

# Felszín alatti hulladék hő tárolás és hőtranszport modellek

Nyiri Gábor, Dr. Zákányi Balázs, Ilyés Csaba, Dr. Szűcs Péter,  
Christian Camacho, Tupbucha Udomporn

NTP-SZKOLL-21-0006

# Amiről szó lesz

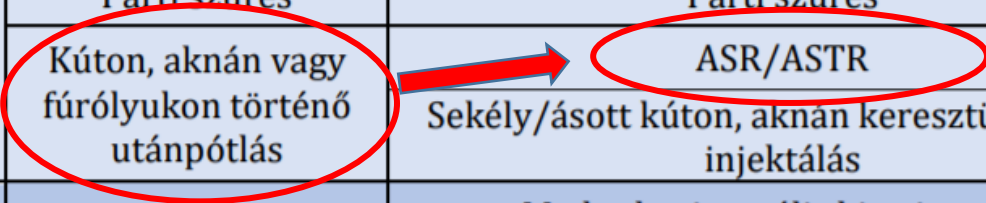
- Célkitűzés
- Szakirodalmi háttér
- Alkalmazott szoftver bemutatása
- Hulladékhő tárolás modellezése
  - Elméleti területen végzett vizsgálatok
  - Valós környezetben végzett vizsgálatok
- Összefoglalás, további kutatási feladatok

# Célzott felszínalatti vízutánpótlás (Managed Aquifer Recharge)

- Egy olyan vízgazdálkodási módszer család, melynek alkalmazása hosszú időkre nyúlik vissza, de mint fogalom viszonylag fiatal (Dillon et al. 2018)
- Definíció szerint a víztartók tudatos vízutánpótlását jelenti, későbbi vízkivétel céljából vagy környezeti haszon elérése érdekében (NRMCC, EPHC és NHMRC 2009)
- A különböző szakirodalmak más-más módon csoportosítják a MAR típusokat
- A fő MAR típusokat két csoportra lehet bontani attól függően, hogy a módszer alkalmazása a víz intenzívebb beszivárogtatására vagy a víz felfogására és összegyűjtésére irányul

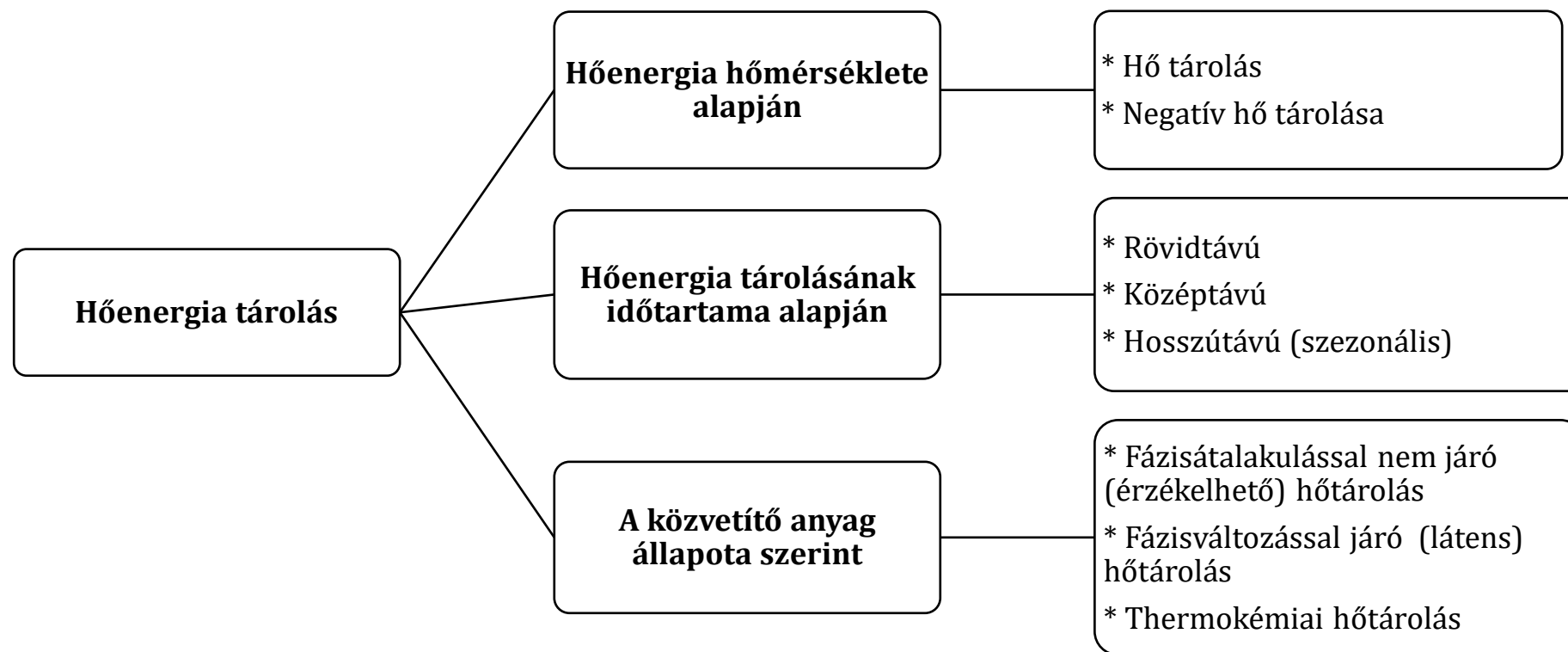
# A MAR típusok lehetséges csoportosítása a globális MAR adatbázis tagolása alapján

	Fő MAR típusok	Specifikus MAR típusok
Elsősorban a víz beszivárogatására irányuló módszerek	Felszíni beszivárogató módszerek	Csatornák és árkok
		Fordított lecsapolás
		Többletöntözés
		Árasztás
		Beszivárogató tavak és medencék
	Parti szűrés	Parti szűrés
	Kúton, aknán vagy fúrólukon történő utánpótlás	<b>ASR/ASTR</b> Sekély/ásott kúton, aknán keresztül történő injektálás
Elsősorban a víz felfogására, összegyűjtésére irányuló módszerek	Medermorfológia-módosítás	Meder horizontális kiterjesztése
		Utánpótlódást segítő gát
		Homok kitöltésű tározó gát
		Felszín alatti gát
	Esővíz és felszíni lefolyás összegyűjtése és felhasználása	Gátak és töltések
		Esővíz összegyűjtése háztetőkről
		Árkok



# Hőenergia tárolás

Magas vagy alacsony hőmérsékletű hőenergia ideiglenes tárolása későbbi felhasználás céljából.



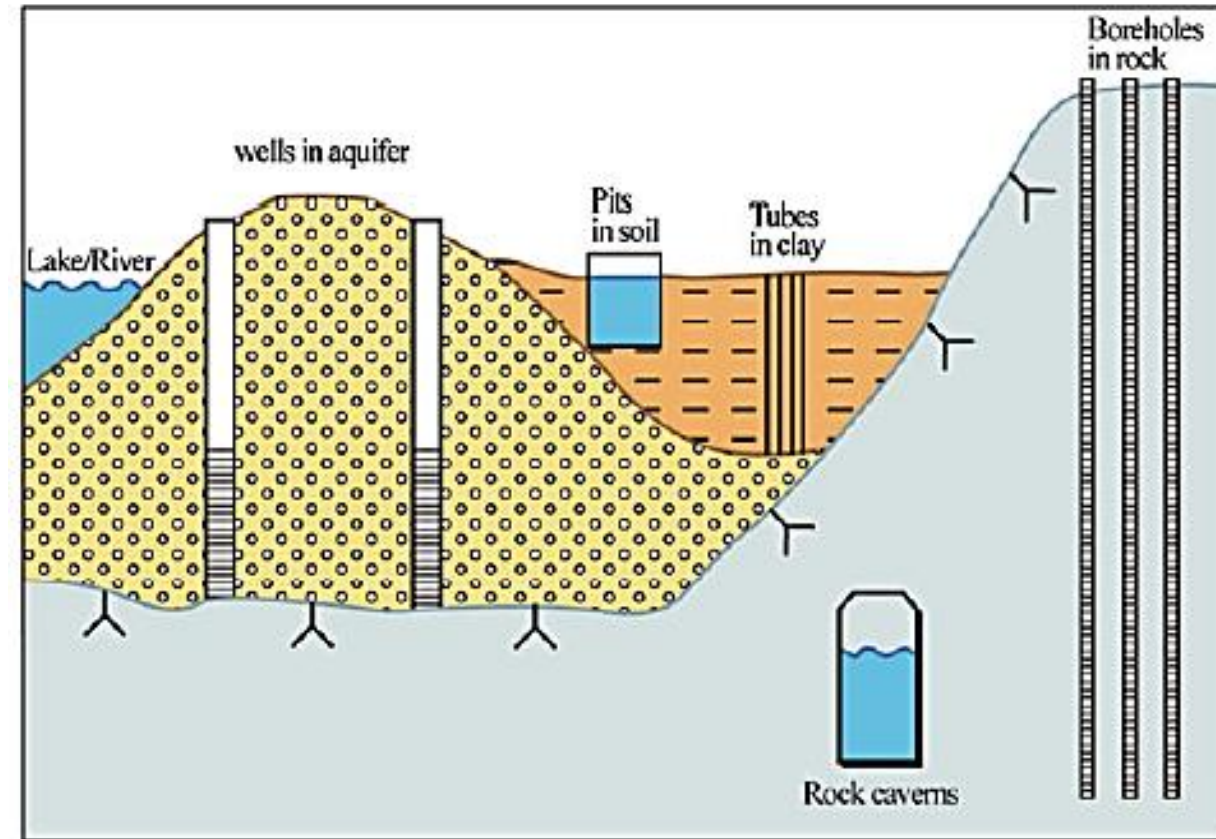
1. ábra: A hőenergia tárolás osztályozása (Cao, 2010)

