 + T * (0.0034 - ((0.0039 * 00400) / lambdaInit)));

        IfeSetHeatSolidConductivity(pDoc, n, lambda);
    }
    /*
    If (n % 1000 == 0)
    {
        IfeMessage(pDoc, "HeatCondTemp calculation %d of %d", n, nElements);
    }
    */
}

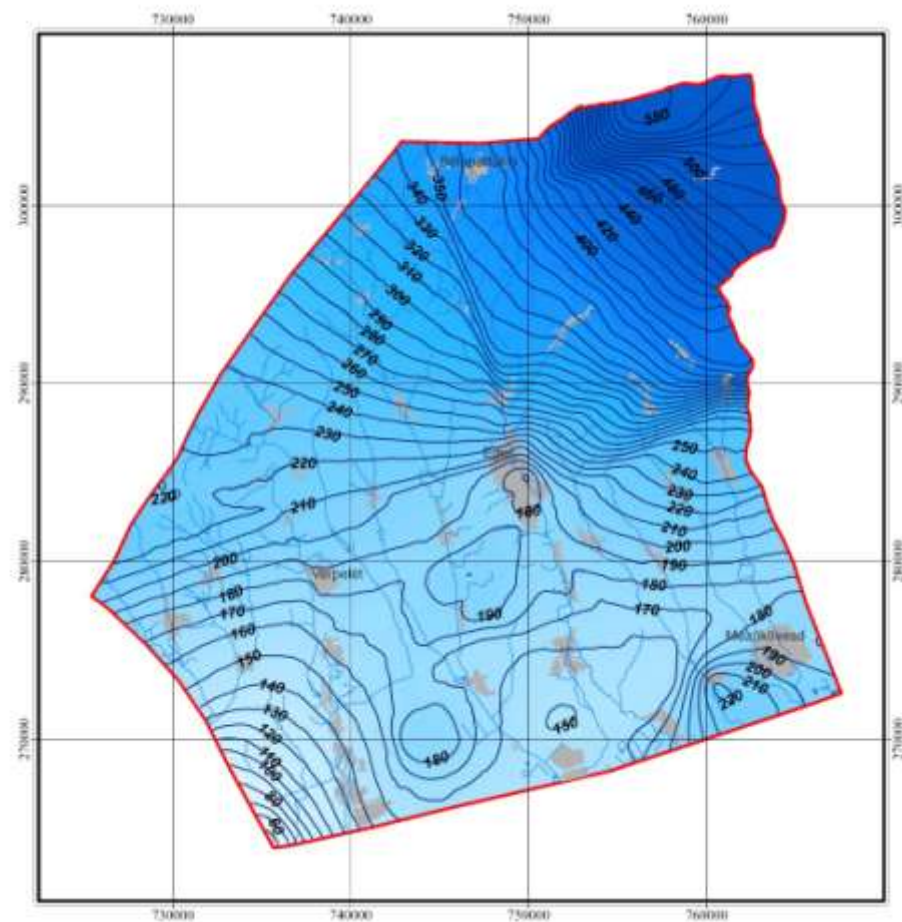
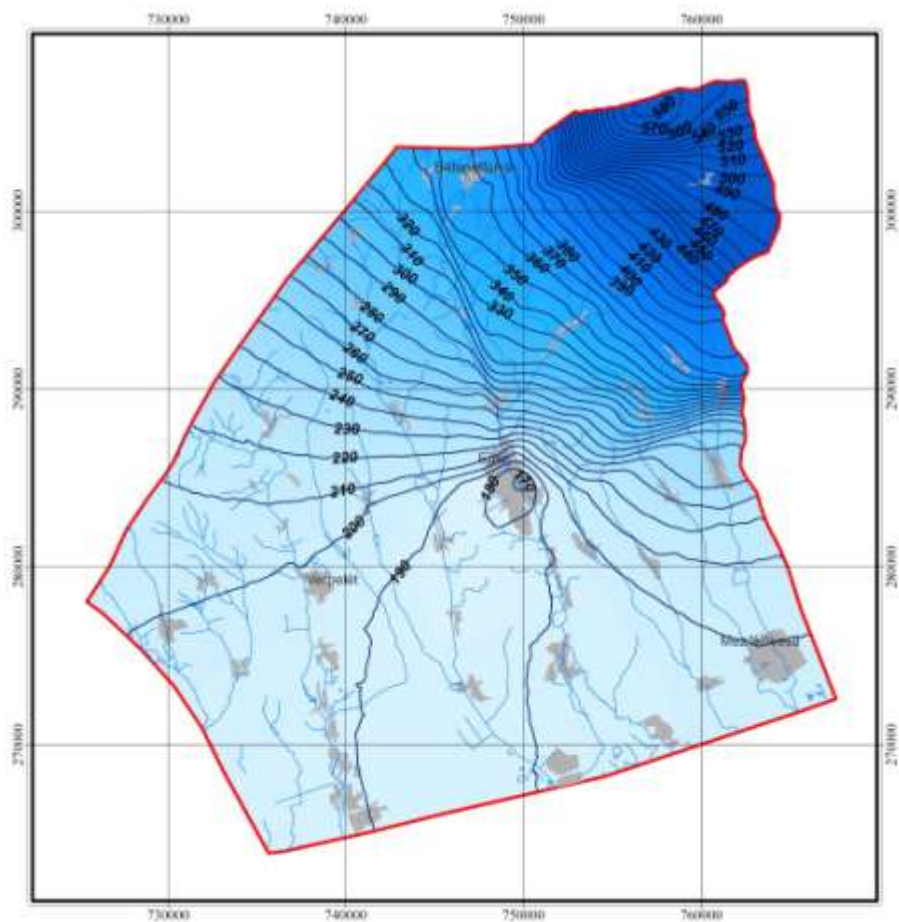
Output
Show output from: Build
***** Build: 0 succeeded, 0 failed, 2 up-to-date, 0 skipped *****
```

Eredmények I.

Hidraulikus emelkedési magasság

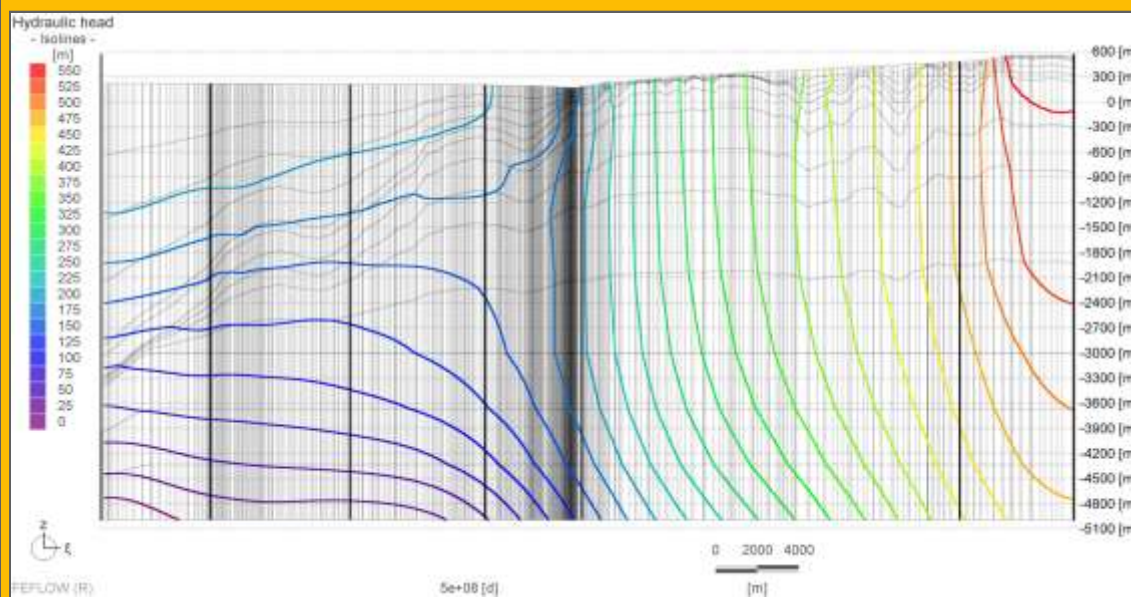
Modellezett hidraulikus emelkedési magasság [mBf]
5. modellréteg /sűrűségfüggetlen/

Modellezett hidraulikus emelkedési magasság [mBf]
5. modellréteg /sűrűségfüggő/



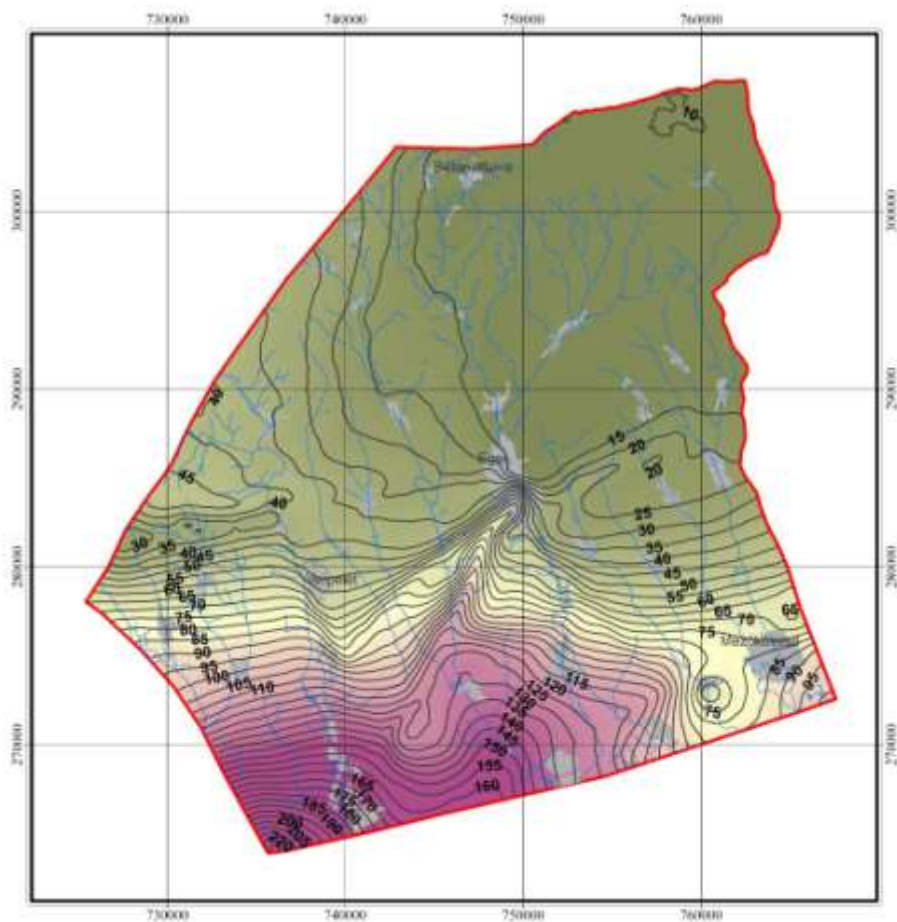
Eredmények II.