# Felszín alatti hőtárolási módszerek osztályozása

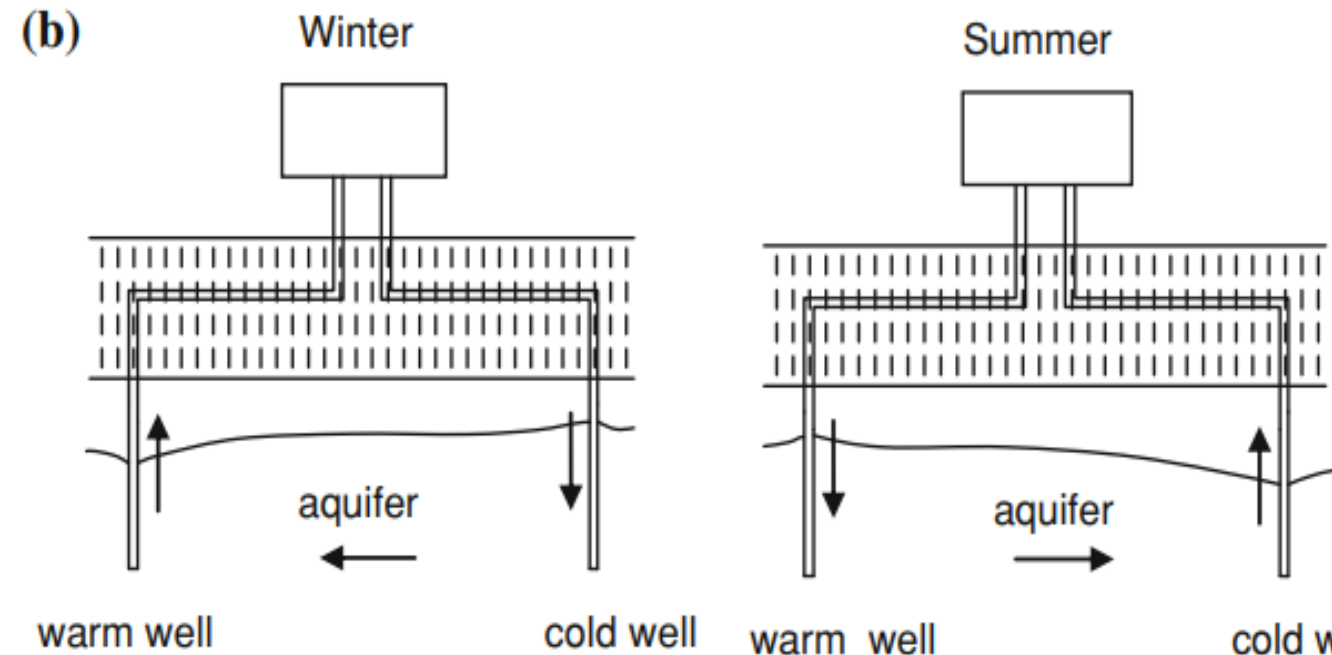
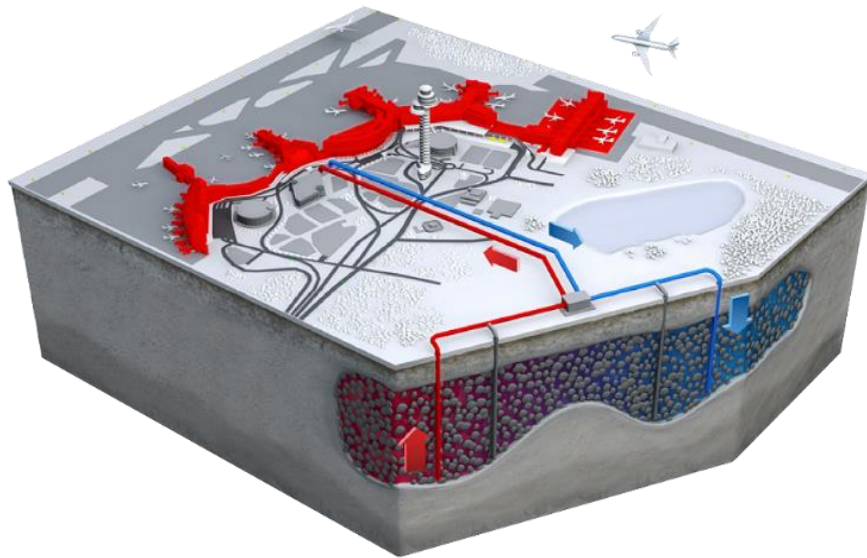
<b>Felszín alatti hőtárolási rendszerek</b>	<b>Tárolási hőmérséklet</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Alacsony hőmérsékletű rendszerek</li><li>* Magas hőmérsékletű rendszerek</li></ul>
	<b>Tárolás célja</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Fűtés</li><li>* Hűtés</li><li>* Kombinált</li></ul>
	<b>Alkalmazási terület</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Lakosság</li><li>* Kereskedelmi</li><li>* Ipari</li></ul>
	<b>Tárolási technológia</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Aquifer thermal energy storage (ATES)</li><li>* Borehole thermal energy storage (BTES)</li><li>* Cavern thermal energy storage (CTES)</li><li>* Bányagödörben történő tárolás</li><li>* Felszín alatti tartályokban történő tárolás</li></ul>

# Felszín alatti hőenergia-tárolási lehetőségek

- Aquifer Thermal Energy Storage (ATES)
- Borehole Thermal Energy Storage (BTES)
- Cavern Thermal Energy Storage (CTES)
- Bányagödörben történő tárolás
- Felszín alatti tartályokban történő tárolás



# Aquifer Thermal Energy Storage System



Tároló kőzet:

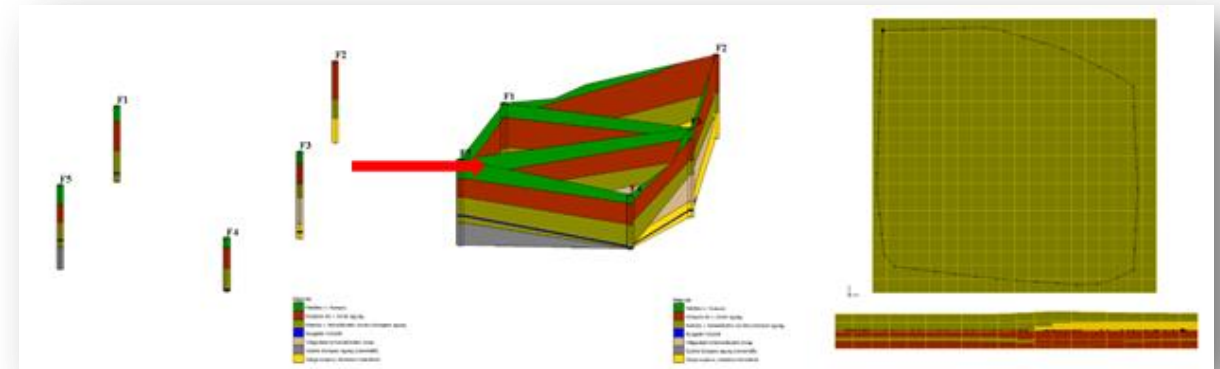
- Homok
- Kavics
- Homokkő
- Mészkö



# A szimulációkhoz alkalmazott GMS rendszerről általában

• A Groundwater Modeling System az egyik legátfogóbb szivárgás-hidraulikai modellezési rendszer. Olyan átfogó program csomag, mellyel a hidrodinamikai- és transzportmodellezés minden fázisa elvégezhető:

- területjellemzés,
- modellfelépítés,
- optimalizálás,
- utófeldolgozás, és
- megjelenítés.



• A GMS véges differencia és véges-elem 2D és 3D modellekkel is együttműködik:

- MODFLOW,
- MODAEM,
- SEAWAT**,
- UCODE,
- SEAM3D,
- és SEEP2D.
- PEST,
- MODPATH,
- **MT3DMS/RT3D**,
- FEMWATER,
- UTCHEM

# Elméleti modellezett területen végzett vizsgálatok

# Alkalmazott módszer

## Transzport egyenlet

$$a. \left(1 + \frac{\rho_b + K_d}{n}\right) \frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}[(D_m + \alpha v_a) \text{grad} C] - \text{div}(v_a C) + \frac{q_k C}{n}$$

## Hőtranszport egyenlet

$$b. \left(\frac{\rho_m c_m}{n \rho_w c_w}\right) \frac{\partial C}{\partial t} = \text{div} \left[ \left( \frac{\lambda_m}{n \rho_w c_w} + \alpha v_a \right) \text{grad} T \right] - \text{div}(v_a T) + \frac{q_h}{n \rho_w c_w}$$

Heat input parameter	Units	MT3DMS package
$K_d = \frac{C_s}{\rho_w c_w}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Chemical reaction
$D_m = \frac{\lambda_m}{n \rho_w c_w}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Dispersion
$a = a$	$[\text{m}]$	Dispersion
$q_k C = \frac{q_h}{\rho_w c_w}$	$[\text{K} \cdot \text{s}^{-1}]$	Sink and source mixing

Réteg	Vastagság [m]	Szivárgási tényező [m/s]	Fajlagos tárolási tényező [m <sup>-1</sup> ]	Fajlagos hozam[%]	Effektív porozitás[%]
ATES feletti réteg	300	1x10 <sup>-6</sup>	1.2x10 <sup>-3</sup>	22	20
ATES réteg	100	1x10 <sup>-4</sup>	5x10 <sup>-5</sup>	32	22
ATES alatti réteg	300	1x10 <sup>-7</sup>	1.4x10 <sup>-3</sup>	20	18

Modell paraméter	Érték
Egy kutas rendszer injektálási intenzitása	1500 [m <sup>3</sup> /d]
Többkutas rendszer injektálási intenzitása	500 [m <sup>3</sup> /d]
Termelés hozama	2000 [m <sup>3</sup> /d]
A porózus közeg effektív hővezetési tényezője ( $\lambda_b$ )	2.2 [W/m/K]
Víz térfogati hőteljesítménye ( $\rho_w C_w$ )	4.19 x10 <sup>6</sup> [J/(m <sup>3</sup> /C)]
Hőeloszlási tényező ( $K_d$ )	2.10x10 <sup>-4</sup> [m <sup>3</sup> /kg]
Termikus diffúzió ( $D_T$ )	1.64x10 <sup>-6</sup> [m <sup>2</sup> /s]
Longitudinális diszperzivitás ( $\alpha_L$ )	0.5 [m]
Horizontális transzverzális diszperzivitás ( $\alpha_{TH}$ )	0.05 [m]
Vertikális transzverzális diszperzivitás ( $\alpha_{TV}$ )	0.05 [m]
Kőzet száraz testsűrűsége ( $\rho_b$ )	2650.0 [kg/m <sup>3</sup> ]
Térfogati hőkapacitás ( $C$ )	880 [J/kg/K]

## Modell

## Mechanizmus

**ATES-T1W**

Egy kút dupla funkcióval. A kitermelés, és besajtolás fél évente váltja egymást.

**ATES-T2W-50m**

Két kút, melyek közül az egyik besajtol, a másik pedig termel, fél éves ciklusokban. A két kút távolsága 50 m.

**ATES-T2W-100m**

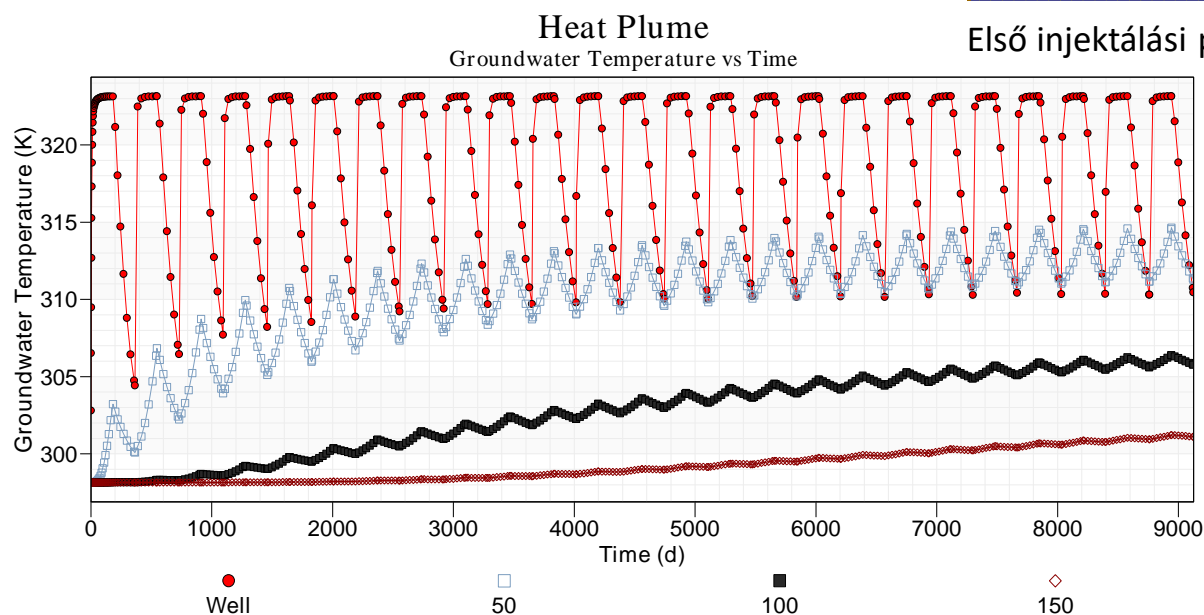
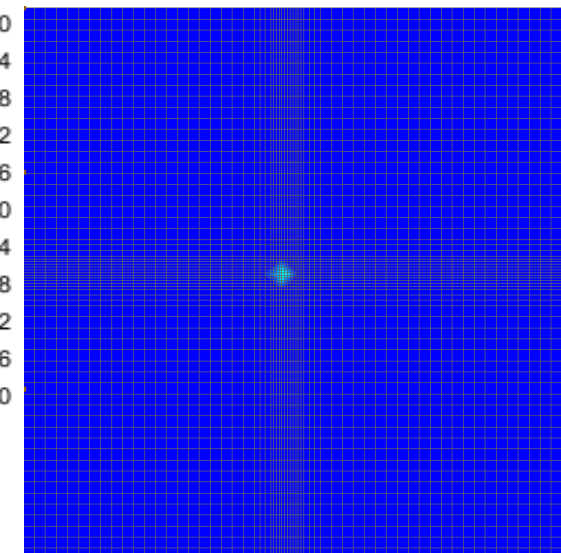
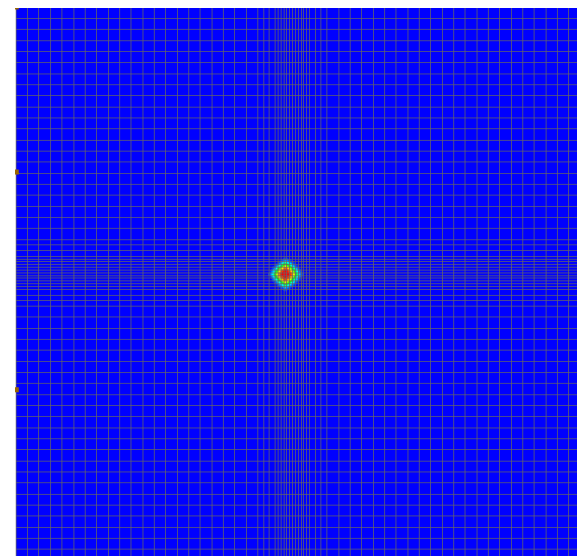
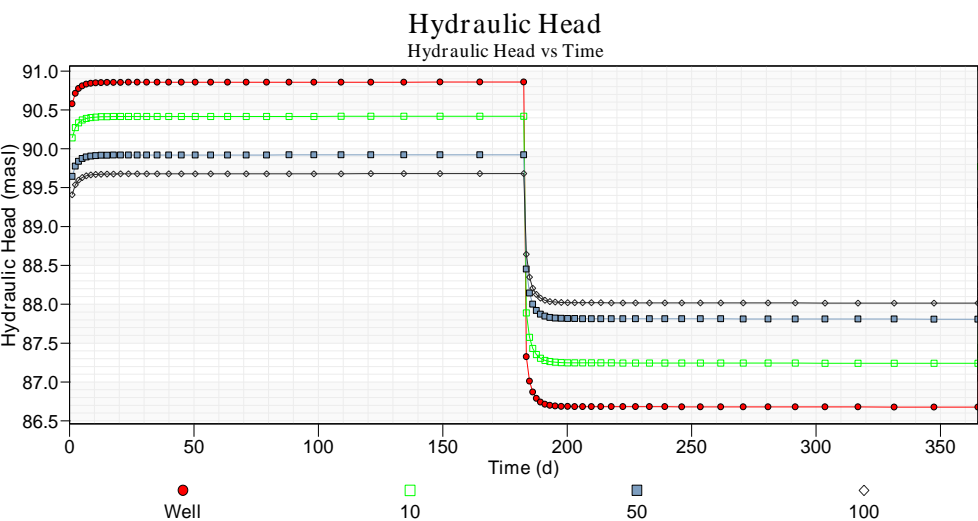
Két kút, melyek közül az egyik besajtol, a másik pedig termel, fél éves ciklusokban. A két kút távolsága 100 m.

**ATES-T5W-50m**

Többkutas rendszer, melynél négy kút végzi a folyamatos besajtolást, és a köztük lévő termelő kút végzi a termelést fél éves ciklusban.

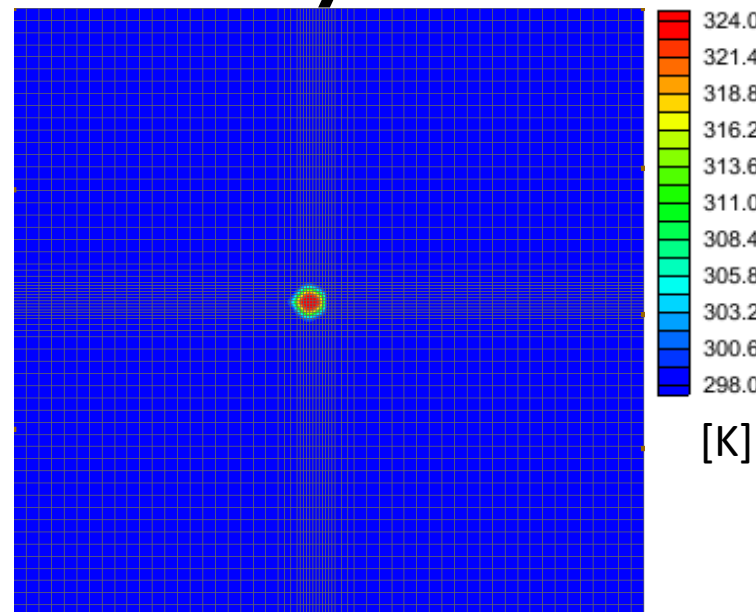
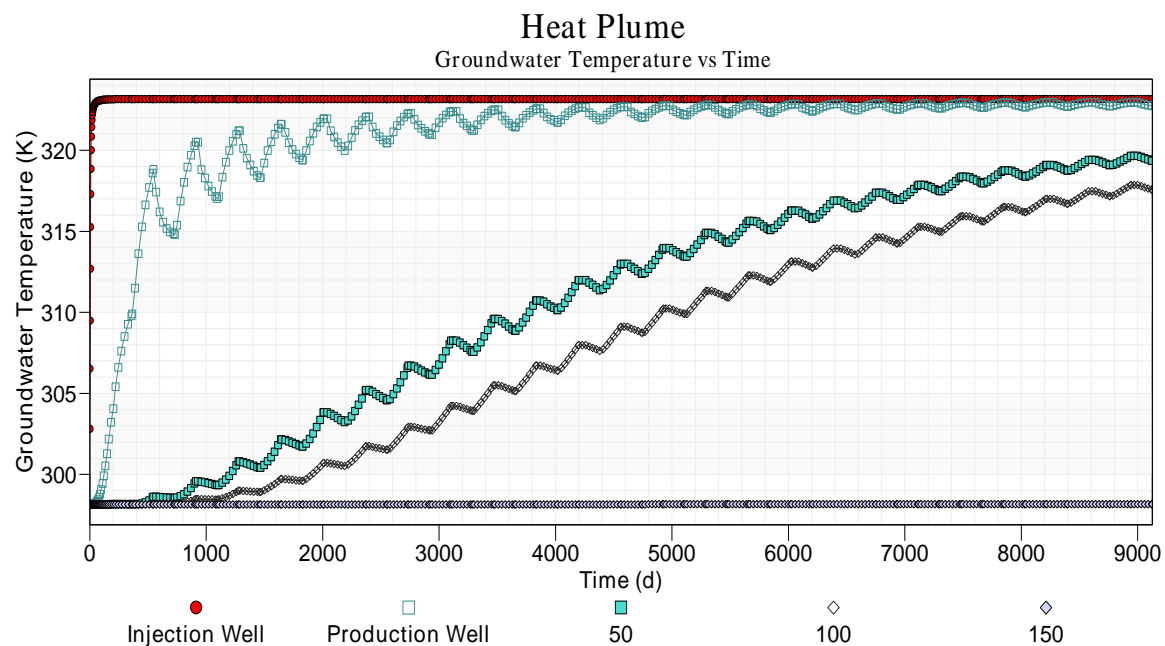