Hidraulikus emelkedési magasság



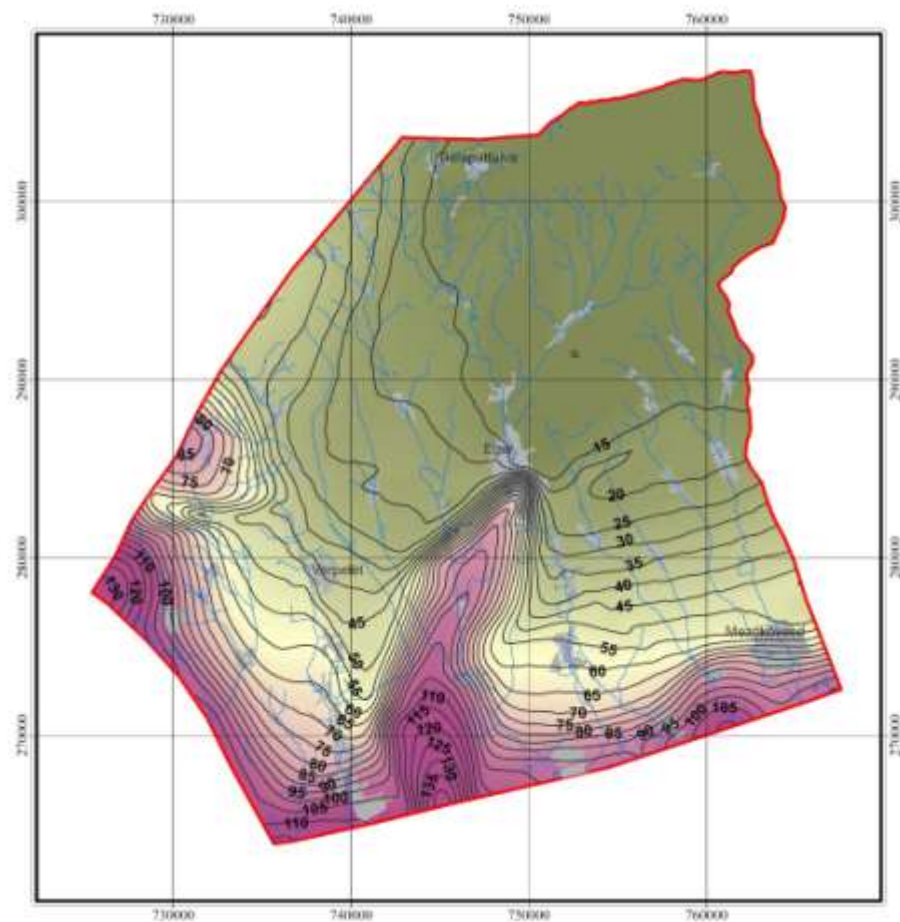
Eredmények III.

Modellezett hőmérséklet eloszlás [°C]
5. modellréteg /sűrűségfüggetlen/



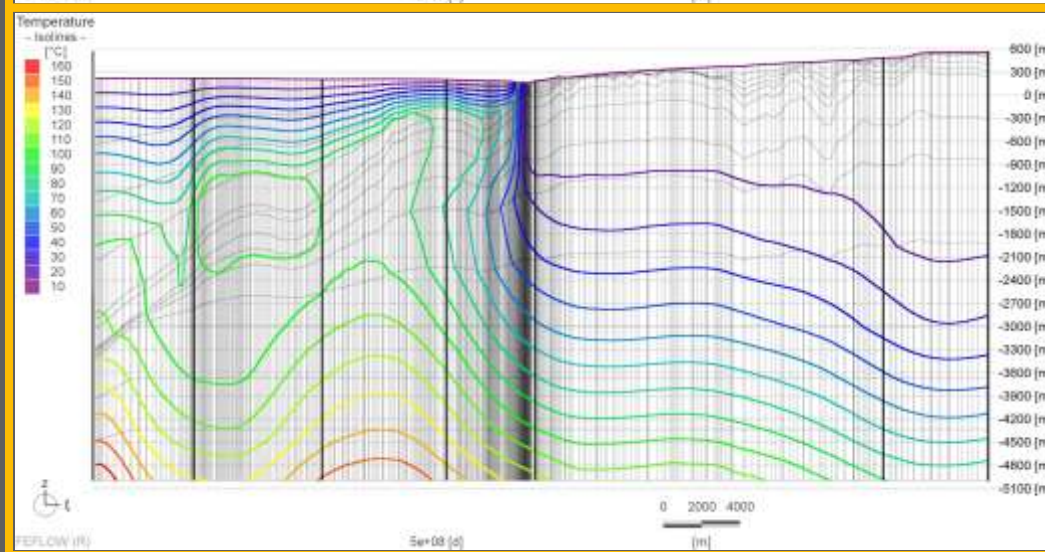
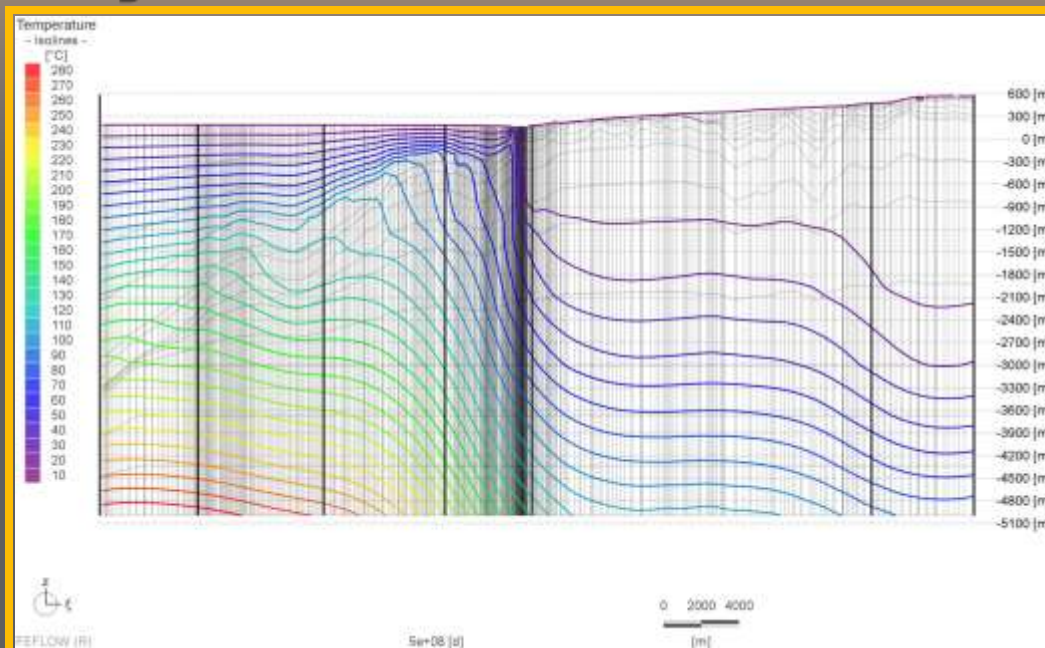
Hőmérséklet

Modellezett hőmérséklet eloszlás [°C]
5. modellréteg /sűrűségfüggő/



Eredmények IV.