## ATES-T1W (egyutas rendszer)

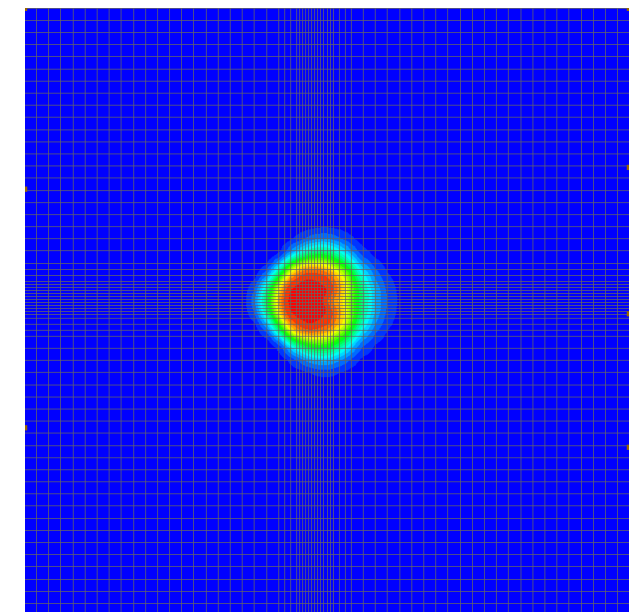


# Alap modellek vizsgálati eredményei

## ATES-T2W (Kétkutas rendszer)



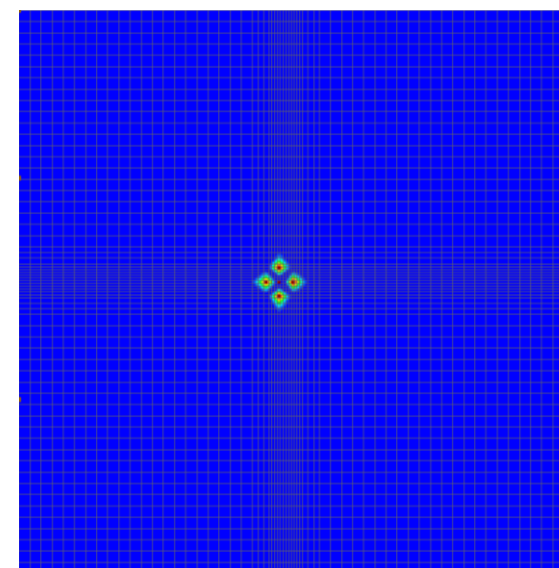
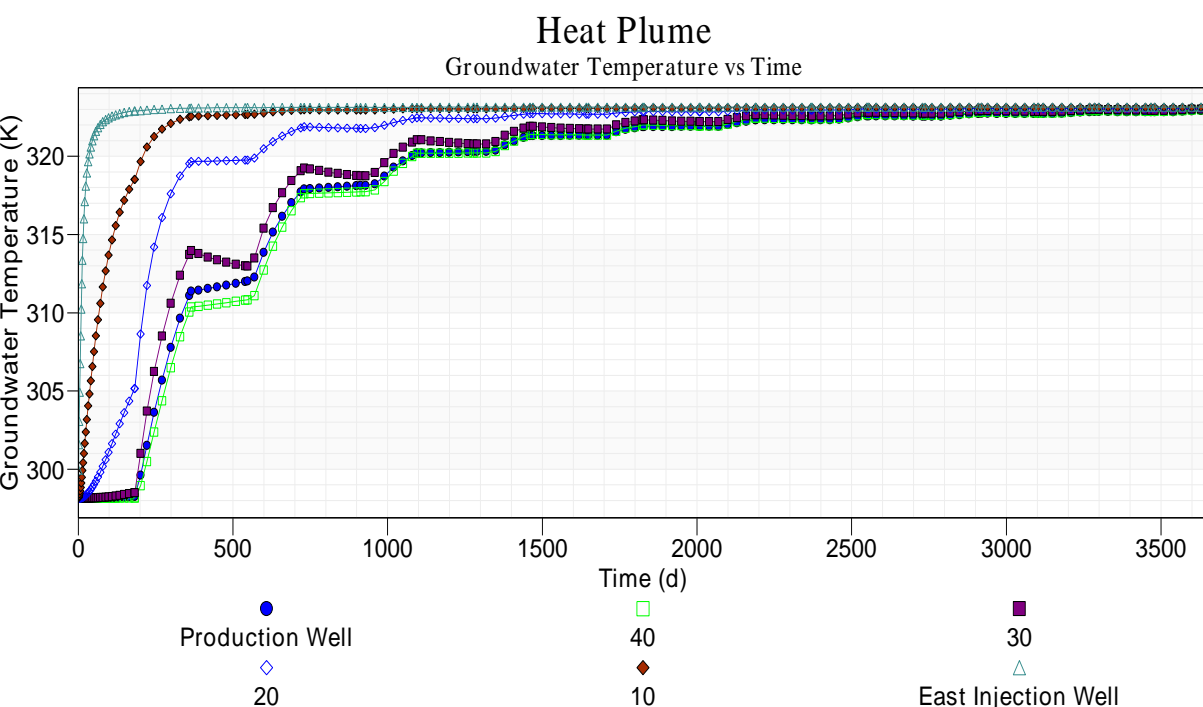
Első termelési periódus utolsó napja



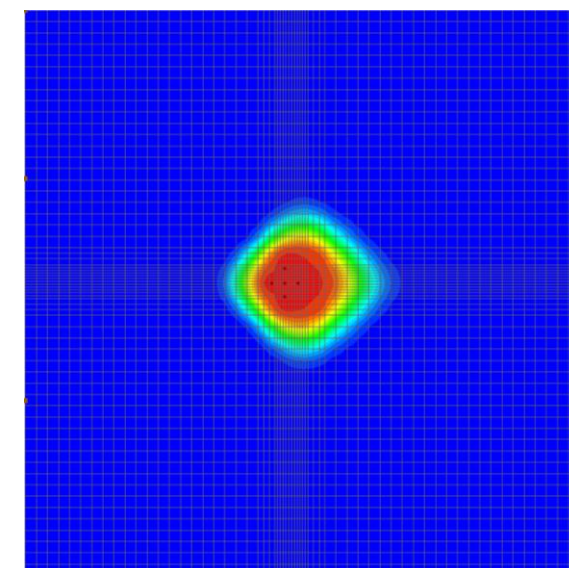
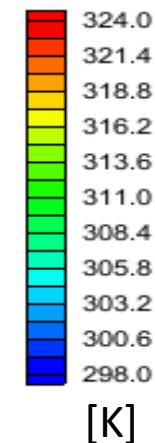
Utolsó termelési periódus utolsó napja

# Alap modellek vizsgálati eredményei

ATES-T5W 50m (Többkutas rendszer)



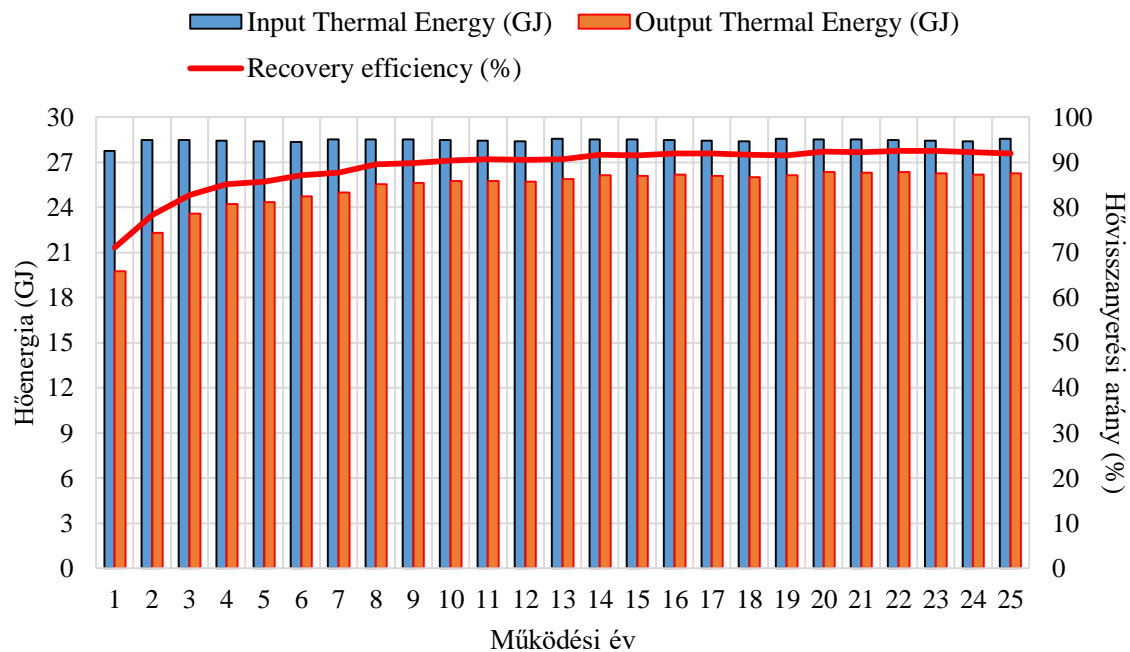
Első termelési periódus utolsó napja



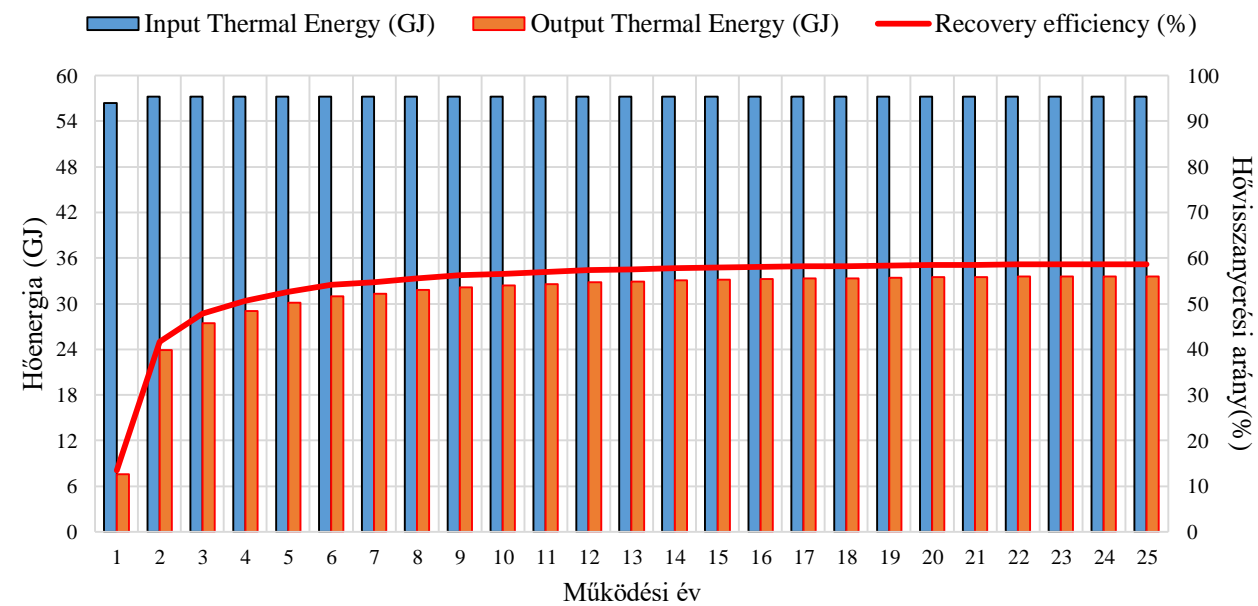
Utolsó termelési periódus utolsó napja



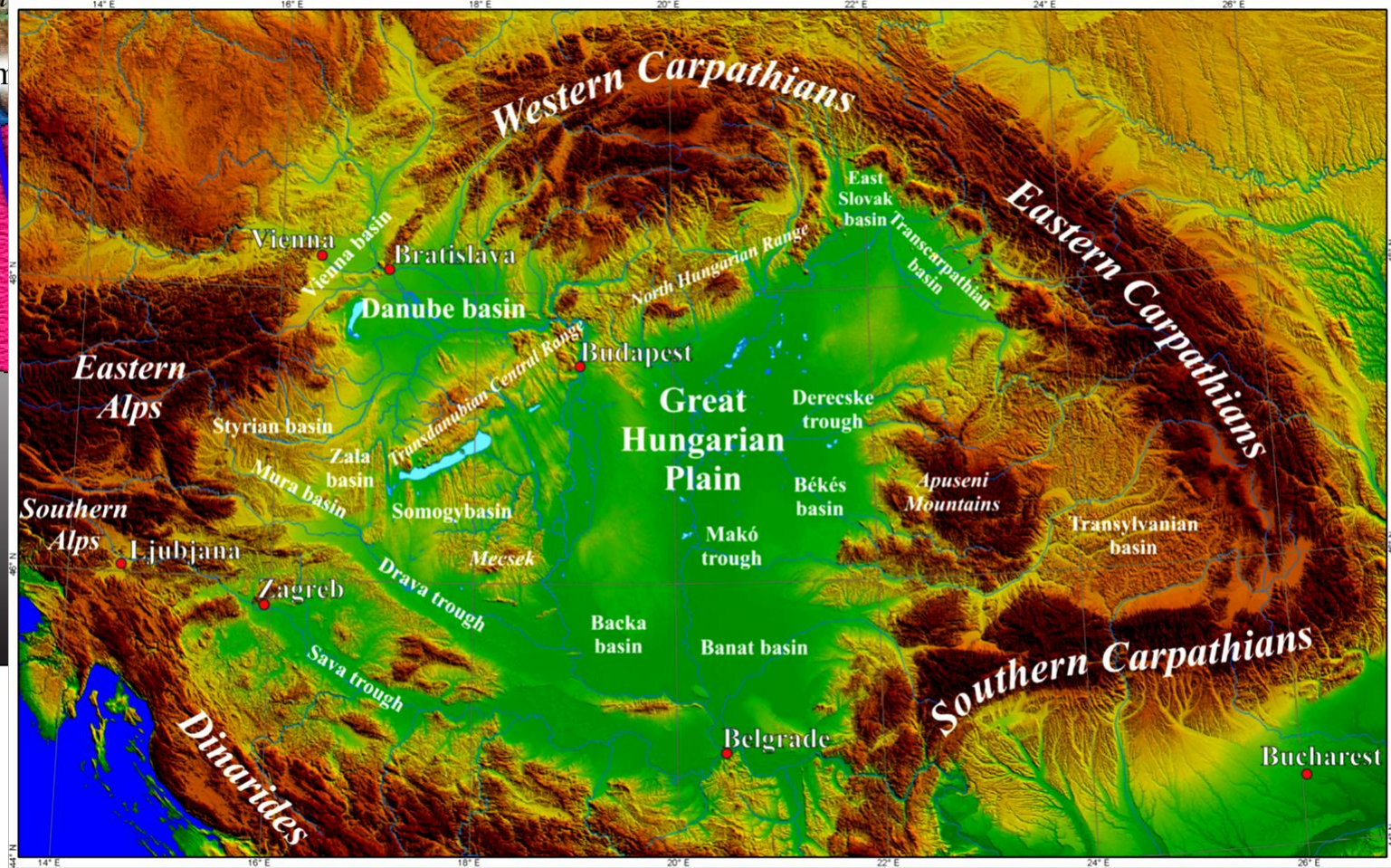
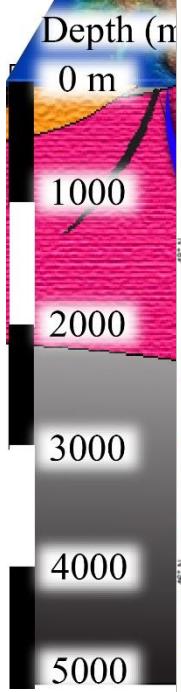
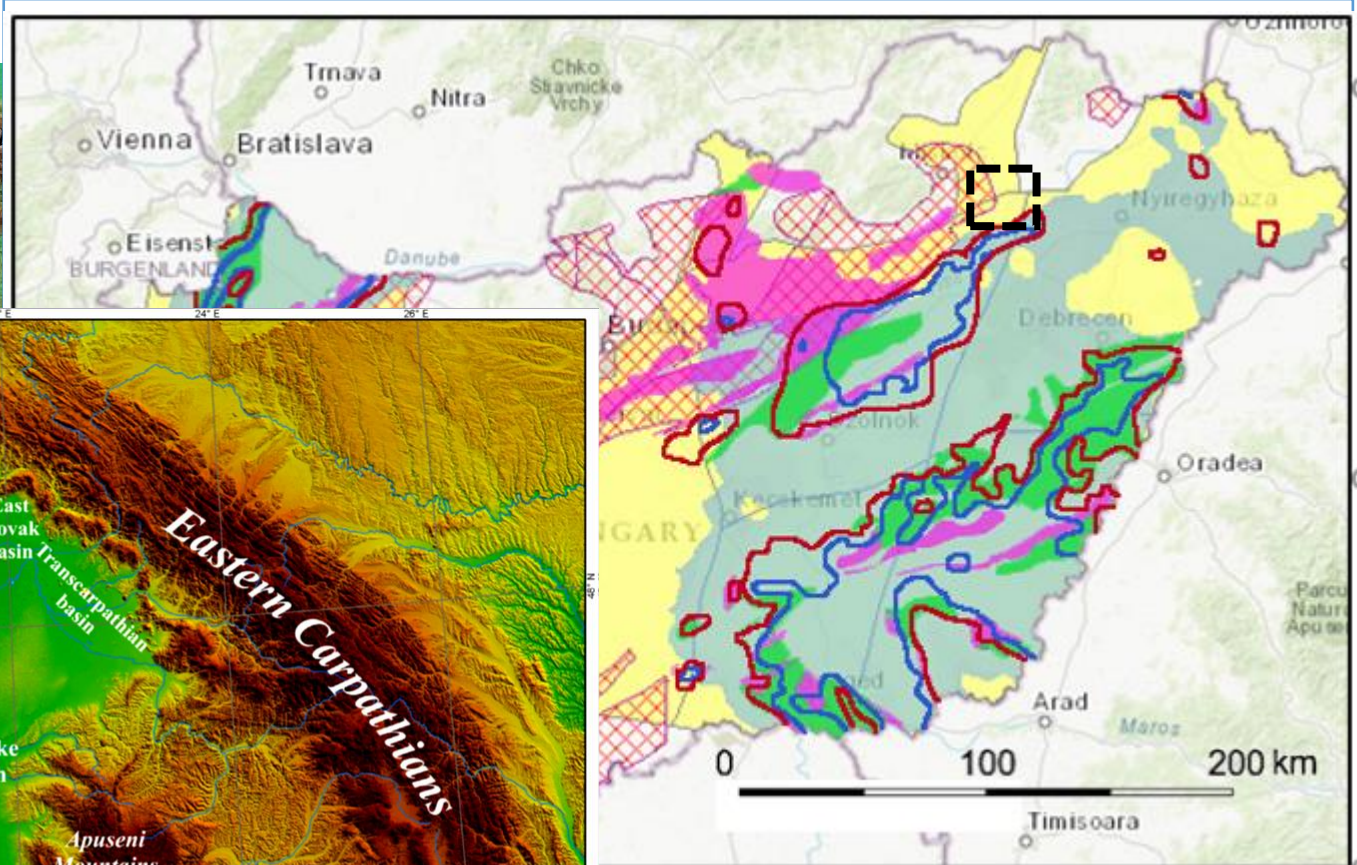
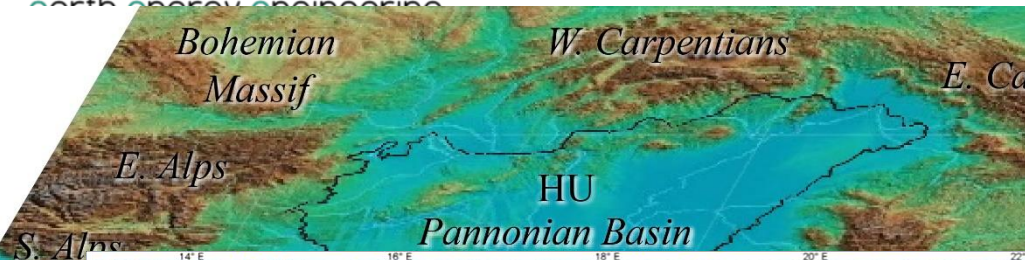
### ATES-T1W



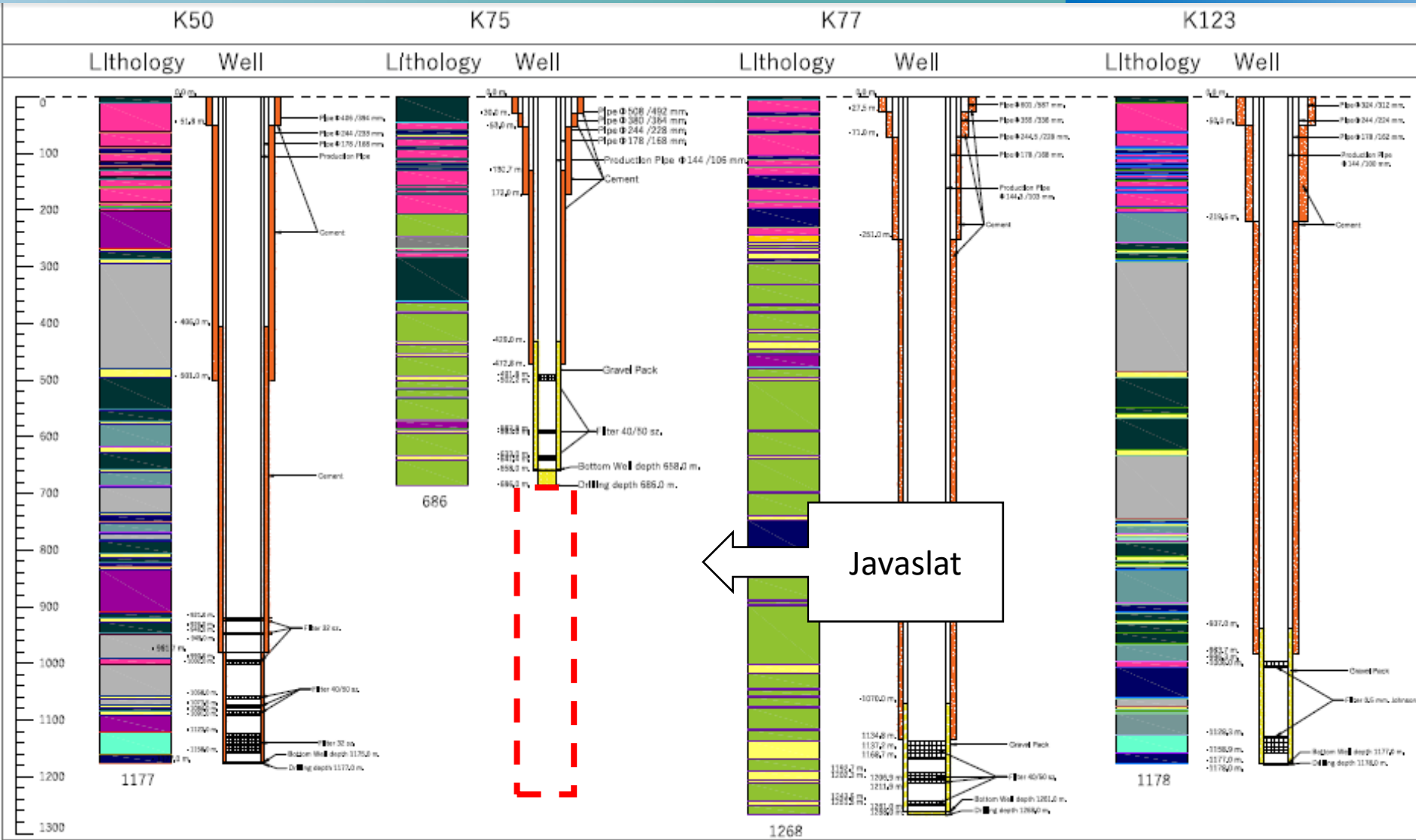
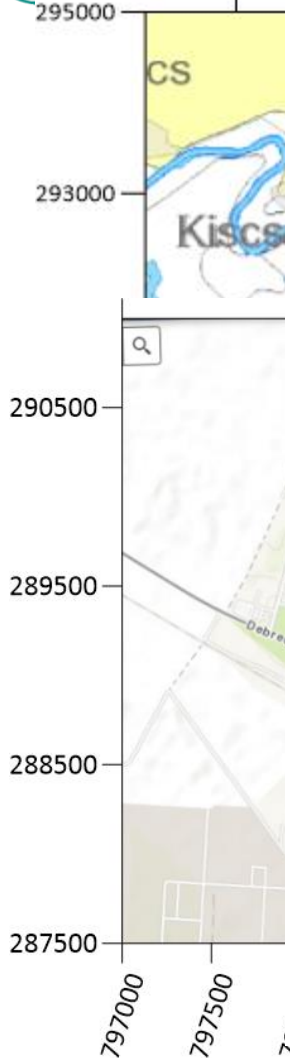
### ATES-T2W 50m



# Valós környezetben végzett modell vizsgálatok



- Carbonate, cracked reservoirs deeper than 2500 m
- The estimated temperature 120 °C
- The estimated temperature 150 °C
- Carbonate subsoil formation over 2500 m
- Deep igneous, metamorphic subsoil formation over 2500 m



K123	Unit
799844.97	
289677.27	
93.94	mBsl.
1,177.8	m.
69.88	Bsl.
1,170.6	m
65.61	°C
57.50	°C
7.7	
309.85	l/m <sup>3</sup>
125.8	l/m <sup>3</sup>