Hőmérséklet

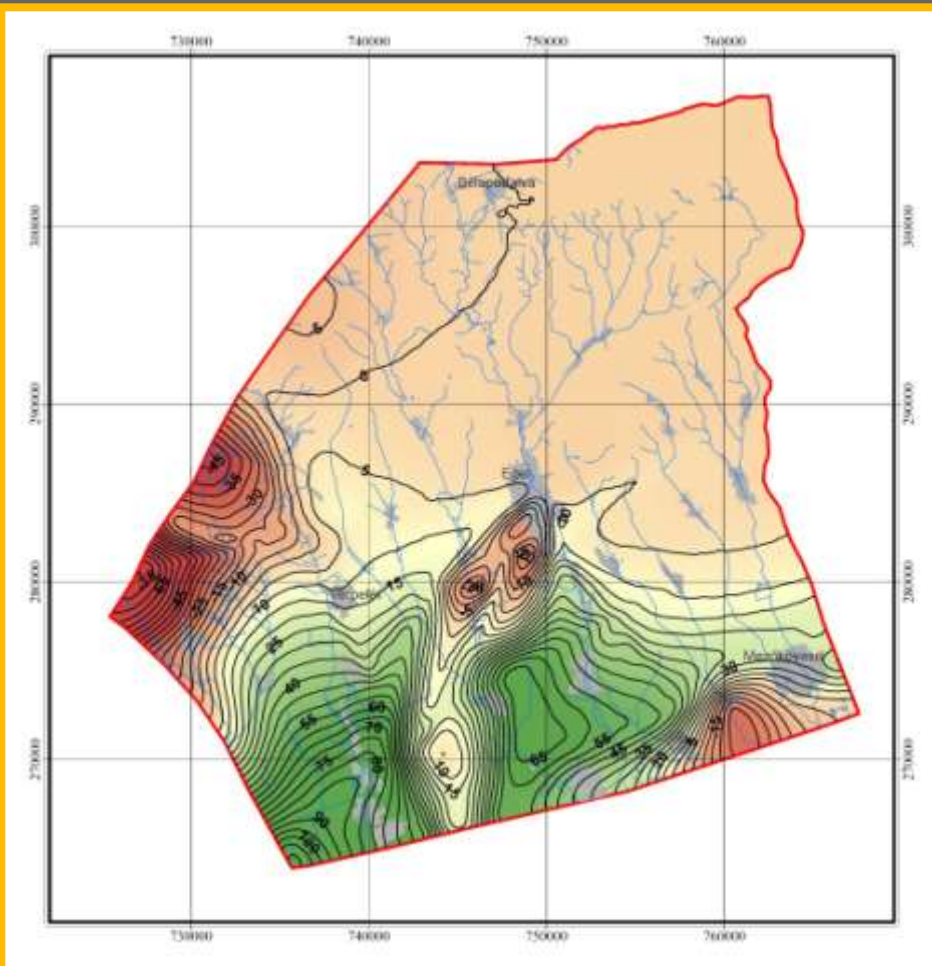
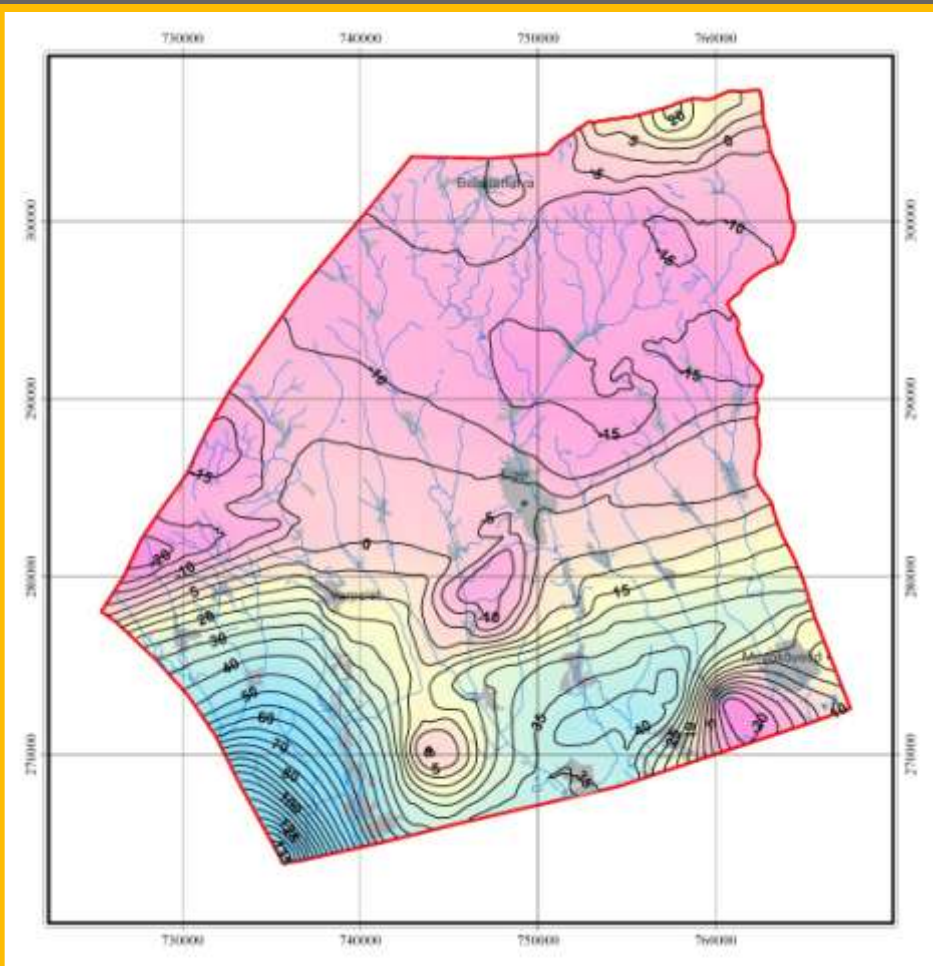


Eredmények V.

Különbség térképek

Hidraulikus emelkedési magasság

Hőmérséklet

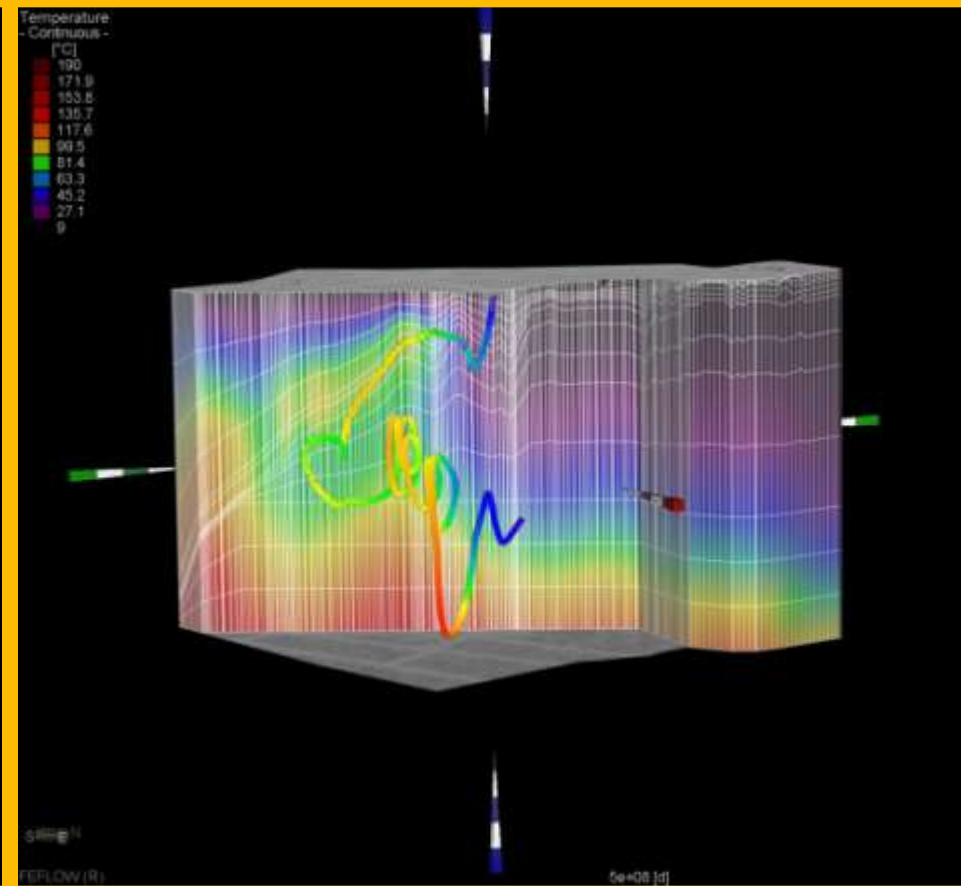
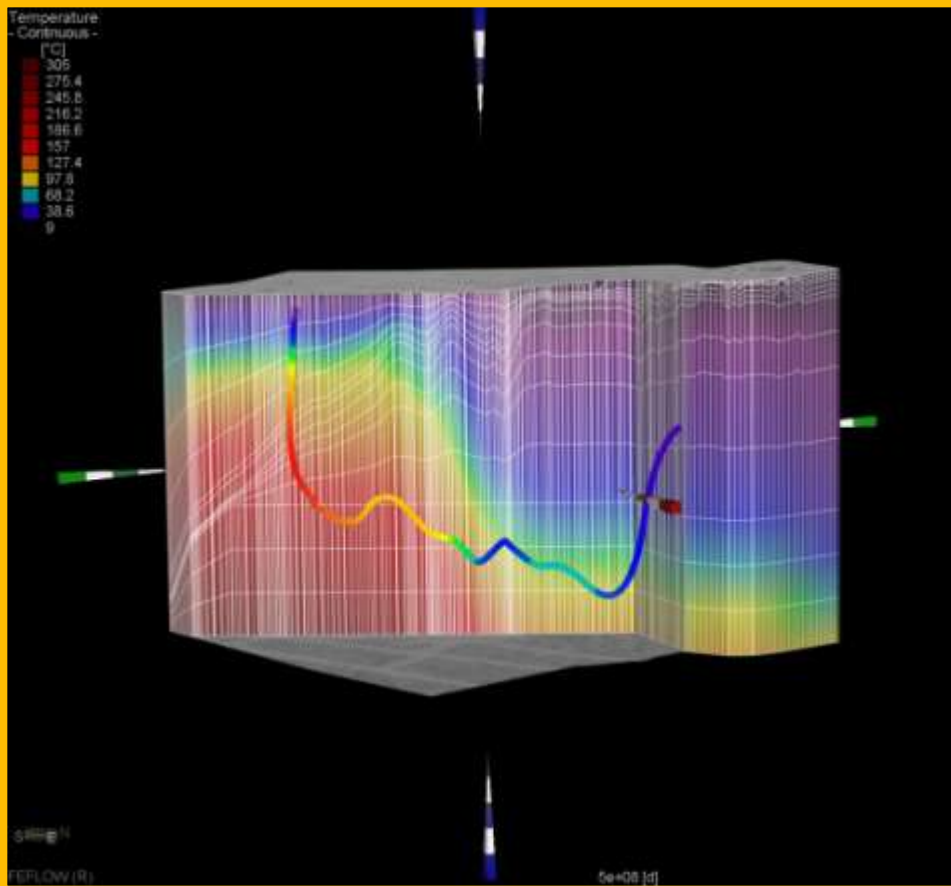


Eredmények VI.

Áramvonalak

Áramvonal
/sűrűségfüggetlen/

Áramvonal
/sűrűségfüggő/



Összefoglalás

- ↓ A sűrűség különbségből fakadó vízmozgás iránya a bemutatott esetben megegyezik a topográfiai különbség által hajtott áramlás irányával
- ↓ A vízmozgás sebességek nagyobbak, nagyobb terület hűl el
- ↓ A kiemelt felszín alatti karsztrögök esetén a spontán konvekciónak nagyobb a szerepe, konvekciós cellák jöhetnek létre
- ↓ A kalibrálást újra el kell végezni

Köszönöm a figyelmet!