## Modelling of ATEs system

### 1) Groundwater flow modelling MODFLOW

Model parameter	Symbol	Value	Unit
Temperature of injecting constant hot water	-	333.15 K (60 °C)	
Effective thermal conductivity of the porous media	$\lambda_b$	2.7	W/m/K
Volumetric heat capacity of the water	$\rho_w C_w$	$4.19 \times 10^6$	J/(m <sup>3</sup> /C)
Thermal distribution coefficient	$K_d$	$2.10 \times 10^{-4}$	m <sup>3</sup> /kg
Thermal diffusivity	$D_T$	$1.64 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s
Longitudinal dispersivity	$\alpha_L$	0.5	m
Horizontal transverse dispersivity	$\alpha_{TH}$	0.05	m
Vertical transverse dispersivity	$\alpha_{TV}$	0.05	m
Dry bulk density	$\rho_b$	1961.0	kg/m <sup>3</sup>

Spe	Layer	Layer Material Description	Hydraulic properties			
			K (m/d)	Ss	Sy	Porosity
Rel	1	Top Soil, Silty clay, Clay, and layer of sand	$1.78 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-6}$	0.10	0.18
Soi	2	Pebbly coarse-sand	432	$1 \times 10^{-4}$	0.32	0.36
Ge	3	Clayey-Sandy Silt with interbed of Lignite	$1.78 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-5}$	0.18	0.20
	4*	Sand, sandstone	43.2	$1 \times 10^{-4}$	0.27	0.32
	5	Clay	$8.64 \times 10^{-10}$	$2.4 \times 10^{-4}$	0.20	0.20

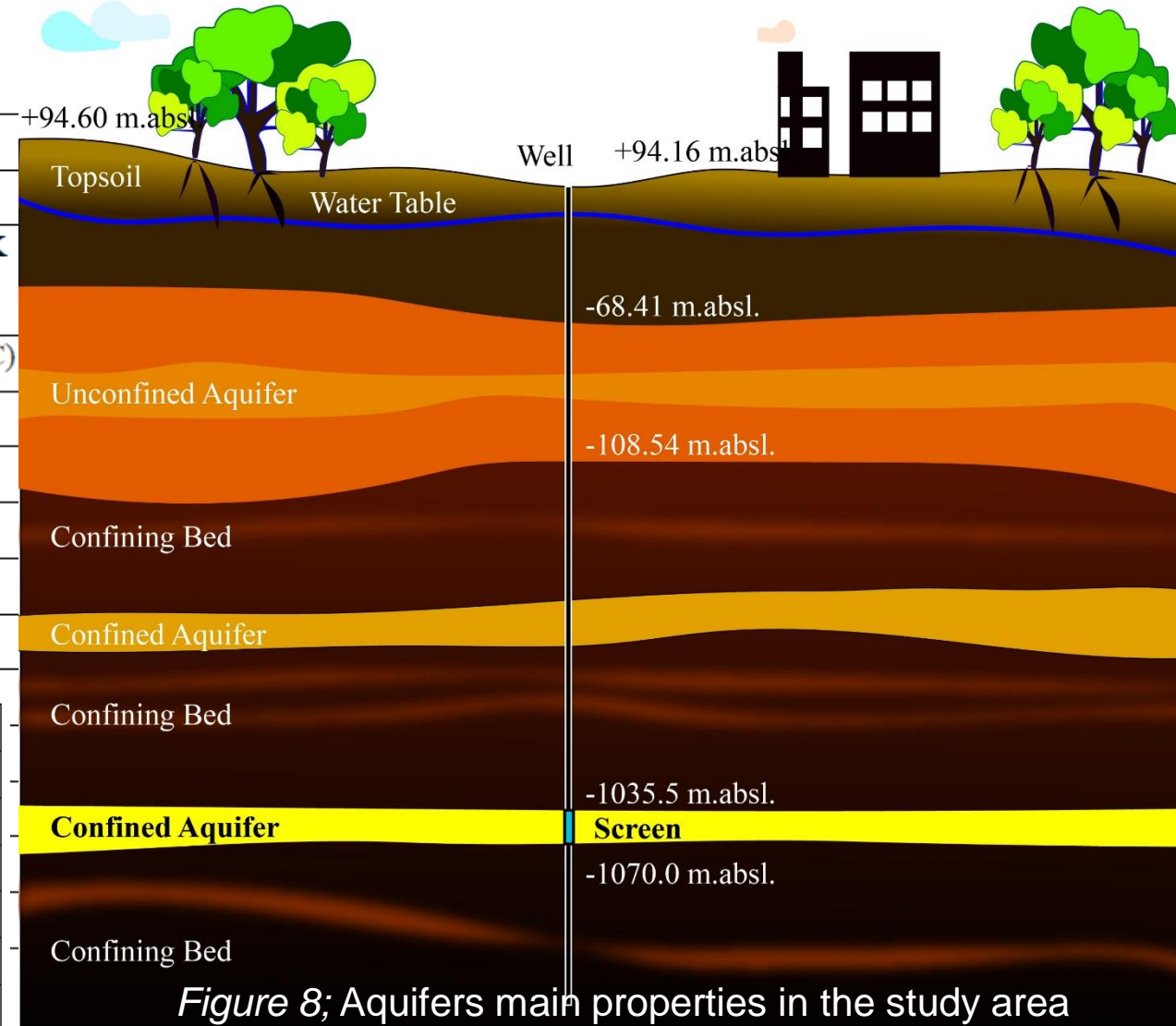


Figure 8; Aquifers main properties in the study area

# MATERIALS AND METHODS TO MODELLING

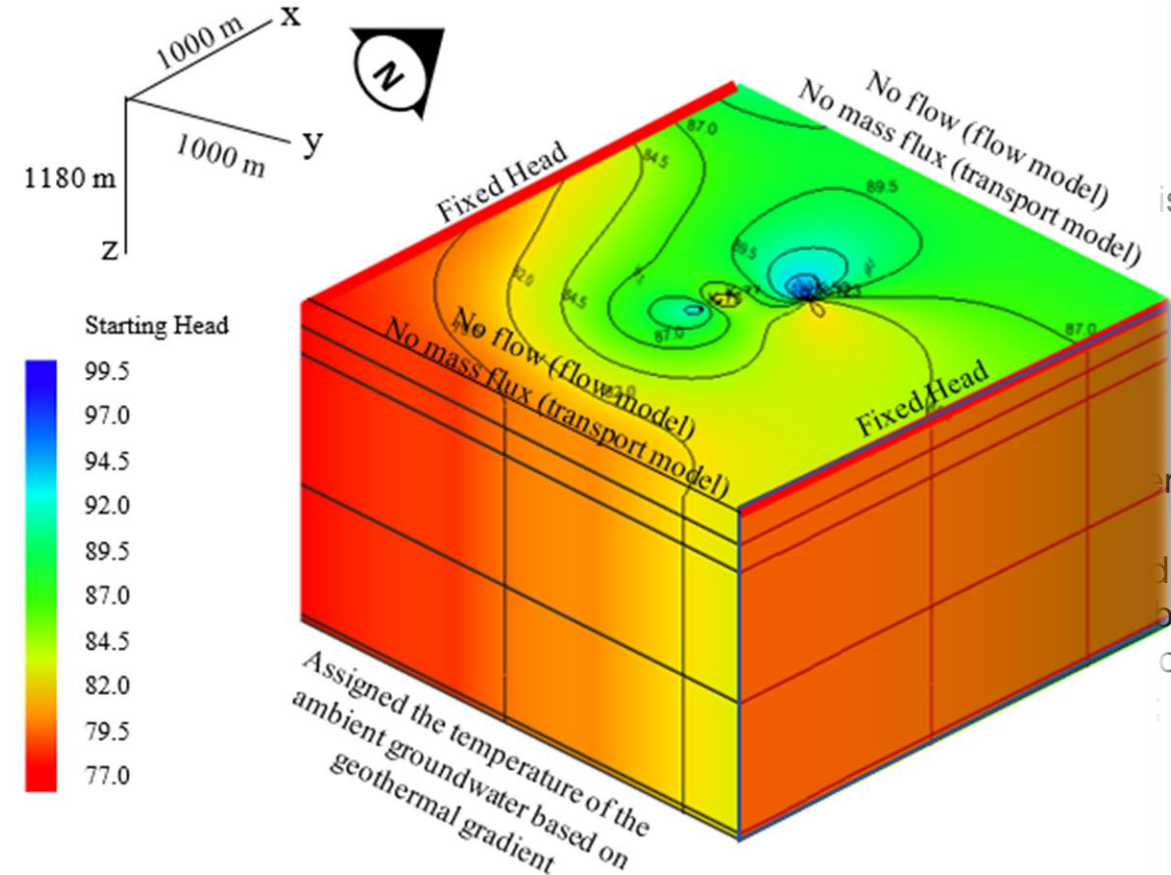
MODFLOW simulation in GMS is used for the groundwater flow model with model domain extension 2000 x 2000 m<sup>2</sup> with a 10 x 10 m<sup>2</sup> cell grids. And 5 horizontal layer with various thickness

The water table and elevation of stratigraphy of layers were interpolated by Kriging method.

The temperature of the model is changing with the depth respect to geothermal gradient 50°C per 1000 m

A flow model, northern and southern borders are assumed as no-flow boundaries.

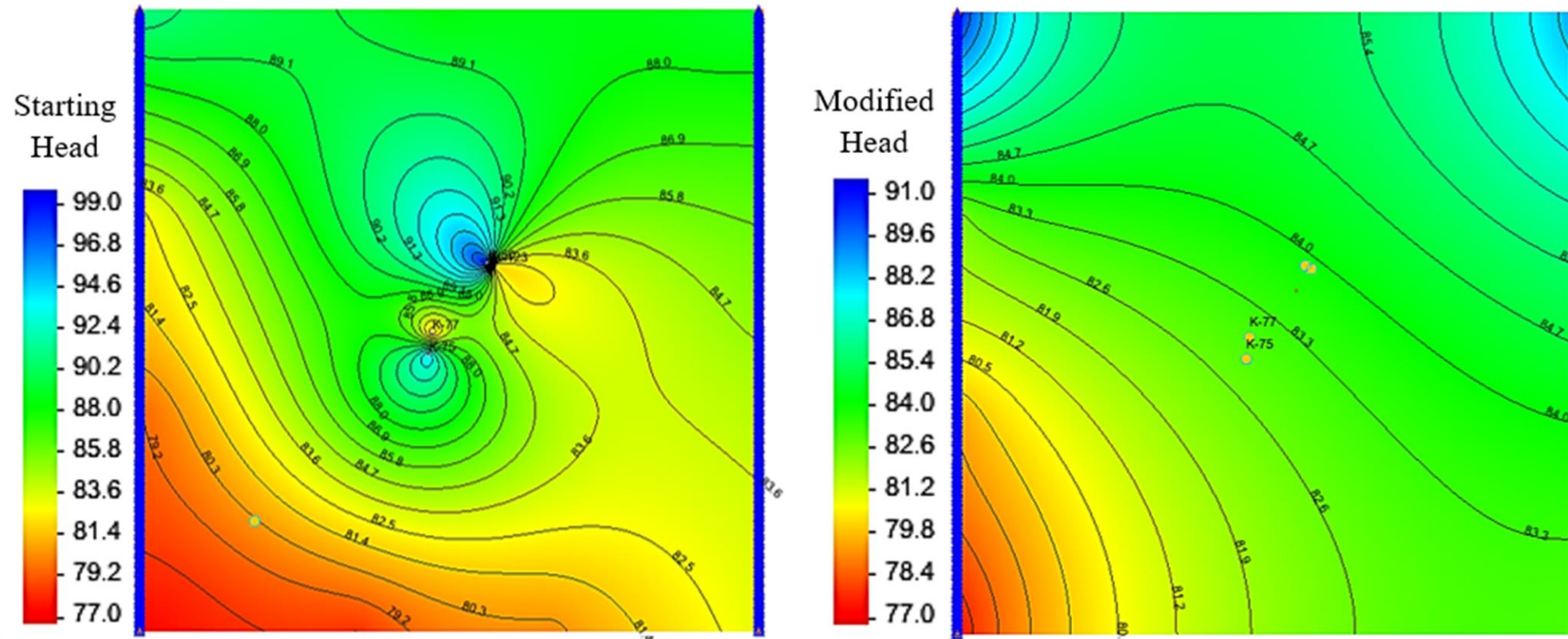
A transport model, the northern and southern boundaries of the domain are no mass flux



The model grid showing the initial boundary conditions assigned to the model

- A unique well with double function

# MATERIALS AND METHODS TO MODELLING

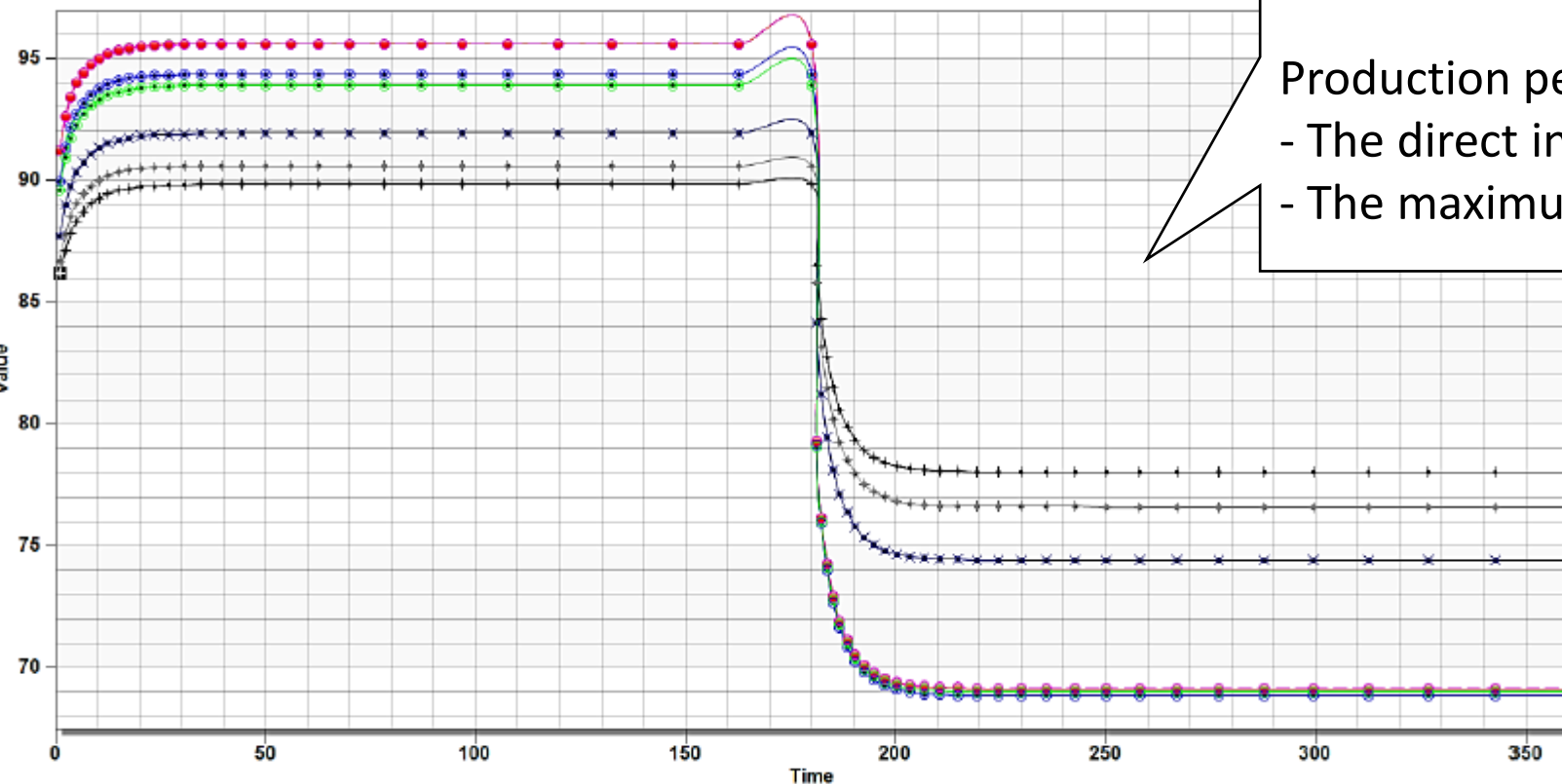


The starting hydraulic head are interpolated from four water well reports, and the modified hydraulic head

# 1) Egy kutas rendszer (kettős funkciójú kút), 6 hónap injektálási időszak és 6 hónap termelési időszak váltakozása

Observed hydraulic head vs Time

• K-50      ◊ K-123      ◊ K-77      ◊ K-75  
 × 50 m      + 100 m      + 150 m



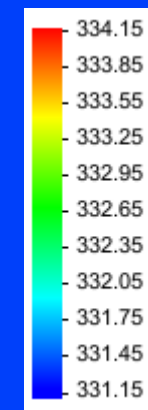
## Injection period

- The direct influence radius around 400 m
- The maximum difference hydraulic head 11.35 m

## Production period

- The direct influence radius around 450 m
- The maximum difference hydraulic head 15.13 m

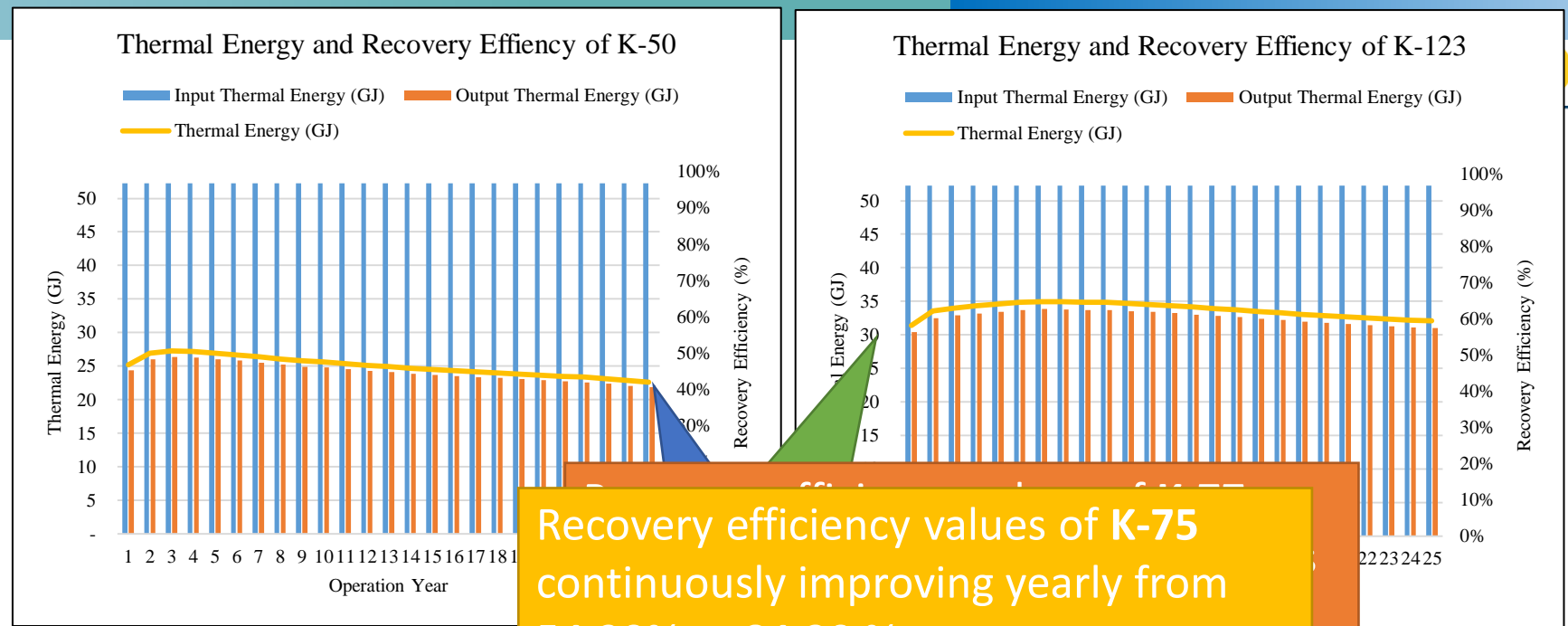
## Temperature





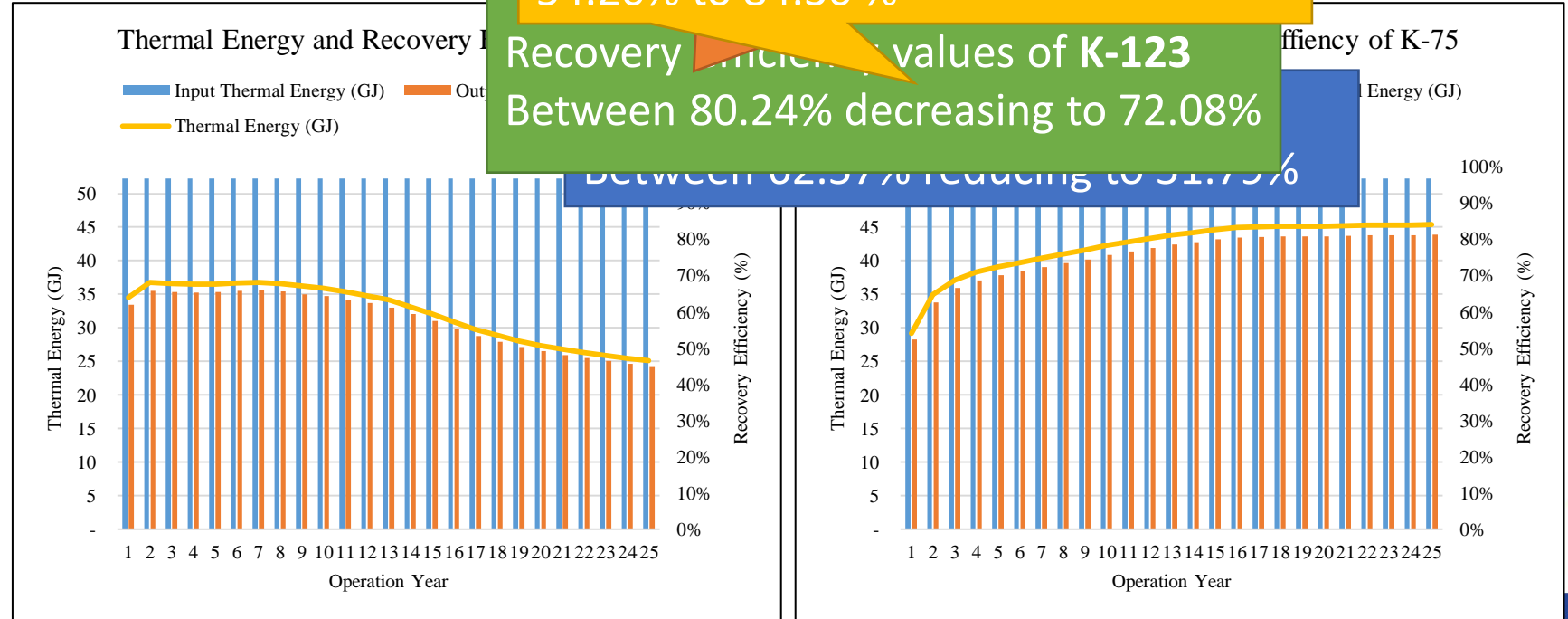
# RESULT

**Figure:** Input and output thermal energy and its recovery efficiency annually in ATEs system for 25 years of the 1<sup>st</sup> scenario



Recovery efficiency values of K-75 continuously improving yearly from 54.20% to 84.30 %

Recovery efficiency values of K-123 Between 80.24% decreasing to 72.08%



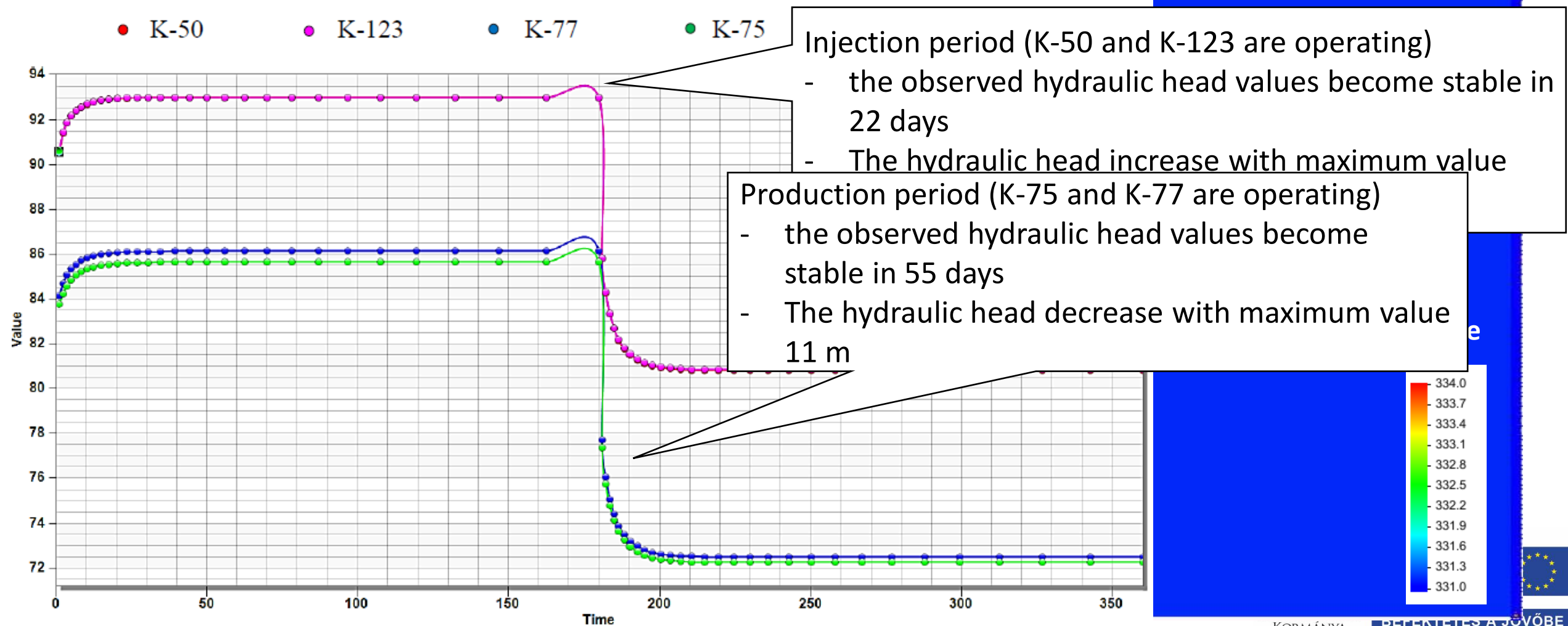
The heat transport has a strong influence by a thermal loss due to the different temperatures of the ambient groundwater flow in the ATEs system.

- The heat transport velocity is 43.93 m/day
- The effective thermal dispersion is  $5.79 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

## 2) Két kutas rendszer, ahol K-50 és a K-123 injektáló kút, 6 hónapos időszakra, a K-75 és K-77 pedig évente 6 hónapia működő termelő kuttak

Observed Hydraulic Head vs Time

Temperature vs Time

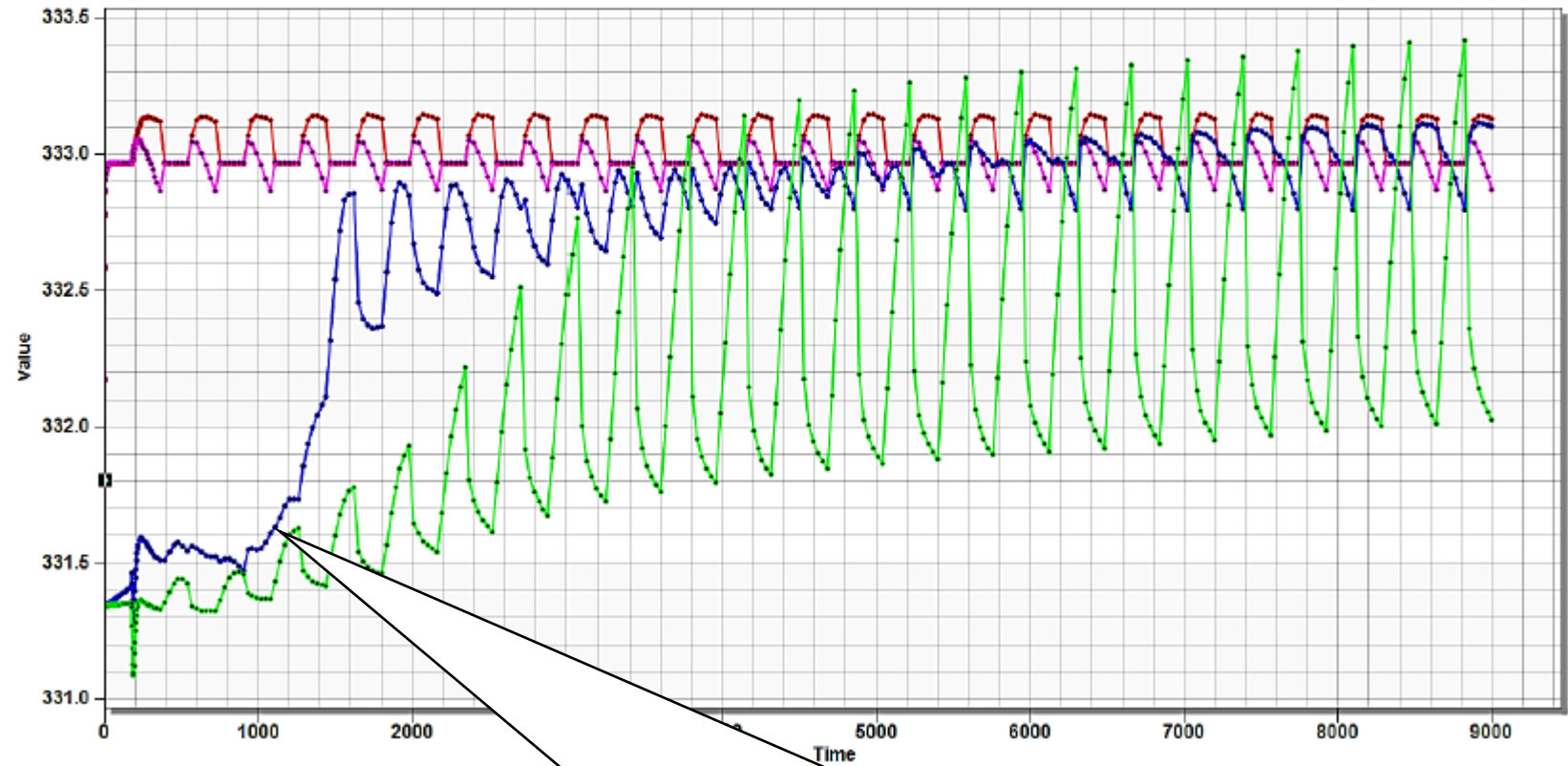


## Observed Temperature vs Time

# RESULT

● K-50    ● K-123    ● K-77    ● K-75

**Figure;** Timeline of observed temperature variability at the four wells in ATES system for 25 years of the 2<sup>nd</sup> scenario



At K-77 receives mitigating warm water after 1000 days

# Összefoglalás, projekt utáni feladatok

A vizsgálatok fő célja az volt, hogy nagy mennyiségű hulladékhővel rendelkező ipari létesítmények számára alternatívát tudjunk felállítani az ilyen típusú hőtárolással

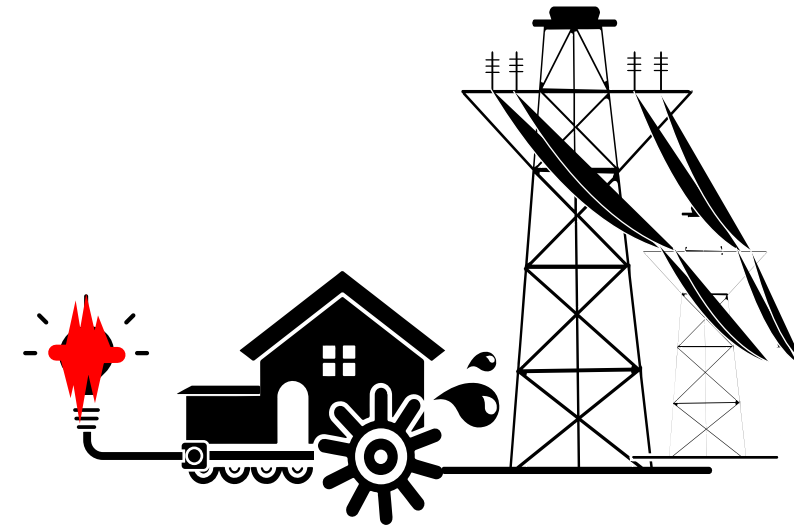
A hőtranszport modellezés scenárió vizsgálatai segítettek meghatározni azt a három paramétert, ami az ATES rendszerek termikus viselkedését leginkább meghatározza



1. Az injektáló és a termelő kutak helye és távolsága
2. A melegvíz hozama és hőmérséklete
3. A hidraulikus és termikus paraméterek

## Jövőbeli célok

- Paraméter érzékenységi vizsgálatok
- Pontosabb energiamegtérülési számítások
- Pilot teszt



## Felhasznált irodalom

- **Dillon, P. J., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., & Ward, J. (2009):** Managed aquifer recharge. An introduction waterlines report series, (13), 86 p.
- **NRMMC, EPHC, NHMRC (2009):** Australian Guidelines for water recycling, managing health and environmental risks, vol 2C: managed aquifer recharge. Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council National Health and Medical Research Council, 237 p.
- **Stefan, C., Ansems, N. (2017):** Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. Sustainable Water Resources Management, 4(2), pp. 153-162. Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F., Hannappel, S. (2017): Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. Hydrogeology Journal, 25(6), pp. 1909- 1922.
- **Christian Orlando Camacho López (2019):** Assessment of heat storage capability in Tiszaújváros using 3D heat transport modelling. Diploma thesis, University of Miskolc
- **Udomporn Tupbucha (2021):** 3D Numerical modelling and experimental simulations on thermal behavior of aquifer thermal energy storage in Tiszaújváros. Diploma thesis, University of Miskolc

**Köszönöm a figyelmet!**

